



WESLEY GONÇALO DA SILVEIRA

**ESTUDO DE DOSAGEM DE AREIA DESCARTADA DE
FUNDIÇÃO EM SUBSTITUIÇÃO AO SOLO NA MATRIZ DE
TIJOLO SOLO-CIMENTO**

**LAVRAS-MG
2023**

WESLEY GONÇALO DA SILVEIRA

**ESTUDO DE DOSAGEM DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO EM
SUBSTITUIÇÃO AO SOLO NA MATRIZ DE TIJOLO SOLO-CIMENTO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro
Orientador

**LAVRAS-MG
2023**

WESLEY GONÇALO DA SILVEIRA

**ESTUDO DE DOSAGEM DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO EM
SUBSTITUIÇÃO AO SOLO NA MATRIZ DE TIJOLO SOLO-CIMENTO**

**DOSING STUDY OF DISCARDED FOUNDRY SAND IN SUBSTITUTE OF SOIL IN
THE SOIL-CEMENT BRICK MATRIX**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 08 de março de 2023
Dr. Eduardo Souza Cândido - UFLA
Me. Milena Camila de Oliveira - UFLA

Prof. Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro
Orientador

**LAVRAS-MG
2023**

RESUMO

A areia descartada de fundição (ADF) é um resíduo gerado em grande quantidade pela indústria metalúrgica. Seu descarte inadequado causa sérios impactos ambientais, como a contaminação do solo e da água. Por isso, é fundamental destiná-lo de maneira ambientalmente correta, seja por meio da reciclagem ou da disposição em aterros sanitários adequados. Nesse sentido, solucionar o descarte inadequado de resíduos no meio ambiente propulsionou a realização deste trabalho, o qual apresenta um estudo de dosagem de ADF, para a substituição do solo na fabricação de tijolo solo-cimento como uma alternativa ecológica à construção civil. A escolha da ADF como aditivo se deu por se tratar de uma matéria-prima de aquisição econômica no Brasil e, sobretudo, renovável, possibilitando a produção de peças sustentáveis de alvenaria que apresentam resistência e durabilidade tão eficientes quanto os tijolos convencionais. As amostras de ADF dos ensaios realizados foram coletadas de um aterro industrial, localizado no município de Extrema/MG. Em acordo com a NBR 10833 (ABNT, 2012), optou-se por analisar quatro tratamentos: T0, T25, T50 e T100, correspondentes à, respectivamente, 0%, 25%, 50%, e 100% de ADF em substituição à massa de solo. Para cada tratamento proposto, realizou-se ensaios de granulometria, massa específica dos sólidos e limites de consistência. Também foi realizado um ensaio de compactação dos tratamentos para, posteriormente, executar o ensaio de compressão simples dos corpos de prova cilíndricos, nos pontos de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima. Os resultados encontrados demonstraram que os tratamentos com até 50% de ADF são adequados para a confecção de tijolo solo-cimento, atendendo aos requisitos estabelecidos pela NBR 10833 (ABNT, 2012), porém, analisando pelos resultados de granulometria com sedimentação, todos os tratamentos são adequados. Quanto ao ensaio de compressão simples, constatou-se que, quanto maior a porcentagem de ADF, maior é a resistência à compressão. Sendo assim, concluiu-se que os tratamentos T25 e T50 são viáveis para serem utilizados na confecção de tijolo-solo-cimento, recomendando-se para técnicas futuras a fabricação de tijolos na dosagem de 50% de ADF e 50% de solo.

Palavras-chave: Reciclagem. Resíduos Industriais. Tijolo ecológico.

ABSTRACT

The discarded foundry sand (DFS) is a waste generated in large quantities by the metallurgical industry. Its improper disposal causes serious environmental impacts, such as soil and water contamination. Therefore, it is essential to dispose of it in an environmentally correct way, either through recycling or disposal in appropriate landfills. In this sense, solving the inappropriate disposal of waste in the environment propelled the realization of this work, which presents a study of dosage of discarded foundry sand for the replacement of soil in the manufacture of soil-cement brick as an ecological alternative to civil construction. The choice of DFS as an additive was due to the fact that it is an inexpensive raw material to be purchased in Brazil and, above all, renewable, enabling the production of sustainable masonry pieces that have resistance and durability as efficient as conventional bricks. The samples of DFS from the tests carried out were collected from an industrial landfill, located in the municipality of Extrema/MG. In accordance with NBR 10833 (ABNT, 2012), it was decided to analyze four treatments: T0, T25, T50 and T100, corresponding to, respectively, 0%, 25%, 50%, and 100% of DFS in replacement for the soil mass. For each proposed treatment, granulometry tests, specific mass of solids and consistency limits were carried out. A compaction test of the treatments was also carried out to later perform the simple compression test of the cylindrical specimens, at the points of optimal moisture and maximum dry specific mass. The results found showed that treatments with up to 50% ADF are suitable for making soil-cement brick, meeting the requirements established by NBR 10833 (ABNT, 2012), however, analyzing the results of granulometry with sedimentation, all treatments are suitable. As for the simple compression test, it was found that the higher the percentage of DFS, the greater the resistance to compression. Therefore, it was concluded that the T25 and T50 treatments are viable to be used in the manufacture of brick-soil-cement, recommending for future techniques the manufacture of bricks in the dosage of 50% of DFS and 50% of soil.

