



## **AValiação DO POTENCIAL DE USO DA LAMA DE ALTO FORNO EM TIJOLOS SOLO-CIMENTO**

**Yandiara L. N. de Barros<sup>1\*</sup>, Rosana V. Silva<sup>2</sup> e Carla T. D. B. Alledi<sup>3</sup>**

*1,2 – Programa de pós-graduação em Tecnologias Sustentáveis (PPGTECS), Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), Av. Vitória, 1729, Jucutuquara, Vitória, CEP CEP 29040-780, ES.*

*3 – Coordenadoria de Edificações, Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), Vitória, ES.*

### **RESUMO**

*O objetivo deste trabalho foi avaliar se a Lama de Alto Forno, resíduo de empresa siderúrgica, tem potencial para ser aplicada em tijolos de solo-cimento substituindo parcialmente o solo. Para tal, foi feita a caracterização química do resíduo visando identificar qualitativamente e quantitativamente seus constituintes. Para a caracterização física e classificação do solo que compõe os tijolos de solo-cimento, realizou-se a análise de granulometria e a análise do Índice de Plasticidade, tanto do solo sem o resíduo, quanto do solo com o resíduo. Foram preparados 3 traços substituindo um determinado percentual em massa do solo pelo resíduo, 10%, 20% e 30% e 40%, além de um traço de referência, sem resíduo. Os resultados apontaram que a Lama de Alto Forno é um resíduo rico em carbono (cerca de 40,2%) e ferro (cerca de 28%). No que diz respeito à granulometria, tanto o solo quanto o resíduo são suficientemente finos, com partículas entre 62,5 e 90 µm. O limite de liquidez de todos os traços atendeu ao requisito da norma (ABNT NBR 10833:2012)<sup>(1)</sup>, sendo que, o que apresentou maior valor foi o com 40% de resíduo (40,2) e o de menor valor foi o com 10% de resíduo (26,5). Quanto ao índice de plasticidade, todos os traços apresentaram valor inferior ao limite estabelecido em norma, com valor médio de 7. Para avaliar a resistência a compressão e absorção de água desses traços, foram moldados corpos de prova cilíndricos (12 mm x 16 mm), seguindo a metodologia de Souza Santos<sup>(2)</sup>, utilizando cimento na proporção de 1:9 com cura em câmara úmida por 7 dias. Os resultados indicaram que o resíduo Lama de Alto Forno, no percentual de até 40% em massa, é adequado como substituinte parcial do solo na fabricação de tijolos de solo-cimento, tendo em vista a caracterização química e física do material estar dentro dos limites normativos para este tipo de produto.*

**Palavras-chave:** *Lama de Alto Forno, tijolo solo-cimento, resíduo siderúrgico.*

### **INTRODUÇÃO**

A produção em massa de um aço de baixo custo e alta qualidade foi um marco na chamada Segunda Revolução Industrial, em 1856<sup>(3)</sup>. Desde então, há uma crescente atividade industrial mundial. Segundo os dados da Agência Brasil (2021), a produção de aço bruto de janeiro a agosto chegou a 24 milhões de toneladas em 2021 e inerente a essa produção está a geração de resíduos. Contudo, mesmo com a expansão da atividade industrial do aço no Brasil, predomina a ausência de programas de gestão de resíduos sólidos industriais, o que promove cada vez mais uma destinação incorreta de escórias industriais. Este problema, grande parte das vezes, tem causado uma contaminação ambiental de solos, lençóis freáticos e influenciado no clima<sup>(4)</sup>.

Diante destas questões, as indústrias siderúrgicas têm realizado esforços significativos para minimizar e/ou eliminar seus impactos ambientais. Assim, estudos vêm sendo realizados para encontrar alternativas ambientalmente corretas para o descarte dos resíduos da produção do

aço. Muitos destes resíduos podem voltar para o processo, sendo assim reciclados. Há os que, apesar de não conseguirem ser reciclados, podem ser utilizados na fabricação de novos materiais ou incorporados a materiais já existentes no mercado.

