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

**Kelly Ribeiro de Souza Souto**

# APROVEITAMENTO DE LODO DE ESGOTO E CONCHA DE LILIU (*Anomalocardia brasiliana*) EM ARGAMASSA

**Natal**
**2016**

Kelly Ribeiro de Souza Souto

# APROVEITAMENTO DE LODO DE ESGOTO E CONCHA DE LILIU (*Anomalocardia brasiliana*) EM ARGAMASSA

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

Orientador: Prof. Dr. André Luis Calado Araújo

Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

Natal

2016

Catalogação da Publicação na Fonte.
Biblioteca Central Zila Mamede. Setor de Informação e Referência

Souto, Kelly Ribeiro de Souza.
Aproveitamento de lodo de esgoto e Concha de Liliu (Anomalocardia brasiliana) em argamassa / Kelly Ribeiro de Souza Souto. - Natal, 2016.
76 f. : il.

Orientador: André Luis Calado Araújo.
Coorientador: Marcos Alyssandro Soares dos Anjos.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária.

1. Uso de Resíduos. 2. Argamassa. 3. Viabilidade Técnica. 4. Lodo de Esgoto. 5. Pó de Conchas. I. Araújo, André Luis Calado. II. Anjos, Marcos Alyssandro Soares dos. III. Título.

RN/UF/BCZM CDU 628.3

KELLY RIBEIRO DE SOUZA SOUTO

# APROVEITAMENTO DE LODO DE ESGOTO E CONCHA DE LILIU (*Anomalocardia brasiliana*) EM ARGAMASSA

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

**BANCA EXAMINADORA**

Dr. André Luis Calado Araújo – Orientador

Dr. Cícero Onofre de Andrade Neto – Examinador UFRN

Dr. Edilberto Vitorino de Borja – Examinador Externo IFRN

Natal, 18 de março de 2016

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder força e sabedoria.

Aos meus pais, Keila e Júnior, por tudo que fizeram por mim.

Aos meus irmãos, Lívia e Kauã, por existirem na minha vida.

Ao meu marido Ramon, por todo o amor.

Ao professor André, por toda paciência, calma, incentivo, compreensão, disponibilidade e ensinamentos desde o primeiro contato na pós-graduação.

Ao professor Marcos e ao professor Cícero, pelas contribuições para a minha dissertação.

Ao professor Edilberto, pela disponibilidade e pelas contribuições.

Ao bolsista Jandson, por realizar comigo todos os ensaios de caracterização dos resíduos e fabricação das argamassas.

À Yasmin, por ajudar nos ensaios enquanto foi possível.

À Evilane, por toda disponibilidade e dúvidas tiradas.

A Jonas, pelos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão.

A Romário, pela britagem e moagem das conchas.

À Tassyla do SENAI/RN, pelo ensaio de resistência de aderência à tração.

À Carla, pelos ensaios de MEV e de FRX.

À minha amiga Selma, pela edição das imagens.

A Felipe Ferreira e toda a CAERN, por todas as informações passadas e pelas autorizações para as coletas na ETE do Baldo.

A todos os amigos, familiares e professores que de alguma forma me ajudaram.

**SUMÁRIO**

LISTA DE FIGURAS ..... viii
LISTA DE TABELAS ..... x
RESUMO ..... xi
ABSTRACT ..... xii
1 INTRODUÇÃO ..... 1
2 MATERIAL E MÉTODOS ..... 7
2.1 ÁREA DE ESTUDO ..... 8
2.1.1 Lodo de Esgoto ..... 8
2.1.2 Conchas do Liliu ..... 10
2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ..... 10
2.2.1 Teor de Umidade, Inchamento e Teor de Matéria Orgânica ..... 11
2.2.2 Granulometria por Peneiramento e a Laser ..... 12
2.2.3 Massa Específica e Unitária ..... 15
2.2.4 Material Fino que Passa Através da Peneira 75 µm, por Lavagem ..... 15
2.2.5 FRX, DRX e MEV com EDS ..... 16
2.2.6 Determinação de Atividade Pozolânica ..... 17
2.2.7 Presença de Organismos Patogênicos ..... 17
2.2.8 Classificação do Resíduo ..... 18
2.3 ENSAIOS DAS ARGAMASSAS FABRICADAS ..... 18
2.3.1 Argamassa no Estado Fresco ..... 19
2.3.2 Argamassa no Estado Endurecido ..... 21
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES ..... 26
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO ..... 26
3.1.1 Teor de Umidade e de Matéria Orgânica ..... 26
3.1.2 Granulometria por Peneiramento e a Laser ..... 26
3.1.3 Massa Específica e Unitária ..... 28
3.1.4 FRX, DRX e MEV com EDS ..... 28

3.1.5 Classificação do Resíduo .....32
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DAS CONCHAS .....32
3.2.1 Granulometria a Laser .....32
3.2.2 Massa Específica e Unitária .....33
3.2.3 FRX, DRX e MEV com EDS .....33
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO .....37
3.3.1 Teor de Umidade e Inchamento .....37
3.3.2 Granulometria por Peneiramento.....37
3.3.3 Massa Específica e Unitária .....38
3.4 ENSAIOS DAS ARGAMASSAS FABRICADAS – LODO DE ESGOTO.....38
3.4.1 Argamassa no Estado Fresco.....38
3.4.2 Argamassa no Estado Endurecido.....39
3.5 ENSAIOS DAS ARGAMASSAS FABRICADAS – PÓ DAS CONCHAS DE LILIU .....41
3.5.1 Argamassa no Estado Fresco.....41
3.5.2 Argamassa no Estado Endurecido.....42
4. CONCLUSÕES .....47
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....49
ANEXOS .....54

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da 1ª etapa da pesquisa ..... 7
Figura 2 – Fluxograma da 2ª etapa da pesquisa ..... 7
Figura 3 - Fluxograma da 3ª etapa da pesquisa ..... 8
Figura 4 – Vista geral da ETE do Baldo – Natal, RN ..... 9
Figura 5 – Vista do lodo descartado em contêineres ..... 9
Figura 6 – Vista do descarte das conchas do Liliu na Lagoa Guaraíras, RN ..... 10
Figura 7 – Vista da coleta do lodo ..... 10
Figura 8 – Aspecto visual do lodo úmido (a), em estufa (b), seco (c) e incinerado (d) ..... 12
Figura 9 - Vista do moinho de bolas (a) e aspecto do lodo seco após a moagem (b) ..... 12
Figura 10 – Vista das Conchas do Liliu ..... 14
Figura 11 – Vista do pó das conchas do Liliu caracterizado ..... 14
Figura 12 – Vista da pasta formada durante o ensaio que impediu a quantificação do material fino ..... 16
Figura 13 – Vista do molde preenchido e rasado para determinação da consistência ..... 20
Figura 14 - Ensaio de retenção de água (a) conjunto com bomba (b) funil/papel-filtro úmido (c) adensamento com 37 golpes e (d) rasamento e sucção por 15 min ..... 21
Figura 15 – Moldagem dos corpos-de-prova prismáticos (a), ruptura por tração na flexão (b) corpo-de-prova comprimido ..... 22
Figura 16 – Moldagem dos corpos-de-prova prismáticos (a), ruptura por tração na flexão (b) e argamassa sendo comprimida (c) ..... 23
Figura 17 – Vista da execução do chapisco (a) e da execução do emboço (b) ..... 23
Figura 18 - Ensaio de resistência de aderência à tração (a) corte da argamassa e colagem das pastilhas (b) equipamento de tração acoplado na pastilha e (c) medida do diâmetro do corpo-de-prova ..... 24
Figura 19 – Vista dos corpos-de-prova da argamassa com lodo (a) e da argamassa com pó de concha (b) em contato com 5 mm de água no recipiente ..... 24
Figura 20 – Vista da obtenção da largura (a), altura (b) e massa do corpo-de-prova (c) ..... 25
Figura 21 - Curva granulométrica do lodo* ..... 27

Figura 22 - Morfologia dos lodos (a) 01 com 200x (b) 01 com 500x (c) 02 com 1000x (d) 02 com 2000x (e) 03 com 5000x e (f) 03 com 7000x.....30
Figura 23 - Área da amostra que foi feito o EDS.....31
Figura 24 - Ponto da amostra que foi feito o EDS.....31
Figura 25 - Curva granulométrica do pó das conchas (média de 3 resultados) .....33
Figura 26 – Cristais encontrados na análise mineralógica do pó das conchas.....34
Figura 27 – Morfologia do pó das conchas (a) 200x (b) 400x (c) 1000x (d) 2000x (e) 3000x e (f) 5000x .....35
Figura 28 - Área da amostra que foi feito o EDS.....36
Figura 29 - Ponto da amostra que foi feito o EDS.....36
Figura 30 - Curva granulométrica da areia*.....37
Figura 31 - Resistências das argamassas em MPa aos 28 dias.....40
Figura 32 - Resistências das argamassas em MPa aos 28 dias.....43
Figura 33 - Aumento da resistência à compressão em relação ao tempo.....44
Figura 34 - Aumento da resistência à tração na flexão em relação ao tempo.....44
Figura 35 – Corpos de prova após ensaio de absorção de água por capilaridade....45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Massa específica e massa unitária do lodo.....28
Tabela 2 - Composição química do lodo*.....29
Tabela 3 – Elementos da área analisada.....31
Tabela 4 - Elementos do ponto analisado.....31
Tabela 5 - Massa específica e massa unitária do pó das conchas.....33
Tabela 6 - Composição química do pó das conchas.....34
Tabela 7 – Elementos da área analisada.....36
Tabela 8 – Elementos do ponto analisado.....36
Tabela 9 - Massa específica e massa unitária da areia.....38
Tabela 10 - Resultados das argamassas no estado fresco.....39
Tabela 11 - Resistências das argamassas com lodo aos 92 dias.....40
Tabela 12 - Capilaridade e Densidade de massa aos 28 dias.....41
Tabela 13 - Classificação das argamassas.....41
Tabela 14 - Resultados das argamassas no estado fresco.....42
Tabela 15 - Resistências das argamassas aos 7 e aos 91 dias.....43
Tabela 16 - Capilaridade e Densidade de massa aos 28 dias.....45
Tabela 17 - Classificação das argamassas.....46

## RESUMO

O lodo de esgoto é o subproduto gerado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) e as conchas de Liliu são os subprodutos sólidos gerados na pesca desse molusco na Lagoa Guaraíras, RN. Devido à importância do manejo dos resíduos para a manutenção da qualidade do meio ambiente, surge a possibilidade de utilizar esses materiais como componente na matéria-prima de argamassa. Assim, o objetivo deste trabalho foi analisar a viabilidade técnica da incorporação de resíduos em pó (lodo de esgoto e conchas de Liliu) em argamassa. Foi utilizado o lodo predominantemente doméstico, proveniente da ETE do Baldo – Natal, RN e as conchas de Liliu proveniente dos municípios de Arês, RN e Senador Georgino Avelino, RN. Na primeira etapa os resíduos foram moídos e caracterizados através de análises físicas, química, mineralógica e morfológica. Na segunda etapa estes resíduos foram aplicados à diferentes argamassas, sendo comparadas à argamassa de cimento, cal e areia (1:1:7) e à argamassa de cimento e areia (1:7) e então foram avaliadas e comparadas no estado fresco (consistência, teor de ar incorporado, densidade de massa e retenção de água) e no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração na flexão, capilaridade, densidade de massa e resistência de aderência à tração). Diante das avaliações, constatou-se que o experimento com lodo de esgoto, nas proporções utilizadas e sem a remoção da matéria orgânica, não obteve resultados satisfatórios, devido este material diminuir drasticamente a resistência e reagir com os outros componentes da argamassa, liberando um odor muito forte e desagradável, tornando a fabricação da argamassa uma atividade desaconselhável. Noutro sentido, constatou-se que há viabilidade técnica e prática em utilizar o pó das conchas, devido a este material aumentar a resistência e melhorar outras propriedades da argamassa.



**PALAVRAS-CHAVE:** Uso de Resíduos. Argamassa. Viabilidade Técnica. Lodo de Esgoto. Pó de Conchas.

## ABSTRACT

Sewage sludge is the by-product generated in the Sewage Treatment Plants (STP) and Liliu shells are solid by-products generated in fishing this mollusk in Lagoon Guaraíras, RN. Given the importance of waste management to maintain the quality of the environment, there is the possibility of using these materials as a component in the raw material mortar. The objective of this study was to analyze the technical feasibility of incorporating powdered waste (sewage sludge and Liliu shells) mortar. It was used predominantly domestic sludge from the STP Baldo – Natal, RN and Liliu of shells from the municipalities of Arês, RN and Senador Georgino Avelino, RN. In the first step the residues were ground and characterized by physical, chemical, mineralogical and morphological analysis. In the second step these residues were applied to the different mortars and compared to the cement mortar, lime and sand (1:1:7) and the cement mortar and sand (1:7) and were then evaluated and compared in the fresh state (consistency, entrained air content, mass density and water retention), and in the hardened state (compressive strength, tensile strength in bending, capillarity, mass density, tensile bond strength). Given the reviews, it was found that the experiment with sewage sludge, in the proportions used and without the removal of organic matter, has not achieved satisfactory results, because this material dramatically reduce strength and react with the other components of the mortar, releasing a very strong and unpleasant odor, making the manufacture of mortar one inadvisable activity. In another sense, it was found that there are technical and practical feasibility of using the powder of the shells, due to this material increase strength and improve other properties of the mortar.



**KEYWORDS:** Use of Waste. Mortar. Technical Viability. Sewage Sludge. Shells Powder.

## 1 INTRODUÇÃO

A importância do saneamento e sua relação com a saúde humana é evidente e, a partir dessa constatação, muitos estudos tem sido desenvolvidos no intuito de utilizar os subprodutos gerados pelas mais diferentes atividades humanas. Um dos eixos desse saneamento básico é o esgotamento sanitário, que na etapa do tratamento gera resíduos que devem receber um destino sanitariamente adequado, porque podem poluir os corpos d'água, os lençóis freáticos e causar outros problemas ambientais.

O principal resíduo gerado nas estações de tratamento de esgoto é o lodo e devido à importância do manejo dos resíduos para a manutenção da qualidade do meio ambiente, surgiu a sugestão de incorporar esse material na composição de argamassas.

Outro resíduo pesquisado foi a concha do molusco do tipo Liliu (*Anomalocardia brasiliana*), que é pescado na Lagoa Guaraíras, nos municípios de Arês, RN e Senador Georgino Avelino, RN. A pesca no local é desenvolvida sob regime de economia familiar e a comercialização desse molusco constitui a principal fonte de renda para grande parte das famílias daquelas comunidades. Entretanto, a deposição das conchas que restam após a retirada do molusco causa impactos ambientais às margens da lagoa, como o soterramento do mangue, além do impacto visual. Por isso, existe a necessidade de dar destinação adequada a esse resíduo e vislumbrou-se a possibilidade da incorporação desse material como componente na matéria-prima de argamassa.

O lodo de esgoto é composto basicamente de uma mistura de matéria orgânica, inorgânica e água e, de acordo com Jordão e Pessôa (2011), pode ter uso agrícola e uso industrial como a produção de agregado leve para a construção civil e incorporação à fabricação de cimento e de produtos cerâmicos. Já o principal constituinte das conchas é o carbonato de cálcio ($CaCO_3$), – matéria-prima para diversos produtos, como cal virgem, cal hidratada, bloco e pavimentos para construção civil, construções de estradas, cerâmica, indústria de tijolos e de cimento (CHIERIGHINI *et al*., 2011). Assim, o uso desses resíduos como matéria-prima surge como uma possibilidade de destinação técnica e sustentavelmente viável.

Khanbilvard e Afshari (1995), explicam que vários tipos de resíduos podem ser incorporados nas argamassas e concretos, seja como cimento Portland composto, aditivos minerais ou como fíler.

O lodo gerado no Brasil é descartado em aterros sanitários, que perpetuam a geração de poluentes e representam elevados custos operacionais (POGGIANI *et al*., 2006) ou em lixões e até nos corpos aquáticos, poluindo o meio ambiente drasticamente. Para evitar isso, o uso de lodo de esgoto como matéria-prima surge como uma possibilidade de destinação que se contrapõe à ideia de que ele apenas constitui uma matéria inútil a ser confinada (DURANTE INGUNZA *et al*., 2011). No estudo da viabilidade da incorporação de lodo de esgoto, diversos trabalhos anteriores foram estudados, como exposto a seguir.

Os pesquisadores Tay e Show (1994) e Tay, Show e Hong (2002) misturaram lodo digerido e desidratado com cal, realizando sua queima, moagem e peneiramento, para criar um cimento biológico, denominado “Bio-cimento”. Substituindo esse cimento biológico parcialmente no cimento Portland na produção de argamassa, verificou-se que adições de até 10% proporcionaram resistência ligeiramente superior à encontrada na convencional, mas, para valores de até 30% a resistência ficou próxima da argamassa padrão.

Fontes (2003), diferentemente, avaliou a potencialidade do lodo, após calcinação, como substituto parcial do cimento Portland na produção de argamassas e concretos. Fez análises de trabalhabilidade (consistência), resistência e durabilidade (absorção de água por capilaridade) e concluiu que o uso da cinza de lodo de esgoto (CLE) é viável tecnicamente e ambientalmente devido às mudanças serem pequenas nas propriedades investigadas, por essa prática eliminar um risco de contaminação ao meio ambiente e à saúde pública através do isolamento do resíduo nocivo e por conferir a redução do consumo de cimento Portland.

Noutro sentido, Lessa (2005) utilizou o lodo gerado em estação de tratamento de esgoto misto como adição em argamassa da construção civil, depois de incinerado. Realizou os ensaios de resistência à compressão, absorção capilar, lixiviação e solubilização na argamassa e a partir dos resultados, confirmou a viabilidade técnica da incorporação. Nesse trabalho, foi adicionado até 20% de lodo incinerado e quanto maior a adição, maior a resistência à compressão.

Posteriormente, Musse (2007) estudou o aproveitamento do lodo de esgoto doméstico como insumo na produção de argamassa de concreto, em substituição parcial ao cimento Portland como adição mineral. Com a argamassa no estado fresco, foi analisado o índice de consistência e no estado endurecido realizou ensaios de resistência à compressão, absorção por imersão e fervura e carbonatação. Verificou que com o uso da CLE, nos teores de 5% a 10%, em substituição ao cimento na argamassa de concreto, os valores atingidos são próximos às resistências relativas das argamassas de referência, ou seja, sem adição, o que pode mobilizar seu aproveitamento na construção civil.

Outras pesquisas, como a de Silveira *et al.* (2009) estudaram a substituição parcial do cimento Portland por cinzas de lodo de esgoto. O lodo foi queimado à temperatura de 550°C e as cinzas obtidas foram moídas em um moinho de bolas. As resistências à compressão das argamassas produzidas com substituição de 10%, 20% e 30% do cimento Portland pela cinza foram parecidas ao da argamassa padrão e o desempenho quanto à resistência à tração por compressão diametral não teve alteração significativa entre as argamassas.

Costa (2014), por sua vez, estudou a viabilidade de utilização de CLE como adição em argamassa de cimento Portland. Foram estudadas adições desta cinza nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% em relação à massa de cimento. Os ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco foram índice de consistência, teor de ar incorporado, densidade de massa e retenção de água, e no estado endurecido foram densidade de massa, absorção de água por capilaridade, coeficiente de capilaridade, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência de aderência à tração e análise microestrutural. Foi comparada a argamassa padrão com as argamassas com adição da cinza e concluído que a CLE não prejudicou a integridade e propriedades das argamassas com adição, inclusive aumentando a resistência à compressão e tração, sendo 20% a porcentagem mais indicada. Assim, torna-se viável a adição de cinza de lodo de esgoto em argamassa de cimento Portland para o traço estudado.

Enquanto isso, Podkowa *et al.* (2015) encontraram alternativas relacionadas a empregabilidade do lodo, tanto para seu estado “in natura”, para suas cinzas, como também para o lodo digerido e desidratado. É possível estabelecer opções para o lodo como agregado leve, na fabricação de tijolos, em forma de “bio-cimento” ou

incorporando-o em argamassas e concretos. Entretanto, os custos relativamente altos relacionados a estes processos de produção e a ausência de percepção sustentável, dificultam a produção em larga escala.

Todos esses pesquisadores realizaram experimentos de cinza de lodo de esgoto misturada com argamassa e mostram caminhos para novos trabalhos no mesmo tema. Portanto, existe a possibilidade de se utilizar argamassa contendo adição de cinza de lodo e as propriedades necessárias para a argamassa podem ser alcançadas, mesmo que a qualidade seja menor do que a da argamassa sem lodo de esgoto (LESSA, 2005 e COSTA, 2014). Após observar que alguns trabalhos concluem que há viabilidade em fabricar argamassa com CLE, foi estudada a viabilidade de fabricar argamassa com lodo seco incorporado, método utilizado pelo presente trabalho, evitando-se assim os custos elevados de transformar esse lodo em cinza.

Já as conchas descartadas podem ser beneficiadas e transformadas através de um processo relativamente simples. Petrielli (2008) produziu carbonato de cálcio retirando a matéria orgânica e moendo as conchas na granulometria desejada, produziu óxido de cálcio calcinando as conchas a uma temperatura de 1.000°C e através da hidratação deste, obteve o hidróxido de cálcio. Portanto, o uso de conchas como matéria-prima surge como uma possibilidade de destinação técnica e sustentavelmente viável. No estudo da viabilidade da incorporação de conchas, os seguintes trabalhos foram estuados.

Yoon *et al*. (2003) utilizaram conchas de ostras para fabricação de argamassa. A análise química e microestrutural realizada mostraram que as conchas são predominantemente compostas de carbonato de cálcio com impurezas raras e a análise de resistência à compressão de argamassa com as conchas em substituição à areia mostrou que não houve redução significativa na resistência até 40%. A argamassa com conchas tem o fator água cimento maior devido à maior capacidade de absorção de água da concha, mas concluem que os resultados demonstraram que as conchas podem ser recursos de materiais calcários puros e eficazes em substituição da areia, indicando promissores materiais de construção reutilizáveis.

No estudo de Batista *et al*. (2009) utilizaram cascas de ostras e mariscos em substituição parcial ao agregado (areia fina e média) em blocos de concreto. Foram lavadas, secadas ao sol, trituradas em moinho de bolas e então misturadas aos

outros materiais do bloco. Os valores de substituição foram variados para serem feitos os ensaios de resistência à compressão, absorção de água e microscopia de varredura eletrônica (MEV). Mostraram que a resistência à compressão do bloco testado foi em torno de 30% maior do que a dos blocos convencionais, que a absorção de também foi melhor e atende a norma, que a incorporação das cascas tendem a reduzir a porosidade e concluíram que assim fica comprovada a viabilidade técnica do bloco.

Tristão *et al*. (2009) estudaram a utilização de conchas de mexilhões na fabricação da cal para produção de argamassa e para isso fizeram a preparação das amostras, calcinação, trituração, peneiramento, caracterização físico-química, ensaios na cal e realizaram os ensaios de MEV com detectores de energia dispersiva de raios X (EDS) e termogravimetria. Após análise dos resultados dos ensaios realizados na cal, concluíram que o material obtido atendeu aos requisitos exigidos na norma de cal hidratada para argamassas.