Keywords: Recycling. Industrial Waste. Ecologic brick.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	REFERENCIAL TEÓRICO	8
2.1	Resíduos sólidos	8
2.2	Areia Descartada de Fundição (ADF)	9
2.3	Tijolo solo-cimento.....	11
2.4	Incorporação de resíduos na matriz tijolo solo-cimento	16
2.5	Estudo de dosagem	17
3	MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1	Solo.....	19
3.2	Cimento.....	20
3.3	Areia Descartada de Fundição (ADF)	20
3.4	Ensaio de caracterização dos materiais.....	20
3.4.1	Massa específica dos sólidos.....	21
3.4.2	Análise granulométrica	22
3.4.3	Limites de consistência	22
3.5	Ensaio de retração	23
3.6	Determinação das porcentagens de solo e ADF	23
3.7	Ensaio de compactação.....	24
3.8	Confecção dos corpos de prova	25
3.9	Ensaio de compressão simples	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
4.1	Caracterização dos materiais.....	29
4.1.1	Massa específica dos sólidos.....	29
4.1.2	Análise granulométrica	29
4.1.3	Limites de consistência	33
4.2	Ensaio de retração	35
4.3	Ensaio de compactação.....	37
4.4	Ensaio de compressão simples	42
5	CONCLUSÃO.....	44
	REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

O não gerenciamento adequado do descarte de resíduos é um dos maiores impasses ambientais do mundo, perpassando por todos os setores da sociedade, dos domicílios às indústrias. Diante desse contexto, a Organização das Nações Unidas (ONU) e seus parceiros no Brasil estão trabalhando para alcançar 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável como metas da Agenda de 2030.

Dentre esses objetivos, destaca-se a intenção dessa pesquisa em fortalecer as seguintes ações da Agenda de 2030 (ONU, 2023): **9 - Indústria, inovação e infraestrutura:** Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação; **11- Cidades e comunidades sustentáveis:** Tornar as cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis; **12- Consumo e produção responsáveis:** Garantir padrões de consumo e de produção sustentáveis.

Assim posto, no setor metalúrgico, a areia descartada de fundição (ADF) é um tipo de resíduo gerado durante o processo de fundição de metais. Seu descarte é oneroso e complexo e se tornou um grande problema ambiental devido à quantidade de material gerado. Em muitos casos, a única alternativa é a disposição em aterros sanitários, o que pode gerar impactos ambientais negativos. Por isso, é fundamental buscar soluções mais sustentáveis e eficazes para a destinação da areia descartada de fundição, pensando em seu reuso e aplicação em outros setores.

Na área da construção civil, um dos setores que mais consome insumos naturais para a produção de artefatos, a preocupação com o esgotamento das matérias-primas e a exorbitante quantidade de bens descartados vem propulsionando estudos de técnicas e fontes renováveis para a fabricação de peças sustentáveis de alvenaria, como os tijolos ecológicos de solo-cimento.

Nesse sentido, a presente pesquisa, além de mobilizar outros estudos em busca de recursos e tecnologias de reutilização e reciclagem, fortalece significativamente o alcance das metas da Agenda de 2030 da ONU para o Desenvolvimento Sustentável, ao incorporar o resíduo de areia descartada de fundição (ADF) na produção de tijolos ecológicos.

A escolha do resíduo em questão se deu pelas excelentes características da substância descartada quando adicionadas à base da mistura dos tijolos, consistida em água, solo e cimento. A interação entre os aditivos, de acordo com as dosagens testadas, pode resultar em um produto viável, econômico e muito resistente, tornando-se uma eficiente opção de substituição dos tijolos convencionais.

Ao analisar o teor ideal dos aditivos necessários por meio de ensaios realizados com diferentes dosagens, objetivou-se, sobretudo, obter o melhor aproveitamento possível do material descartado, transformando-o em novo produto, resistente e durável.

Cumprido dizer, no entanto, que a pesquisa não pretende esgotar as possibilidades de ensaios de dosagens, mas incentivar caminhos viáveis que oportunizem e incentivem técnicas e estudos, diante da aplicabilidade eficiente do resíduo de ADF à confecção de tijolos solo-cimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Resíduos sólidos

A urbanização, o crescimento industrial e a revolução tecnológica alteraram as atividades humanas, seus modos de produção e de consumo. De acordo com Gouveia (2012) como consequência, o aumento na produção de resíduos se tornou um grande problema ambiental e econômico da sociedade, considerando que o descarte desses materiais, muitas vezes, não possui destinação adequada.

A gravidade da questão é que muitos resíduos podem trazer riscos à saúde da população e impactos ambientais irreversíveis, como degradação do solo, comprometimento dos corpos d'água e mananciais, a intensificação de enchentes, a contribuição para a poluição do ar, a proliferação de vetores sanitários que acarretam em insalubridade nas áreas afetadas, entre outros problemas. Por isso, é cada vez mais evidente que viabilizar práticas sustentáveis de gerenciamento adequado dos resíduos é a única maneira de reduzir significativamente os impactos à saúde e qualidade ambiental e recuperar os contingentes degradados (GOUVEIA, 2012).

Com efeito, visando regulamentar as estratégias das ações ambientais, a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010) traçou diretrizes e metas de disposição, gestão e gerenciamento adequados e ambientalmente responsáveis para os resíduos de diversas fontes. Buscando, sobretudo, a redução do volume gerado, ao incentivar e ampliar projetos de reciclagem e pressionar a responsabilização dos agentes produtores de resíduos e exigir a colaboração e execução de planos de redução pelas instituições públicas, governo dos estados, municípios e indústrias.