O resíduo estudado neste trabalho, a Lama de Alto Forno, é um dos mais produzidos por uma siderurgia que tem um Alto Forno como meio redutor. Segundo Ereno (2007), a lama se origina a partir da lavagem dos gases do Alto Forno<sup>(5)</sup>. Informações da empresa siderúrgica ArcelorMittal Tubarão corroboram que este é o resíduo de maior demanda e reduzida aplicação. Cerca de 7000 toneladas são produzidas por mês, equivalente a um total de 84000 toneladas de resíduo por ano. A maior dificuldade atual da siderúrgica em questão é a destinação ambientalmente correta do material.

Do ponto de vista ambiental a indústria cerâmica se destaca por conseguir absorver uma grande quantidade de resíduos oriundos de outras indústrias. Na literatura, diversos estudos evidenciam a utilização da lama de alto forno em materiais cerâmicos<sup>(6)</sup>.

Pesquisadores do Instituto Federal do Espírito Santo – Ifes, campus Vitória, têm realizado diversas pesquisas na área de reaproveitamento de resíduos para o desenvolvimento de materiais de construção. Destaca-se a produção de tijolos de solo-cimento com diferentes resíduos, como o vidro<sup>(7)</sup>, mármore e granito<sup>(8)</sup> e resíduos da dessulfuração de gases na coqueria<sup>(9)</sup>. Dando continuidade a esta linha de pesquisa, este trabalho visou avaliar o potencial de uso da Lama de Alto Forno em tijolos solo-cimento como substituto parcial do solo. Esta prospecção justifica-se pela produção do resíduo em larga escala tornando sua estocagem inviável e complexa.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### Materiais

O solo do tipo argiloso foi doado pela empresa Cerâmica Adélio Lubiana Ltda., localizada em Nova Venécia – ES. Trata-se de uma argila plástica, cujo nome genérico é Batinga. O resíduo Lama de Alto Forno (LAF) foi doado pela ArcelorMittal Tubarão, localizada em Serra – ES. O resíduo foi coletado utilizando a técnica de amostragem conforme ABNT – NBR 10007<sup>(10)</sup>. O cimento utilizado foi o CP V – ARI, devido sua elevada resistência inicial e menor tempo de pega quando comparado aos demais cimento. O cimento utilizado atendeu as especificações da norma ABNT NBR 16697:2018<sup>(11)</sup>. A água utilizada foi fornecida pela concessionária de abastecimento local CESAN, que garante estar isenta de impurezas nocivas à hidratação do cimento conforme ABNT NBR 15900-1:2009<sup>(12)</sup>.

### Métodos

O solo utilizado neste trabalho foi composto pela mistura de areia e argila, na proporção de 1:1, e passou por peneiramento em abertura de 2,36 mm para retirada de matéria orgânica. Foi realizada a análise de Granulometria à laser e determinação do Limite de Liquidez (LL), conforme a norma ABNT NBR 6459:2016<sup>(13)</sup>, e Limite de Plasticidade (LP), conforme ABNT NBR 7180:2016<sup>(14)</sup>, para posterior determinação dos Limites de Atterberg.

A Lama de Alto Forno foi seca em estufa em temperatura de  $100 \pm 5^\circ \text{C}$  e, posteriormente, peneirada em abertura de 2,36 mm. Realizou-se análise de Fluorescência de Raios X (FRX), análise elementar de Carbono e Enxofre (Leco - C e S), Microscopia Eletrônica de Varredura

(MEV), Difração de Raios X (DRX) e Granulometria à Laser. A caracterização do cimento foi fornecida pelo fabricante.

Após a caracterização prévia dos materiais, lama e solo, realizou-se a formulação dos traços. Em seguida, foi realizado o ensaio para determinação dos Limites de Atterberg de cada traço formulado.