Na pesquisa de Faria *et al*. (2011) foi elaborado um projeto que abrangia a produção de cal a partir conchas de ostras com o processo de calcinação e a sua incorporação à argamassas de assentamento de alvenaria e de revestimento, envolvendo a população local e a sustentabilidade da construção.

Loffi (2014), por sua vez, realizou um estudo sobre o comportamento de uma argamassa incorporada com pó das conchas das ostras. Para caracterização da concha, fez os ensaios de granulometria, determinação da matéria orgânica, teor de cloretos, tempo de pega, teor retido na peneira 75 µm, água de pasta de consistência normal e massa específica. Na argamassa no estado fresco realizou o ensaio de tempo de pega e no estado endurecido realizou ensaios de tempo de pega, absorção de água, resistência mecânica e ensaio de expansibilidade. Os resultados mostraram que a argamassa com conchas absorveu mais água, mas obteve um resultado melhor para resistência mecânica quando incorporado 5% de ostras e o ensaio de reação álcali-agregado mostrou-se favorável, não acusando patologia nas amostras. 10% ou mais de ostras incorporadas na argamassa estudada diminuiu sua resistência.

Todos esses pesquisadores realizaram experimentos de conchas adicionadas aos blocos de concreto e à argamassa e mostram caminhos para novos trabalhos no mesmo tema. Portanto, existe a possibilidade de pesquisar a utilização de

argamassa contendo pó de conchas e as propriedades necessárias para a argamassa podem ser alcançadas, com a probabilidade inclusive de se obter materiais com características melhores tecnicamente do que a da argamassa sem conchas.

De acordo com os trabalhos dos pesquisadores estudados, percebe-se que existe a possibilidade de se utilizar argamassa contendo lodo de esgoto ou pó de conchas e que as propriedades necessárias para a argamassa podem ser alcançadas. Assim, o objetivo desse trabalho foi estudar a viabilidade técnica de incorporação desses resíduos em argamassas para emboço e reboco. Com isso, identificar quais os benefícios, prejuízos e dificuldades da utilização desses materiais sem fazer a sua incineração. Havendo viabilidade, será muito bom para o meio ambiente, já que irá diminuir a quantidade de resíduo inutilizado (lodo e conchas) e de matéria prima utilizada na fabricação da argamassa (areia ou cal).

Para se chegar ao objetivo geral, alguns objetivos específicos foram destacados. São eles:

- Caracterizar o lodo em relação ao teor de umidade, percentual de sólidos voláteis, granulometria, massa específica, massa unitária, determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm, determinação de atividade pozolânica, presença de organismos patogênicos e classificação do resíduo;
- Caracterizar o pó das conchas em relação à granulometria, massa específica e massa unitária;
- Identificar a composição química, as fases cristalinas e a microestrutura dos resíduos;
- Avaliar a influência dos resíduos nas propriedades da argamassa no estado fresco: consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água;
- Avaliar a influência dos resíduos nas propriedades da argamassa no estado endurecido: resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência de aderência à tração, coeficiente de capilaridade, absorção de água por capilaridade e densidade de massa.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia da pesquisa foi dividida em três partes e foi elaborada para cumprir os objetivos do trabalho. A parte inicial consistiu na preparação dos resíduos, incluindo coleta, secagem e moagem do lodo e britagem e moagem das conchas coletadas e está esquematizada na Figura 1.

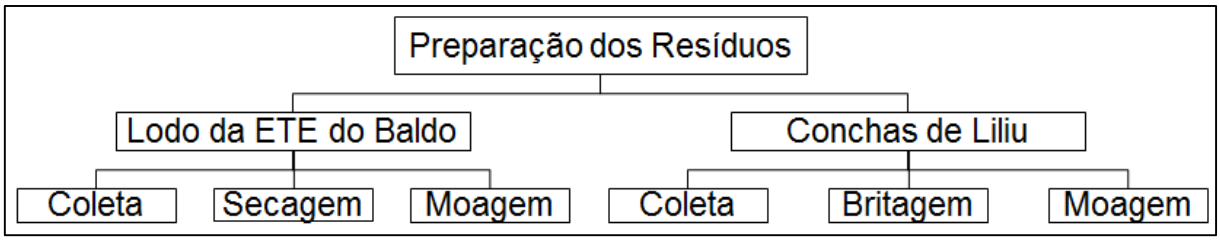



Figura 1 – Fluxograma da 1ª etapa da pesquisa

A segunda parte (Figura 2) foi realizar a caracterização dos resíduos (lodo seco e pó das conchas), com todas as análises necessárias para determinar as propriedades indispensáveis para um material a ser incorporado em argamassa.

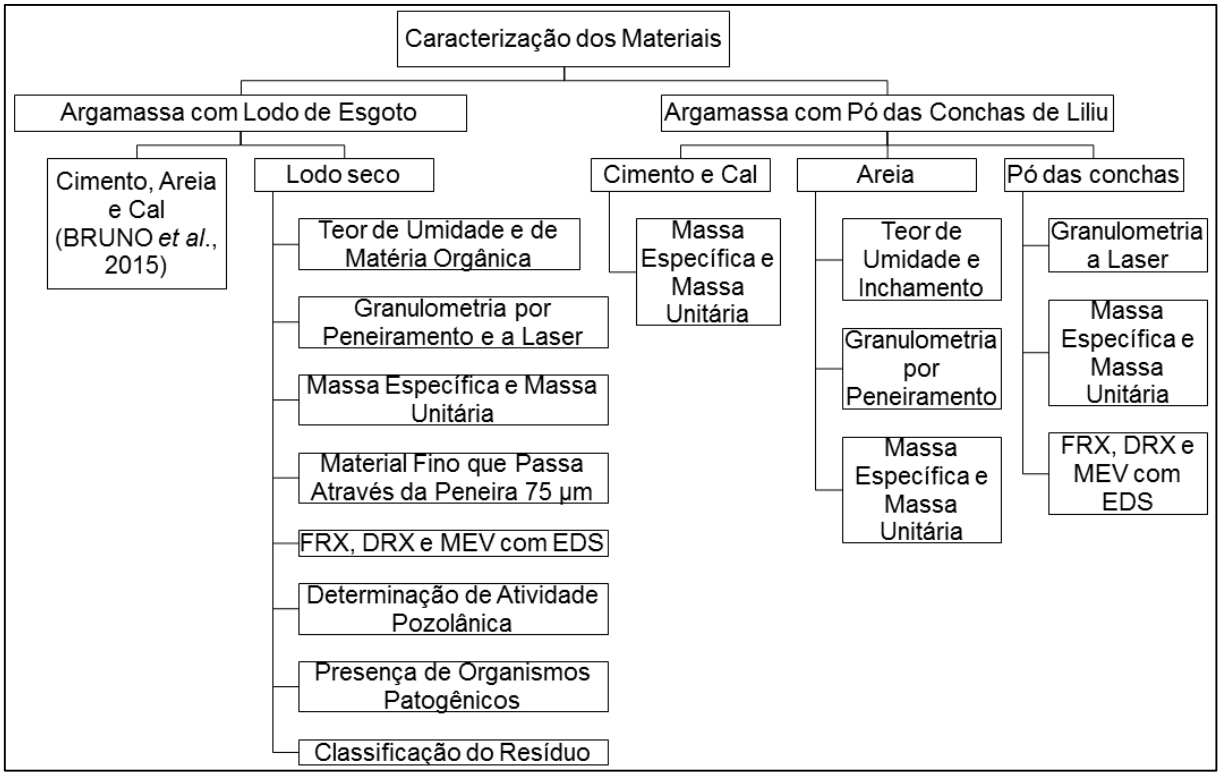



Figura 2 – Fluxograma da 2ª etapa da pesquisa

E a terceira fase foi a incorporação em si, com todos os ensaios para avaliar a qualidade da argamassa no estado fresco e no estado endurecido (Figura 3).

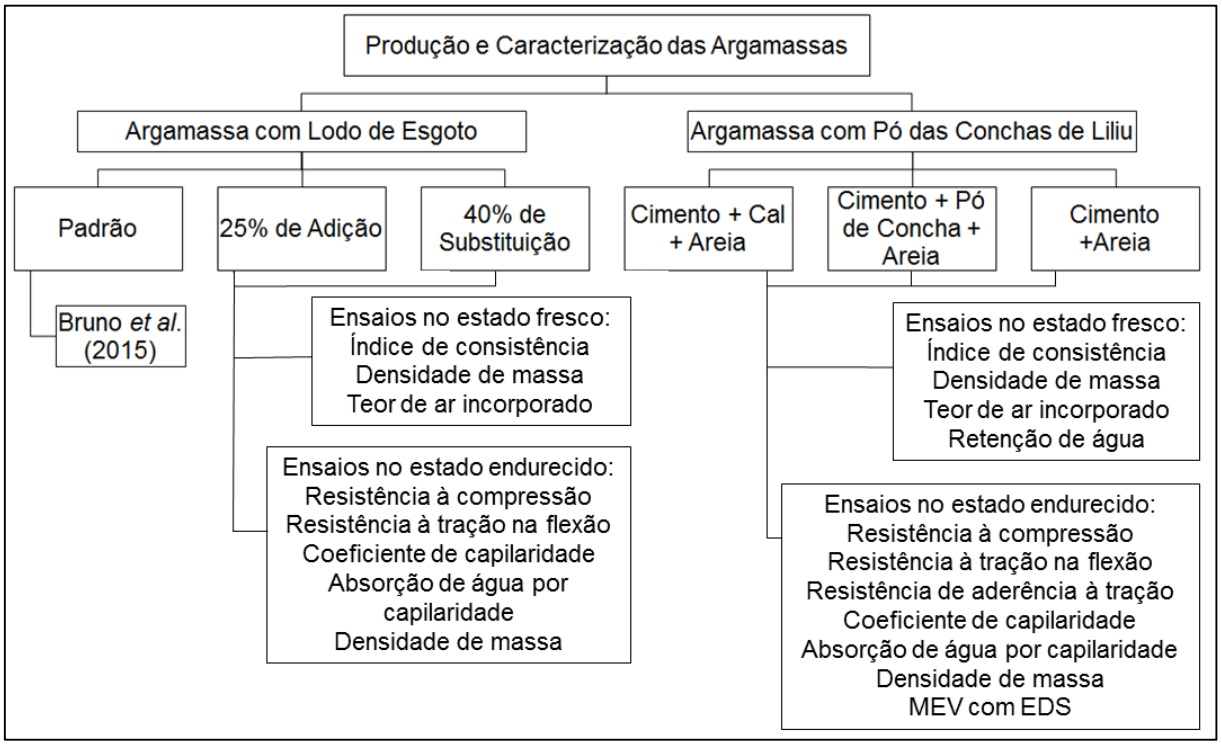


Figura 3 - Fluxograma da 3ª etapa da pesquisa

## 2.1 ÁREA DE ESTUDO

### 2.1.1 Lodo de Esgoto

Foi utilizado lodo da ETE do Baldo – Natal, RN (Figura 4), para o estudo com resíduo de esgoto predominantemente doméstico. O sistema é composto por duas linhas de tratamento que trabalham em paralelo com tratamento preliminar, reatores UASB (reator anaeróbio de manta de lodo), câmara anóxica seguida de processo aeróbio misto com crescimento disperso e aderido por meio biodiscos e posterior decantação e, por fim, a desinfecção por raios ultravioletas (FERRAZ *et al*., 2014).

Figura 4 – Vista geral da ETE do Baldo – Natal, RN
Fonte: Google Earth (2016)

Existe na ETE uma unidade de desidratação do lodo. O tanque de lodo digerido (vindo dos reatores UASB) e escuma (vinda do decantador secundário) são mantidos de forma homogênea através de misturadores. O descarte é então enviado para as centrífugas de desidratação, sendo ainda misturadas com água e solução com polímeros. As tortas geradas são descartadas em contêineres (Figura 5) que vão para o aterro metropolitano da grande Natal (CAERN).

Figura 5 – Vista do lodo descartado em contêineres

De acordo com a média dos dados de geração de lodo fornecidos pela CAERN dos meses de maio/2014 a dezembro/2015 (últimos 20 meses), a Estação do Baldo envia, por mês, ao aterro aproximadamente 39,82 toneladas de lodo, o que custa a CAERN R$ 3.324,57. No ano de 2015, por exemplo, foram geradas quase 400 toneladas de lodo e foi gasto mais de R$ 33.000,00 para enviar esse material ao aterro.

### 2.1.2 Conchas do Liliu

Foram utilizadas as conchas do Liliu (*Anomalocardia brasiliana*), um molusco pescado na lagoa Guaraíras, nos municípios de Arês, RN e Senador Georgino Avelino, RN. O molusco é coletado no fundo da lagoa quando a maré está baixa e levado até a margem para aquecer, abrir e retirar o alimento que é comercializado. Desse processo, as conchas do Liliu são descartadas e acumuladas às margens da lagoa, gerando impacto visual e soterramento do mangue (Figura 6).

Figura 6 – Vista do descarte das conchas do Liliu na Lagoa Guaraíras, RN

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para caracterização, foram coletadas três amostras de lodo logo que eram centrifugadas na ETE do Baldo e caíam na caçamba (Figura 7), nos dias 03, 10 e 24 de março de 2015. Todas as amostras foram analisadas em triplicata a fim de se conseguir maior confiabilidade dos resultados, gerando assim nove resultados para cada análise do lodo da ETE do Baldo.

Figura 7 – Vista da coleta do lodo

Para caracterização das conchas foram coletadas amostras nas margens da lagoa e para caracterização da areia, o material foi adquirido em material de construção, tudo analisado também em triplicata.

Os ensaios realizados com lodo foram teor de umidade, teor de matéria orgânica, granulometria por peneiramento, granulometria a laser, massa específica, massa unitária, determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem, espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), difratometria de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) com detectores de energia dispersiva de raios X (EDS), determinação de atividade pozolânica, presença de organismos patogênicos e classificação do resíduo.

Os ensaios realizados com o pó das conchas foram granulometria a laser, massa específica, massa unitária, espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), difratometria de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) com detectores de energia dispersiva de raios X (EDS). E os ensaios realizados com a areia foram teor de umidade, inchamento, granulometria por peneiramento, massa específica e massa unitária.

### 2.2.1 Teor de Umidade, Inchamento e Teor de Matéria Orgânica

A determinação de umidade, do lodo e da areia, foi realizada pelo método da secagem em estufa. A amostra foi pesada antes de ser colocada na estufa a 100°C. Esta massa, aproximadamente 50g, corresponde a massa úmida (Figura 8a). Após permanecer no mínimo 24 horas na estufa, até obter constância de massa, a amostra foi pesada novamente e teve-se a massa seca (Figura 8c). Com essas duas informações, o teor de umidade foi calculado.

O ensaio para a determinação do inchamento da areia foi realizado como preconiza a NBR 6467 (2006). O inchamento é o fenômeno da variação do volume aparente, provocado pela absorção de água livre pelos grãos e que incide sobre a sua massa unitária.

A determinação do teor de matéria orgânica do lodo foi realizada pelo método da perda de peso após ignição. A amostra seca em estufa (Figura 8b) foi incinerada em mufla a 550°C por 60 minutos. Nessas condições, toda matéria orgânica é

transformada em $CO_2$ e água, restando, na cápsula de porcelana, apenas os sólidos inorgânicos (Figura 8d).

(a) (b) (c) (d)

Figura 8 – Aspecto visual do lodo úmido (a), em estufa (b), seco (c) e incinerado (d)

### 2.2.2 Granulometria por Peneiramento e a Laser

A granulometria das matérias primas é fundamental na maior parte dos processos industriais e está diretamente relacionada com o comportamento dos materiais nas diferentes fases unitárias (MEINL, 2011).

- Granulometria do Lodo:

Todo o lodo coletado foi seco em estufa e moído em moinho de bolas (Figura 9) para depois ser realizada a granulometria e as análises seguintes. Esse moinho é constituído por um cilindro horizontal rotativo parcialmente preenchido com esferas. Ao girar, esse cilindro provoca o cascateamento das esferas, e as ações combinadas de choque e cisalhamento provocam a dispersão do material (AZEVEDO, 2004).

(a) (b)

Figura 9 - Vista do moinho de bolas (a) e aspecto do lodo seco após a moagem (b)

No moinho de bolas usado em laboratórios, geralmente é utilizado um material chamado alumina (óxido de alumínio), tanto para o cilindro, quanto para as esferas, em função de sua grande densidade e para se evitar a contaminação dos materiais que estão sendo trabalhados (NOS, 2011).

De acordo com os limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos (areia grossa de 1,2 a 4,8 mm e areia fina de 0,05 a 0,3 mm), obteve-se do moinho de bolas, partículas com diâmetro máximo de areia grossa. Assim, utilizou-se na argamassa o lodo com dimensão menor que 4,8 mm.

Depois de moído, o lodo seco foi utilizado para fazer a determinação da sua composição granulométrica, segundo a NBR NM 248:2003.

Finalizada a caracterização granulométrica, toda a amostra coletada foi peneirada na peneira de abertura de 4,75 mm e o que ficou retido nela foi descartado, pois seu diâmetro não corresponde a agregado miúdo. Todo o lodo que passou da peneira 4,75 mm foi utilizado na argamassa como substituição do agregado miúdo e na argamassa como adição. De posse da amostra toda separada, as seguintes análises foram feitas.

A granulometria a laser foi realizada no laboratório de Cimentos da UFRN, por meio de um granulômetro em equipamento CILAS modelo 1090, apenas com o material fino passante da peneira 200 (abertura de 0,075 mm). O objetivo desse ensaio foi caracterizar melhor as partículas finas, devido sua grande quantidade.

A difração a laser mede as distribuições de tamanho das partículas por medição da variação angular na intensidade da luz difundida à medida que um feixe de laser interage com as partículas dispersas da amostra. Partículas grandes dispersam a luz em pequenos ângulos em relação ao feixe de laser e partículas pequenas dispersam a luz em ângulos grandes. Os dados sobre a intensidade da dispersão angular são então analisados para calcular o tamanho das partículas responsáveis por criar o padrão de dispersão. Esse tamanho é indicado como o diâmetro de uma esfera de volume equivalente (MALVERN).

- Granulometria do Pó de Concha:

Como o objetivo do trabalho era substituir a cal pela concha, as conchas (Figura 10) foram britadas (até estarem com diâmetro de 3 a 5 mm), moídas em moinho de bolas e passadas na peneira 200 para se conseguir um pó de diâmetro equivalente.

Figura 10 – Vista das Conchas do Liliu

A granulometria a laser do pó de concha também foi realizada no laboratório de Cimentos da UFRN, com o material fino passante da peneira 200 (Figura 11).

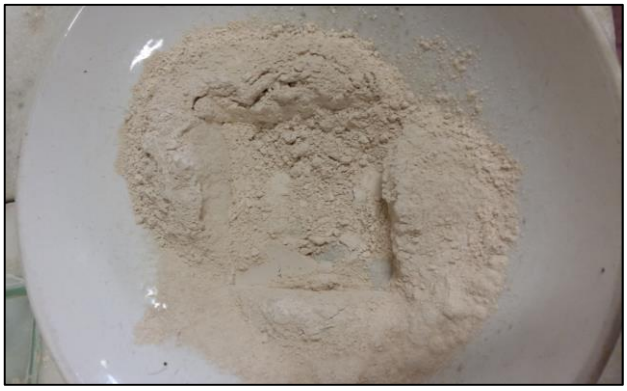


Figura 11 – Vista do pó das conchas do Liliu caracterizado

- Granulometria do Agregado Miúdo:

Toda a areia adquirida foi seca em estufa para depois ser realizada a granulometria por peneiramento e as análises seguintes. De acordo com os limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos (areia grossa de 1,2 a 4,8 mm e areia fina de 0,05 a 0,3 mm), obteve-se partículas com diâmetro máximo de areia grossa. A areia seca foi utilizada para fazer a determinação da sua composição granulométrica, segundo a NBR NM 248:2003. A peneira de maior diâmetro utilizada foi a 6,3 mm (série intermediária), seguida das peneiras 4,75, 2,36, 1,18, 0,6, 0,3 e 0,15 mm (série normal).

### 2.2.3 Massa Específica e Unitária

A determinação da massa específica, do lodo e do pó de concha, foi realizada por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier, como preconiza a NBR NM 23 (2001). E a determinação da massa específica da areia foi realizada por meio do frasco Chapman, como preconiza a NBR NM 52 (2009).

A determinação da massa unitária, do lodo, do pó de concha e da areia, foi realizada com um recipiente paralelepipédico com volume de 4.913,0 $cm^3$ e de acordo com o que preconiza a NBR NM 45 (2006). Separou-se a amostra com no mínimo duas vezes o correspondente à capacidade do recipiente e o peso do recipiente vazio foi registrado. A amostra foi lançada no recipiente, até encher, de forma a evitar a compactação do material, sendo posteriormente rasado e pesado. Com essas informações, a massa unitária foi calculada.

### 2.2.4 Material Fino que Passa Através da Peneira 75 µm, por Lavagem

Como o lodo foi utilizado em substituição a areia, este ensaio precisava ser realizado da forma que preconiza a NBR NM 46 (2003). 500 g de lodo seco foram colocados em um recipiente com água e agitado. Essa mistura foi vertida para outro recipiente através de peneiras de 1,18 mm e 0,075 mm e o material retido nas peneiras deve ser devolvido ao recipiente de lavagem. Essa operação deve ser repetida até que a água de lavagem se torne limpa. Quando isso ocorrer, o lodo retido nas peneiras será coletado e colocado em estufa a 110°C até constância de peso, onde será pesado para determinar a massa do material seco após a lavagem. O teor desse material é calculado com essas informações.

Nesse ensaio o resultado não foi obtido, pois o lodo, que tem grande capacidade de absorção de água, quando entrou em contato com a água, formou uma pasta que impediu a passagem dos materiais pulverulentos pela peneira (Figura 12), impossibilitando sua quantificação.

Figura 12 – Vista da pasta formada durante o ensaio que impediu a quantificação do material fino

### 2.2.5 FRX, DRX e MEV com EDS

A composição química do lodo e do pó de concha foi analisada através da espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), uma técnica de análise qualitativa e quantitativa da composição química de amostras. Consiste na exposição de amostras a um feixe de radiação para a excitação e detecção da radiação fluorescente resultante da interação da radiação com o material da amostra (BELMONTE, 2005). A análise foi realizada no Laboratório de Análise Química do departamento de engenharia de materiais da UFRN, em equipamento Shimadzu, modelo EDX 720.

A identificação das fases cristalinas do lodo e do pó de concha foi realizada por meio da difratometria de raios X (DRX). Essa identificação ocorre porque os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos da onda dos raios X. Quando se incide um feixe de raios X em um cristal, o mesmo interage com os átomos presentes, gerando a difração (SILVA, 2013). A análise foi realizada no Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis do RN, em equipamento Shimadzu, modelo XRD-6000.

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento capaz de fornecer informações de detalhe, com aumentos de até 300.000 x, produzindo imagens de alta ampliação e resolução. Sua grande vantagem consiste na observação direta de bordas ou contornos de grãos e, também, em seções polidas, e na caracterização de porosidade inter e intragranular. Os MEVs equipados com

detectores de energia dispersiva de raios X (EDS) possibilitam a determinação da composição das amostras. Uma das vantagens da utilização do MEV-EDS é a rapidez e facilidade na preparação das amostras, que podem até ser brutas, dependendo do objetivo da pesquisa (DUARTE *et al*., 2003). O MEV do lodo e do pó de concha foi realizado no Laboratório de Análise Química do departamento de engenharia de materiais da UFRN, em equipamento Hitachi, modelo TM 3000 e o EDS no Swift ED 3000.