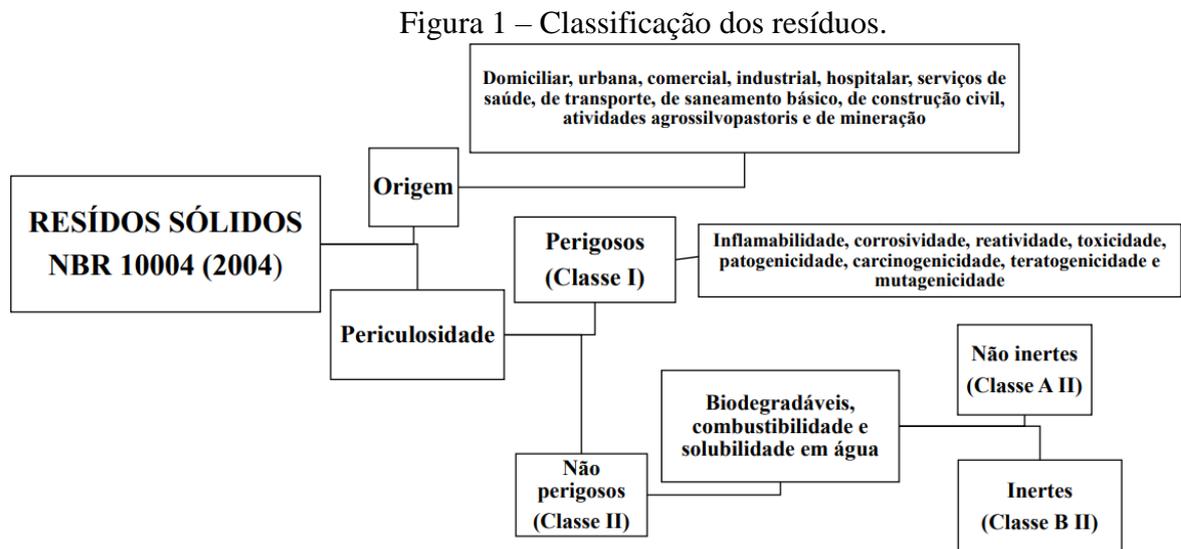
Em geral, as ações adequadas, segundo a PNRS são: a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, nesta ordem de importância. Tecnologias de recuperação dos resíduos urbanos, desde que comprovadas a viabilidade técnica e ambiental, podem ser utilizadas e serão monitoradas (BRASIL, 2010).

Ficou determinado, portanto, que são considerados resíduos sólidos quaisquer bens descartados – sejam materiais, substâncias ou objetos resultantes das atividades humanas – apresentados tanto em estados sólidos ou semissólidos, bem como na forma de gases contidos em recipientes ou líquidos inviáveis de serem lançados na rede pública de esgotos, exigindo, portanto, soluções técnicas e econômica indisponíveis tecnologicamente (BRASIL, 2010).

De outro lado, amparando a PNRS, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), regulamenta os tipos dos resíduos de acordo com “a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.” (ABNT NBR 10004:2004)

Assim, duas categorias de resíduos são classificadas, a qual a primeira diz respeito à origem (domiciliar, urbana, comercial, industrial, hospitalar, bem como os oriundos de serviços de saúde, de transporte, de saneamento básico, de construção civil, de atividades agrossilvopastoris e de mineração), ao passo que a outra determina-os pelo nível de periculosidade, sendo os perigosos os que oferecem risco à saúde e ao meio ambiente (apresentando características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade), e os não perigosos, aqueles que não representam características de risco e podem conter propriedades biodegradáveis, de combustibilidade ou solubilidade em água (BRASIL, 2010).

O fluxograma ilustrado na Figura 1 apresenta a hierarquia das classificações.



Fonte: Brasil (2010).

2.2 Areia Descartada de Fundação (ADF)

A moldagem em areia é um processo muito antigo e o mais tradicional na fundição, uma vez que a areia apresenta características versáteis que fazem dela a primeira opção nos processos existentes, como a boa disponibilidade na natureza, o baixo custo de exploração e o fato de serem refratárias e coesíveis ao serem misturadas com argila e outros aditivos orgânicos ou inorgânicos (KLINSKY, 2013).

De acordo com Reinert (1996 citado por CARNIN, 2008), a matéria das areias de fundição é constituída por um agregado fino, mineralogicamente puro, denominado “areia base”, recebendo aglomerantes que conferem as características da forma dos moldes durante o processo de fundição.

Conforme Oliveira (2016), podem ser divididas em duas categorias: areia verde e areia ligada quimicamente. Para a fundição de areia verde, são adicionados à areia base bentonita, carvão e água. Já nas areias ligadas quimicamente, são adicionados ligantes químicos, tais como resinas fenólicas e ureia-formaldeído. Os aditivos são adicionados à areia para confeccionar peças mais complexas com melhor acabamento, durabilidade e resistência.

Contudo, apesar do processo de fundição reutilizar a areia muitas vezes, a degradação é inevitável e, quando não é mais possível reaproveitá-la, essa areia é descartada e denominada de ADF. Nesse contexto, pesquisas sobre o reaproveitamento de ADF têm se tornado cada vez mais frequentes em razão da quantidade de resíduo gerado, além do custo elevado para a preparação e manutenção de aterros destinados ao descarte (SILVA, 2010).

A esse respeito, a ABNT define na NBR 15702 (ABNT, 2009) como sendo areias descartadas de fundição aquelas provenientes do processo produtivo da fabricação de peças fundidas, como areias de macharia, de moldagem, areia a verde, preta, despoejamento, de varrição. Entretanto, é importante elucidar que, no Brasil, a maior parte das ADF não apresentam riscos de periculosidade, enquadrados pela NBR 10004 (ABNT, 2004) na classe de resíduos não-perigosos, classificadas como inertes ou não inertes.

Estudos sobre a viabilidade ambiental da reciclagem de areia descartada de fundição demonstram que as areias de fundição são um subproduto muito viável para a substituição de materiais convencionais. Para Alves (2012), devido ao seu baixo custo, alta disponibilidade e performance satisfatória, o tipo de ADF mais frequente para aplicações de reutilização são as areias verdes, principalmente as de fundições ferrosas e de alumínio.

Schmitz *et al.* (2013), estudaram o efeito da adição de areia descartada de fundição na fabricação de argamassa. Com os resultados, os autores constataram que a ADF aumenta as propriedades de resistência da argamassa e este material possui potencial para ser utilizado como aditivo e agregado miúdo na fabricação de argamassas.