### Formulação dos traços

Os percentuais utilizados foram definidos com base na pesquisa bibliográfica, principalmente os trabalhos desenvolvidos por alunos do Ifes campus Vitória para fabricação de tijolos solo-cimento<sup>(7, 8 e 9)</sup>. Foram preparados 4 traços com a mistura de solo e resíduo, substituindo um determinado percentual em massa do solo pelo resíduo nos percentuais de, 10%, 20%, 30% e 40%, além de um traço de referência, sem resíduo. A relação de cimento usado na mistura foi de 1:9. A formulação definida seguiu a proporção, conforme a tabela I.

Tabela I: Formulação dos traços.

Traço	% Solo (Areia + Argila)	% Cimento	% Resíduo
<b>Referência</b>	90	10	0
<b>10% de resíduo</b>	80	10	10
<b>20% de resíduo</b>	70	10	20
<b>30% de resíduo</b>	60	10	30
<b>40% de resíduo</b>	50	10	40

Feita a caracterização física dos traços e, tendo como o objetivo avaliar a resistência à compressão e absorção de água destes, foram moldados corpos de prova em matriz cilíndrica por compressão uniaxial com ação única de pistão superior com carga de 2000 kgf, produzindo corpos de prova cilíndricos nas dimensões de 12 mm de diâmetro e aproximadamente 16 mm de altura, seguindo metodologia proposta por Souza Santos (1989)<sup>(2)</sup>. Para cada traço estudado foram confeccionados 20 corpos de prova que foram curados em câmara úmida durante 7 dias e, dos 20 corpos de prova por traço produzidos, 14 foram ensaiados à compressão e 6 foram utilizados para o ensaio de absorção de água.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização Química

A caracterização química do resíduo, conforme tabela II abaixo, indica a predominância de carbono e ferro.

Tabela II: Composição química da Lama de Alto Forno.

FRX								ICP-OES	Leco	
SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	MnO	Na <sub>2</sub> O	P	FeT	C	S
5,22	2,90	2,15	0,88	0,61	0,35	0,18	0,12	27,2	40,2	0,39

Para Nascimento; *et. al* (2000), o alto teor de ferro e carbono encontrado na lama de alto forno é devido ao carregamento de partículas geradas pelo processo de redução devido ao fluxo ascendente de gases contra a corrente no interior do alto forno<sup>(15)</sup>. A análise por DRX apontou que há uma predominância de fases mineralógicas de ferro como a Hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) e Wustita (FeO), além de quartzo (SiO<sub>2</sub>) e calcário (CaCO<sub>3</sub>). O difratograma obtido pode ser observado na figura 1.

Conforme a figura 2, foi observado nas imagens obtidas pela técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que a Lama de Alto Forno se apresenta em partículas finas e sem formato único.

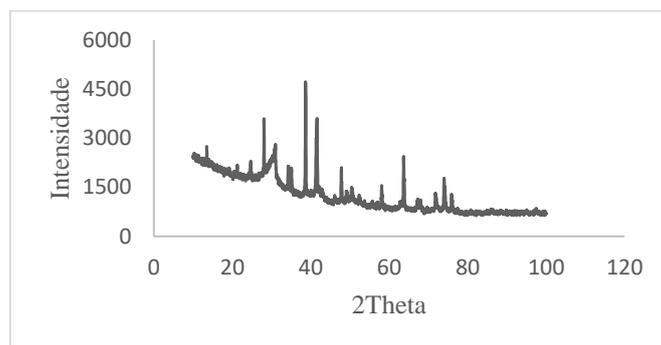


Figura 1: Difratograma da Lama de Alto Forno.

