



## ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DO LODO DE ESGOTO GERADO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS NA FORMULAÇÃO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS DE SOLO-CIMENTO

**Antônio Ramos Soares Júnior** – antonio.ramos@casal.al.gov.br

Técnico Industrial em Edificações da Companhia de Saneamento de Alagoas – CASAL. Graduando em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Alagoas – UFAL.

Rua Sebastião Pereira Bastos nº 668

57.500-000 – Santana do Ipanema – Alagoas

**Israel Correia Oliveira** – israel.oliveira@ifal.palmeira.edu.br

Técnico em Edificações do Instituto Federal de Alagoas – IFAL. Graduando em Engenharia Civil pelo Instituto Federal de Alagoas – IFAL.

**Natália Pereira Lopes** – natalia.lopes@casal.al.gov.br

Assistente Administrativo da Companhia de Saneamento de Alagoas – CASAL. Graduada em Direito pela Universidade Regional da Bahia – UNIRB.

**Júlio César Moura Menezes Júnior (orientador)** – julio.menezes@casal.al.gov.br

Gerente de Projetos da Companhia de Saneamento de Alagoas – CASAL. Graduado em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Alagoas – UFAL

**Resumo:** *Os Sistemas de Esgotamento Sanitários são complexos industriais essenciais à manutenção do equilíbrio ecológico e das relações simbióticas sustentáveis entre o homem e a natureza. Todavia, é sabido que o processo industrial de tratamento de esgoto bruto, ainda que metodicamente cíclico, gera volume abissal do resíduo lodo que, por princípio, carece de gerenciamento. No Brasil, a maior alíquota de lodo gerado em ETE's - Estações de Tratamento de Esgotos tem sido descartada, sem nenhum tratamento, em aterros sanitários, resultando em vicissitudes ambientais e econômicas. Pensando nisto, foi desenvolvido estudo, por intermédio deste trabalho, objetivando avaliar a influência da adição do lodo de esgoto gerado na ETE do município de Santana do Ipanema – AL sobre as propriedades tecnológicas do tijolo ecológico de solo-cimento para uso na construção civil. As matérias-primas utilizadas na modulação da tecnologia desenvolvida foram: solo, lodo de esgoto seco, cimento Portland e água tratada. O método adotado embasou-se na análise experimental, impetrada, em sua estrutura, a partir dos ensaios de caracterização e qualificação de tijolos-ecológicos de solo-cimento regimentados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Para a determinação da dosagem ideal estuda-se a adição de três diferentes proporções de lodo (5%, 10% e 15%) a composição binária de solo-cimento. Os resultados apontam que a incorporação do lodo de ETE influencia diretamente nas propriedades tecnológicas dos tijolos de solo-cimento e demonstram que o lodo analisado pode ser incorporado em formulações de solo-cimento numa proporção aproximada de 5% em relação à massa de solo seco.*

**Palavras-chave:** *Gerenciamento, Lodo de ETE, Tijolo ecológico de solo-cimento, Resíduo.*

## STUDY OF INCORPORATION OF SEWAGE SLUDGE GENERATED IN SEWAGE TREATMENT PLANTS IN FORMULATING ECOLOGICAL BRICKS OF CEMENT-SOIL

**Abstract:** Sanitary sewage systems are industrial complexes essential to maintaining ecological balance and sustainable symbiotic relations between man and nature. However, the industrial sewage treatment process, though, generates huge volume of sewage sludge that lacks management. In Brazil, the greatest percentage of sludge generated in sewage treatment plants has been discarded, without any treatment, in landfills, resulting in environmental and economic problems. Thinking about it, through the present work was developed a study to assess the influence of addition of sewage sludge generated in sewage treatment plant in the municipality of Santana do Ipanema-AL on the technological properties of the ecological brick of soil-cement for use in construction. The raw materials used in the formulation of technology developed were: sewage sludge, dry soil, Portland cement and drinking water. The method adopted is based on experimental analysis, structured from the characterization and qualification tests of ecological bricks of soil-cement regulated by the Brazilian Association of technical rules – ABNT. To determine the ideal dosage is studied the addition of three different proportions of silt (5%, 10% and 15%) the binary composition of soil-cement. The results show that the incorporation of the sludge of sewage treatment Station directly influence on the technological properties of soil-cement bricks, also demonstrates that the sludge analyzed can be incorporated into formulations of soil-cement in a ratio of approximately 5% in relation to the mass of dry soil.

**Keywords:** Management, Sludge from sewage treatment plant, Ecological brick soil-cement, Residue.

### 1. INTRODUÇÃO

Por muito tempo se tem negligenciado a importância da gestão dos resíduos sólidos na manutenção do equilíbrio ambiental dos ecossistemas. A produção crescente de lixo industrial e urbano, desabrolhado, sobretudo, com o advento da modernidade, elucida um problema crescente enfrentado pelos Estados. Estima-se que todos os anos produza-se, no Brasil, mais de 220.000 toneladas de lodo seco, advindo do tratamento de esgotos em Sistemas de Esgotamento Sanitários – SES's. Hoje, tem-se a ciência que o lodo de esgoto assume alto potencial de contaminação ambiental, logo, carece de gerenciamento fim.

As vantagens potenciais da reciclagem e da reutilização de resíduos sólidos na promoção da sustentabilidade dos ecossistemas são muitas, John (2000) aponta como reflexos notórios e emergentes da reutilização dos resíduos: redução do volume de aterros, preservação de recursos naturais, economia de energia, redução da poluição, geração de empregos, redução do custo do controle ambiental pelas indústrias e maior durabilidade na economia de divisas. Em tudo denota-se que o gerenciamento responsável de resíduos apresenta-se cada vez mais como prática de gestão importante à sustentabilidade, quer seja por atenuar o impacto ecológico gerado pela indústria, quer por reduzir os custos de produção advindos com a destinação inadequada dos resíduos.

É indiscutível o quanto os sistemas de tratamento de esgotos são necessários à saúde ambiental dos ecossistemas e a preservação dos recursos naturais. Todavia, segundo Cassini et al. (2003), é fundamental para essa avaliação a inclusão promissora da gestão adequada dos resíduos gerados nas Estações de Tratamento de Esgotos – ETE's.