### 2.2.6 Determinação de Atividade Pozolânica

A ABNT-NBR 12653:2014 define os requisitos para os materiais serem pozolânicos e determina que o material deva ser rejeitado caso não atenda a qualquer um dos requisitos da norma. Entre os requisitos químicos, está a perda ao fogo, que não poder ser maior que 10%.

O ensaio de perda ao fogo constitui-se em colocar a amostra com peso determinado em um cadinho de porcelana e calcinar em forno mufla à temperatura de 950°C, por 20 min. Depois de calcinada e esfriada, a amostra é pesada e o valor da perda ao fogo é obtido através da relação entre a perda de massa no processo de calcinação e a massa inicial da amostra (RESENDE *et al*., 2012).

O lodo da ETE do baldo foi submetido a calcinação a 550°C para determinar teor de matéria orgânica, onde a perda foi de 60%. Portanto, não se pode considerar o lodo como material pozolânico, pois a uma temperatura mais baixa, ele já passou do limite de 10%.

### 2.2.7 Presença de Organismos Patogênicos

A presença de microrganismos patogênicos no lodo é um dos fatores mais preocupantes em sua utilização ou disposição final, mas a higienização térmica é um método que acaba com esse problema. A temperatura excessiva pode promover a desnaturação proteica e/ou a inativação de enzimas fundamentais ao desenvolvimento do organismo. Dessa forma, o tratamento térmico tem sido uma alternativa para destruição e/ou inativação de organismos patogênicos (PEDROZA *et al.*, 2006).

Para remover 90% de bactérias indicadoras (Coliformes termotolerantes e *Escherichia Coli*), Pedroza *et al*. (2006) mostram que 60 minutos de exposição a uma temperatura de 70°C é suficiente, já levando em conta problemas de transporte de calor em unidades grande com lodo. Ilhenfeld (1999) apresenta a temperatura e o tempo necessários para a destruição de doze organismos patogênicos encontrados no lodo de esgoto, mostrando que aproximadamente 70°C por 60 minutos destrói todos eles.

E em relação aos ovos de helmintos, Andreoli *et al*. (2001) mostraram em sua pesquisa que essa temperatura por esse tempo não é suficiente para inviabilizá-los. Entretanto, mostram que a 80°C, 5 minutos já é suficiente.

Como todo o lodo utilizado na pesquisa foi secado em estufa a 100°C por no mínimo 24h, não houve problemas quanto à presença de organismos patogênicos. A secagem em estufa, além de remover a umidade do lodo, também realizou o tratamento térmico.

### 2.2.8 Classificação do Resíduo

A CAERN, por destinar o lodo da ETE do Baldo no aterro sanitário, teve que classificar em que tipo de resíduo esse lodo se enquadra e esse resultado foi avaliado nessa pesquisa para saber a possibilidade de contaminação do ser humano em contato com esse resíduo.

## 2.3 ENSAIOS DAS ARGAMASSAS FABRICADAS

- Argamassa com Lodo de Esgoto:

Para fabricação da argamassa, foram utilizados os lodos coletados e todos os ensaios também foram realizados em triplicata a fim de se conseguir maior confiabilidade dos resultados, gerando assim nove resultados para cada ensaio da argamassa com lodo da ETE do Baldo. Todos os ensaios laboratoriais foram feitos nas amostras que tem 25% de lodo seco como adição (a massa do agregado ficou a mesma do traço de referência) e nas que tem 40% em peso de lodo seco em substituição parcial ao agregado miúdo.

Essas altas porcentagens foram escolhidas arbitrariamente para verificar o impacto significativo do lodo na argamassa e a partir dos resultados, determinar se é melhor continuar os estudos com mais ou menos quantidade de lodo.

As argamassas produzidas com lodo foram baseadas no traço referência produzido por Bruno *et al*. (2015), todos os seus resultados foram comparados e o traço misto padrão foi de 1:1:7 (1 saco de cimento de 50kg, 1 saco de cal de 20kg e 7 padiolas de areia úmida de 40l cada = 280l).

As duas argamassas fabricadas com lodo foram comparadas a argamassa da pesquisa de Bruno *et al*. (2015) – 0% de lodo incorporado, devido ao traço base ser o mesmo e o agregado miúdo (recolhido numa obra situada na região metropolitana de Natal, RN, no município de Parnamirim), cimento Portland composto com pozolana (CPII Z-32) e cal-leve (CHI) também foi o mesmo pois as duas pesquisas estavam sendo realizadas ao mesmo tempo e no mesmo laboratório.

- Argamassa com Pó das Conchas de Liliu:

Para fabricação da argamassa, foi utilizado o pó das conchas coletadas e todos os ensaios também foram realizados em triplicata a fim de se conseguir maior confiabilidade dos resultados. Todos os ensaios laboratoriais foram feitos nas amostras que tem 100% de concha em substituição à cal, nas que tem apenas cimento e areia e nas que tem cimento, cal e areia.

Foi escolhido substituir totalmente a cal para verificar o impacto do pó de concha na argamassa, pois não há viabilidade operacional na fabricação de um traço com substituição parcial da cal. A argamassa fabricada com pó de concha foi comparada a argamassa padrão de cimento, cal e areia e a argamassa de cimento e areia – 0% de resíduo incorporado.

### 2.3.1 Argamassa no Estado Fresco

Para a caracterização da argamassa no estado fresco, os ensaios de índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado foram realizados nas argamassas com lodo.

Para a caracterização da argamassa com pó de concha, os ensaios de índice de consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água foram realizados. Com o mesmo traço de argamassa realizou-se os três primeiros ensaios e pela quantidade maior de argamassa que era necessária, outro traço foi fabricado para o ensaio de retenção de água.

O ensaio de índice de consistência foi realizado como está preconizado na NBR 13276 (2005). A trabalhabilidade foi verificada com esse método, pois ele busca medir a consistência da argamassa e avaliar se está adequada para o uso a que se destina. Para a determinação desse índice, o ensaio consiste em utilizar a argamassa imediatamente após a sua preparação para encher um molde em três camadas e em cada uma delas aplicar golpes (15, 10 e 05, respectivamente) para distribuir a argamassa uniformemente e depois fazer o rasamento (Figura 13). Retira-se o molde e aciona a manivela da mesa para que sejam efetuados 30 golpes por 30 segundos (01 queda por segundo). Registra a medida de três diâmetros uniformemente distribuídos e o índice de consistência corresponde à média dessas três medidas, expressa em milímetros.

Figura 13 – Vista do molde preenchido e rasado para determinação da consistência

O ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado foi realizado como está preconizado na NBR 13278 (2005). Consiste em utilizar um recipiente cilíndrico de peso e volume conhecido e enchê-lo de argamassa em três camadas aproximadamente iguais, aplicando 20 golpes e três quedas com altura de 3 cm em cada uma delas. Após o preenchimento do recipiente com argamassa, deve-se fazer o seu rasamento e registrar a sua massa para posterior aplicação nas equações apresentadas na Norma.

A retenção de água foi obtida como preconiza a NBR 13277 (2005). O ensaio (Figura 14) consiste em pesar o conjunto funil/papel-filtro úmido, após ser acionada a bomba e aplicado sucção ao conjunto por 90 segundos, depois pesar o conjunto com argamassa adensada com 37 golpes e aplicar ao conjunto com argamassa uma sucção de 51 mmHg por um período de 15 minutos e depois pesá-lo novamente.

(a) (b) (c) (d)

Figura 14 - Ensaio de retenção de água (a) conjunto com bomba (b) funil/papel-filtro úmido (c) adensamento com 37 golpes e (d) rasamento e sucção por 15 min

### 2.3.2 Argamassa no Estado Endurecido

Para a caracterização da argamassa no estado endurecido, os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração na flexão, coeficiente de capilaridade, absorção de água por capilaridade e densidade de massa foram realizados nas argamassas com lodo. Para cada tipo de argamassa foram moldados 03 corpos-de-prova (CP's) prismáticos para medir a resistência à compressão e à tração na flexão em cada idade (28 e 91 dias) e 03 para os ensaios de coeficiente de capilaridade, absorção de água por capilaridade e densidade de massa apenas aos 28 dias, totalizado 09 corpos-de-prova para a argamassa com substituição por lodo e 09 para a argamassa de adição de lodo.

Para a caracterização da argamassa com pó de concha, os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência de aderência à tração, coeficiente de capilaridade, absorção de água por capilaridade, densidade de massa e MEV com EDS foram realizados. Para cada tipo de argamassa foram moldados 03 corpos-de-prova prismáticos para medir a resistência à compressão e à

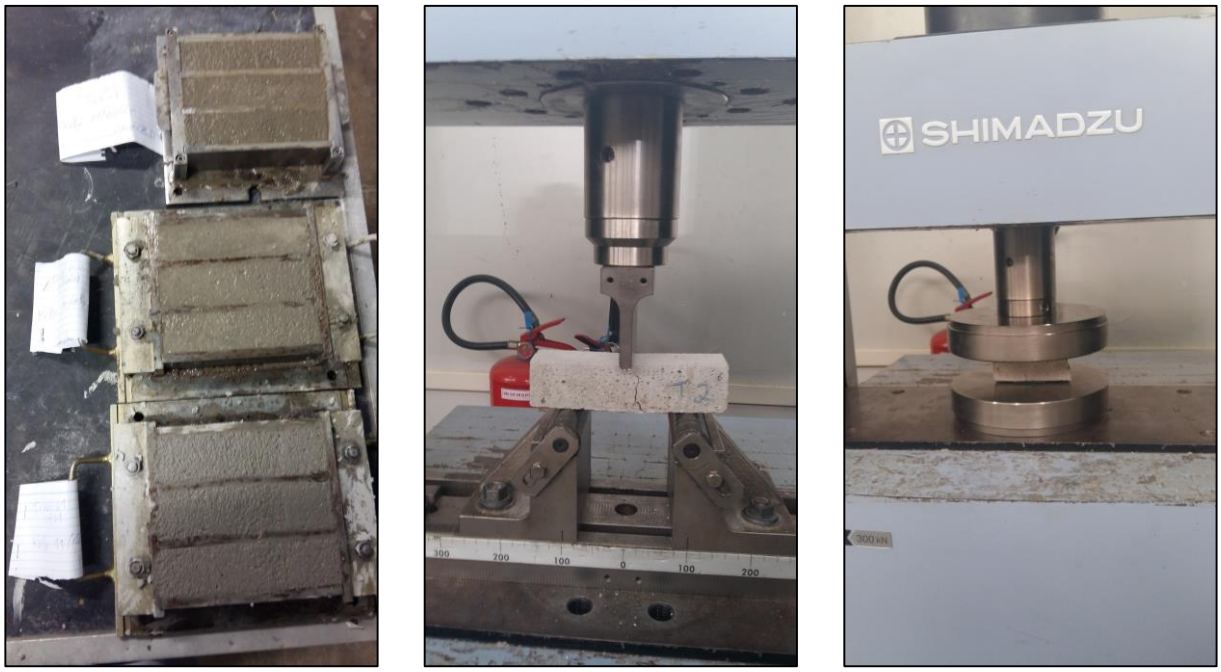
tração na flexão em cada idade (7, 28 e 91 dias) e 03 para os ensaios de coeficiente de capilaridade, absorção de água por capilaridade e densidade de massa apenas aos 28 dias, totalizado 12 corpos-de-prova (CP's) para cada argamassa. A execução do emboço foi simulada em uma placa de concreto para cada tipo de argamassa e em 04 amostras de cada placa foram medidas a resistência de aderência à tração.

Os ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão foram realizados como está preconizado na NBR 13279 (2005). A argamassa foi rompida com os corpos-de-prova nas idades de 28 e 91 dias (lodo) e de 07, 28 e 91 dias (pó de concha), no Laboratório de Ensaios Mecânicos da UFRN, na prensa universal da Shimadzu, modelo AG-X 300 kN.

O ensaio consiste em romper os corpos-de-prova fabricados (Figuras 15a e 16a) em moldes prismáticos (dimensões de 04 x 04 x 16 cm) à tração na flexão (Figuras 15b e 16b) e, usando suas metades restantes, romper à compressão (Figuras 15c e 16c). Antes do ensaio à compressão, duas faces do corpo-de-prova recebeu uma pequena placa metálica (dimensões 40 mm x 40 mm e 4 mm de espessura), para garantir a área de aplicação da carga solicitada pela norma (500 N/s para compressão axial e 50 N/s para tração na flexão). A Figura 15 mostra a argamassa com lodo e a Figura 16 mostra argamassa com pó de concha.

(a) (b) (c)

Figura 15 – Moldagem dos corpos-de-prova prismáticos (a), ruptura por tração na flexão (b) corpo-de-prova comprimido




(a) (b) (c)

Figura 16 – Moldagem dos corpos-de-prova prismáticos (a), ruptura por tração na flexão (b) e argamassa sendo comprimida (c)

A resistência potencial de aderência à tração foi verificada como preconiza a NBR 15258 (2005). O substrato utilizado foi uma superfície de concreto chapiscada (Figuras 17a e 17b) e a resistência foi medida aos 28 dias, no Laboratório do SENAI/RN – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, no aparelho para ensaio de arrancamento manual digital da Solotest, capacidade de 1500 kgf.

(a) (b)

Figura 17 – Vista da execução do chapisco (a) e da execução do emboço (b)

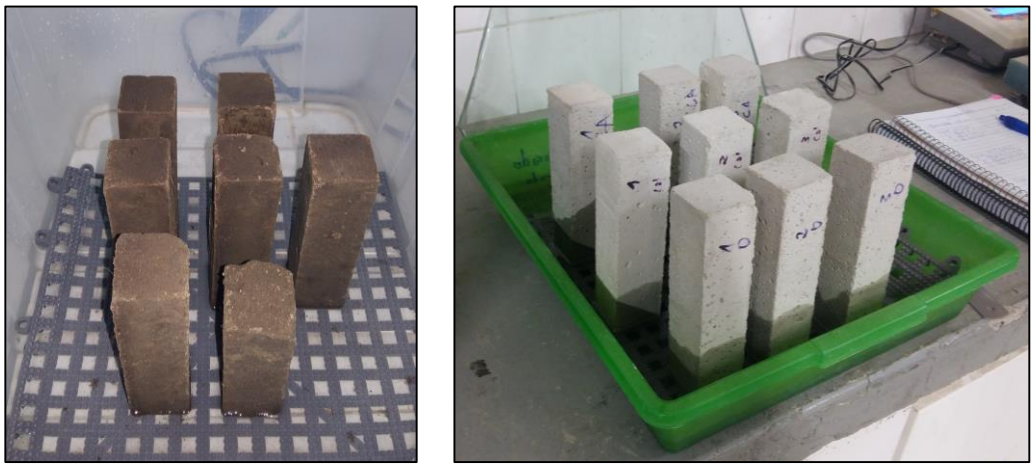
O ensaio consiste em cortar a argamassa para delimitar os corpos de prova e aos 28 dias limpar e colar pastilhas metálicas nas áreas delimitadas pelos cortes (Figura 18a). Após isso, a ruptura dos corpos-de-prova é feita acoplando o equipamento de tração a pastilha (Figura 18b) e aplicando o esforço do equipamento

até a ruptura. Anota-se a carga de ruptura e mede-se o diâmetro do corpo-de-prova com paquímetro (Figura 18c) para obter-se a tensão requerida.

(a) (b) (c)

Figura 18 - Ensaio de resistência de aderência à tração (a) corte da argamassa e colagem das pastilhas (b) equipamento de tração acoplado na pastilha e (c) medida do diâmetro do corpo-de-prova

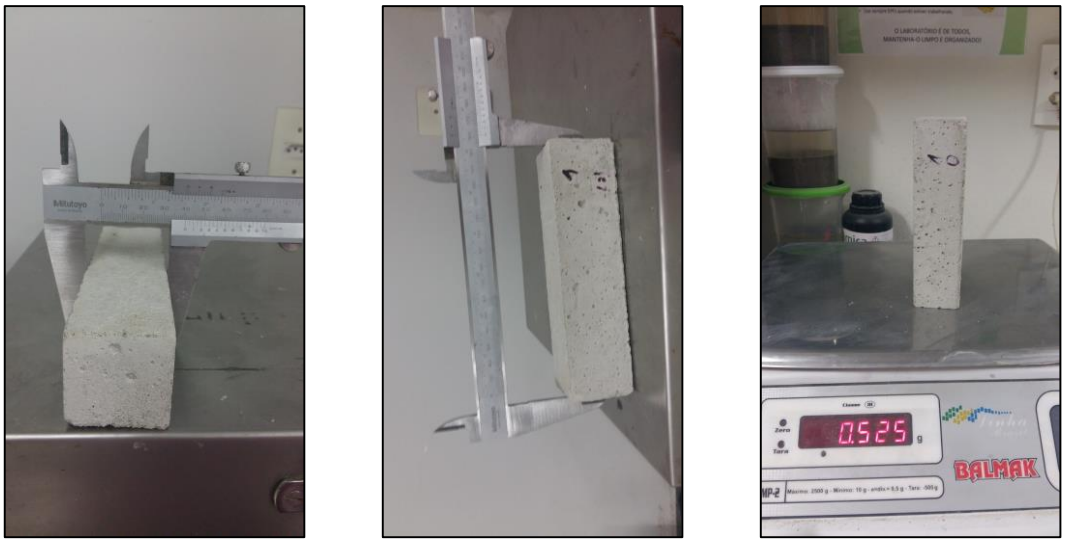
A determinação de absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade foi feita como prevê a NBR 15259 (2005). O ensaio consiste em aos 28 dias lixar e limpar a superfície do CP e determinar sua massa. Depois, posicionar os CP's com a face quadrada sobre o suporte no recipiente de ensaio, com nível de água constante de 05 mm acima da face em contato com a água (Figura 19) e determinar a massa de cada CP aos 10 e aos 90 minutos.



(a) (b)

Figura 19 – Vista dos corpos-de-prova da argamassa com lodo (a) e da argamassa com pó de concha (b) em contato com 5 mm de água no recipiente

A densidade de massa aparente no estado endurecido foi obtida conforme prevê a NBR 13280 (2005). O ensaio consiste em aos 28 dias medir largura (Figura 20a), altura, comprimento (Figura 20b) e massa (Figura 20c) dos CP's. Dimensões determinadas com paquímetro, em centímetros e massa registrada em gramas.




(a) (b) (c)

Figura 20 – Vista da obtenção da largura (a), altura (b) e massa do corpo-de-prova (c)

A microscopia eletrônica de varredura com detecção de energia dispersiva de raios X foi realizada nas argamassas com 98 dias, em uma pequena amostra dos corpos-de-prova rompidos aos 91 dias. Esse MEV também foi realizado no Laboratório de Análise Química do departamento de engenharia de materiais da UFRN, em equipamento Hitachi, modelo TM 3000 e o EDS no Swift ED 3000.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das argamassas com lodo são todos discutidos e comparados com a argamassa padrão fabricada por Bruno *et al*. (2015). Foram produzidas uma argamassa com 40% de lodo em substituição ao agregado miúdo e outra com 25% de adição de lodo.

Sobre as argamassas com pó de concha, três foram produzidas para serem comparadas: uma apenas de cimento e areia, outra de cimento, pó de concha e areia e a do traço referência 1:1:7 de cimento, cal e areia (1 saco de cimento de 50kg, 1 saco de cal de 20kg e 7 padiolas de areia úmida de 40l cada = 280l). De acordo com o traço referência, o inchamento do agregado miúdo e as massas específicas e unitárias dos materiais, obteve-se o traço seco em massa de cada argamassa. O pó de concha foi utilizado em substituição de 100% da cal e todos os resultados comparados. O agregado miúdo foi adquirido em uma loja de material de construção no município de Natal. Para a produção das argamassas, empregou-se o cimento Portland composto com pozolana (CPII Z-32) e cal-leve (CHI).

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO

#### 3.1.1 Teor de Umidade e de Matéria Orgânica

A alta umidade encontrada no lodo (80,22% ± 0,04%) indica que mesmo com a centrífuga de desidratação na ETE do Baldo, muita água ainda permanece no material e o baixo desvio padrão mostra que essa centrífuga opera de maneira uniforme. O teor de matéria orgânica do lodo seco também constante e com baixa variação (58,40% ± 0,07%) indica que mais da metade do lodo já seco é matéria orgânica.

#### 3.1.2 Granulometria por Peneiramento e a Laser

Através da granulometria por peneiramento, determinou-se a dimensão máxima característica do lodo (0,6 mm), bem menor do que a da areia utilizada (4,75 mm) e o módulo de finura (0,33) do lodo, que também é bem menor do que o do agregado (2,56). Isso mostra que o lodo utilizado é muito fino, o que faz desse

material uma ótima associação para aumentar a trabalhabilidade, diminuir a capilaridade e a permeabilidade da argamassa. A Figura 21 mostra a curva granulométrica do lodo.

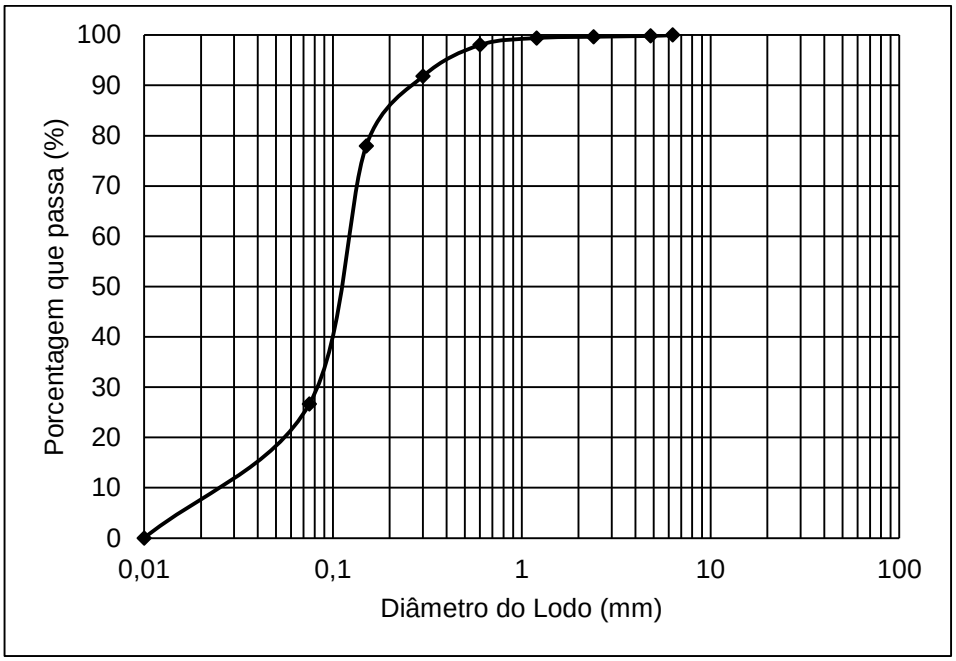



Figura 21 - Curva granulométrica do lodo*
*Média dos 9 resultados (3 réplicas de 3 coletas)

A granulometria a laser foi realizada em uma faixa de 0,10 a 500,00 µm e através dela foi confirmado que a dimensão máxima característica é 0,6 mm, pois a quantidade de lodo com dimensão imediatamente inferior (0,3 mm) também foi maior que 5% na análise a laser. O módulo de finura pela granulometria a laser foi de 0,17, o que mostra que o lodo utilizado é mais fino do que foi mostrado no peneiramento. Esses resultados indicam que o lodo e fibras de cabelo presente nele entupiam as aberturas das malhas e impediam que parte das partículas menores que a abertura passasse.