Klinsky (2013), avaliou a possibilidade de reaproveitar a areia descartada de fundição na construção de camadas de pavimentação de baixo volume de tráfego. O autor concluiu que a ADF apresenta característica para ser utilizada nas construções desse tipo de pavimento, mas recomenda a construção de trechos experimentais para monitoramento para garantir que o resíduo não comprometa a segurança ambiental.

Beutler (2017), estudou o uso de subprodutos industriais como areia de fundição para fabricar blocos de solo-cimento. Avaliando o desempenho do cimento supersulfatado e da areia de fundição como materiais corretivos do solo, analisando sua viabilidade em termos de resistência à compressão, absorção de água e durabilidade. Os resultados evidenciaram que a areia de fundição tem potencial para ser utilizada como material de correção do solo para aplicação em blocos de solo-cimento.

De acordo com os resultados obtidos por Dyer *et al.* (2022), a ADF se enquadra como agregado miúdo, apresentando características semelhantes à areia natural, e avaliaram sua viabilidade técnica e econômica, como agregado em artefatos de cimento. Além disso, os ensaios de lixiviação e solubilização indicaram que as peças contendo ADF se enquadram na classificação de não perigosos e inertes. Assim, os autores concluíram que o reuso de ADF como agregado na fabricação de artefatos ou blocos de cimento é uma iniciativa técnica e ambientalmente viável.

2.3 Tijolo solo-cimento

A construção civil é um dos setores econômicos que mais impactam o meio ambiente, devido à alta exploração de recursos naturais e matérias-primas. Em razão disso, o setor tem investido cada vez mais em novas tecnologias e técnicas para o uso de materiais reciclados na confecção de novos artefatos. Nesse contexto, a produção de tijolos solo-cimento surgiu como uma excelente opção sustentável, sendo o processo de fabricação pensado para que se tenha funcionalidade na construção civil, reduzindo também o desperdício de material.

De acordo com Pereira e Pezzuto (2010), o interesse de confecção no Brasil surgiu em 1936, a partir da regulamentação do seu uso pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). As primeiras incorporações desse tijolo se deram em bases e sub-bases de pavimentos da estrada.

Segundo Heise (2004), entre as primeiras obras realizadas com a aplicação de tijolo solo-cimento no país, estão o aeroporto de Petrolina/PE e a construção de residências em Petrópolis/RJ, durante a década de 40. O autor ainda relata que o arquiteto Lucio Costa utilizou a técnica de pau-a-pique e um painel monolítico de solo-cimento para um projeto desenvolvido à construção da Vila Operária de João Monlevade/MG. O estado de conservação dessas construções demonstrou a eficiência do material e da técnica. Depois desse momento, a produção de tijolo solo-cimento foi consideravelmente ampliada, devido às comprovadas vantagens técnicas e econômicas oferecidas (HEISE, 2004 apud PEREIRA; PEZZUTO, 2010).

Para Barreto (2020), os tijolos solo-cimento permitem estrutura ideal, há qual há furos, ou septos que possibilitam a passagem de tubulações elétricas e hidráulicas, dispensando rasgos realizados nas técnicas de construção atuais. Além disso, a maleabilidade de sua confecção oferece um acabamento fino, eficiente para bases ou sub-bases de pavimentos em vias urbanas, pátios industriais ou estacionamentos. Também pode ser seguramente aplicado como blocos intertravados, painéis, paredes, fundação em obras civis como tijolos e blocos, revestimento de barragens, canais, diques, revestimento de túneis, estabilização de taludes, como sacos de solo-cimento, entre outros.

Diversos são os estudos que utilizam a composição de tijolo solo-cimento para a obtenção de peças sustentáveis. Silva Segantini e Wada (2011) aplicaram à composição diferentes resíduos de construção e demolição, verificando a excelente adesão da composição de solo-cimento aos resíduos adicionados. Afirmam também a redução dos custos de consumo de água e de energia na produção desses tijolos.

Lira (2020) também comprova que o solo-cimento permite composições muito eficientes quando recebe materiais recicláveis de demolição em sua composição. Demonstra ainda que, além de dispensar processos de queima, a fabricação de solo-cimento diminui os custos de aquisição de matéria-prima, pois os tijolos podem ser produzidos com o solo do próprio local da obra.

Para regulamentar a produção de tijolo solo-cimento, a NBR 8491 (ABNT, 2012) define como sendo “constituído de uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland, água e aditivos e/ou pigmentos em proporções que atendam aos requisitos desta norma, cuja altura menor que sua largura. Pode ser maciço ou vazado.”

Com efeito, a ABNT estabelece pela NBR 10833 (ABNT, 2013) as características geotécnicas do solo que devem ser atendidas para que este possa ser utilizado na fabricação das peças de tijolos solo-cimento, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Características do solo para a produção de tijolos de solo-cimento.

Características do solo	
Passante na peneira de 4,75 mm	100%
Passante na peneira de 0,075 mm	10% a 50%
Limite de liquidez	≤ 45%
Índice de plasticidade	≤ 18%

Fonte: NBR 10833 (ABNT, 2013).

Ainda à respeito da classificação e identificação dos solos, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), organizou os ensaios a seguir – padronizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) – com a finalidade de orientar as análises das características dos solos, apresentando estudos a respeito da: (I) Determinação da massa específica dos grãos de solos (NBR 6458/2016 ou DNER DPT 93/1994); (II) Determinação do limite de liquidez dos solos (NBR 6459/2017); (III) Determinação do limite de plasticidade dos solos (NBR 7180/2016); (IV) Análise granulométrica dos solos (NBR 7181/2018).

Nesse sentido, depois de caracterizar o solo por meio das orientações dos ensaios, é necessário classificá-lo de acordo com a American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), como demonstra a Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação de solos Highway Research Board – HRB adotada pela AASHTO.