Segundo Nucci et al. (1978) apud Camilo (2013) “o tratamento de esgotos normalmente resulta na produção de dois subprodutos importantes: O efluente líquido pronto para ser devolvido ao meio ambiente e o lodo primário e secundário - resíduo com grande concentração de microorganismos, sólidos orgânicos e minerais”, que por se tratar, em termos classificatórios, de

detrito proveniente dos serviços públicos de saneamento básico necessita de gestão integrada conforme as diretrizes da lei 12.305 de 2 de agosto de 2010.

De acordo com Andreoli (2006) apud Maziviero (2011) o lodo de esgotos representa em média 1% a 2% do volume total do esgoto tratado, denota gerenciamento bastante complexo e custos elevados. Todavia atenta-se que, diante da emergência de se preservar os recursos naturais, insurge o desafio de encontrar formas economicamente viáveis e ambientalmente seguras que tencionem a transformação dos resíduos, de lixos industriais e/ou urbanos à tecnologias sustentáveis.

*A preocupação com o descarte correto do lodo de esgotos é algo relativamente recente no Brasil. Até poucos anos, a única referência ao lodo nos projetos das ETE's, após o tratamento, era uma seta e as palavras "disposição final", sem identificar onde seria o descarte e nem como seria feito. Dessa forma, as empresas gerenciadoras de saneamento básico procuravam apenas se livrar do resíduo, sendo as formas mais utilizadas o descarte da torta de lodo em aterros sanitários – landfill, e o descarte do lodo líquido, bombeado através de dutos até alto-mar – descarga oceânica (NUVOLARI et al., 2011).*

A história elucida que “até a década de 60 a disposição final do lodo resultante de sistemas de tratamento de efluentes era feita em aterros sanitários, mas devido o aumento na geração deste resíduo, tal alternativa passou a ser ineficaz do ponto de vista físico e ambiental” (AZUMA, 1973 apud GEYER 2001).

A Lei 12.305 (BRASIL, 2010) institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e deixa patente que o sistema de gerenciamento de resíduos deve obedecer uma sequencia sistemática de prioridades de forma que um detrito com potencial de reutilização, por exemplo, não seja de nenhuma forma descartado como rejeito em aterros sanitários.

Nesses parâmetros fica cada vez mais evidente que a disposição final, em aterros sanitários, dos resíduos gerados nos sistemas de esgotamento sanitários, sobretudo os provenientes de gradientes industriais, não se configura como alternativa sustentável, visto o viés anticíclico que preconiza essas disposições e o emergente e conseqüente impacto negativo perpetrado no meio ambiente, inserido, mesmo após desativação dos aterros, com a produção cogente de subprodutos considerados danosos a saúde dos ecossistemas, como é o caso do chorume e do metano.

Segundo Ingunza et al. (2006) apud Silva (2008) o reaproveitamento de resíduos em tecnologias da construção civil é uma prática que vem sendo utilizada de maneira crescente no Brasil, justamente por predispor práticas ambientalmente corretas que reduzem o consumo de recursos naturais, tanto na forma de matérias-primas quanto na forma de energia, transformando resíduos em recursos, reduzindo portanto os custos advindos com a disposição final dos resíduos.

Considerando os estudos já realizados com os tijolos de solo-cimento, o presente trabalho objetiva, a partir de estudo de caso, equacionar a formulação de tijolos ecológicos através da mistura de solo, cimento Portland, água e lodo seco produzido a partir do Sistema de Esgotamento Sanitário do município de Santana do Ipanema – AL, operado atualmente pela Companhia de Saneamento de Alagoas – CASAL. Logra-se, de outro viés, a necessidade de minimizar o impacto socioambiental potencial dos Sistemas de Esgotamentos Sanitários com usufruto de tecnologias cíclicas capazes de desencadear processos sistemáticos sucessivos e sustentáveis de transformação, de forma que a saúde socioambiental seja afiançada como produto fim do desenvolvimento sustentável.

Por esta ótica, pode-se asseverar que os tijolos ecológicos de solo-cimento expõem-se como alternativa virtual de destinação de resíduos sólidos quando se conforma como veículo tendencioso à formulação de diversas misturas em substituição parcial de seus componentes básicos: solo, cimento e água. Santos et al. (2009) licita a ideia sustentável intrínseca as formulações de solo-cimento quando explicita as vantagens potenciais dos tijolos ecológicos que contempla: não passar pelo processo de queima, apresentar maior resistência mecânica, possuir maior isolamento acústico e térmico, combater a umidade e desenvolver menor peso.

Logo se vê que através do gerenciamento sustentável dos resíduos sólidos é possível expandir o alcance de preservação da saúde ambiental e humana de forma que o meio ambiente não seja lesado e o ser humano não viva em condições sociais deploráveis.

O modelo de gestão adornado pela CASAL já predispõe, intrínseca a sua missão, o conceito de saúde ambiental atrelado ao princípio da logística sustentável quando objetiva “promover a qualidade de vida da sociedade alagoana com ética e responsabilidade social satisfazendo os clientes internos e externos através da prestação de serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário de excelência com sustentabilidade socioambiental e financeira (CASAL, 2014)”.

Destarte, com o intento de delinear mais objetivamente o conteúdo deste estudo, segue uma breve definição das matérias-primas utilizadas no ensaio desse trabalho.

O solo pode ser definido como um material não consolidado da camada superficial da terra, facilmente desagregável, contendo minerais diversos sob as formas de areias, de silte e de argilas (CEBRACE, 1981 apud KAROLINA, 2010).

O cimento Portland é um pó fino que apresenta propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que quando sob a água, endurece e não mais se decompõe quando exposto à água novamente. O cimento Portland é composto de clínquer e adições, sendo o primeiro o seu principal componente, que será presente em todos os cimentos. As adições variam de um tipo de cimento para o outro (ABCP, 2002).

Lodo de esgoto é definido como o resíduo gerado nos processos de tratamento de esgoto sanitário, constituindo-se de uma fonte de matéria orgânica e de nutrientes com alto potencial de riscos à saúde pública, ao ambiente e à proliferação de vetores de moléstias e organismos nocivos (Resolução CONAMA 375/2006).