O ANEXO A mostra as curvas granulométricas a laser dos lodos 1, 2 e 3 e indicam que o diâmetro médio das partículas é 74,18 µm, com D10 (diâmetro a 10% acumulado) correspondendo a 6,79 µm, D50 de 49,34 µm e D90 de 187,91 µm. Pelo peneiramento não dá para chegar a um valor exato, mas chega-se a conclusão que o D10 e o D50 são menores que 75 µm, o D90 é maior, o que atesta os resultados da granulometria a laser. Como o diâmetro do cimento varia entre 10 e 50 µm, o lodo pode preencher os vazios presentes na argamassa e melhorar o empacotamento da

matriz cimentícia por ter aproximadamente 17,37% de partículas menores que 10 µm e mais de 51% de partículas menores que 50 µm.

O lodo 01 tem partículas maiores do que os lodos 02 e 03, fato que ocorreu devido ter sido a primeira amostra a ser moída e ainda não saber o tempo necessário de moagem para obter uniformidade nos tamanhos das partículas.

### 3.1.3 Massa Específica e Unitária

As determinações de massa específica não podem diferir entre si em mais do que 0,01 g/cm³ (NBR NM 23, 2001) e os resultados de massa unitária de cada ensaio não deve apresentar desvio maior que 1% em relação à média (NBR NM 45, 2006). Para a massa específica, esse valor não é atendido para cada coleta (0,028 g/cm³ o maior desvio), mas o da massa unitária é atendido (0,66% o maior desvio de massa unitária). Calculando de acordo com a média das três coletas, a diferença da massa específica passa ainda mais do limite, como mostra a Tabela 1. Mas, essa diferença é aceitável devido ter ocorrido nos lodos coletados e moídos em dias diferentes.

Tabela 1 - Massa específica e massa unitária do lodo

| Material | Massa Específica (g/cm³) | Massa Unitária (g/cm³) |
|---|---|---|
| Lodo* | 1,77 ± 0,06 | 0,58 ± 0,06 |

*3 réplicas de 3 coletas, 9 resultados

Esses valores são bem menores do que os da areia (M.E. = 2,66 g/cm³ e M.U. = 1,10 g/cm³) e isso faz do lodo um material leve que utilizando o mesmo peso de areia, consegue produzir um volume maior de argamassa.

### 3.1.4 FRX, DRX e MEV com EDS

Mesmo já constatado que o lodo não atende ao requisito de perda ao fogo para ser considerado material pozolânico, foram verificados outros requisitos químicos através da análise química pelo FRX. O resultado está apresentado na Tabela 2 e mostra que o lodo é composto por 67,035% de $Fe_2O_3$ + $SiO_2$ + $Al_2O_3$, valor que se enquadraria no mínimo de 50% exigido pela NBR 12653 (2014) para uma pozolana de classe E. Entretanto, a mesma norma indica que o teor de $SO_3$ não

pode ultrapassar 5%, mas o lodo tem em média 7,875%, o que confirma que o lodo não é um material pozolânico.

Tabela 2 - Composição química do lodo*

| Composição Química | Nomenclatura | Massa (%) |
|---|---|---|
| $Fe_2O_3$ | Óxido de Ferro III - Hematita | 33,972 |
| $SiO_2$ | Dióxido de Silício - Sílica | 22,756 |
| $Al_2O_3$ | Óxido de Alumínio - Alumina | 10,307 |
| CaO | Óxido de Cálcio - Cal | 8,799 |
| $SO_3$ | Trióxido de Enxofre - Óxido Sulfúrico | 7,875 |
| $ZrO_2$ | Óxido de Zircônio | 3,254 |
| $P_2O_5$ | Pentóxido de Fósforo | 2,943 |
| $TiO_2$ | Óxido de Titânio IV | 2,846 |
| ZnO | Óxido de Zinco | 2,635 |
| MgO | Óxido de Magnésio | 1,577 |
| $K_2O$ | Óxido de Potássio | 1,405 |
| CuO | Óxido de Cobre II | 0,697 |
| SrO | Óxido de Estrôncio | 0,69 |
| MnO | Óxido de Manganês II | 0,155 |
| $Cr_2O_3$ | Óxido de Cromo III | 0,069 |
| NiO | Óxido de Níquel II | 0,021 |
| | TOTAL | 100,00 |

*Média de 3 resultados (1 réplica de cada coleta)

Os resultados relativos à análise mineralógica pelo DRX dos lodos estão apresentados no ANEXO B. Indicam que o lodo é composto predominantemente por fases cristalinas de Quartzo ($SiO_2$), Dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), Wuestita (FeO) e Berlinita ($AlPO_4$). Portanto, pela análise mineralógica pode-se dizer que o lodo é um material heterogêneo e predominantemente cristalino, devido à grande quantidade de picos.

O lodo 3 indicou picos de Anatásio ($TiO_2$), mas comparando ao DRX dos lodos 1 e 2 e ao FRX, percebe-se que o equipamento possa ter confundido esse cristal com o cristal de $Fe_2O_3$, que está presente em muita quantidade no lodo (33,972%) e foi identificado no DRX das outras duas coletas.

A análise morfológica do lodo está apresentada nas Figuras 22a a 22f, onde é possível a visualização das dimensões e do aspecto do material, em aumentos de 200, 500, 1000, 2000, 5000 e 7000 vezes.

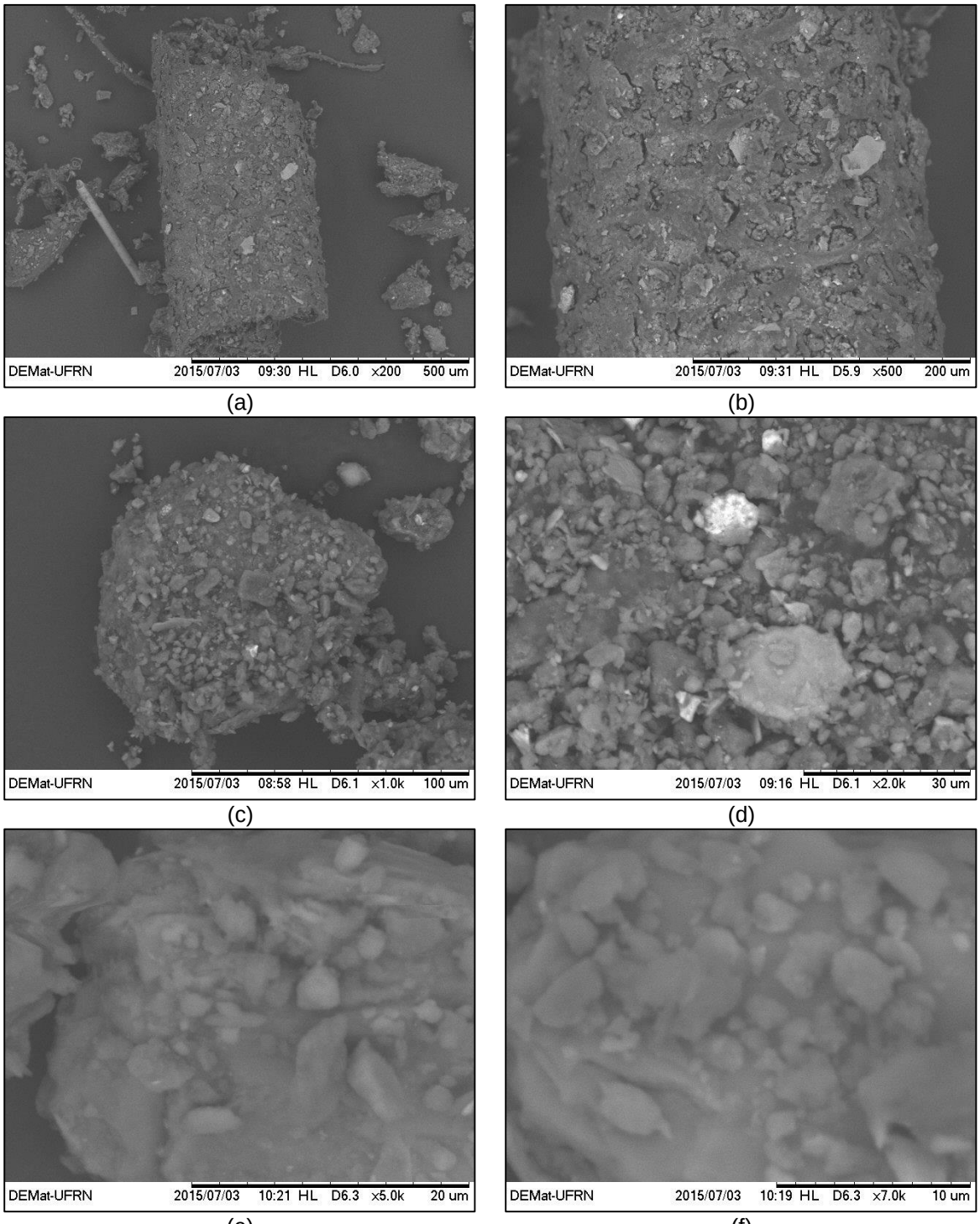



Figura 22 - Morfologia dos lodos (a) 01 com 200x (b) 01 com 500x (c) 02 com 1000x (d) 02 com 2000x (e) 03 com 5000x e (f) 03 com 7000x

Nas Figuras 22a e 22b observa-se que o lodo da primeira coleta possui a superfície mais irregular, formada por partículas angulares e com baixa esfericidade. Essa forma menos esférica do lodo 01 foi verificada, pois foi o lodo que passou menos tempo no moinho de bolas, por ainda não se saber o tempo ideal de moagem, e consequentemente foi menos desgastado. Nas Figuras 22c e 22d

observa-se o lodo da segunda coleta, com partículas maiores juntas conglomeradas com partículas pequenas. Alguns desses grãos possuem a mesma morfologia e as partículas são mais esféricas que as do lodo 01. E nas Figuras 22e e 22f, que mostram o lodo 3, as características são bem parecidas com as do lodo 2 e por terem um aumento maior, dá para verificar que realmente existem partículas menores que 10 µm no lodo.

O MEV junto com o EDS, além de visualizar o aspecto do lodo, consegue identificar os elementos químicos de uma determinada área ou de um determinado ponto. A Figura 23 mostra a área do lodo 1 que foi feito o EDS e a Tabela 3 mostra os elementos e suas quantidades na área. A Figura 24 mostra o ponto do lodo 2 que foi feito o EDS e a Tabela 4 mostra os elementos e suas quantidades no ponto. Através dessa análise, percebe-se que os pontos claros são compostos, em sua maioria, por ferro, silício e enxofre.

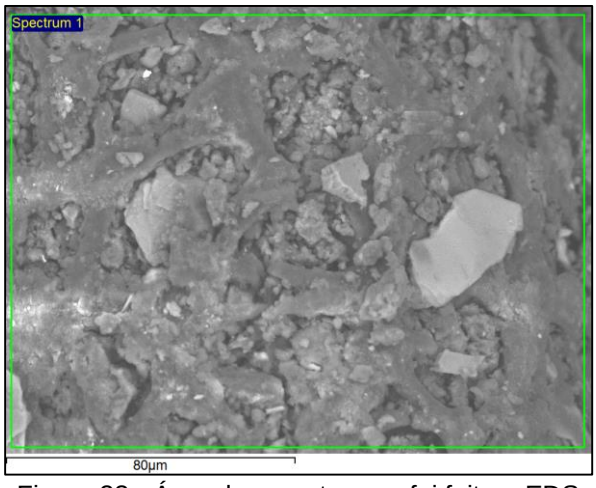



Figura 23 - Área da amostra que foi feito o EDS
Largura da imagem: 161,7 µm

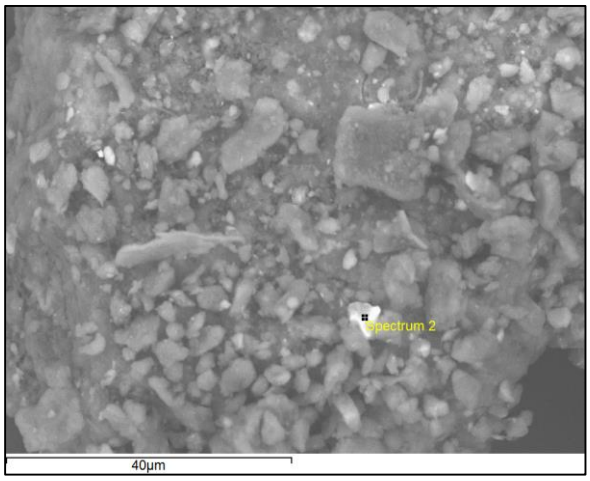



Figura 24 - Ponto da amostra que foi feito o EDS
Largura da imagem: 80,9 µm

Tabela 3 – Elementos da área analisada

| Elemento | (%) |
|---|---|
| Silício | 27,776 |
| Enxofre | 17,602 |
| Ferro | 17,420 |
| Alumínio | 15,828 |
| Zinco | 12,179 |
| Cálcio | 4,295 |
| Zircônio | 4,133 |
| Fósforo | 0,768 |

Tabela 4 - Elementos do ponto analisado

| Elemento | (%) |
|---|---|
| Ferro | 61,066 |
| Silício | 20,983 |
| Alumínio | 11,224 |
| Enxofre | 3,746 |
| Cálcio | 2,981 |

Além da quantificação, foi feito no Lodo 3, através do MEV com EDS, imagens que mostram, através de pontos, a distribuição dos elementos químicos. Essas imagens encontram-se no ANEXO C, onde dá para perceber a grande quantidade de enxofre e ferro no ponto claro. Identifica-se também que há grãos um pouco maiores de silício e que cálcio, alumínio, zircônio e fósforo são elementos mais dispersos na área analisada.

### 3.1.5 Classificação do Resíduo

De acordo com análise feita pela CAERN, o lodo da ETE do Baldo é um resíduo de classe II A, o que demonstra que não é perigoso, mas também não é inerte. Ou seja, não apresenta periculosidade, mas é biodegradável (NBR 10004, 2004).

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DAS CONCHAS

### 3.2.1 Granulometria a Laser

A granulometria a laser foi realizada em uma faixa de 0,10 a 500,00 µm com o material fino da concha passante da peneira 200, o mesmo diâmetro utilizado na fabricação da argamassa.

A Figura 25 mostra a curva granulométrica a laser do pó das conchas e indica que o seu diâmetro médio é 35,12 µm, com D10 (diâmetro a 10% acumulado) correspondendo a 2,36 µm, D50 de 31,34 µm e D90 de 68,25 µm, o que indica que o material é realmente muito fino. Como o diâmetro do cimento varia entre 10 e 50 µm, o pó das conchas pode preencher os vazios presentes na argamassa e melhorar o empacotamento da matriz cimentícia por ter aproximadamente 19% de partículas menores que 10 µm e 73% de partículas menores que 50 µm.

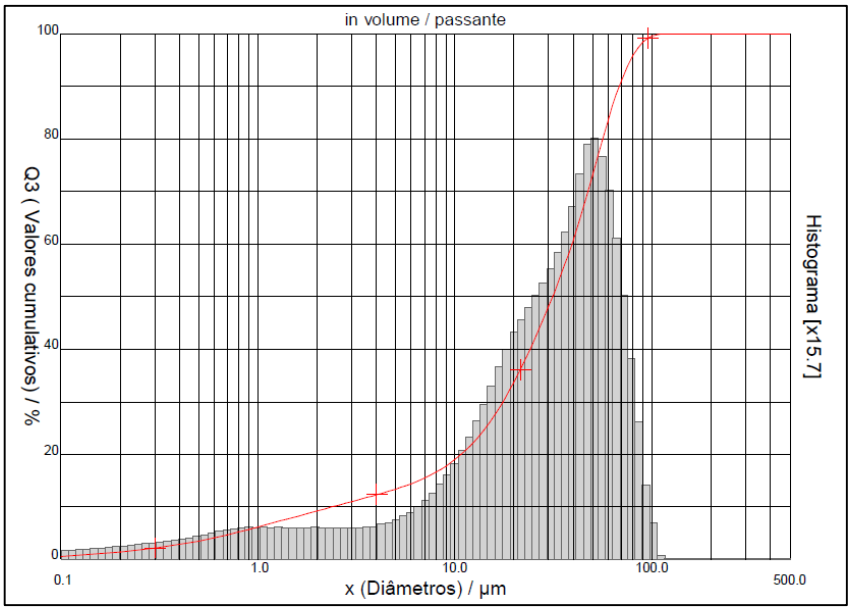


Figura 25 - Curva granulométrica do pó das conchas (média de 3 resultados)

### 3.2.2 Massa Específica e Unitária

As determinações de massa específica não podem diferir entre si em mais do que 0,01 g/cm³ (NBR NM 23, 2001) e os resultados de massa unitária de cada ensaio não deve apresentar desvio maior que 1% em relação à média (NBR NM 45, 2006). Foram feitas 3 réplicas de cada análise e esses valores foram atendidos ($3{,}14 \times 10^{-16}$ g/cm³ o maior desvio da massa específica e 1% o maior desvio de massa unitária), como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Massa específica e massa unitária do pó das conchas

| Material | Massa Específica (g/cm³) | Massa Unitária (g/cm³) |
|---|---|---|
| Pó das Conchas* | 2,90 ± 0,00 | 1,03 ± 0,01 |

*Média de 3 resultados

Os valores da cal foram: M.E. = 2,64 g/cm³ e M.U. = 0,42 g/cm³, o que mostra que a cal é bem mais leve que o pó de concha.

### 3.2.3 FRX, DRX e MEV com EDS

O resultado da análise química pelo FRX está apresentado na Tabela 6 e mostra que a concha é composta basicamente por óxido de cálcio, motivo que incentivou a sua utilização em substituição a cal.

Tabela 6 - Composição química do pó das conchas

| Composição Química | Nomenclatura | Massa (%) |
|---|---|---|
| CaO | Óxido de Cálcio - Cal | 82,739 |
| $Fe_2O_3$ | Óxido de Ferro III - Hematita | 7,304 |
| $Na_2O$ | Óxido de Sódio | 4,541 |
| $SiO_2$ | Dióxido de Silício - Sílica | 1,991 |
| SrO | Óxido de Estrôncio | 1,581 |
| $Al_2O_3$ | Óxido de Alumínio - Alumina | 0,758 |
| $SO_3$ | Trióxido de Enxofre - Óxido Sulfúrico | 0,485 |
| MnO | Óxido de Manganês II | 0,348 |
| $K_2O$ | Óxido de Potássio | 0,191 |
| $ZrO_2$ | Óxido de Zircônio | 0,064 |
| | TOTAL | 100,00 |

O resultado relativo à análise mineralógica pelo DRX do pó de concha está apresentado na Figura 26. Indica que o pó é composto predominantemente por fases cristalinas de Quartzo ($SiO_2$), Aragonita ($CaCO_3$), Ilvaita ($CaFe_{2,75}HSi_2O_9$) e Lepidocrocita (FeO(OH)). Portanto, pela análise mineralógica pode-se dizer que o pó das conchas é um material heterogêneo e predominantemente cristalino, devido à grande quantidade de picos. Os elementos encontrados nos cristais pelo DRX coincidem com os elementos do FRX, assegurando confiabilidade das análises.

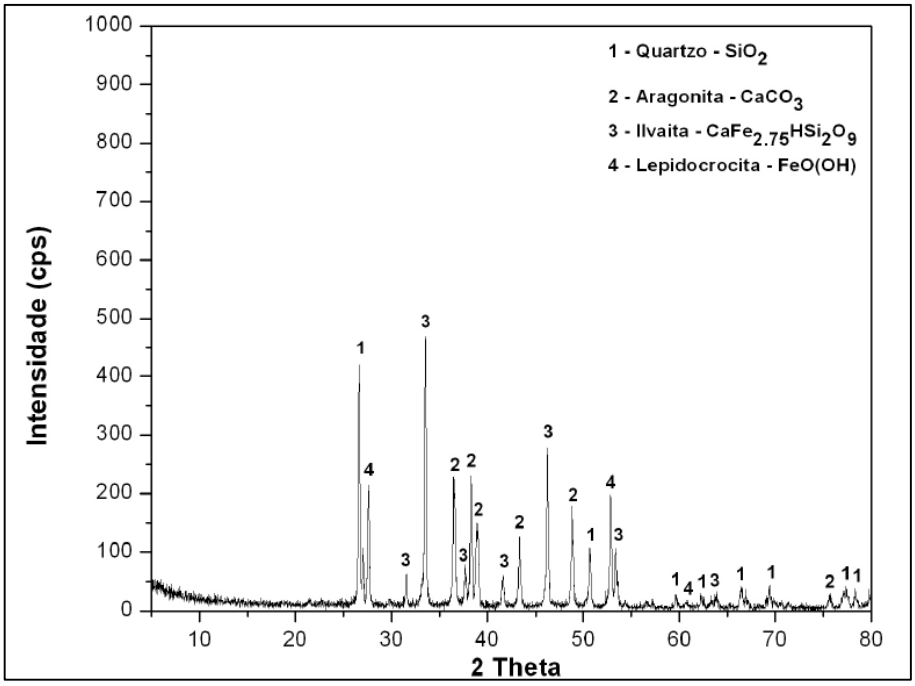


Figura 26 – Cristais encontrados na análise mineralógica do pó das conchas

A análise morfológica do pó de concha está apresentada nas Figuras 27a a 27f, onde é possível a visualização das dimensões e do aspecto do material, em

aumentos de 200, 400, 1000, 2000, 3000 e 5000 vezes. Observa-se que o pó possui a superfície irregular, formado por partículas angulares e com baixa esfericidade. Essa forma pouco esférica deve-se ao fato de a concha ser muito resistente e não se desgastar com facilidade no moinho de bolas.