Classificação geral	Materiais granulares (35% ou menos passa na peneira N° 200)							Materiais silto-argilosos (Mais de 35% passa na peneira N° 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Classificação em grupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
% material passante											
Peneira 2,00 mm	50 máx										
Peneira 0,42 mm	30 máx	50 máx	51 min								
Peneira 0,075mm	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 min	36 min	36 min	36 min
Limite Liquidez				40 máx	41 min	40 máx	41 min	40 máx	41 min	40 máx	41 min
Índice de Plasticidade	6 máx		N.P.	10 máx	10 máx	11 min	11 min	10 máx	10 máx	11 min	11 min
Materiais predominantes	Fragmentos de pedra e areia		Areia fina	Pedregulhos e areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Qualidade geral como subleito	Excelente a boa							Regular a mau			

Fonte: AASHTO/HRB.

Contudo, é preciso compreender as propriedades do cimento Portland utilizado na mistura. Trata-se de um pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, o qual se endurece devido a ação da água. Após endurecer, o cimento Portland não se desintegra ou se dissolve, nem mesmo sob a ação da água (ABCP, 2002)

Como postulado nos ensaios, segundo a ABCP, a definição do teor ideal de cimento Portland a ser misturado no solo é realizada por meio dos estudos de dosagem, os quais diferentes quantidades desse cimento são analisadas a fim de encontrar um valor ideal capaz de estabilizar a massa de solo, para se obter as características mecânicas necessárias à fabricação dos tijolos. Em relação às dosagens, a ABCP utiliza a classificação da AASHTO/HBR, que estabelece o teor de cimento utilizado no estudo de dosagem.

A Tabela 3 relaciona o teor de cimento Portland com a classificação do solo, segundo a AASTHO/HRB.

Classificação do solo (AASHTO)	Teor de cimento em massa (%)
A1 – a	5
A1 – b	6
A2	7
A3	9
A4	10
A5	10
A6	12
A7	13

Fonte: ABCP (2004).

Os ensaios da ABCP demonstram que os solos que contêm 50% a 90% de areia produzem uma mistura de solo-cimento com maior durabilidade. Segundo os estudos da ABCP, em relação aos solos arenosos, contêm uma boa graduação e plasticidade de média a baixa, ficando suscetíveis a se estabilizarem com cimento, uma vez que demandam teores de aditivos baixos. Ao passo que os solos finos ou argilosos têm plasticidade elevada, requerendo teores elevados de cimento, exigindo uma força mecânica mais enérgica para realizar a mistura.

No que se refere a água utilizada, a ABNT, por meio da NBR 8491 (ABNT 2012), estabelece que não deve apresentar sujidade ou impurezas prejudiciais à hidratação do cimento, bem como o solo utilizado não deve conter também matérias orgânicas que interfiram na estabilidade e padronização das peças de tijolos. Em relação à absorção de água, recomenda-

se que a média dos valores não seja maior que 20%, e que os valores individuais não sejam maiores que 22%, com tempo mínimo de 7 dias.

Para tanto, a NBR 8491 (ABNT, 2012) também estabelece as dimensões, definindo que o tijolo solo-cimento deve apresentar 20 cm de comprimento, 10 cm de largura e 5 cm de altura (Tipo A) ou 24 cm de comprimento, 12 cm de largura e 7 cm de altura (Tipo B). Pode, no entanto, apresentar dimensões diferentes dessas, desde que a altura seja menor que a largura. Já em relação ao valor médio de resistência à compressão da amostra ensaiada, a norma especifica que não deve ser inferior a 2,0 MPa ou 20,0 kgf/cm², enquanto o valor de resistência à compressão individual não deve ser inferior a 1,7 MPa ou 17,0 kgf/cm², com idade mínima de 7 dias.

Em termos gerais, quanto às etapas da fabricação, os processos se constituem em misturar o solo-cimento de maneira manual até se obter uma massa de coloração uniforme. Após a mistura, inicia-se o processo de modelagem, em que os blocos são prensados e colocados à sombra para a secagem. A partir daí, os tijolos são submetidos ao processo de cura por, no mínimo, 14 dias, e precisam ser conservados úmidos durante os primeiros 7 dias. Depois desse período, os tijolos estão prontos para armazenamento e transporte.

2.4 Incorporação de resíduos na matriz tijolo solo-cimento

Amparada pela literatura de referências na área, como Barreto (2020), Lira (2020), Pereira e Pezzuto (2010), Silva Segantini e Wada (2011) e Heise (2004), bem como pelas diretrizes normativas para a confecção de tijolos da ABNT, da ABCP e da AASHTO, a análise dos ensaios realizados com o resíduo de ADF demonstra a eficiência da reutilização desse composto como matéria-prima renovável para a fabricação de tijolos ecológicos.

Neste sentido, adicionar resíduos de ADF em substituição às matérias primas tradicionais do tijolo, além de minimizar os impactos ambientais em razão do descarte inadequado desse resíduo, beneficia economicamente a construção civil, bem como contribui às pesquisas do setor, impulsionando tratativas e estudos das técnicas e tecnologias sustentáveis.

Contudo, agregar o resíduo ADF exige um cuidadoso estudo de dosagem, ao qual se apresentará a seguir. Para esse estudo, cabe destacar que propriedades como resistência, densidade do resíduo e tipo de aplicação são as principais determinações para a definição de dosagens eficazes à produção das peças.

2.5 Estudo de dosagem

De acordo com as orientações das normas de dosagem e métodos de ensaios da ABCP, utilizou-se uma sequência de ensaios realizados com a mistura determinada. Assim, à mistura foram acrescidos o resíduo de ADF, o cimento e a água. Na sequência, após a interpretação da interação obtida, coletou-se o resultado de três variáveis consideradas: a quantidade de cimento, a quantidade de água e a quantidade de massa específica seca alcançada depois da compactação.