### **1.1. Do Sistema de Esgotamento Sanitário do município de Santana do Ipanema – AL**

Composto por redes coletoras, ligações domiciliares, interceptores, Estações Elevatórias de Esgoto – EEE’s, Estação de Tratamento de Esgoto – ETE e emissário final, o Sistema de Esgotamento Sanitário do município de Santana do Ipanema é um complexo público, operado, há aproximadamente 3 (três) anos pela Companhia de Saneamento de Alagoas – CASAL.

O Sistema de coleta e transporte de esgoto do SES é do tipo simplificado - separador absoluto, concebido para receber, exclusivamente, águas residuais da atividade urbana, composto de rede coletora convencional e rede coletora condominial.

O sistema de recalque é constituído por 7 (sete) EEE’s, todas são do tipo poço úmido, precedidas por um tratamento preliminar do tipo simplificado constituído de caixas circulares.

A ETE, em sua concepção geral, contempla 3 (três) lagoas de estabilização em paralelo do tipo facultativa, 8 (oito) Digestores Anaeróbicos por Fluxo Ascendente – DAFA’s em paralelo e 8 (oito) Leitões de Secagem. O Sistema tem capacidade para tratar os esgotos a nível secundário, com considerável redução dos níveis de DBO e de coliformes termotolerantes.

O tratamento primário, na área da ETE, é realizado com o emprego de DAFA’s, esses, não possuem nenhum material para suportar ou concentrar a biomassa, operando inteiramente como um leito fluidizado. Nessa unidade de tratamento ocorre um processo biológico natural, a digestão anaeróbia, que leva à degradação de material orgânica através da sua conversão em metano.

Após todo processo bioquímico dentro do digestor, haverá acúmulo de lodo no reator, o qual será purgado, servindo posteriormente como inóculo para novos digestores ou mesmo para ser descartado (Figura2). Desde a concepção da ETE do município de Santana do Ipanema, contemplou-se a construção de leitões de secagem de lodo (Figura 1), visando reduzir a umidade, para facilitar o transporte do material para descarte. O lodo de esgoto retido nos leitões de secagem são utilizados como matéria-prima dos tijolos ecológicos formulados, objeto desse trabalho.

No estágio seguinte de tratamento têm-se um sistema de lagoas de estabilização em paralelo, constituído por três lagoas facultativas. São lagoas com profundidade de 1,0 e 2,5 metros onde se desenvolvem uma grande variedade de micro-organismos, sendo os mais importantes, as algas e bactérias de cuja simbiose resulta a eficiência do tratamento.

Figura 1: DAFA's e Leitos de Secagem



Figura 2: Lodo seco coletado



## 2. METODOLOGIA

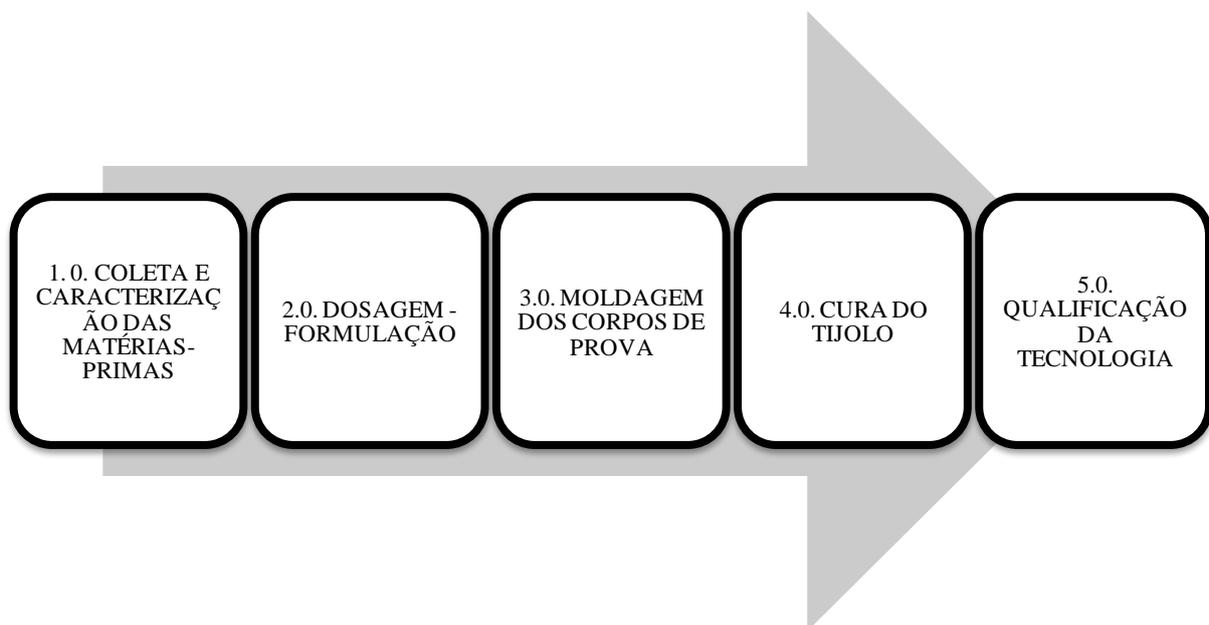
A maior parte dos ensaios dissertados neste trabalho foram concebidos no laboratório de materiais de construção do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas (IFAL), campus Palmeira dos Índios. No instituto, encontramos os equipamentos cogentes para a execução da grande maioria dos ensaios prescritos pela ABNT no que concerne a caracterização e qualificação dos tijolos ecológicos produzidos, mediante a licitude deste trabalho.

O solo utilizado foi coletado, num primeiro momento, nas imediações do Instituto Federal de Alagoas – IFAL, no município de Palmeira dos Índios – AL. Sendo este, proveniente de movimentações de terras para construções de novas estruturas do instituto.

Quanto ao cimento, utilizou-se Cimento Portland Composto CPIIZ-32 em observância a NBR 11578. Martins et al. (2006) elucida que as composições que utilizam o cimento Portland possuem valores mais altos de resistência a compressão devido as características físico-químicas de finura e teor de insolúveis.