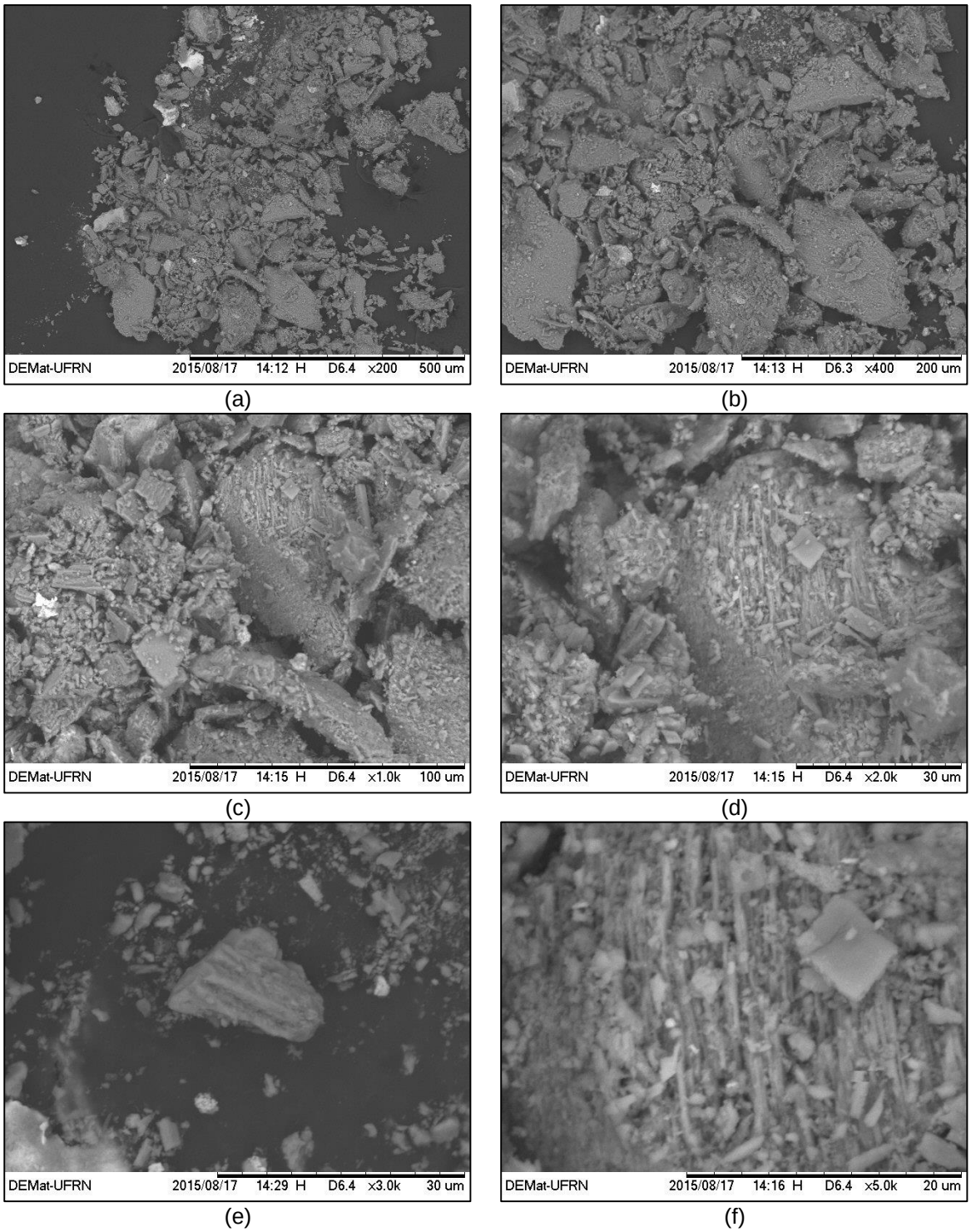



Figura 27 – Morfologia do pó das conchas (a) 200x (b) 400x (c) 1000x (d) 2000x (e) 3000x e (f) 5000x

O MEV junto com o EDS, além de visualizar o aspecto do pó das conchas, consegue identificar os elementos químicos de uma determinada área ou de um determinado ponto. A Figura 28 mostra a área que foi feito o EDS e a Tabela 7 mostra os elementos e suas quantidades na área, que são exatamente os mesmos elementos encontrados no FRX, mais o magnésio. A Figura 29 mostra o ponto que foi feito o EDS e a Tabela 8 mostra os elementos e suas quantidades. Esse ponto é composto basicamente por cálcio.

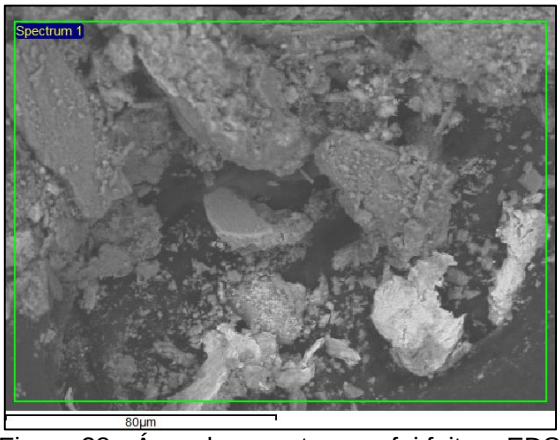


Figura 28 - Área da amostra que foi feito o EDS
Largura da imagem: 161,7 µm

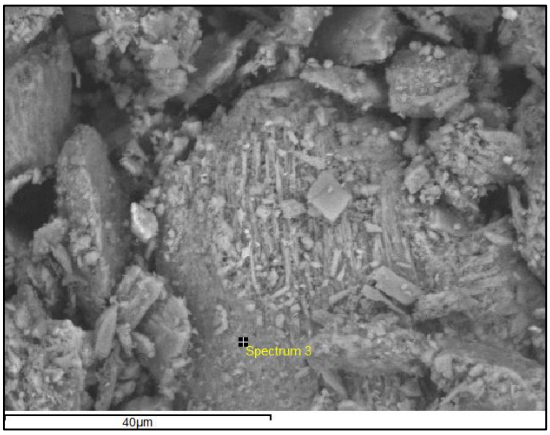


Figura 29 - Ponto da amostra que foi feito o EDS
Largura da imagem: 80,9 µm

Tabela 7 – Elementos da área analisada

| Elemento | (%) |
|---|---|
| Ferro | 53,204 |
| Cálcio | 30,060 |
| Manganês | 9,630 |
| Alumínio | 2,306 |
| Sódio | 1,812 |
| Silício | 1,329 |
| Magnésio | 1,024 |
| Estrôncio | 0,370 |
| Potássio | 0,150 |
| Enxofre | 0,091 |
| Zircônio | 0,024 |

Tabela 8 – Elementos do ponto analisado

| Elemento | (%) |
|---|---|
| Cálcio | 96,864 |
| Ferro | 2,322 |
| Estrôncio | 0,663 |
| Silício | 0,152 |

Além da quantificação, foi feito no pó de concha, através do MEV com EDS, imagens que mostram, através de pontos, a distribuição dos elementos químicos. Essas imagens encontram-se no ANEXO D, onde dá para perceber a grande quantidade cálcio. Identifica-se também que há grãos um pouco maiores de ferro nas áreas claras e que sódio, manganês e alumínio são elementos mais dispersos na área analisada.

## 3.3 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO

### 3.3.1 Teor de Umidade e Inchamento

O teor de umidade da areia foi calculado (3,11% ± 0,07%), mas toda a areia foi seca em estufa antes de ser utilizada para precisar apenas do inchamento (1,27) para calcular o consumo do agregado. O inchamento de 1,27 quer dizer que a areia tem seu volume aumentado em 27% quando entra em contato com a água, precisando levar em conta essa diferença para dosar o traço, pois incide sobre a massa unitária do agregado.

### 3.3.2 Granulometria por Peneiramento

Através da granulometria por peneiramento, determinou-se a dimensão máxima característica da areia utilizada (4,8 mm) e o módulo de finura (2,61), que está na zona ótima de utilização. A Figura 30 mostra a curva granulométrica da areia.

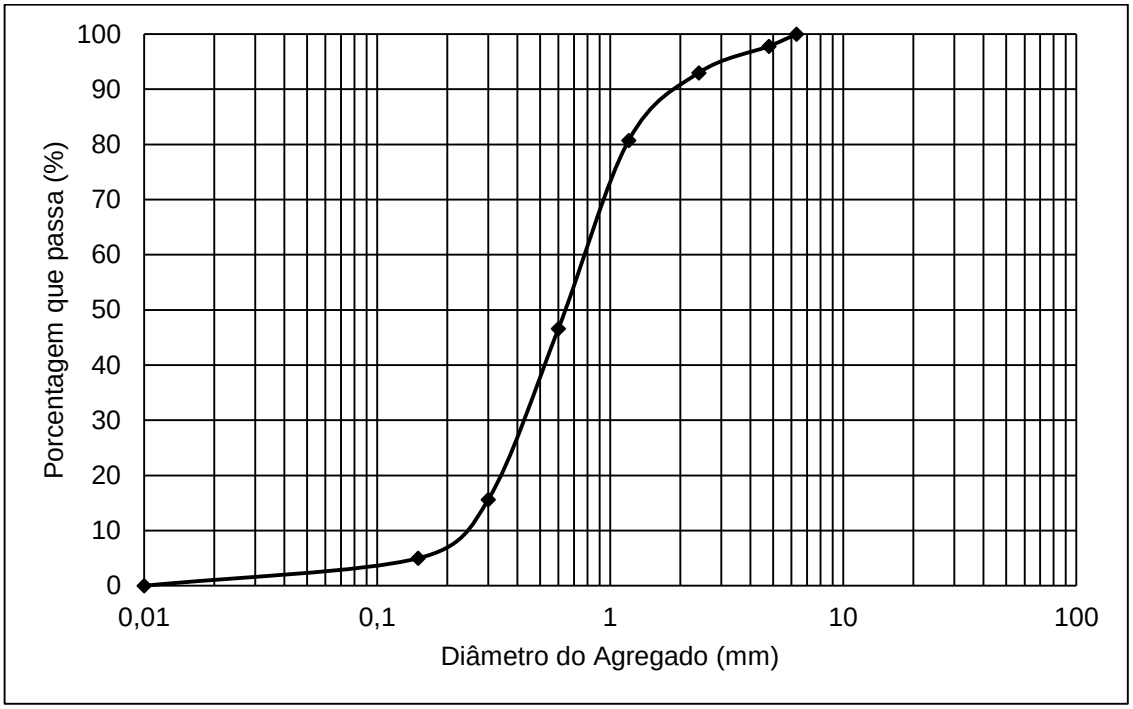



Figura 30 - Curva granulométrica da areia*
*Média de 3 resultados

### 3.3.3 Massa Específica e Unitária

As determinações de massa específica não podem diferir entre si em mais do que 0,05g/cm³ (NBR NM 52, 2009) e os resultados de massa unitária de cada ensaio não deve apresentar desvio maior que 1% em relação à média (NBR NM 45, 2006). Foram feitas 3 réplicas de cada análise, a determinação para massa específica foi atendida (0,0016 g/cm³ o maior desvio), mas a da massa unitária não foi (2% o maior desvio), como mostra a Tabela 9. Por estar usando um agregado comercial, sem tanto controle de qualidade, esse desvio foi aceito para a pesquisa.

Tabela 9 - Massa específica e massa unitária da areia

| Material | Massa Específica (g/cm³) | Massa Unitária (g/cm³) |
|---|---|---|
| Areia* | 2,61 ± 0,00 | 1,47 ± 0,03 |

*Média de 3 resultados

Os valores do cimento foram: M.E. = 3,15 g/cm³ e M.U. = 1,04 g/cm³.

## 3.4 ENSAIOS DAS ARGAMASSAS FABRICADAS – LODO DE ESGOTO

### 3.4.1 Argamassa no Estado Fresco

De acordo com Lima (2010), a cal reage quimicamente com muitos constituintes orgânicos do lodo, alterando a composição química do material, como a imobilização dos metais pesados e a redução dos valores de nitrogênio com a volatilização da amônia decorrente da elevação do pH, mas a matéria orgânica não é destruída. Durante a fabricação do traço com lodo, quando os materiais começaram a serem misturados, houve liberação de odor muito forte e desagradável, que se deve ao fato da amônia presente no lodo ter sido liberada ao entrar em contato com a cal que possui pH elevado por ser alcalino. A cal em contato com água e lodo resulta em uma reação exotérmica que volatiliza a amônia devido ao aumento de temperatura e de pH ocasionado pela reação (MÄDER NETTO *et al*., 2003).

A dosagem do traço com lodo teve por princípio manter o mesmo índice de consistência da argamassa de referência (250mm±5), para serem comparadas. Os

valores encontrados no ensaio serviram como base para a determinação da quantidade de água a ser utilizada tanto no traço de 40% de substituição, quanto no traço de 25% de adição.

A argamassa de referência de Bruno *et al.* (2015) teve o fator a/c = 1,4 para atingir o índice de consistência, enquanto no traço de substituição o fator água cimento foi de 5,1 e no traço de adição o fator água cimento foi de 3,8, valores muito altos que diminuíram a resistência da argamassa. Tanta água teve que ser adicionada devido ao lodo ter um alto teor de absorção e grande quantidade de finos, fatores que diminuíam o espalhamento da argamassa.

A densidade de massa das argamassas com lodo é menor do que a argamassa padrão, fato que se deve ao lodo ser um material leve. A argamassa de referência se enquadra na classe D5, enquanto a de 40% de substituição está na classe D3 e a de 25% de adição está na classe D4, de acordo com a NBR 13281 (2005). Essa norma classifica as argamassas de D1 a D6, sendo D1 as que tem menor densidade de massa no estado fresco e D6 as mais densas. O teor de ar incorporado também é menor por causa do melhor empacotamento dos grãos presentes na argamassa, o que diminui o volume de vazios.

A Tabela 10 mostra os resultados das argamassas no estado fresco.

Tabela 10 - Resultados das argamassas no estado fresco

| | **Índice de Consistência** | **Densidade de Massa** | **Teor de Ar Incorporado** |
|---|---|---|---|
| Referência (BRUNO *et al.*, 2015) | 255 mm | 2,0 g/cm³ | 5 % |
| 40% de subs. de areia por lodo | 255 mm | 1,5 g/cm³ | 1 % |
| 25% de adição de lodo | 250 mm | 1,7 g/cm³ | 2 % |

### 3.4.2 Argamassa no Estado Endurecido

Os valores de resistência à compressão e à tração na flexão das argamassas aos 28 dias estão apresentados na Figura 31. A argamassa de referência se enquadra nas classes P5 e R2, enquanto a de 40% de substituição e a de 25% de adição estão nas classes P1 e R1 (piores classes possíveis), de acordo com a NBR 13281 (2005). Essa norma classifica as argamassas de P1 a P6 e de R1 a R6, indicando o 1 as que tem menor resistência e o 6 as mais resistentes.

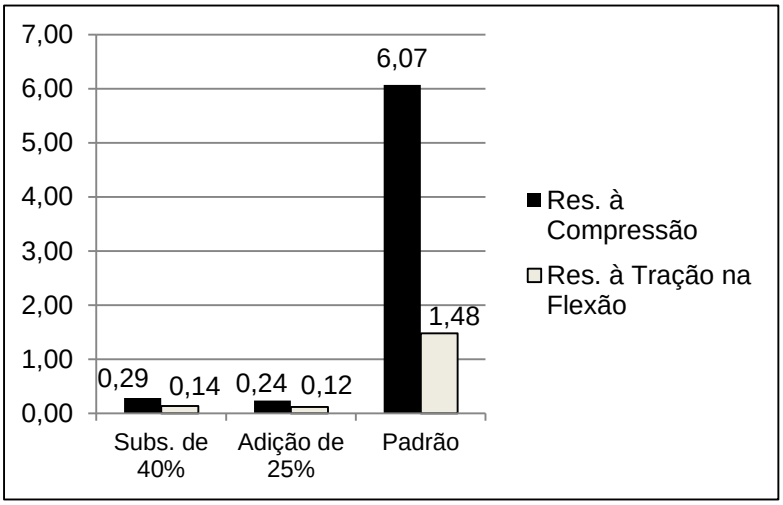


Figura 31 - Resistências das argamassas em MPa aos 28 dias

Aos 92 dias, 91 dias mais 24 horas de tolerância de acordo com a NBR 13279 (2005), foram verificadas as resistências das argamassas com lodo (Tabela 11). Não foi verificada a resistência da argamassa padrão nessa idade, mas percebe-se que os traços com lodo aos 92 dias ainda tem resistência muito menor do que a resistência da argamassa padrão aos 28 dias, não se chegou nem a 1 MPa.

Tabela 11 - Resistências das argamassas com lodo aos 92 dias

| | **Compressão (MPa)** | **Tração na Flexão (MPa)** |
|---|---|---|
| 40% de subst. de areia por lodo | 0,40 ± 0,03 | 0,26 ± 0,03 |
| 25% de adição de lodo | 0,39 ± 0,01 | 0,21 ± 0,02 |

Valores de resistência tão baixos se devem a grande quantidade de água adicionada aos traços com lodo para obter a consistência ideal, o que prejudicou bastante todo o seu desempenho.

Os valores do coeficiente de capilaridade e densidade de massa das argamassas aos 28 dias estão apresentados na Tabela 12. A argamassa de referência se enquadra nas classes M6 e C6, enquanto a de 40% de substituição e a de 25% de adição estão nas classes M4 e C1, de acordo com a NBR 13281 (2005). Essa norma classifica as argamassas de M1 a M6 e de C1 a C6, sendo o M1 as que tem menor densidade de massa aparente no estado endurecido, o M6 as mais densas, o C1 as que tem menor coeficiente de capilaridade, e o C6 as com maior coeficiente. Os traços com lodo estarem na classe C1 é o único ponto positivo dessas argamassas, pois elas não absorvem muita água do ambiente, fato devido à quantidade de água adicionada já ser muito alta e não a uma qualidade do lodo.

Tabela 12 - Capilaridade e Densidade de massa aos 28 dias

| | **Capilaridade ($g/dm^2.min^{1/2}$)** | **Densidade de Massa ($kg/m^3$)** |
|---|---|---|
| Referência (BRUNO *et al.* 2015) | 10,1 | 1.820 |
| 40% de substituição de areia por lodo | 0,4 | 1.423 |
| 25% de adição de lodo | 0,6 | 1.591 |

A classificação geral das argamassas de acordo com a NBR 13281 (2005) está apresentada na Tabela 13, que mostra a inferioridade de qualidade dos traços que contém lodo apenas seco, ainda com matéria orgânica, em relação ao traço padrão (cimento, cal e areia).

Tabela 13 - Classificação das argamassas

| **Argamassa** | **Classificação** |
|---|---|
| Referência (BRUNO *et al.* 2015) | P5 - M6 - R2 - C6 - D5 |
| 40% de substituição de areia por lodo | P1 - M4 - R1 - C1 - D3 |
| 25% de adição de lodo | P1 - M4 - R1 - C1 - D4 |

O “P” está relacionado a resistência à compressão, o “M” a densidade de massa aparente no estado endurecido, o “R” a resistência à tração na flexão, o “C” a coeficiente de capilaridade e o “D” a densidade de massa no estado fresco.

Dessa forma, conclui-se que não foi possível adicionar o lodo de esgoto em argamassa de cimento Portland no traço 1:1:7, visto que o lodo reagiu negativamente com a cal, gerando um odor que atrapalhou muito a fabricação da argamassa e que a sua grande absorção de água diminuiu a qualidade da argamassa, comprometendo as propriedades no estado fresco e endurecido. Mas, de acordo com os resultados obtidos, sugere-se testar a utilização do lodo incinerado, em proporções menores e em um traço sem cal.

## 3.5 ENSAIOS DAS ARGAMASSAS FABRICADAS – PÓ DAS CONCHAS DE LILIU

### 3.5.1 Argamassa no Estado Fresco

A dosagem do traço com pó de conchas teve por princípio manter o mesmo índice de consistência da argamassa de referência (250mm±5). Os valores encontrados no ensaio serviram como base para a determinação da quantidade de água a ser utilizada tanto no traço padrão, quanto no traço de 100% de substituição de cal por pó de concha e no traço de cimento e areia.

A argamassa de referência teve o fator a/c = 1,3 para atingir o índice de consistência, enquanto no traço de substituição o fator água cimento foi de 1,1 e no traço de apenas cimento e areia o fator água cimento também foi de 1,1, valores que mostram que a cal exige mais água que o pó das conchas.

A densidade de massa das argamassas não teve grandes diferenças e todas se enquadram na classe D6, pela NBR 13281 (2005). Essa norma classifica as argamassas de D1 a D6, sendo D1 as que tem menor densidade de massa no estado fresco e D6 as mais densas. O teor de ar incorporado foi menor com a cal e maior com apenas cimento e areia, mostrando que o empacotamento dos grãos é melhor com a cal, em seguida com o pó das conchas e por último com apenas cimento e areia. Com relação à retenção de água, a argamassa com pó de concha foi a que teve o pior desempenho, mas ainda sim tem uma boa classificação (U5). As outras duas argamassas se enquadram na classe U6. A NBR 13281 (2005) classifica as argamassas de U1 a U6, sendo U1 as que retêm menos água e U6 as que retêm mais.

A Tabela 14 mostra os resultados das argamassas no estado fresco.

Tabela 14 - Resultados das argamassas no estado fresco

| | **Índice de Consistência (mm)** | **Densidade de Massa (g/cm³)** | **Teor de Ar Incorporado (%)** | **Retenção de Água (%)** |
|---|---|---|---|---|
| C+Cal+Areia | 253 ± 3,57 | 2,1 ± 0,01 | 3 ± 0,66 | 98,10 ± 0,18 |
| C+Pó de Concha+A | 252 ± 2,33 | 2,1 ± 0,01 | 6 ± 0,63 | 93,47 ± 3,95 |
| C+A* | 251 ± 2,46 | 2,0 ± 0,04 | 8 ± 1,61 | 96,72 ± 0,92 |

*Cimento + Areia

### 3.5.2 Argamassa no Estado Endurecido

Os valores de resistência à compressão, à tração na flexão e de aderência à tração das argamassas aos 28 dias estão apresentados na Figura 32. As argamassas sem pó de concha se enquadram nas classes P5 e R4, enquanto a com pó de concha está nas classes P6 e R5, de acordo com a NBR 13281 (2005), desempenho melhor do que as argamassas tradicionais estudadas. Essa norma classifica as argamassas de P1 a P6 e de R1 a R6, indicando o 1 as que tem menor resistência e o 6 as mais resistentes. Com relação à resistência potencial de aderência à tração, todas as argamassas estudadas entraram na melhor classe, A3,

sendo a argamassa com pó de concha a que obteve a maior resistência (0,59 ± 0,08 MPa). A NBR 13281 (2005) classifica as argamassas de A1 a A3, sendo A1 as menos resistentes e A3 as mais resistentes.

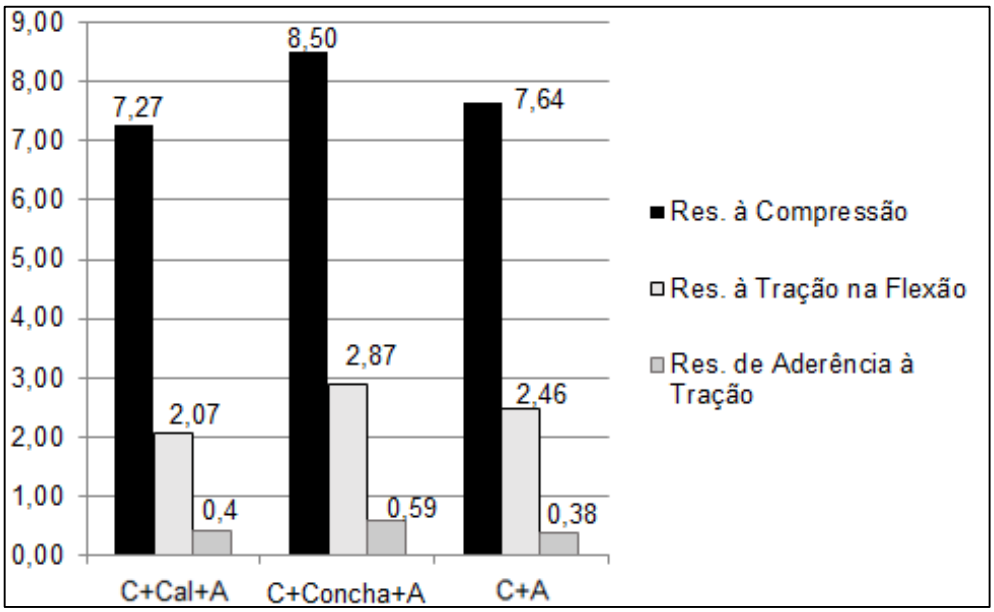


Figura 32 - Resistências das argamassas em MPa aos 28 dias

Aos 07 e aos 91 dias, também foram verificadas as resistências das argamassas (Tabela 15). Percebe-se que independente da idade, o traço com pó de concha teve melhor desempenho, seguido do traço de cimento e areia e por último o traço de referência (cimento, cal e areia), com exceção da resistência à tração na flexão aos 91 dias, que o traço de cimento e areia foi um pouco melhor.