Baseado nas constatações de Buriol (2002), alguns passos devem ser seguidos no momento da dosagem, pois garantirão a durabilidade e a resistência do produto. Boa parte dessas orientações se aplicam para qualquer caso, todavia, existem três que dependem diretamente das propriedades do solo utilizado, sendo elas: a quantidade de cimento; a quantidade de água; a massa específica aparente seca após a compactação (BURIOL, 2002 apud PINTO, 2015).

Conforme Cabral, Santana e Reis (2021) a dosagem de cimento influencia diretamente a qualidade final das peças, interferindo na dosagem do tipo de solo, na resistência dos tijolos, na umidade e na prensa.

Grande (2003) também destaca que para se obter em uma mistura de boa qualidade deve se observar a umidade da mistura, operações de mistura e de compactação, tempo e condições de cura. O autor também enfatiza que o solo-cimento destinado à moldagem de tijolos, blocos ou paredes monolíticas tem uma dosagem mínima condicionada às especificações de valores mínimos de resistência à compressão e absorção de água. Ou seja, a adição de resíduos pode variar à medida que não interfira diretamente no teor mínimo de cimento e de solo.

Somado a esse contexto, Segantine e Wada (2011), concluíram em seus estudos que a dosagem adequada de cimento deve ser de 4%, com adição mínima de 20% de resíduo de construção e demolição (RCD), obtendo melhores resultados quando se aumenta a dosagem do resíduo à mistura, chegando a 100% da massa do solo. Por sua vez, em sua pesquisa, Dantas (2020) empregou diversos tipos de resíduos e verificou que, independentemente da sua natureza, a adição de 20% a 40% em massa em relação ao solo foi suficiente para obter um desempenho satisfatório. Além disso, o teor máximo de cimento em todas as misturas solo-resíduo testadas foi de 10%.

Em linhas gerais, segundo os referenciais utilizados, a interação entre as características do solo e do cimento é determinante para se fazer um estudo da dosagem da mistura, uma vez que o ideal é uma dosagem que utilize a maior quantidade de resíduo possível sem prejudicar

a qualidade dos tijolos, tomando como parâmetro uma proporcionalidade razoável que esteja entre os valores de pesquisas já realizadas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Solo

O solo utilizado no presente trabalho foi coletado no campus sede da Universidade Federal de Lavras (UFLA), nas margens da primeira estrada à esquerda da Estrada das Lagoas sentido LavrasTec – UFLA. O ponto de coleta está localizado nas coordenadas geográficas 21° 14' 12.4" S, 44° 58' 22.3" O.

Figura 2 – Local de coleta do solo.



Fonte: Google Earth (2022).

O local de coleta foi escolhido, com base no levantamento feito por Curi *et al.* (2017), por apresentar uma boa porcentagem de areia, que de acordo com a NBR 10833 (ABNT, 2012) é um material com potencial de ser utilizado na produção de tijolos solo-cimento.

Após a coleta, o solo foi homogeneizado, seco ao ar até atingir a umidade higroscópica e, por fim, armazenado em uma bombona plástica higienizada.

Figura 3 – Secagem ao ar após a coleta.



Fonte: Do autor (2022).

3.2 Cimento

O cimento utilizado para o estudo foi do tipo CP II-E-32 – Cimento Portland Composto com Escória. O CP II-E-32 possui propriedades aceitáveis para a fabricação do tijolo solo-cimento, além de ser facilmente encontrado no mercado, por se tratar de um material de extremo uso na construção civil.

3.3 Areia Descartada de Fundição (ADF)

A areia descartada de fundição foi fornecida por uma indústria metalúrgica localizada no município de Extrema/MG. A areia coletada é proveniente de um aterro industrial (Classe II B) da própria empresa.

Figura 4 – Aterro industrial onde a ADF foi coletada.



Fonte: Google Earth (2022).

3.4 Ensaios de caracterização dos materiais

O solo e a ADF foram homogeneizados, destorroados, secos ao ar e preparados para os ensaios de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016).

Para caracterização física do solo e da ADF foram realizados os ensaios apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Ensaios de caracterização.

Ensaio	Norma
Massa específica dos sólidos	DNER-ME 093/94
Análise granulométrica	NBR 7181/2018
Limite de Liquidez (LL)	NBR 6459/2017
Limite de Plasticidade (LP)	NBR 7180/2016

Fonte: Do autor (2022).

3.4.1 Massa específica dos sólidos

A massa específica dos sólidos foi determinada de acordo com a DNER-ME 093/94, que utiliza o processo de aquecimento do picnômetro para retirar todo o ar presente na amostra.

Figura 5 – Análise de densidade dos sólidos.



Fonte: Do autor (2022).

3.4.2 Análise granulométrica

A granulometria foi determinada de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2018), aplicando a combinação de sedimentação e peneiramento.

Figura 6 – Procedimento de peneiramento e sedimentação.



Fonte: Do autor (2022).

A partir dos resultados obtidos desse ensaio foi construída a curva de distribuição granulométrica de cada material.

3.4.3 Limites de consistência

Os limites de consistência, limite de liquidez e limite de plasticidade, foram determinados de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 2017) e NBR 7180 (ABNT, 2016).

O índice de plasticidade (IP) foi determinado de acordo a Equação 1.

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

Onde:

IP – Índice de plasticidade;

LL – Limite de liquidez;

LP – Limite de plasticidade.

3.5 Ensaio de retração

O ensaio de retração foi realizado de acordo com a metodologia descrita no manual do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CEPED, 1984). O ensaio tem como objetivo verificar a presença de argilas expansivas nos solos. Esse tipo de argila pode absorver água em grande quantidade e no processo de secagem ocasionar fissuras ou trincas.