Analicamente o procedimento experimental foi pautado no esquema sintático plotado na Figura 3.

Figura 3 – Procedimento experimental



## 2.1. Coleta e preparação das matérias-primas

O lodo deparado no leito de secagem foi retirado quando apresentou forma de torrões secos. Por conseguinte, foi destorreado manualmente para o ensaio de granulometria conjunta e determinação dos limites de consistência.

O solo adquirido, seguindo as recomendações da NBR 7181 (ABNT, 1984), foi submetido ao processo de secagem por 48h na temperatura de 40°C em estufa. Após a secagem da amostra de solo, adotou-se o procedimento de quarteamento, conforme as prescrições da NBR NM27 (ABNT, 2001).

## 2.2. Caracterização das matérias-primas

### *Análise Granulométrica*

A análise granulométrica dos solos resulta na distribuição de tamanho de partículas da amostra e das proporções relativas em que elas se encontram. Foi realizado por ensaio de peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento (ABNT, 1984).

Atenta-se que, devido à putrescibilidade do lodo de esgotos, a sua análise granulométrica só será obtida mais detalhadamente num momento posterior, através do ensaio de difração a laser.

### *Densidade Real*

Para determinar a densidade real dos solos foi utilizado o método do picnometro aquecido, estabelecido pela ME 093 (DNER, 1994). A técnica consiste em medir os pesos do picnometro vazio e do picnometro com as substâncias compostas em análise, de forma a obter-se uma relação entre a massa de uma amostra de solo e o volume ocupado pelas suas partículas sólidas.

### *Análise da plasticidade dos solos*

Os limites de consistência dos solos foram deliberados por intermédio dos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade. Sabe-se que para as partículas finas, a análise granulométrica não é suficiente para a caracterização, logo, é necessário o estudo da plasticidade do solo para melhor prognostico do seu comportamento.

Define-se:

Limite de Liquidez (LL): Teor de umidade determinado pelo aparelho de Casa Grande pelo qual a ranhura se fecha com 25 golpes. A técnica do ensaio é preconizada pela NBR 6459 (ABNT, 1984a).

Limite de Plasticidade (LP): Teor de umidade necessário para moldar uma porção do solo umedecido sobre uma placa lisa até formar um pequeno cilindro com 3 mm de diâmetro e 12 cm a 15 cm de comprimento. O ensaio é normatizado pela NBR 7180 (ABNT, 1984 b).

Índice de Plasticidade (IP): Subtração matemática entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, conforme mostra a equação (1). Em termos teóricos, define-se o IP como zona na qual o material ensaiado se encontra no estado plástico.

(1)

$$IP = LL - LP$$

### *Compactação*

O método adotado partiu, em nível de embasamento, do ensaio de Proctor Normal e Modificado ensaiado a partir da NBR-7182, baseado no método descrito na ASTM D-698/2004. Esse ensaio consiste na relação entre teores de umidade para respectivos pesos específicos seco, buscando determinar o teor de umidade ótima. São utilizados um cilindro metálico de volume conhecido e um

soquete de 2,5kg que é solto de 30,5cm de altura. Para isso, mistura-se solo com umidade higroscópica a certa quantidade de água conhecida, já admitindo seu limite de plasticidade para que fique cerca de 5% abaixo da umidade ótima.

Deposita-se o solo aos poucos no cilindro de forma que todo o volume seja preenchido com três camadas. Cada camada deverá ser compactada pelo soquete com número de golpes determinado pela norma. Uma vez que o cilindro é composto por duas partes encaixadas, a terceira camada deverá ficar cerca de 1cm mais alta que o molde inferior do cilindro, para ao que ao tirar a parte superior seja possível rasar a superfície, garantindo o volume correto da amostra. Com isso o solo é pesado junto com o cilindro de onde se retira três amostras para aferir a umidade.

Para ensaios em que o solo é reutilizado, o corpo de prova é retirado do molde, destorroado e acrescenta-se mais água para que se repetia o procedimento. O processo é repetido cerca de cinco vezes. Ao obter os dados de umidade e calcular o peso específico de cada amostra, é possível montar o gráfico teor de umidade x peso específico seco e encontrar o teor de umidade ótimo.

### 2.3. Dosagem - Formulação

A dosagem de tomada foi pautada nos métodos de fabricação dos tijolos de solo-cimento, preconizadas pela ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland- Boletim Técnico 112, 1988, assim como no Estudo Técnico 35, 1986. Evidentemente salvados as necessárias formulações, já que pretende-se adicionar a mistura solo-cimento um novo composto com propriedades recém conhecidas.

Todavia, considerou-se a metodologia definida pela Norma Simplificada de Dosagem, metodizada conforme parâmetros antagônicos de classificação.

### 2.4. Moldagem dos corpos de prova

Os materiais constituintes dos tijolos: solo, cimento e lodo de esgoto, foram misturados manualmente, no intento de se obter uma massa de coloração uniforme. Em seguida, foi adicionado água tratada, aos poucos, a fim de se conseguir a formação de uma mistura o mais homogênea possível. Logo após a mistura, a massa produzida foi diferida para a prensa manual contraíndo assim, logo após a prensagem, a forma de tijolo.

Após retirar os tijolos, recém-produzidos, da prensa, estes, foram conduzidos para uma superfície plana e lisa. Quando transcorrido 6 (seis) horas contados a partir do fim da moldagem, os tijolos foram umedecidos com o auxílio de um borrifador com intervalo de duas horas por um período de sete dias.

Logo se vê que a moldagem dos corpos de prova - tijolos ecológicos nada mais é do que a compactação da mistura composta por solo, cimento, lodo e água, obedecendo a umidade ótima obtida do ensaio de compactação. Sendo a energia adotada a mesma do Método SC-1 (ABCP,1986).

### 2.5. Ensaio de avaliação qualitativa dos tijolos ecológicos de solo-cimento

#### *Absorção de Água*

De acordo com a NBR 8492 (ABNT,1984) os tijolos deverão ser secos em estufa até eliminar-se toda a umidade presente. Transcorrido 24 horas em estufa foi feita a pesagem do “corpo” para obtenção do seu peso seco. Em seguida, os tijolos foram imersos em um tanque com água e respectivamente submetidos a uma nova pesagem para obtenção do seu peso úmido.