Tabela 15 - Resistências das argamassas aos 7 e aos 91 dias

| | **Resistência à Compressão (MPa)** | | **Resistência à Tração na Flexão (MPa)** | |
|---|---|---|---|---|
| | 07 dias | 91 dias | 07 dias | 91 dias |
| C+Cal+A | 4,45 ± 0,33 | 8,08 ± 1,16 | 0,95 ± 0,61 | 2,76 ± 0,17 |
| C+Pó de Concha+A | 5,54 ± 0,22 | 11,02 ± 0,53 | 2,09 ± 0,13 | 3,12 ± 0,19 |
| C+A | 4,75 ± 0,34 | 9,87 ± 0,53 | 1,70 ± 0,20 | 3,43 ± 0,12 |

A argamassa com pó de concha aos 07 e aos 91 dias foi a que obteve maior resistência à compressão e menor desvio padrão, o que reforça sua qualidade superior nesse aspecto.

O aumento da resistência à compressão com o passar do tempo está resumido na Figura 33, assim como o da resistência à tração na flexão está apresentado na Figura 34.

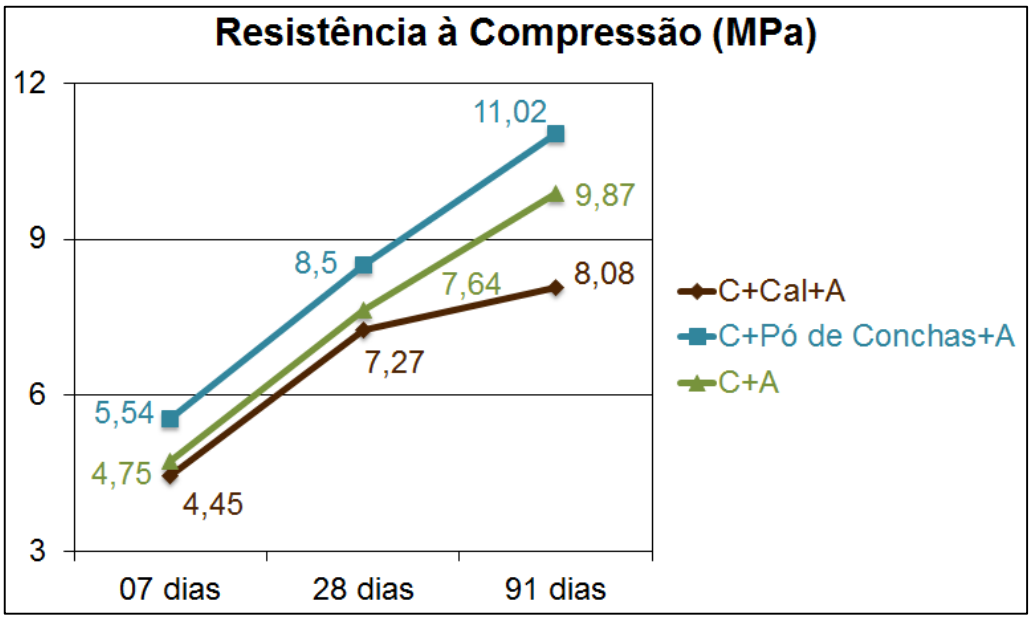



Figura 33 - Aumento da resistência à compressão em relação ao tempo

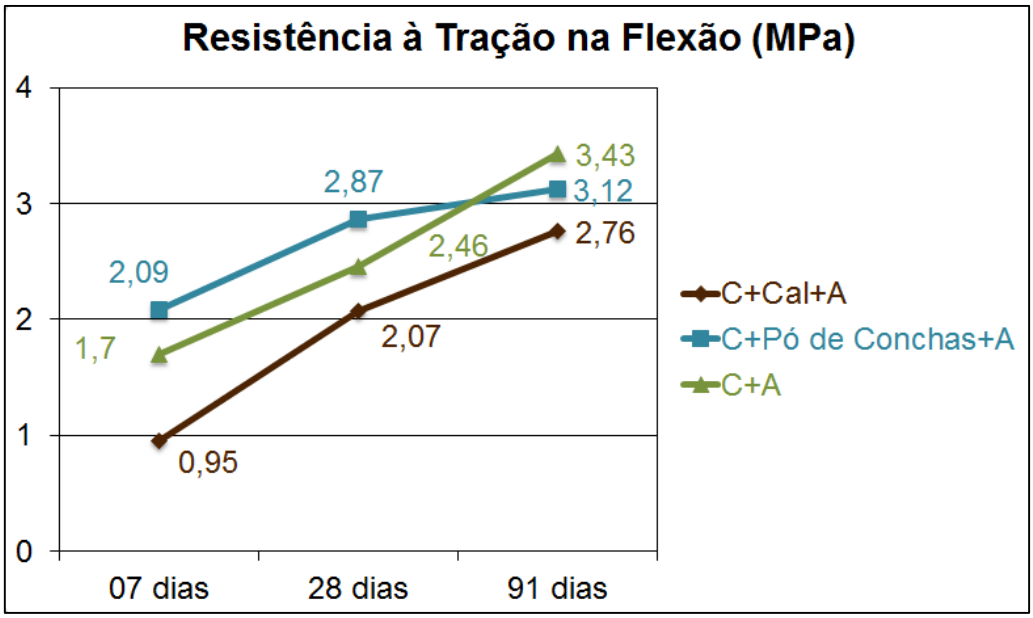



Figura 34 - Aumento da resistência à tração na flexão em relação ao tempo

Os valores do coeficiente de capilaridade e densidade de massa das argamassas aos 28 dias estão apresentados na Tabela 16. A argamassa de referência e a com pó de concha se enquadram nas classes M6 e C1, enquanto a de cimento e areia está nas classes M6 e C2, de acordo com a NBR 13281 (2005).

Essa norma classifica as argamassas de M1 a M6 e de C1 a C6, sendo o M1 as que tem menor densidade de massa aparente no estado endurecido, o M6 as mais densas, o C1 as que tem menor coeficiente de capilaridade, e o C6 as com maior coeficiente. O traço com pó de concha está nas melhores classificações. A Figura 35 comprova os resultados do coeficiente de capilaridade, o traço de cimento e areia (1 CA) é o que absorve mais água e o traço de cimento, cal e areia (1 Cal) é o que absorve menos.

Tabela 16 - Capilaridade e Densidade de massa aos 28 dias

| | **Capilaridade ($g/dm^2.min^{1/2}$)** | **Densidade de Massa ($kg/m^3$)** |
|---|---|---|
| C+Cal+A | 0,97 ± 0,15 | 1.900 ± 44 |
| C+Pó de Concha+A | 1,47 ± 0,06 | 1.914 ± 18 |
| C+A | 1,60 ± 0,20 | 1.886 ± 18 |

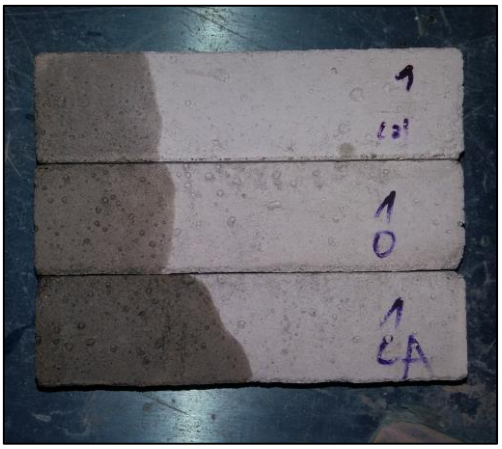



Figura 35 – Corpos de prova após ensaio de absorção de água por capilaridade

A análise morfológica da argamassa de cimento, cal e areia está apresentada no ANEXO E, da argamassa de cimento, pó de concha e areia está no ANEXO F e da argamassa de cimento e areia está no ANEXO G. Nesses anexos é possível a visualização das dimensões e do aspecto de cada argamassa, em aumentos de 40, 400, 1000, 2000, 2500 e 5000 vezes. Observa-se que a argamassa com cal tem mais poros, a argamassa de apenas cimento e areia tem poucos grãos pequenos e a argamassa com o pó das conchas foi a que mais formou cristais na hidratação do cimento (ANEXO F com 5000x), apresentando menos vazios e sendo mais compacta, o que resulta na sua maior resistência.

O MEV junto com o EDS, além de visualizar o aspecto das argamassas, consegue identificar os elementos químicos de uma determinada área ou de um determinado ponto. Os resultados do MEV com EDS da argamassa de cimento, cal e areia estão apresentados no ANEXO H, da argamassa de cimento, pó de concha e areia está no ANEXO I e da argamassa de cimento e areia está no ANEXO J. Nota-se que os elementos principais de todas as argamassas são o cálcio e o silício e elementos como alumínio, enxofre e potássio aparecem em pequenas proporções nas áreas e nos pontos analisados.

A classificação geral das argamassas de acordo com a NBR 13281 (2005) está apresentada na Tabela 17, que mostra a boa qualidade do traço que contém concha moída de Liliu.

Tabela 17 - Classificação das argamassas

| **Argamassa** | **Classificação** |
|---|---|
| Cimento, cal e areia (Referência) | P5 - M6 - R4 - C1 - D6 - U6 - A3 |
| 100% de substituição de cal por pó de concha | P6 - M6 - R5 - C1 - D6 - U5 - A3 |
| Cimento e areia | P5 - M6 - R4 - C2 - D6 - U6 - A3 |

O “P” está relacionado a resistência à compressão, o “M” a densidade de massa aparente no estado endurecido, o “R” a resistência à tração na flexão, o “C” a coeficiente de capilaridade o “D” a densidade de massa no estado fresco, o “U” a retenção de água e o “A” a resistência potencial de aderência à tração.

Dessa forma, conclui-se que é possível adicionar o pó das conchas em argamassa de cimento Portland no traço 1:1:7, visto que o material reagiu bem, melhorando ou deixando igual a qualidade da argamassa (suas propriedades no estado fresco e endurecido). Com o aumento da resistência, pode-se pensar inclusive em estudar a viabilidade de utilização da concha de Liliu em concreto.

## 4. CONCLUSÕES

Sobre a viabilidade da utilização do lodo de esgoto seco e moído em argamassa, pode-se concluir que:

- O lodo de esgoto utilizado foi bastante fino (51% menor que 50 µm) e composto em sua maioria por matéria orgânica;
- Nas proporções utilizadas, não se encontra viabilidade técnica da utilização do lodo, devido este material diminuir drasticamente a resistência e, em virtude da alta quantidade de matéria orgânica, reagir com os outros componentes da argamassa, liberando um odor muito forte e desagradável;
- A utilização da cal nos traços pode ter sido o fator preponderante para a reação química que liberou o odor;
- Para atingir o índice de consistência da trabalhabilidade ideal, foi necessário aumentar o fator água cimento devido às partículas de lodo absorvem muita água. Tal fato foi o principal para a diminuição da resistência.

Sobre a viabilidade da utilização do pó das conchas de Liliu em argamassa, pode-se concluir que:

- O pó utilizado das conchas moídas é bastante fino (73% menor que 50 µm) e composto em sua maioria por cálcio, fatores que diminuíram a necessidade de água, para um índice de consistência determinado, e que melhoram a resistência da argamassa;
- Há grande possibilidade de utilizar a concha de Liliu em pó na argamassa, pois esse resíduo melhorou a maioria das propriedades do material fabricado, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido;
- Após um estudo mais avançado, propõe-se a implantação de projetos sociais com fornecimento de britador e moinho de bolas aos pescadores de Liliu, a fim de que as conchas descartadas possam servir nas construções e reformas das casas da localidade. A transformação das conchas descartadas em pó pode se tornar uma alternativa sustentável para as comunidades;
- Também surge a possibilidade de fazer um estudo de viabilidade para utilizar as conchas com granulometria maior para diminuir o tempo delas no moinho.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quanto à caracterização dos resíduos estudados, o lodo de esgoto foi considerado fino (51% menor que 50 µm) e composto em sua maioria por matéria orgânica, fator que faz dele um material que absorve muita água e consequentemente diminui a resistência da argamassa. Já o pó das conchas utilizado foi bastante fino (73% menor que 50 µm) e composto em sua maioria por cálcio, fatores que diminuíram a necessidade de água e que melhoram a resistência da argamassa.

Quanto ao uso do pó dos resíduos incorporado em argamassas, observou-se que o lodo de esgoto da ETE do Baldo, nas proporções utilizadas, não apresenta viabilidade técnica, devido este material diminuir drasticamente a resistência e, em virtude da alta quantidade de matéria orgânica, reagir com os outros componentes da argamassa, liberando um odor muito forte e desagradável. De outro modo, observou-se que existe possibilidade técnica e significativa viabilidade prática de utilizar o pó das conchas de Liliu, pois esse material melhorou a maioria das propriedades da argamassa, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido.

Assim, considerando a importância e abrangência do tema, sugere-se, para aprofundamento da utilização de resíduos em materiais de construção, estudar a incorporação de lodo incinerado às argamassas, ou aplicação do lodo seco em proporções reduzidíssimas em um traço sem cal.

Por fim, em relação a utilização das conchas, sugere-se analisar a durabilidade das argamassas fabricadas com o pó das conchas, estudar a viabilidade de utilizar as conchas (em argamassa e/ou concreto) com granulometria maior, para diminuir o tempo delas no moinho. Sugere-se, ainda, uma avaliação sobre possíveis projetos sociais nas cidades que pescam o molusco, englobando a aquisição de britador e moinho de bolas comunitários, a fim de que as conchas do Liliu possam servir nas construções e reformas das casas e outras edificações da localidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


ANDREOLI, C. V.; CHERUBINI, C.; FERREIRA, A. C.; TELES, C. R. Avaliação de parâmetros para secagem e desinfecção do lodo de esgoto em condições artificiais (Estufa). **Sanare, Revista Técnica da Sanepar,** v. 15 n. 15, p. 77-86, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR: 6467:** Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006. (Corrigida em setembro de 2009 e Confirmada em maio de 2011).

_____. **NBR 10004:** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004. (Confirmada em novembro de 2014).

_____. **NBR: 12653:** Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. (Corrigida em março de 2015).

_____. **NBR: 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005. (Confirmada em julho de 2014).

_____. **NBR: 13277:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005. (Confirmada em dezembro de 2014).

_____. **NBR: 13278:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005. (Confirmada em dezembro de 2014).

_____. **NBR: 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005. (Confirmada em dezembro de 2014).

_____. **NBR: 13280:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005. (Confirmada em dezembro de 2014).

_____. **NBR: 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005. (Confirmada em dezembro de 2014).

_____. **NBR: 15258:** Argamassa para revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005. (Confirmada em dezembro de 2014).

_____. **NBR: 15259:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005. (Confirmada em dezembro de 2014).

_____. **NBR NM: 23:** Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM: 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. (Confirmada em maio de 2012).

_____. **NBR NM: 46:** Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003. (Confirmada em novembro de 2011).

_____. **NBR NM: 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM: 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. (Confirmada em novembro de 2011).

AZEVEDO, M. **Tintas:** os velhos moinhos trocam as bolas pelos contínuos. Química e Derivados, 2004. Disponível em: <http://www.quimica.com.br/pquimica/27347/tintas-os-velhos-moinhos-trocam-bolas-pelos-continuos/>. Acesso em: 03 abr. 2015.

BATISTA, B. B.; SANTOS, M. V. dos; SILVA, H. R. T.; ORTIZ, P. E.; MARCONDES, L. F. T. **"Bloco verde":** reaproveitamento de resíduos da construção civil e de conchas de ostras e mexilhões. In: 16º Concurso Falcão Bauer, Câmara Brasileira da Indústria da Construção Civil - Premiando a Qualidade. 2009, 14 p.

BELMONTE, E. dos P. **Espectrometria por fluorescência de raios X por reflexão total:** um estudo simulado utilizando o método de Monte Carlo. Rio de Janeiro, 2005. 164 f. Tese (mestrado em ciências em engenharia nuclear), Programa de pós-graduação de engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

BRUNO, G. B.; FARIAS, E. C. de; ANJOS, M. A. S. dos; SILVA, A. W.; MELO, A. R. de; MEDEIROS, L. G. S. de. Estudo comparativo do desempenho e da durabilidade de argamassa de revestimento convencional e argamassa de revestimento com RCC. **Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto.** 16 f., out. 2015.

CAERN. **ETE do Baldo – Natal, RN**. Disponível em: <http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/caern/DOC/DOC000000000017758.PDF>. Acesso em: 23 nov. 2014.

CHIERIGHINI, D.; BRIDI, R.; ROCHA, A. A. da; LAPA, K. R. Possibilidades do uso das conchas de moluscos. **3° International Workshop – Advances in Cleaner Production**. São Paulo. 5 p., maio 2011.

COSTA, F. M. S. da. **Estudo da viabilidade da utilização de cinza de lodo de esgoto como adição em argamassa de cimento Portland.** Natal, 2014. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

DUARTE, L. da C.; JUCHEM, P. L.; PULZ, G. M.; BRUM, T. M. M. de; CHODUR, N.; LICCARDO, A.; FISCHER A. C.; ACAUAN, R. B. Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros. **Pesquisas em Geociências**, v. 30, p. 3-15, 2003.

DURANTE INGUNZA, M. P.; DUARTE, A. da C. L.; NASCIMENTO, R. M. Use of Sewage Sludge as Raw Material in the Manufacture of Soft-Mud Bricks. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, p. 852-856, 2011.

FARIA, P.; AMADO, M. P.; CARTAXO, F. Produção local de materiais para a sustentabilidade da construção. **CLME – 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia.** Maputo, 10 p., ago.-set. 2011.

FERRAZ, D. L. de M.; CUNHA, P. E. V.; ARAUJO, A. L. C.; FERNANDES NETO, C. Avaliação do desempenho operacional de uma ETE em escala real, composta de reator UASB seguido de tanque de aeração com biodiscos. **XII Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2014, Natal, RN. Anais do XII SIBESA. Rio de Janeiro: ABES, 2014. v. 1.

FONTES, C. M. A. **Potencialidades da cinza de lodo de Estações de Tratamento de Esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento Portland.** 2003. 143f. Tese (Mestre em Ciências) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

GOOGLE EARTH. **Vista geral da ETE do Baldo – Natal, RN**. 2016. Disponível em: < https://www.google.com.br/maps/@-5.7897863,-35.2118509,240m/data=!3m1!1e3>. Acesso em: 15 jan. 2016.

ILHENFELD, R. G. K. Higienização do lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I.; ILHENFELD, R. G. K. (Org.). **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura.** Curitiba: PROSAB, 1999. Cap. 4, p. 27-40.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. Aproveitamento e destino final do lodo. In:_____. **Tratamento de esgotos domésticos**. 6. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011. Cap. 18, p. 449-466.

KHANBILVARD, R.; AFSHARI, S. Sludge Ash as Fine Aggregate for Concrete Mix. **Journal of Environmental Engineering**. v. 121, n. 9 (Set), p. 633-638, 1995.

LESSA , G. T. **Contribuição ao estudo da viabilidade da utilização do lodo de estação de tratamento biológico de esgoto misto na construção civil**. Porto Alegre, 2005. 135f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

LIMA, M. R. P. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto**. São Paulo, 2010. 284 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LOFFI, S. B. **Estudo sobre o comportamento de uma argamassa incorporada com cascas de ostras.** Palhoça, 2014. 66 f. TCC (trabalho de conclusão de curso da graduação em engenharia ambiental e sanitária), Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2014.

MÄDER NETTO, O. S.; ANDREOLI, C. V.; CARNEIRO, C.; TAMANINI, C. R.; FRANÇA, M. Estudo das variações de pH no lodo caleado em função de diferentes dosagens de óxido de cálcio e teores de umidade. **22° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. 6 p. Joinville, set. 2003.

MALVERN. **Difração laser.** Disponível em: <http://www.malvern.com/br/products/technology/laser-diffraction/>. Acesso em: 04 abr. 2015.

MEINL, C. M. **Relatório Granulometria Laser.** 04 f. 2011. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/94303059/Relatorio-de-Granulometria-Laser>. Acesso em: 04 abr. 2015.

MUSSE, C. L. B. **Avaliação das potencialidades da cinza de lodo de esgoto da ETE Goiânia como adição mineral na produção de argamassa de cimento Portland.** Goiânia, 2007. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2005.

NOS, G. **Projeto de produtos:** moinho de bolas de baixo custo. Lajedo, 2011. 43 f. Monografia (Bacharelado em Design), - Centro Universitário Univates, Lajedo, 2011.

PEDROZA, E. da C. L.; MOREIRA, E. A.; CAVALCANTI, P. F. F. ; ALÉM SOBRINHO, P.; ANDREOLI, C. V.; VAN HAANDEL, A. Aplicação de leitos para secagem de lodo gerado em estações de tratamento de esgotos. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Biossólidos**: alternativas de uso de resíduos do saneamento. Rio de Janeiro, ABES, 2006. Cap. 5, p. 109-158.

PETRIELLI, F. A. da S. **Viabilidade técnica e econômica da utilização comercial das conchas de ostras descartadas na localidade do Ribeirão da Ilha, Florianópolis, Santa Catarina.** Florianópolis, 2008. 128 f. Dissertação (mestrado em engenharia ambiental), Programa de pós-graduação em engenharia ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PODKOWA, L. D.; FLIEGNER, A. P.; FUCILINI, S. T.; MINUZZI, P., MÜLLER, M.; DARONCO, G. Alternativas para a empregabilidade do lodo na construção civil. **XXIII Seminário de Iniciação Científica, Salão do Conhecimento UNIJUÍ.** 7 p. 2015.

POGGIANI, F.; SILVA, P. H. M. da; GUEDES, M. C. Uso do lodo de esgoto em plantações florestais. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Biossólidos**: alternativas de uso de resíduos do saneamento. Rio de Janeiro, ABES, 2006. Cap. 6, p. 159-188.

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

SILVA, M. I. T. da. **Difração de raios-x aplicada na caracterização de uma amostra mineral**. UFCG, 2013.

SILVEIRA, M. M.; FORMAGINI, S.; PINTO, J. R.; LAZAROTTO, E. F. **Argamassas produzidas com cinzas de lodo de estação de tratamento de esgoto em substituição parcial ao cimento Portland.** Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2009, Feira de Santana/BA, 2009. 14p.

TAY, J.H.; SHOW, K.Y., Municipal Wastewater Sludge as Cementitious and Blended Cement Materials, **Cement and Concrete Composites**, v. 16(Set), p. 39-48, 1994.