Nesse ensaio as amostras de solo e ADF foram umedecidas até a mistura aderir uma consistência plástica, sendo então colocada dentro de uma caixa de madeira com dimensões internas de 60,0 cm de comprimento, 8,5 cm de largura e 3,5 cm de espessura. A caixa moldada com a mistura permaneceu em repouso à sombra e depois de sete dias foi medida a retração no sentido do comprimento. A soma das medidas deve ser inferior a 2,0 cm e a amostra não deve apresentar nenhuma trinca.

3.6 Determinação das porcentagens de solo e ADF

De acordo com a NBR 10833 (ABNT, 2012), e conforme descrito na Tabela 1, o solo deve atender as características estabelecidas para a produção de tijolos de solo-cimento. Sendo assim, a porcentagem de ADF a ser incorporada na massa de solo foi determinada a partir dos resultados preliminares obtidos no peneiramento seco de 4,75 mm e 0,075 mm e dos limites de consistência.

A Tabela 5 apresenta os resultados preliminares de caracterização do solo e da ADF.

Tabela 5 – Resultados preliminares de ensaios de caracterização.

Ensaio	Material	
	Solo	ADF
Peneiramento 4,75 mm (% passante)	100	100
Peneiramento 0,075 mm (% passante)	15	5
Limite de Liquidez (%)	39	20
Índice de Plasticidade (%)	11	4

Fonte: Do autor (2022).

O solo atendeu todos os requisitos da norma, já a ADF não atendeu o requisito de porcentagem de passante na peneira de 0,075 mm. Com isso, para fazer a correção granulométrica foram propostos tratamentos correspondentes à mistura de solo e ADF nas proporções de 40, 50 e 55 de ADF em relação à massa de solo. Para cada tratamento foi

realizado o ensaio de peneiramento seco de na peneira de 0,075 mm. A Tabela 6 apresenta os resultados preliminares do peneiramento das misturas.

Tabela 6 – Resultados preliminares do peneiramento das misturas.

Tratamento	Peneiramento 0,075 mm (% passante)
40	12,4
50	11,0
55	9,0

Fonte: Do autor (2022).

Nota-se que o terceiro tratamento apresentou apenas 9,0% de passante na peneira de 0,075 mm, não atingindo o valor mínimo indicado pela norma. Sendo assim, de acordo com os resultados preliminares, não foram definidas misturas com mais de 50% de ADF, mas ainda assim adotou-se o tratamento com 100% de ADF para observar o comportamento do material.

Por fim, foram propostos quatro tratamentos para o estudo de dosagem, com 0%, 25%, 50% e 100% de ADF em substituição parcial do solo. Os tratamentos foram denominados como T0, T25, T50 e T100, respectivamente.

3.7 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação foi realizado de acordo com os procedimentos da NBR 7182 (ABNT, 2020), a fim de determinar os valores de umidade ótima e de massa específica aparente seca máxima para cada tratamento.

O procedimento foi executado com cilindro pequeno (Proctor) com volume útil igual a 1000 cm³. Foi utilizado o compactador mecânico modelo LR T0131 (Figura 7), com soquete pequeno com massa de 2,5 kg e com controle de altura de queda de aproximadamente 30 cm. A energia de compactação adotada foi energia normal, em três camadas e aplicando-se 26 golpes por camada.

Figura 7 – Equipamento de compactação elétrico utilizado nos ensaios.



Fonte: Do autor (2022).

O método de ensaio foi realizado sem reuso de material, com amostras preparadas com secagem prévia até a umidade higroscópica. Foi determinado no mínimo cinco pontos, de cada tratamento, para obter a curva de compactação.

3.8 Confeção dos corpos de prova

Os corpos de prova cilíndricos de solo-cimento foram confeccionados de acordo com a NBR 12024 (ABNT, 2012). Foi utilizado o cilindro pequeno (cilindro de Proctor) com diâmetro de 10,0 cm e altura de 12,7 cm.

As amostras foram preparadas com o material na umidade ótima, previamente determinada para cada tratamento por meio do ensaio de compactação. Já o teor de cimento foi definido de acordo com a ABCP (2004), considerando a classificação da AASHTO/HRB. A Tabela 7 apresenta o teor de cimento utilizado em cada tratamento para a confeção dos corpos de prova.

Tabela 7 – Teor de cimento utilizado em cada tratamento.

Tratamento	Teor de cimento (%)
T0	10
T25	10
T50	7
T100	7

Fonte: Do autor (2022).

Para moldagem dos corpos, a compactação foi efetuada em três camadas, aplicando-se 26 golpes por camada com um soquete de 2,5 kg, com altura de queda de 30 cm.

Após a moldagem, os corpos de prova foram colocados em caixas plásticas cobertas com lona. Dentro das caixas foram dispostos recipientes com água com objetivo de manter a umidade interna (Figura 8). Os corpos de prova foram molhados por borrifação com água, uma vez por dia, durante todo o processo de cura para garantir a hidratação do cimento.

Figura 8 – Local de cura dos corpos de prova.



Fonte: Do autor (2022).

Foram confeccionados três corpos de prova de cada tratamento, que durante sete dias permaneceram em cura até a realização do ensaio de compressão simples.

3.9 Ensaio de compressão simples

O ensaio de compressão simples foi realizado nos corpos de prova aos sete dias de idade seguindo os procedimentos da NBR 12025 (ABNT, 2012).

Como já mencionado, os corpos de prova foram moldados e curados conforme a NBR 12024 (ABNT, 2012). Após o período de cura, os corpos de prova foram imersos em água por 4 horas (Figura 9).