Para a realização dos cálculos de absorção de água utilizou-se a equação (2):

$$A = \frac{M2 - M1}{M1} 100 \quad (2)$$

Onde:

M1= Massa do tijolo seco em estufa

M2 = Massa do tijolo saturado  
A = Absorção de água, em porcentagem

### *Perda de massa por imersão*

Através do ensaio 256/94 (DNER, 1994), foi determinado a perda de massa por imersão em água de corpos de prova compactados em laboratório, com equipamento miniatura.

A perda de massa por imersão  $P_i$ , para uma determinada condição de compactação, foi obtida pela equação (3):

$$P_i = \frac{M_d \cdot 100}{M_o} \quad (3)$$

Onde:

$M_d$  = Massa de solo seco da porção, despreendida de corpo de prova

$M_o$  = Massa de solo correspondente da 10mm do corpo de prova

$P_i$  = Perda de massa por imersão, expressa em porcentagem, com aproximação de uma unidade.

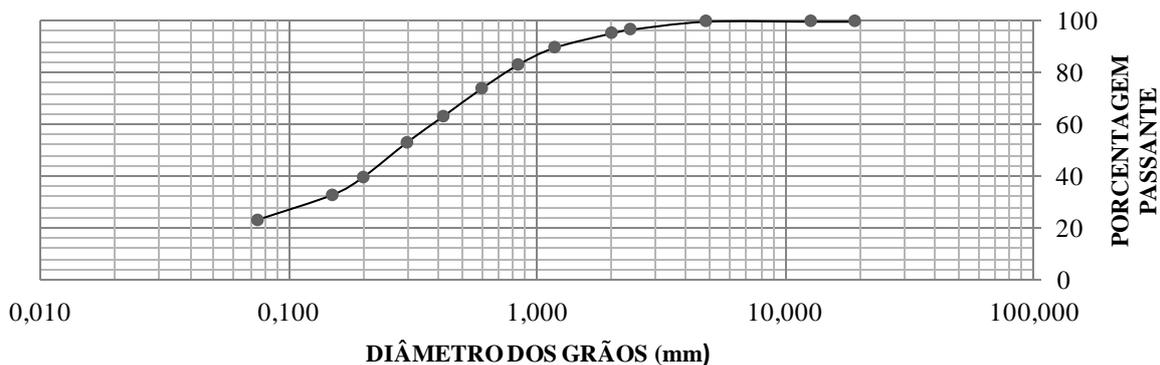
### *Resistência Mecânica*

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com os procedimentos da NBR 8492 (ABNT, 1984), os quais prescrevem os métodos que devem ser ensaiados os tijolos maciços.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O gráfico expresso na Figura 4 apresenta a curva granulométrica do solo utilizado no ensaio de granulometria. Pode-se observar que o material em análise, com densidade real de 2,212 apresenta 23% de partículas argilosas.

Figura 4 – Curva granulométrica da argila

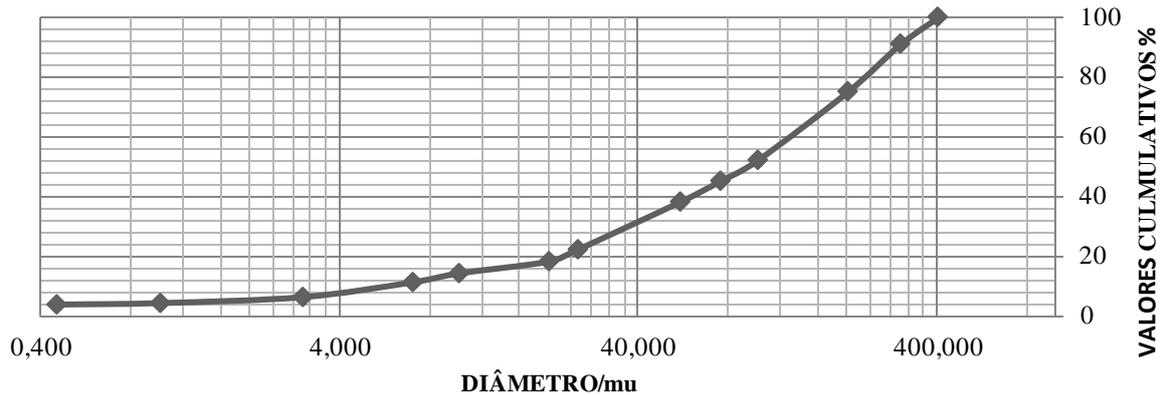


Por intermédio do gráfico acima se pode afirmar que o solo apresenta uniformidade de distribuição nas suas partículas, o que resulta em uma massa com poucos vazios, pois os grãos de menores dimensões preenchem os espaços existentes entre os grãos de maiores dimensões. Tal fenômeno desemboca na diminuição da retração da massa do tijolo fabricada com esta matéria-prima.

A curva granulométrica do lodo de esgoto está representada pelo gráfico plotado na Figura 5. Aponta-se uma densidade real do lodo com valor igual a 1,381, logo infere-se a classificação deste resíduo como agregado leve, por sua densidade real ser menor que 2.



Figura 5 – Curva granulométrica do lodo de esgoto



A Tabela 1 representada abaixo denota os valores obtidos nos ensaios determinantes aos Limites de Liquidez e Plasticidade do solo e conseqüentemente o produto da operação algébrica do Índice de Plasticidade.

Tabela 1 – Limites de Consistência do solo

| MATERIAL | LIMITES DE CONSISTENCIA   |                               |                               |
|----------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|          | LIMITE DE LIQUIDEZ (LL) % | LIMITE DE PLASTICIDADE (LP) % | INDICE DE PLASTICIDADE (IP) % |
| SOLO     | 35,19                     | 27,66                         | 7,53                          |

Com embasamento na literatura denota-se que os solos poderão ser caracterizados em: fracamente plástico, medianamente plástico e altamente plástico. Assim sendo, pelo fato da amostra de solo em análise apresentar índice de plasticidade maior que 7% e menor que 15% pode-se classificar esse solo como medianamente plástico.