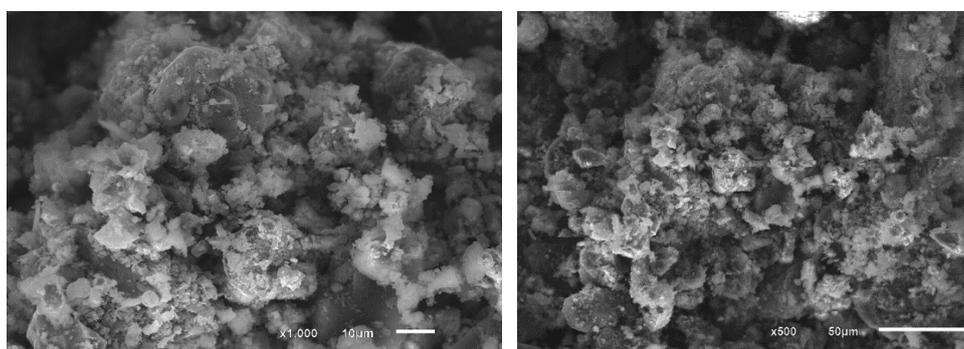


Figura 2: Lama de Alto Forno com aumento de 1000X e 500X, respectivamente.

### Caracterização Física

Segundo a norma ABNT NBR 10833:2012<sup>(1)</sup>, os requisitos essenciais de um solo para confecção dos tijolos solo-cimento são granulometria (passante em 75 µm entre 10 e 50%), Limite de Liquidez (LL < 45) e Índice de Plasticidade (IP < 18). Através das análises realizadas e dos resultados obtidos, apresentados na tabela III, nota-se que todos os traços formulados atenderam aos requisitos normativos.

Tabela III: Limites de Atterberg obtidos das formulações dos traços.

<b>Traço</b>	<b>Limite de Liquidez (LL)</b>	<b>Limite de Plasticidade de (LP)</b>	<b>Índice de Plasticidade (IP = LL - LP)</b>
<b>Referência</b>	23,23	15,6	7,63
<b>10% de resíduo</b>	26,52	21	5,52
<b>20% de resíduo</b>	29,78	23	6,79
<b>30% de resíduo</b>	34,91	26	8,92
<b>40% de resíduo</b>	40,26	32	8,26

Na fabricação de tijolos solo-cimento, alguns parâmetros como resistência à compressão e absorção de água possuem exigências estabelecidas, conforme as normas ABNT NBR 8491:2012<sup>(16)</sup> e 8492:2012<sup>(17)</sup>. Considerando a importância desses resultados, essas propriedades foram avaliadas utilizando corpos de prova, conforme descrito na metodologia. Os resultados são apresentados na tabela IV. Apesar de não haver valores de referências pré-estabelecidas para os corpos de provas produzidos, há uma tendência que evidencia o aumento da resistência à compressão com o aumento do percentual de resíduo adicionado à mistura, o

que alude a uma avaliação positiva quanto ao uso potencial da Lama de Alto Forno como substituinte parcial do solo na fabricação de tijolos solo-cimento. Com relação a absorção de água nota-se uma redução com a adição do resíduo.

Tabela IV: Resistência a compressão e Absorção de água dos Corpos de prova

Traço	Resistência a compressão (MPa)	Absorção de Água (%)
Referência	1,08 ( $\pm 0,3$ )	7,22 ( $\pm 0,6$ )
10% de resíduo	1,35 ( $\pm 0,2$ )	3,64 ( $\pm 0,8$ )
20% de resíduo	1,08 ( $\pm 0,2$ )	2,62 ( $\pm 0,7$ )
30% de resíduo	1,47 ( $\pm 0,2$ )	2,95 ( $\pm 0,4$ )
40% de resíduo	1,43 ( $\pm 0,2$ )	1,5 ( $\pm 0,8$ )

Por meio do ensaio de granulometria à laser, Figura 3, pôde-se observar que, em sua maioria, as partículas do resíduo e solo se apresentam com medidas entre 62,5 e 90  $\mu\text{m}$ .