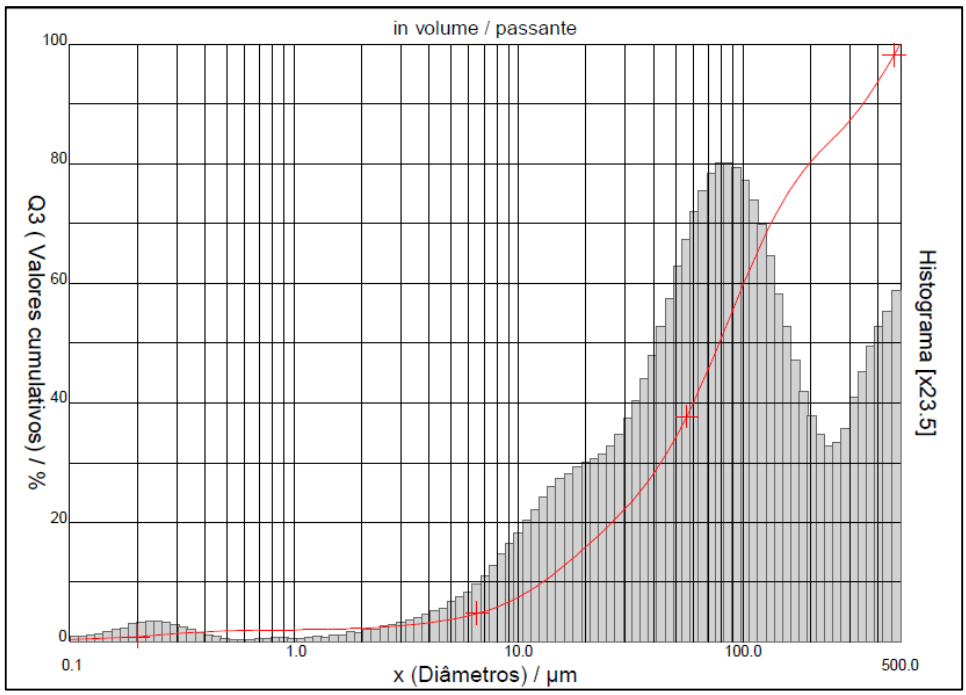
TAY, J.H.; SHOW, K.Y.; HONG, S.Y. Potential Reuse of Wastewater Sludge for Innovative Aplications in Construction Industry, **Bulletin of the College of Engineering, N.T.U.,** n. 86 (Out), p. 103-112, 2002.

TRISTÃO, F. A.; CALDERÓN, B. R. S.; REMBISKI, F. D. Utilização das conchas de mexilhão na fabricação da cal para produção de argamassas históricas. **ELECS – V Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano sobre edificações e Comunidades Sustentáveis.** Recife, 2 p., out. 2009.

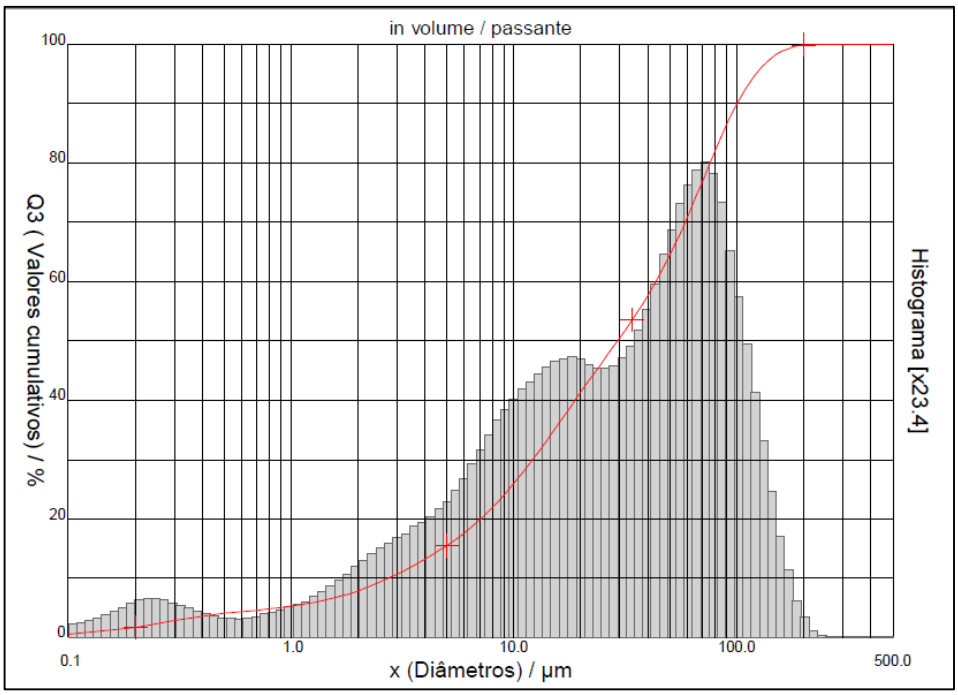
YOON, G.-L.; KIM, B.-T.; KIM, B.-O.; HAN, S.-H. Chemical-mechanical characteristics of crushed oyster-shell. **Waste Management**. n. 23, p. 825-834. 2003.

## ANEXOS

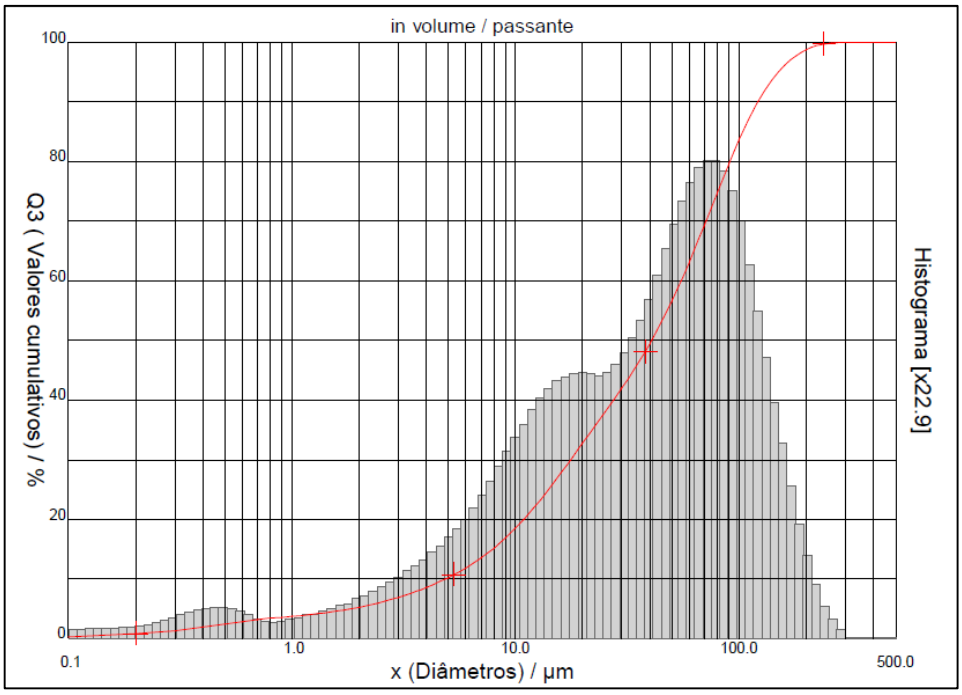
ANEXO A – Curva Granulométrica a Laser do Lodo




(a) Lodo 01 - Média de 4 resultados (4 réplicas da coleta 01)

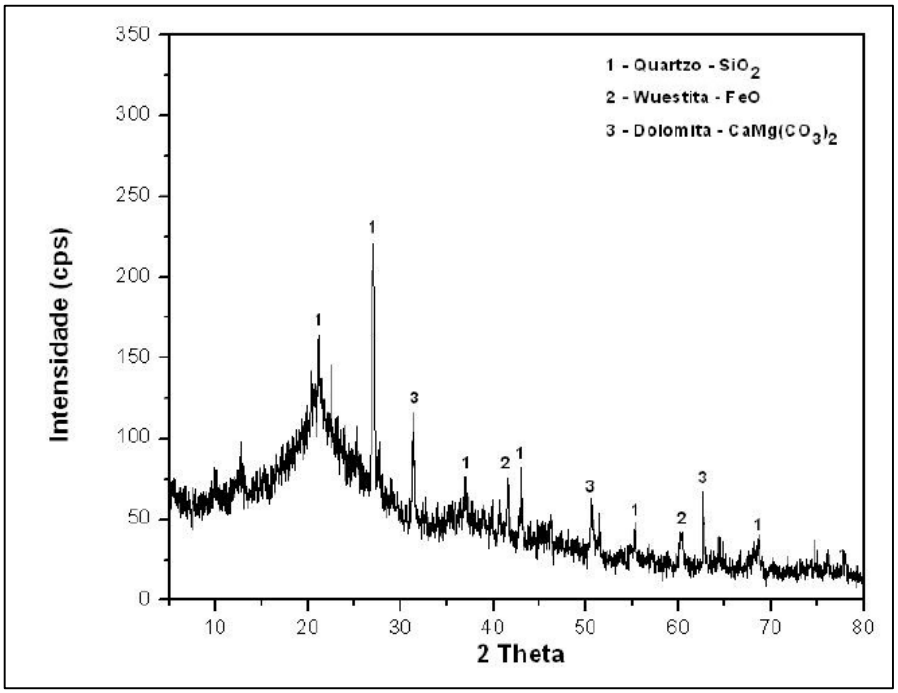



(b) Lodo 02 - Média de 4 resultados (4 réplicas da coleta 02)

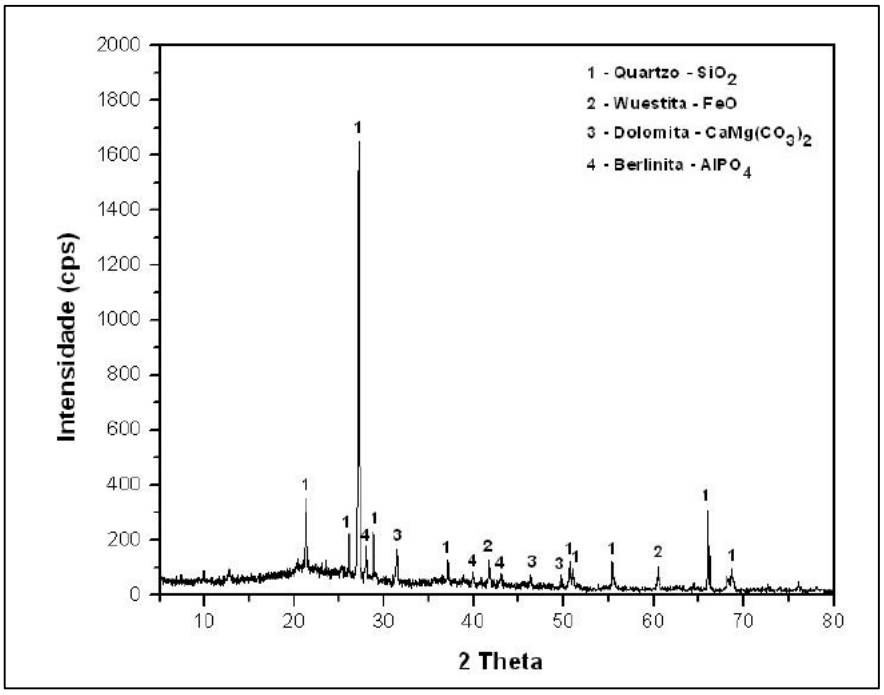



(c) Lodo 03 - Média de 4 resultados (4 réplicas da coleta 03)

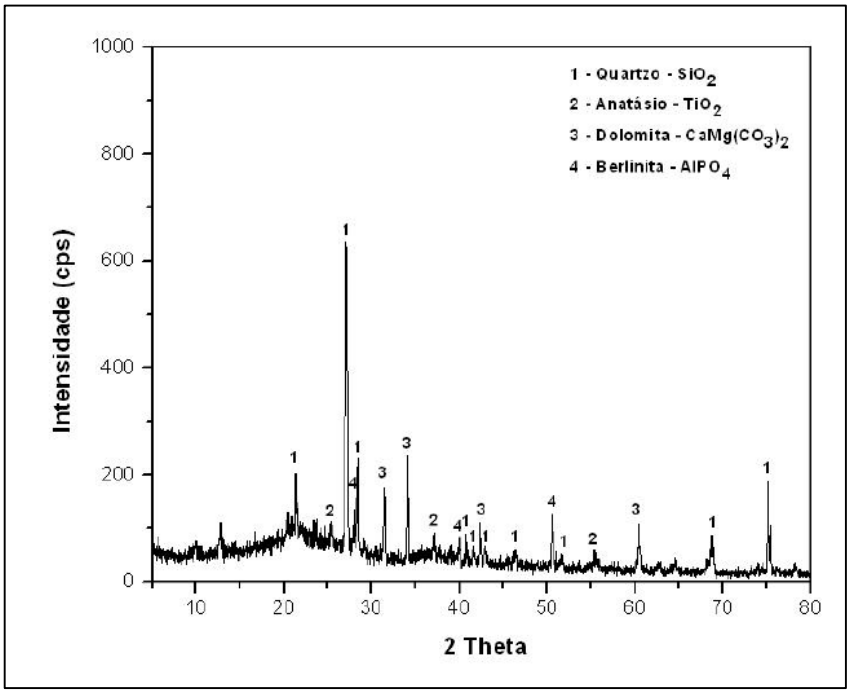
## ANEXO B – Cristais Encontrados na Análise Mineralógica do Lodo




(a) Lodo 01

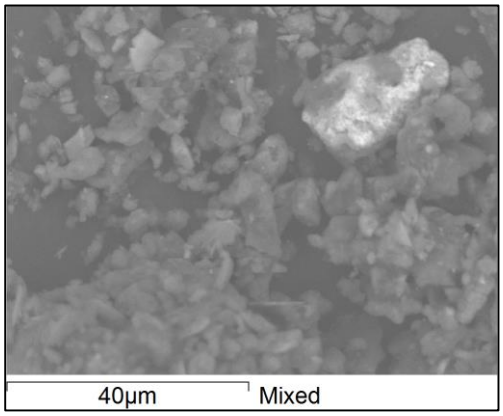



(b) Lodo 02

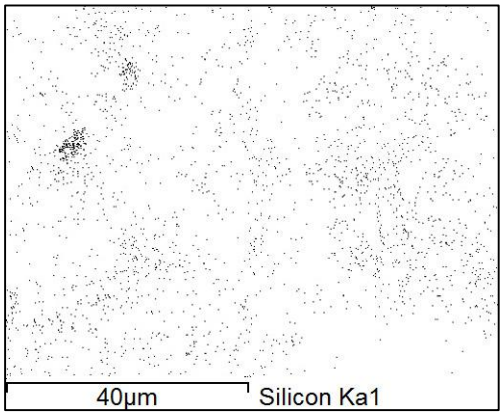



(c) Lodo 03

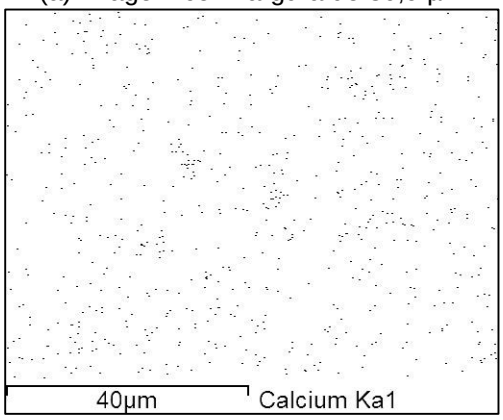
ANEXO C – Distribuição dos Elementos Químicos no Lodo 3



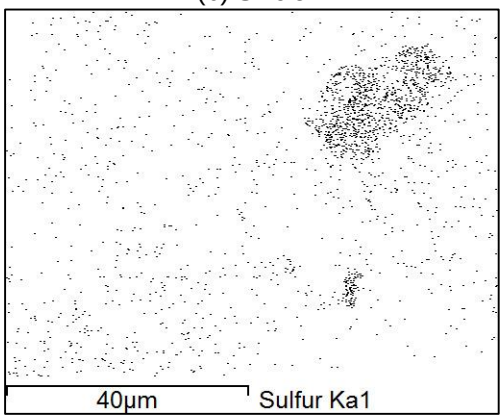

(a) Imagem com largura de 80,9 µm



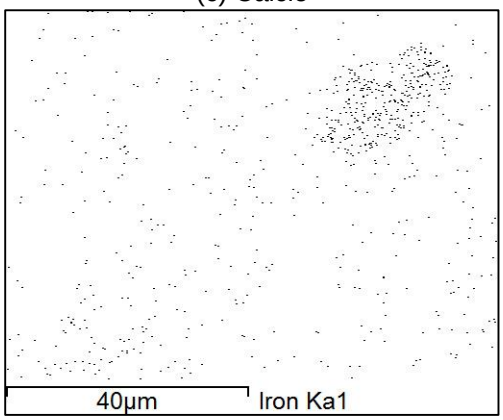

(b) Silício



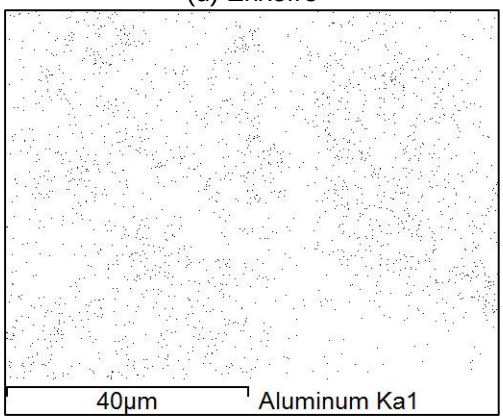

(c) Cálcio



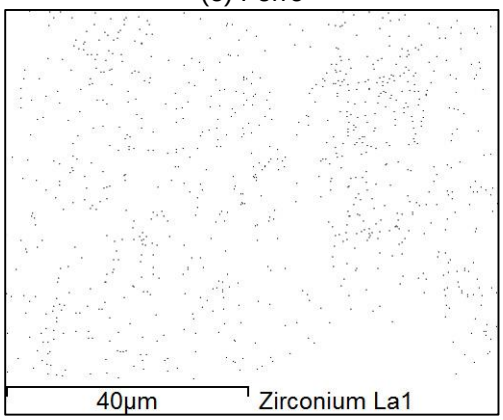

(d) Enxofre



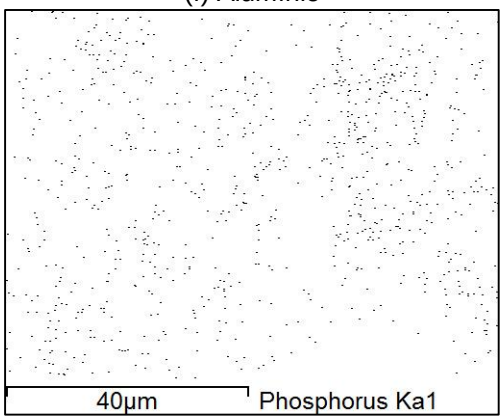

(e) Ferro




(f) Alumínio

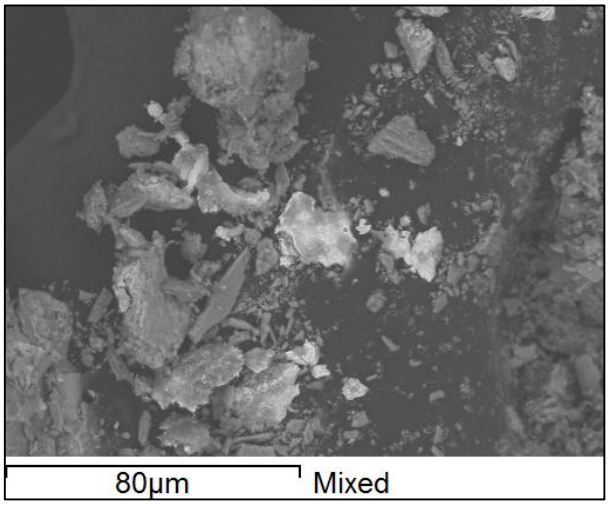



(g) Zircônio

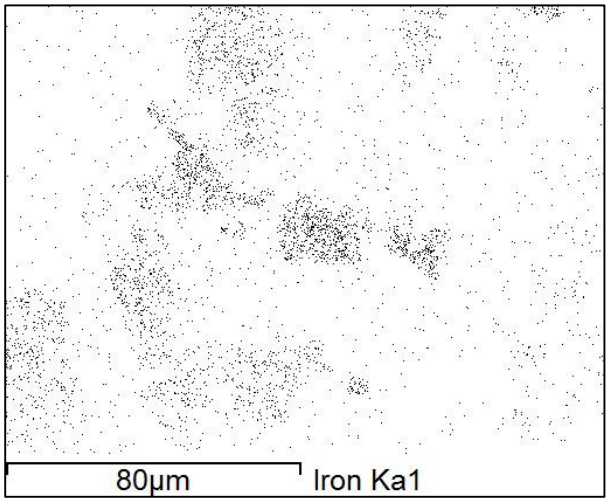



(h) Fósforo

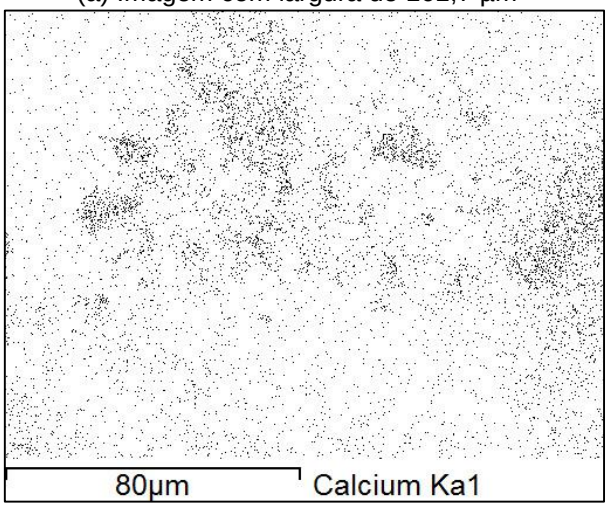
ANEXO D – Distribuição dos Elementos Químicos no Pó das Conchas