Conforme o gráfico de plasticidade desenvolvido por Arthur Casa Grande, e ainda, mediante os ensaios de limite de consistência supramencionados, pode-se dizer ainda que o solo ensaiado trata-se de um silte inorgânico de mediana compressibilidade e silte orgânico.

Como o lodo de esgoto não apresentou plasticidade considera-se seu índice de plasticidade nulo.

Para o cálculo da massa específica seca, em função do teor de umidade e do grau de saturação, têm-se a equação (4).

$$\rho_d = \frac{S \cdot G_s \cdot \rho_w}{S + G_s \cdot \omega} \quad (4)$$

Sabe-se, também, que:

$$\omega = \frac{S \cdot (\rho_s - \rho_d) \cdot \rho_w}{\rho_s \cdot \rho_d} \quad (5)$$

Desta equação, pode-se isolar o S, obtendo-se:

$$S = \frac{\omega \cdot \rho_s \cdot \rho_d}{(\rho_s - \rho_d) \cdot \rho_w} \quad (6)$$

Para calcular o  $\rho_d$  em função apenas do teor de umidade ou do grau de saturação, têm-se:

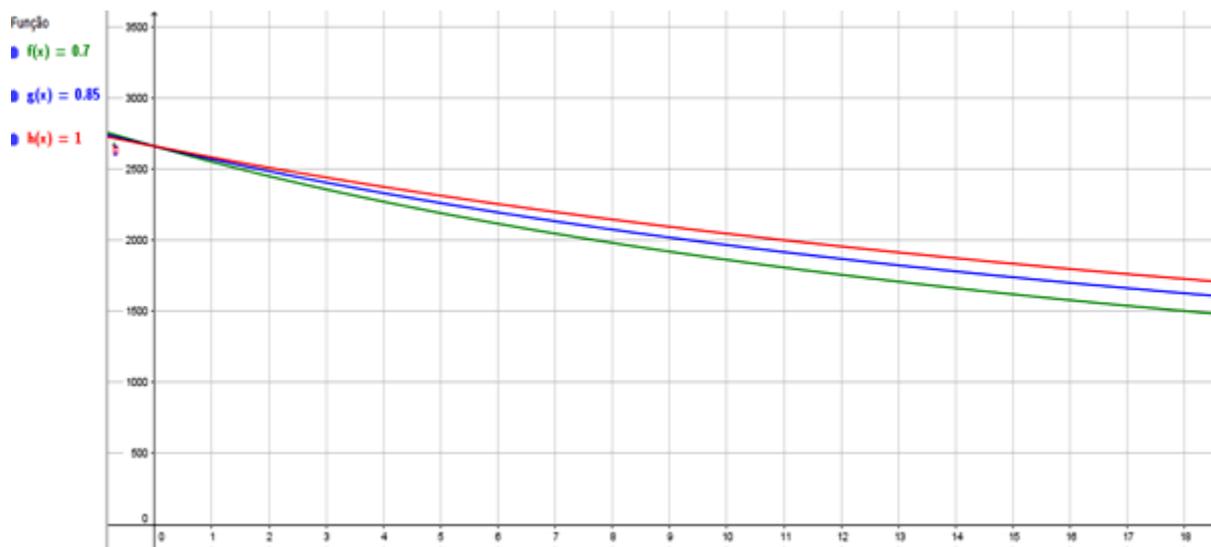
$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad (7)$$

$$\omega = \frac{M_w}{M_s} = \frac{\rho_w \cdot V_w}{\rho_s \cdot V_s} \quad (8)$$

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_t} = \frac{M_s}{V_v + V_s} = \frac{M_s}{\frac{V_w}{S} + V_s} \cdot \frac{\rho_w S}{\rho_w S} = \frac{M_s \cdot \rho_w S}{\omega \rho_s V_s + \rho_w S V_s} = \frac{M_s}{V_s} \cdot \frac{\rho_w S}{\omega \rho_s + \rho_w S} \quad (9)$$

Para um grau de saturação constante pode-se plotar um gráfico  $\rho_d$  vs  $\omega$ , este chamado de curva de iso-saturação. No gráfico desenvolvido na Figura 6 estão representadas as curvas para 70% (azul), 85% (vermelho) e 90% (verde) de grau de saturação do solo.

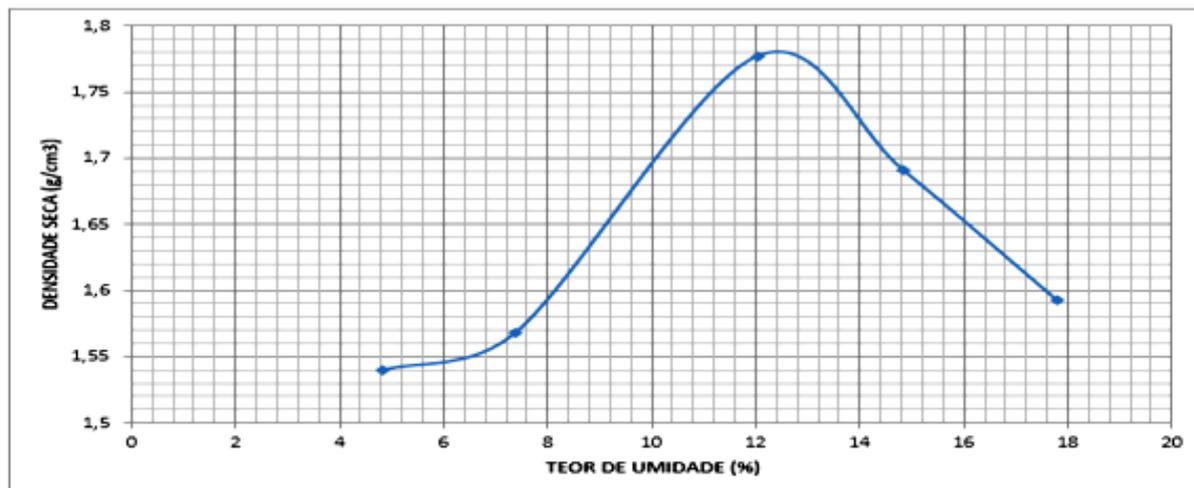
Figura 6 – Curva de iso-saturação (com auxílio do GeoGebra 5.0.1.39)



Após realização do ensaio Proctor Normal, conforme NBR 7182 (ABNT, 1986) obteve-se cinco pontos que relacionam peso específico seco com teor de umidade, conforme representa o gráfico na Figura 7. Através deste gráfico pode-se rematar que o teor de umidade ótimo do solo é igual a 12,5% e o peso específico seco correspondente é igual a 1,78 g/cm<sup>3</sup>.