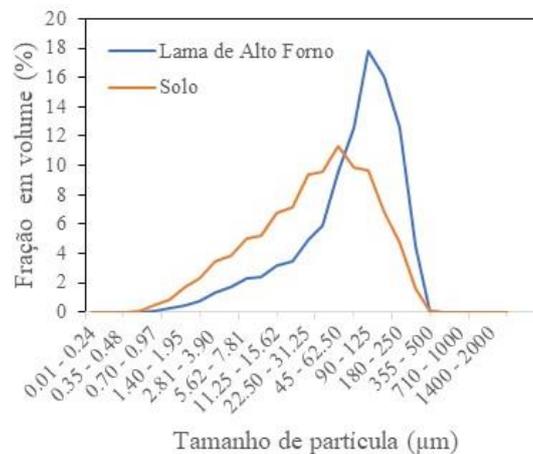


Figura 3: Distribuição do tamanho de partículas do Solo e Lama de Alto Forno.

## CONCLUSÕES

Todos os resultados obtidos indicaram que o resíduo Lama de Alto Forno, no percentual de até 40% em massa, é adequado como substituinte parcial do solo, tendo em vista a caracterização química e física do material estar dentro dos limites normativos (ABNT NBR 10833:2012)<sup>(1)</sup> para este tipo de produto, tijolo de solo-cimento, no que se refere aos Limites de Atterberg. Com relação a resistência a compressão e a absorção de água percebe-se uma tendência de aumento da resistência a compressão e redução da absorção de água com a utilização do resíduo. Na continuidade do trabalho serão confeccionados tijolos de solo-cimento para avaliação do efeito da adição do resíduo no produto.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.
- SOUZA SANTOS, P. Ciência e tecnologia de argilas. v. 1, São Paulo: Edgard Blücher, 1989.

3. SCANSOURCE. A produção em massa do aço inicia a segunda Revolução Industrial. 2016. Disponível em: <https://blogs.scansource.com.br/2015/07/27/a-producao-em-massa-do-aco-inicia-a-segunda-revolucao-industrial/>. Acesso em: Junho de 2019.
4. DIAS, C.A.C.M. SANCHEZ, R.; MONTEIRO, S.N.; VIEIRA, C.M.F. Avaliação das propriedades físicas mecânicas de cerâmica vermelha incorporada com lama de alto forno. In: 19 Congresso brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Campos do Jordão, SP, 2010. Anais do 19<sup>o</sup>CBCIMat, 2010.
5. VIEIRA, C.M.F.; DIAS, C.A.C.M.; MOTHÉ, A.V.; SÁNCHEZ, R.; MONTEIRO, S.N. Incorporação de lama de alto forno em cerâmica vermelha. Revista Cerâmica, n<sup>o</sup> 53, p. 381–387. 2008.
6. ERENO, D. Resíduo vira aço – 2007. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/?art=3201&bd=1&pg=1&lg>. Acesso em: Junho de 2019.
7. SCARDUA, S. S. DA S. Utilização do resíduo de lapidação de vidros planos na produção de tijolos de solo-cimento. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Instituto Federal do Espírito Santo, IFES – Vitória/ES.
8. DELUNARDI, D.L. Desenvolvimento e caracterização de tijolo de solo-cimento com adição de resíduo do corte de rochas ornamentais com fio diamantado. 2019. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologias Sustentáveis) – Instituto Federal do Espírito Santo, IFES – Vitória/ES.
9. MOHAUPT, A. F. Influência do Resíduo da Dessulfuração de Gases da Coqueria em Tijolos de Solo-cimento Utilizados na Construção Civil. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Instituto Federal do Espírito Santo, IFES – Vitória/ES.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6697: Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15900-1: Água para amassamento de concreto — Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
15. NASCIMENTO, R.C.; LENZ, G.; SANTOS, D.M. DOS; CAPOCCHI, J.D.T.; TAKANO, C.; MOURÃO, M. B. Caracterização e viabilização para reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos. In: Anais do 55<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, RJ, p. 2647-2656. 2000.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8491: Tijolo maciço de solo-cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2012.
17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8492: Tijolo de solo-cimento — análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2012.