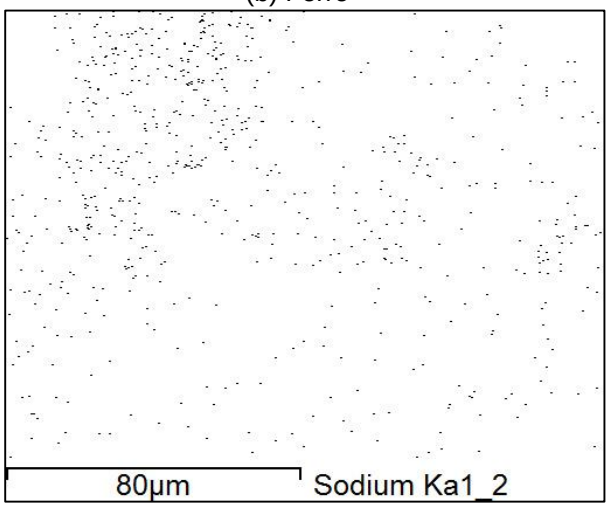

(a) Imagem com largura de 161,7 µm



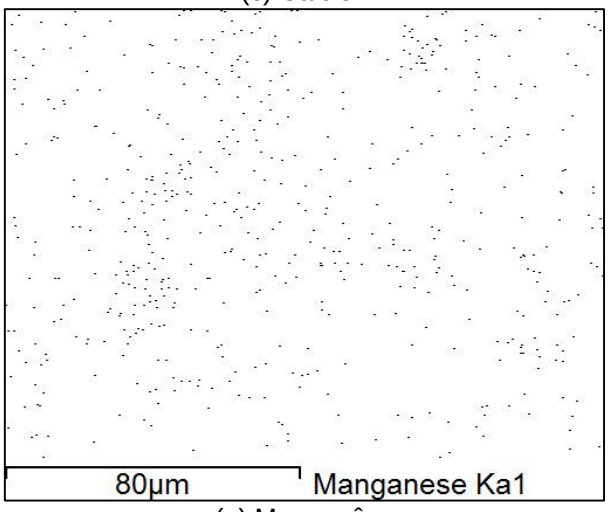

(b) Ferro



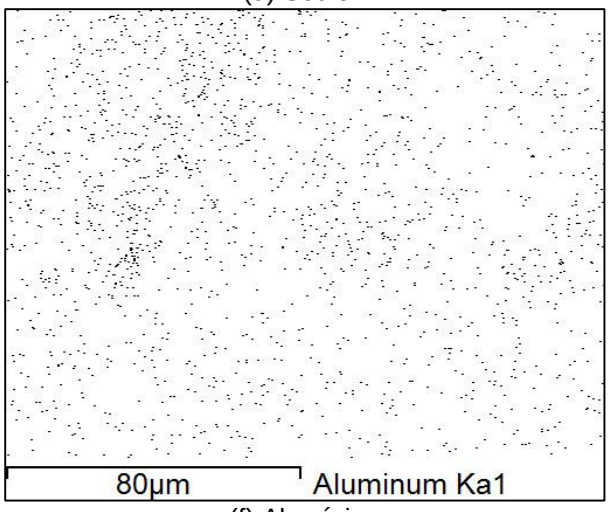

(c) Cálcio




(d) Sódio

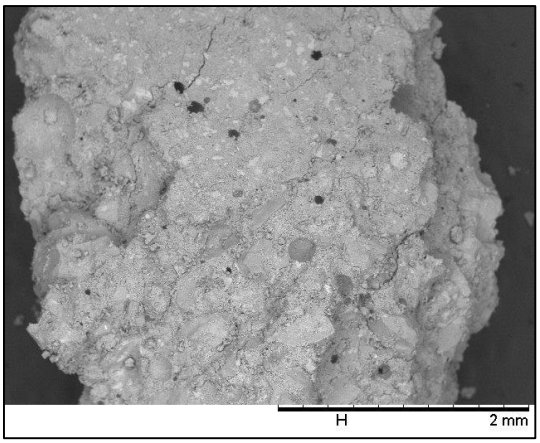



(e) Manganês

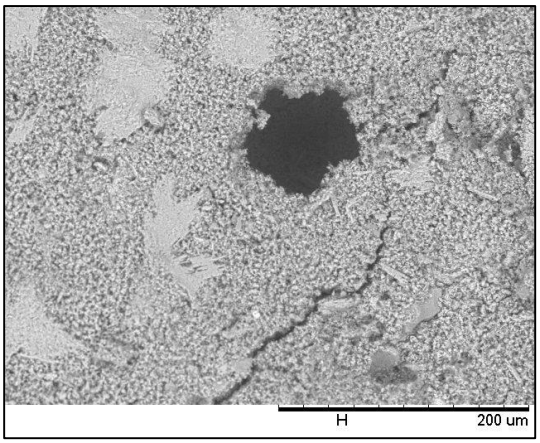



(f) Alumínio

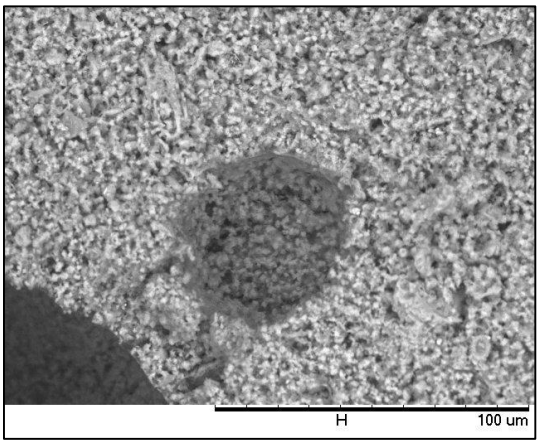
ANEXO E – Morfologia da Argamassa de Cimento, Cal e Areia



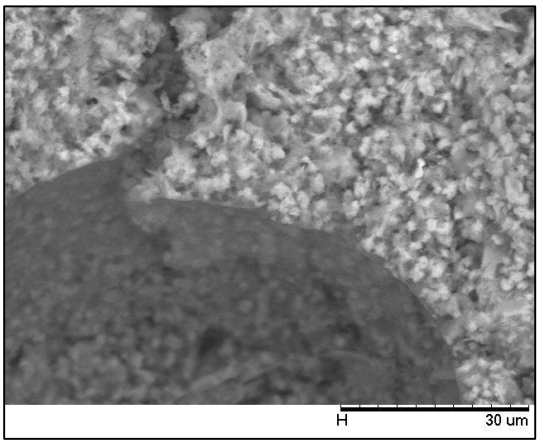

40x



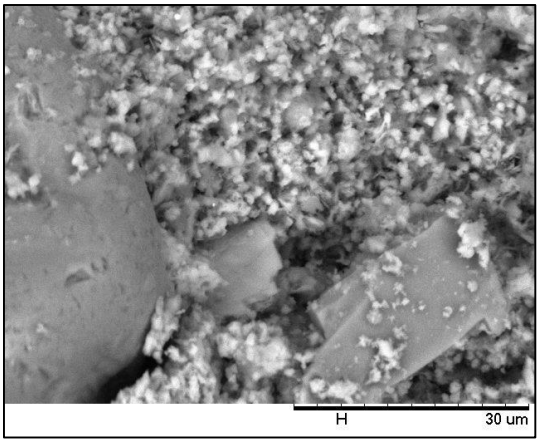

400x



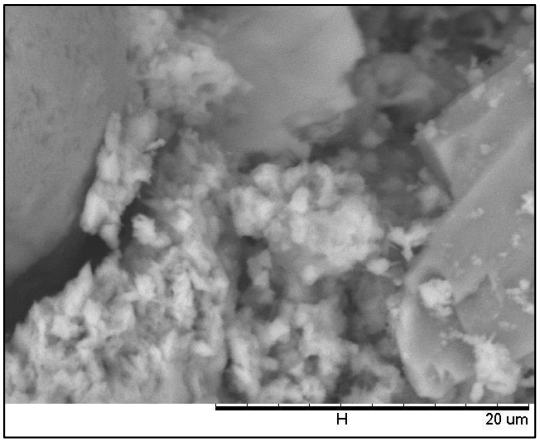

1000x




2000x

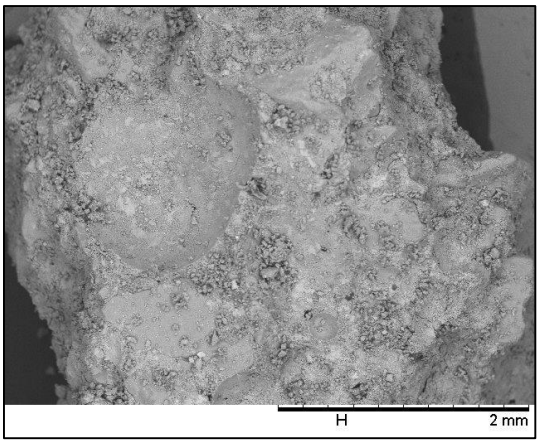



2500x

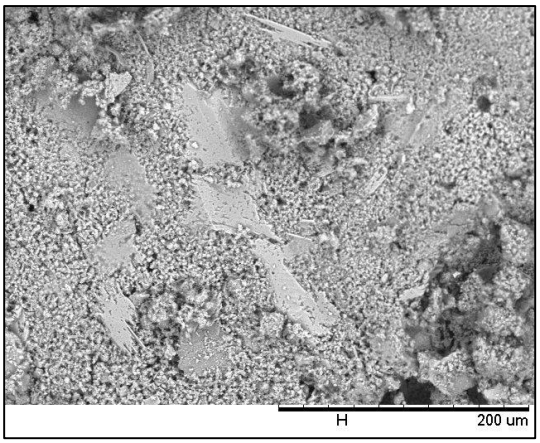



5000x

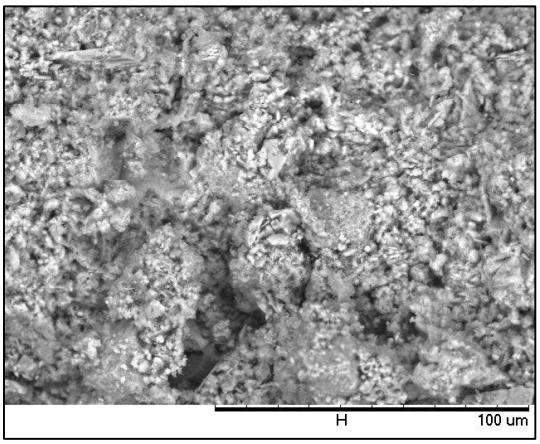
ANEXO F – Morfologia da Argamassa de Cimento, Pó de Concha e Areia



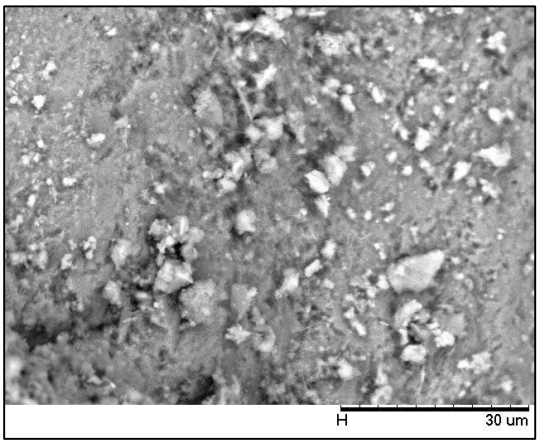

40x



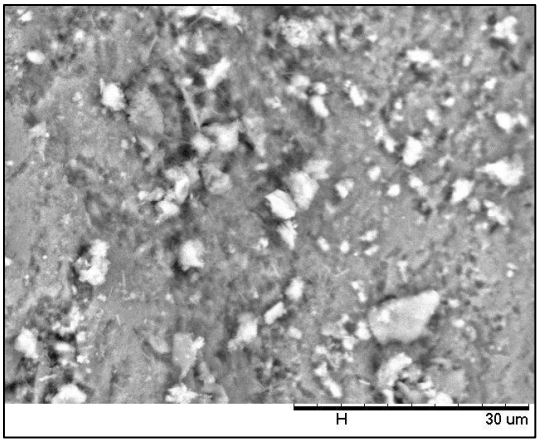

400x



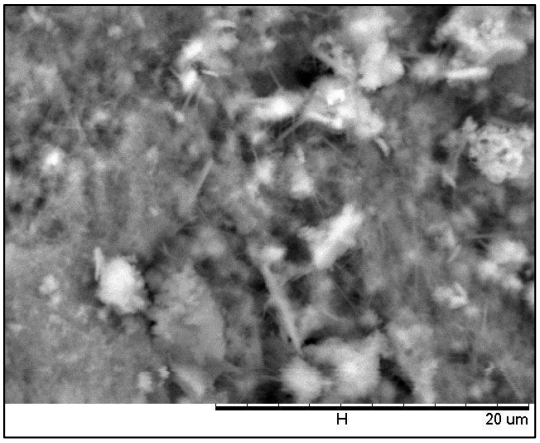

1000x




2000x

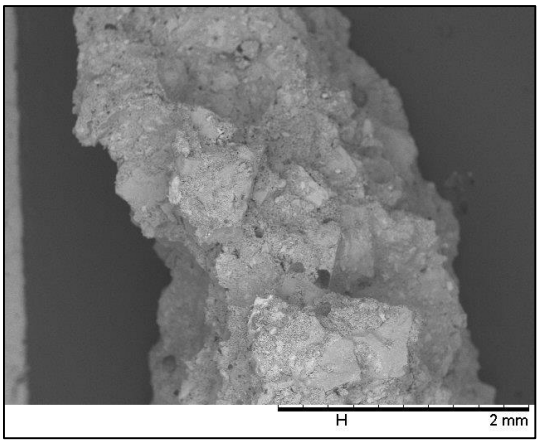



2500x

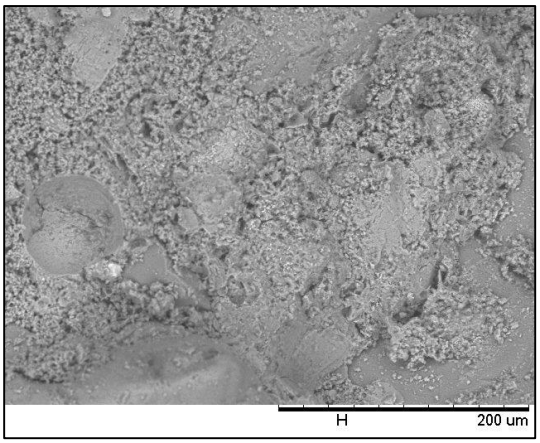



5000x

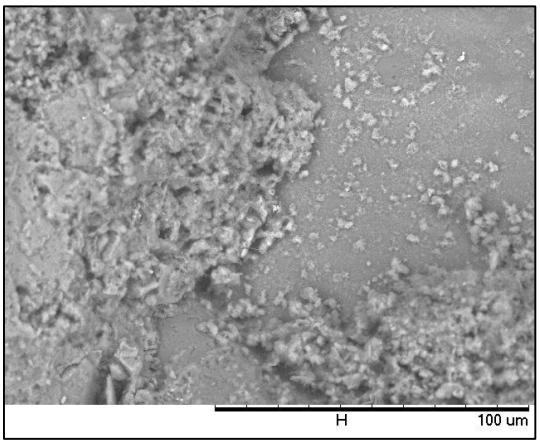
ANEXO G – Morfologia da Argamassa de Cimento e Areia



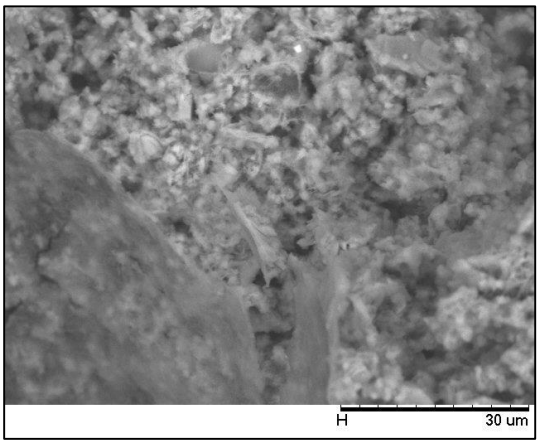

40x



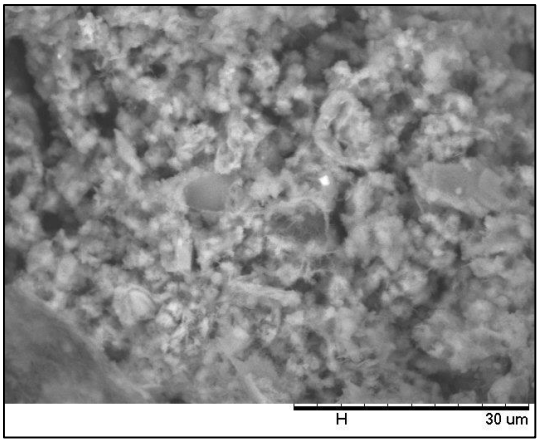

400x



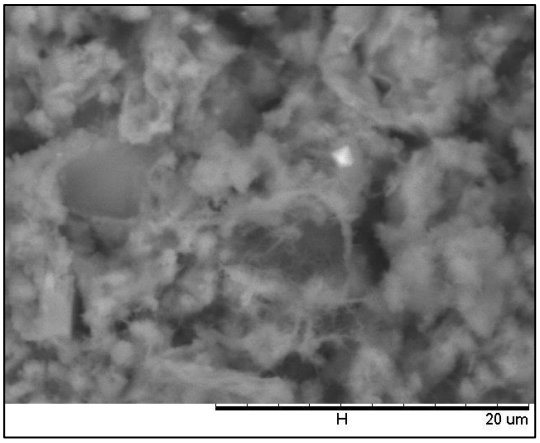

1000x




2000x

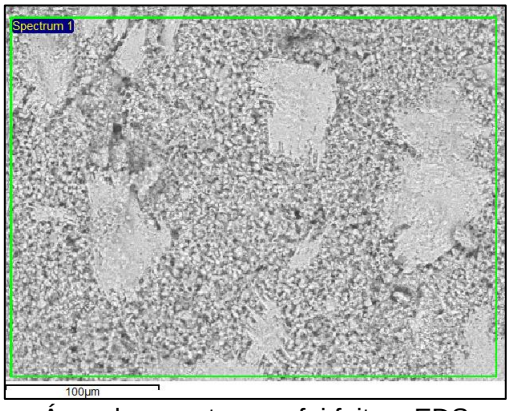



2500x

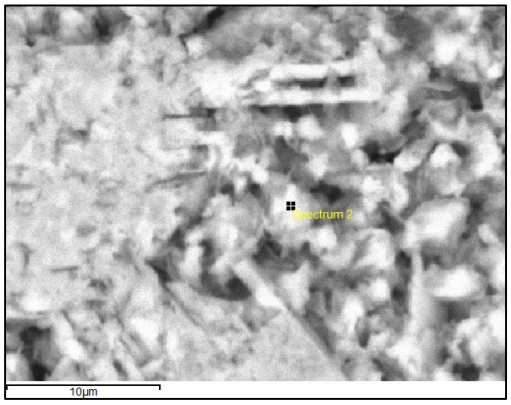



5000x

ANEXO H – Morfologia e Elementos da Argamassa de Cimento, Cal e Areia




Área da amostra que foi feito o EDS
Largura da imagem: 323,4 µm




Ponto da amostra que foi feito o EDS
Largura da imagem: 32,3 µm

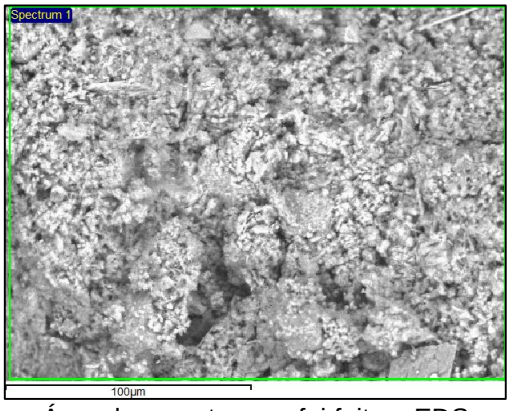
Elementos químicos da área analisada

| **Elemento** | **(%)** |
|---|---|
| Cálcio | 81,513 |
| Silício | 8,764 |
| Alumínio | 2,995 |
| Potássio | 2,374 |
| Ferro | 2,196 |
| Enxofre | 1,203 |
| Magnésio | 0,955 |

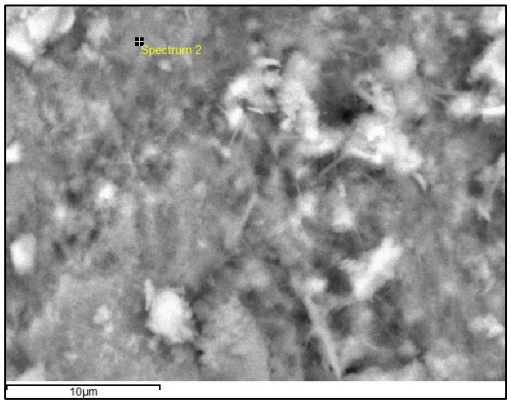
Elementos químicos do ponto analisado

| **Elemento** | **(%)** |
|---|---|
| Cálcio | 83,966 |
| Silício | 10,277 |
| Alumínio | 2,608 |
| Potássio | 1,718 |
| Enxofre | 1,008 |
| Manganês | 0,423 |

ANEXO I–Morfologia e Elementos da Argamassa de Cimento, Pó de Concha e Areia




Área da amostra que foi feito o EDS
Largura da imagem: 202,1 µm




Ponto da amostra que foi feito o EDS
Largura da imagem: 32,3 µm

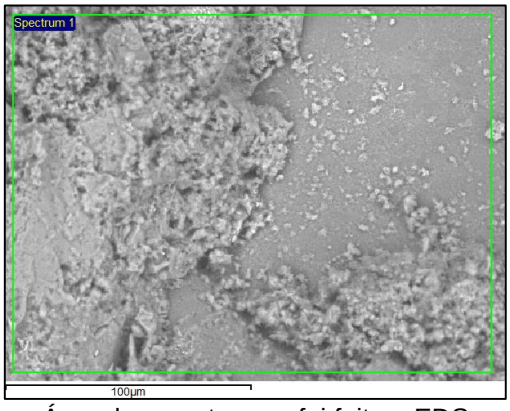
Elementos químicos da área analisada

| **Elemento** | **(%)** |
|---|---|
| Cálcio | 70,017 |
| Silício | 15,799 |
| Alumínio | 5,485 |
| Ferro | 3,628 |
| Enxofre | 3,169 |
| Potássio | 1,902 |

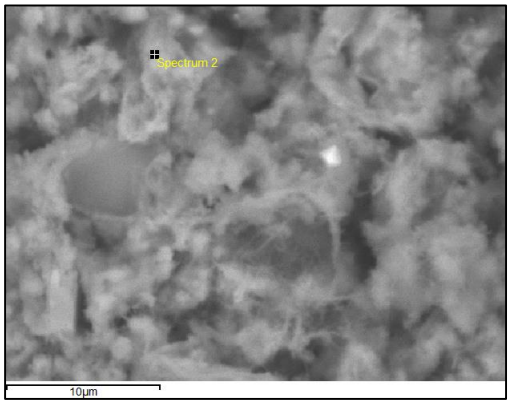
Elementos químicos do ponto analisado

| **Elemento** | **(%)** |
|---|---|
| Cálcio | 56,679 |
| Silício | 21,839 |
| Potássio | 12,588 |
| Alumínio | 5,921 |
| Enxofre | 2,471 |
| Manganês | 0,502 |

ANEXO J – Morfologia e Elementos da Argamassa de Cimento e Areia




Área da amostra que foi feito o EDS
Largura da imagem: 202,1 µm




Ponto da amostra que foi feito o EDS
Largura da imagem: 32,3 µm

Elementos químicos da área analisada

| **Elemento** | **(%)** |
|---|---|
| Cálcio | 48,014 |
| Silício | 45,258 |
| Alumínio | 3,633 |
| Potássio | 1,570 |
| Enxofre | 1,526 |

Elementos químicos do ponto analisado

| **Elemento** | **(%)** |
|---|---|
| Cálcio | 59,168 |
| Silício | 25,958 |
| Alumínio | 9,294 |
| Potássio | 5,580 |