Tratando-se de dosagem adotou-se, baseado na literatura, a proporção de 10% de cimento em relação à massa de solo seco. Para a mistura solo: cimento: lodo, a proporção foi definida em relação à soma da massa do solo seco e da massa do resíduo. A quantidade de água a ser adicionada foi definida a partir do teor de umidade ótimo, apontado através do ensaio de compactação. Já a porcentagem de resíduo em cada formulação foi determinada em relação à massa de solo seco na proporção de 5%, 10% e 15%.

Figura 7 – Curva de compactação ( $\gamma_d \times \omega$ )



|                |                       |
|----------------|-----------------------|
| $\omega$ ótimo | 12,50%                |
| $\rho$         | 1,78g/cm <sup>3</sup> |

Numa perspectiva qualitativa quanto aos aspectos visuais do tijolo ecológico de solo-cimento formulado sob a tutela deste trabalho (Figura 8 e 9), a NBR 7170 (ABNT 1983b) recomenda que os tijolos não devam apresentar deformidades tais como: trincas, quebras, desuniformidade na cor, superfícies irregulares. A Tabela 2 disposta logo abaixo denota um quadro comparativo entre os tijolos com adição de resíduo e o tijolo prova – sem adição de resíduo.

Tabela 2 – Características estéticas dos tijolos

| CARACTERÍSTICAS               | TIJOLO AVALIADO/ PERCENTUAL DE LODO ADICIONADO |     |     |
|-------------------------------|--|-----|-----|
|                               | 5%   | 10% | 15% |
| <b>COLORAÇÃO</b>              | 1  | 2   | 2   |
| <b>ODOR</b>                   | 1  | 1   | 2   |
| <b>REGULARIDADE DE FORMA</b>  | 1  | 2   | 2   |
| <b>HOMOGENEIDADE DE MASSA</b> | 2  | 3   | 3   |
| <b>ARESTAS VIVAS E CANTOS</b> | 2  | 3   | 3   |
| <b>FACILIDADE DE CORTE</b>    | 2  | 2   | 3   |

**1= semelhante ao tijolo com 0% de lodo; 2=pequena alteração; 3= grande alteração; 4= de formação completa.**

Por intermédio dos ensaios de absorção de água e perda de massa por imersão aplicados a cinco corpos de prova, obtiveram-se os resultados de média apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Absorção de água e perda de massa por imersão dos corpos de prova.

| QUANTIDADE DE LODO ADICIONADO % | ABSORÇÃO DE ÁGUA % | PERDA DE MASSA POR IMERSÃO AOS 14 DIAS% |
|---------------------------------|--------------------|---|
| 0                               | 9                  | 0,8                                     |
| 5                               | 16                 | 1,3                                     |
| 10                              | 18                 | 2,1                                     |
| 15                              | 23                 | 2,6                                     |

Figura 8: Moldagem do tijolo com 10% de lodo



Figura 9: Tijolo com 15% de lodo

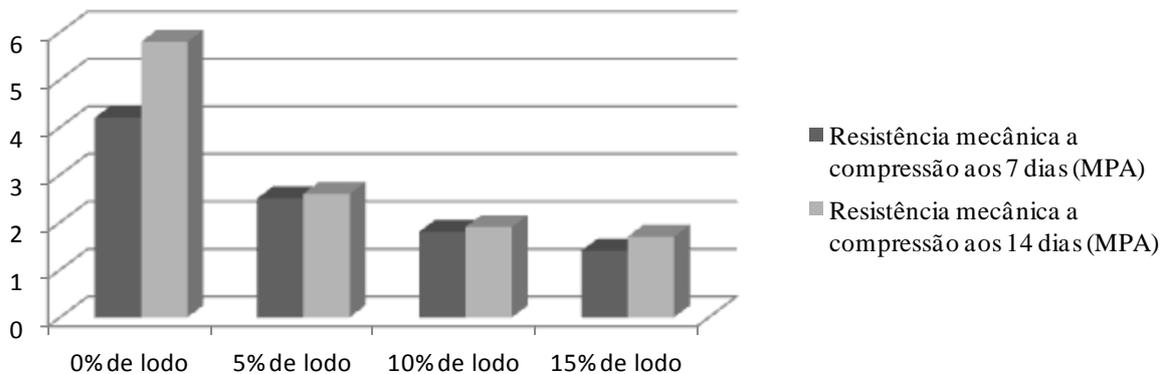


Conforme mostrado na Tabela 3 os corpos de prova apresentaram uma perda de massa dentro dos padrões especificados na norma, que atribui uma perda máxima de massa para o tijolo de solo-cimento de 5%. Nota-se ainda que quanto mais se aumenta à quantidade de lodo a composição maior será a tendência de se aumentar a perda de massa por imersão do tijolo para cada dosagem considerada de solo-cimento.

Quanto à absorção de água dos corpos de prova a Tabela 3 mostra que os tijolos fabricados com lodo, em todas as dosagens absorveram mais água do que o tijolo sem adição do resíduo. Nota-se ainda que as dosagens com 5% e 10% de lodo atendem a NBR 8492 (ABNT, 2012) que prescreve absorção máxima de água de 20%.

O gráfico desenvolvido na figura 10 denota a resistência mecânica a compressão dos tijolos de solo-cimento ensaiados com as dosagens de 0%, 5%, 10% e 15% respectivamente.

Figura 10 – Resistência mecânica a compressão dos tijolos de solo-cimento



Através do gráfico acima observa-se que conforme se aumenta a dosagem de lodo à resistência a compressão do tijolo diminui. Todavia, não se verifica diminuição estatística da resistência mecânica a compressão dos tijolos com 10% de adição de lodo comparado aos que detêm

15% do resíduo em sua dosagem. Do ponto de vista mecânico isto implica que a aplicação de 10% de lodo resultará em um produto com a mesma qualidade de um outro que utilize apenas 10% de lodo.

Pode-se evidenciar ainda que, ao aumentar a porcentagem de resíduo nas formulações, apenas os corpos de prova com 5% de lodo obtiveram uma resistência média acima de 2 MPa, atendendo assim as exigências da NBR 8492 (ABNT, 2012). Os corpos de prova com 10% e 15% de lodo em média não obtiveram a resistência mínima exigida pela Norma Brasileira de Tijolo Maciço de Solo-Cimento, no entanto, individualmente alguns corpos de prova, sob as dosagens supramencionadas, rompidos aos sete dias, apresentaram resistência superior a 1,7 MPa, o que denota uma resistência muito próxima a mínima exigida pela norma, carecendo talvez, de um estudo mais criterioso da dosagem solo: cimento: resíduo.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Outorgar destino sustentável ao lodo de esgoto proveniente das ETE's, no Brasil, ainda é uma prática pouco utilizada. O que, em linhas gerais, culmina na perda algébrica dos benefícios ambientais desencadeados pelo tratamento de esgotos em Sistemas de Esgotamento Sanitários.

Na agenda ambiental se vê, cada vez mais como método promissor, a criação de alternativas ambientalmente seguras capazes de converter resíduos sólidos em tecnologias com valor agregado.

No caso específico da ETE Santana do Ipanema-AL, depreende-se que a aplicação do lodo de esgoto em tijolos ecológicos de solo-cimento vem se mostrando uma alternativa bastante viável de destinação sustentável deste resíduo.

Nota-se que o tijolo formulado com 10% de cimento Portland e 5% de lodo de esgoto, empreende, conforme os ensaios de avaliação qualitativa, características técnicas viáveis à comercialização, segundo as normas da ABNT.

Todavia, não se descarta a possibilidade de postular, num próximo momento, testes mais aprofundados com solos mais plásticos e dosagens ainda mais ousadas a fim de se obter dados mais precisos acerca da tecnologia produzida. Tais incrementos desembocarão, por ventura, num conhecimento mais amplo do produto final, permitindo, portanto, o agenciamento da melhor e mais consistente dosagem. Ainda, considera-se necessário avaliar os impactos ambientais impetrados pelo tijolo ecológico numa perspectiva de médio e longo prazo através dos ensaios de lixiviação e solubilização, indispensáveis ao desenho ambiental do produto final numa perspectiva futura.

#### *Agradecimentos*

Os autores desse projeto agradecem o fomento a ciência e inovação da Companhia de Saneamento de Alagoas – CASAL e do Instituto Federal de Alagoas campus Palmeira dos Índios – IFAL-Pin.

#### 5. REFERÊNCIAS

##### *Artigo de periódico*

CAMILO, L. G. **A logística na destinação do lodo de esgoto**. Revista Científica On-line: Tecnologia, gestão e humanismo. Guaratinguetá. Faculdade de Tecnologia de Guaratinguetá, 2013.

SANTOS, A. F. R. D.; BAUMGART, L. N.; WOICIOKOSKI, M.; JUNIOR, O. T.; JATZAK, S.; NICOLETTI, V. **Utilização de resíduos da construção civil em tijolos ecológicos**. Santa Catarina. Associação do Vale do Itajaí Mirim, 2009. 20p.

##### *Editorial*

ANDREOLI, C.V. et al. **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: Abes, 2006. 417.

*Livro*

CASSINI, S. T.; VAZOLLER, R. F.; PINTO, M. T. Introdução. 1-9 p. In: CASSINI, S. T. (coord). **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES/Rima, 2003. 210 p.

NUVOLARI, A. et al. **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**. 2ª ed. São Paulo: Blucher, 2011. 565p.

*Monografia, dissertação e tese*

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

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 120p. Tese (Livre-Docência em Engenharia Civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, (2000).

KAROLINA, S. J. M. **Estudo da incorporação de cascalho proveniente da perfuração de poços de petróleo em formulações para tijolos de solo-cimento**. Tese 72/ PPGEM. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2010.

MAZIVIERO, G.T. **Avaliação do potencial citotóxico, genotóxico e mutagênico de lodo de esgoto por meio dos sistemas – teste allium cepa e tradescantia pallida**. 2011. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas). UNESP/Rio Claro/SP/2011.

SILVA, F. D. A. **Influência do lodo de ETE na massa para fabricação de cerâmica vermelha**. Dissertação (Mestrado) 32/2008 PPGCEM. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.

*Normativos*

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D698: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristic of soil using standard effort**.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11578: Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8492: Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 27: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Estudo Técnico 35 Dosagem das misturas de solo-cimento- Normas de Dosagem.** São Paulo, 1986.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília: Governo Federal, 2010. Disponível em: . Acesso em: 22 junho 2016. 16h35.

CASAL. **Planejamento Estratégico.** Maceió: 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 375/06.** Define os critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília: Conama, 2008

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME 093/94 - Solos: Determinação da densidade real – Método de Ensaio.** 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME 256/94 – Solos compactados com equipamentos miniatura – determinação da perda de massa por imersão.** 1994.

#### *Trabalho em evento*

ÂNGULO, SÉRGIO C.; ZORDAN, SÉRGIO; e JOHN, VANDERLEY M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil.** EVENTO: IV SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES. CT 206- IBRACON. São Paulo- SP, 2001.

MARTINS, I. R.; BARBOSA, M. P.; LAZARI, C. R.; SALLES, F. M. **Otimização dos Materiais para a Composição do Concreto de Alto Desempenho.** IBRACON – V. 2 – Construções em Concreto - Trabalho CBC0164 – p. 1381 - 1395. 46º Congresso Brasileiro do Concreto, 2006.

SILVA, M. V.; FUNGARO, D.A. **Caracterização de Lodo de Estação de Tratamento de Água e Cinzas de Carvão Visando sua Utilização na Manufatura de Tijolo.** 3rd INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION. São Paulo 2011.