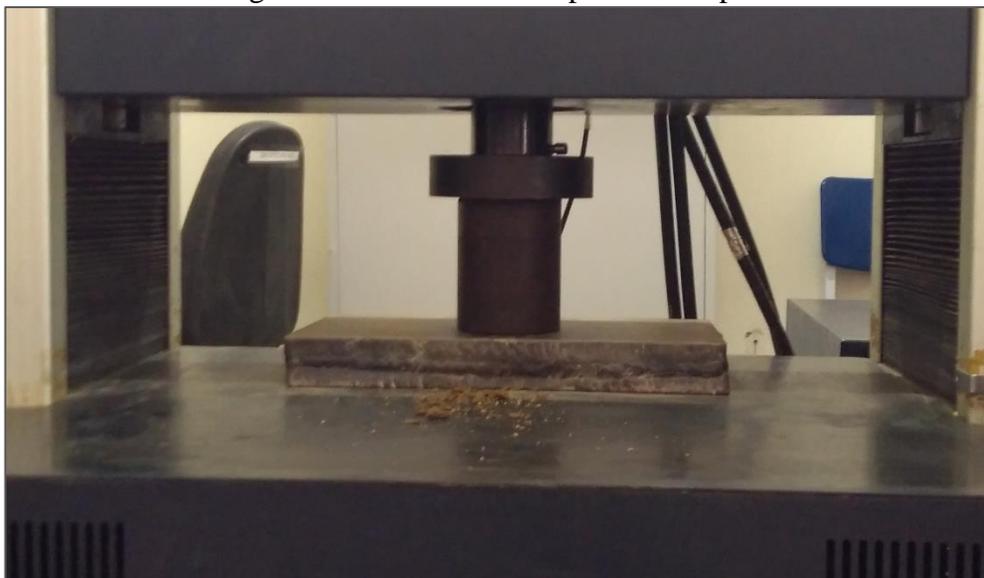
Figura 9 – Corpos de prova imersos em água antes do ensaio de compressão.



Fonte: Do autor (2022).

De acordo com a norma, a máquina de ensaio à compressão pode ser de qualquer tipo, desde que aplique carga contínua e sem choques. Para o ensaio de compressão foi utilizada a máquina de ensaios universal modelo WDW-300 E (Figura 10) do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia da UFLA.

Figura 10 – Ensaio de compressão simples.



Fonte: Do autor (2022).

A tensão de ruptura à compressão de cada corpo de prova foi calculada conforme a Equação 2.

$$T = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Onde:

T - Tensão de ruptura à compressão simples (MPa);

F - Carga de ruptura (N);

A - área da seção transversal do corpo de prova (mm²).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Massa específica dos sólidos

A Tabela 8 apresenta os valores de massa específica dos sólidos (ρ_s) dos quatros tratamentos.

Tabela 8 – Resultados da massa específica dos sólidos.

Tratamento	ρ_s (g cm ⁻³)
T0	2,598
T25	2,593
T50	2,575
T100	2,525

Fonte: Do autor (2022).

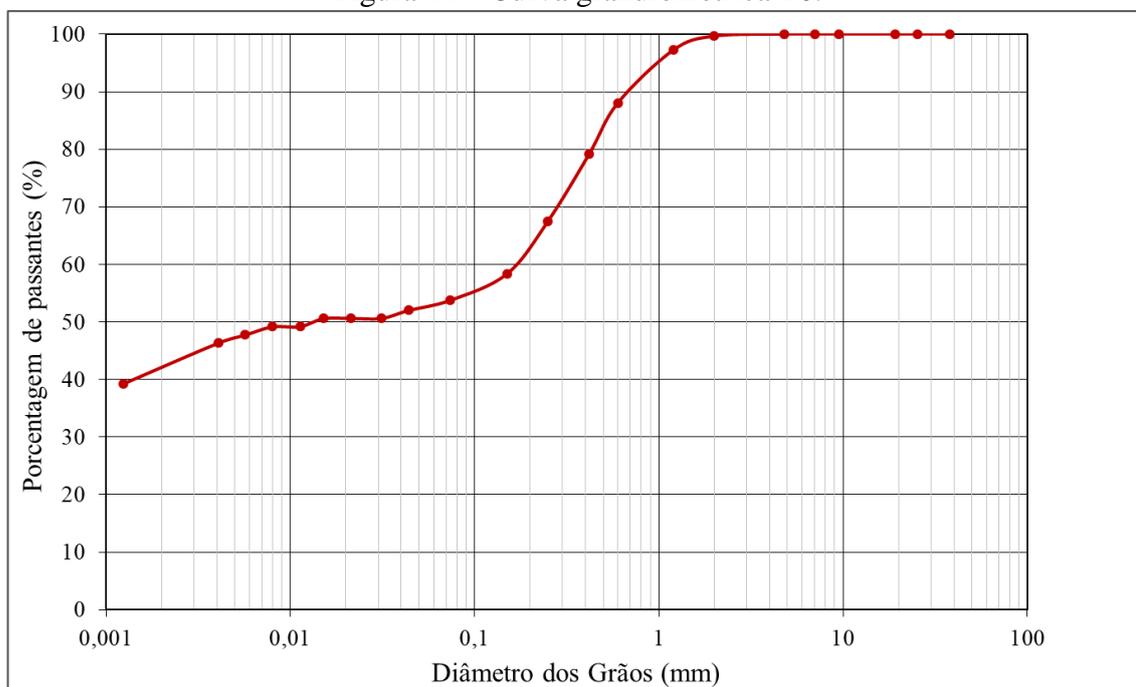
Com os resultados podemos verificar que o aumento do teor de ADF diminuiu a massa específica dos sólidos dos tratamentos.

Klinsky (2013) que avaliou a possibilidade de reaproveitar a areia de fundição residual na construção de camadas de pavimentos, também observou em seu estudo que a adição de teores crescentes de areia de fundição reduziu a massa específica dos sólidos.

4.1.2 Análise granulométrica

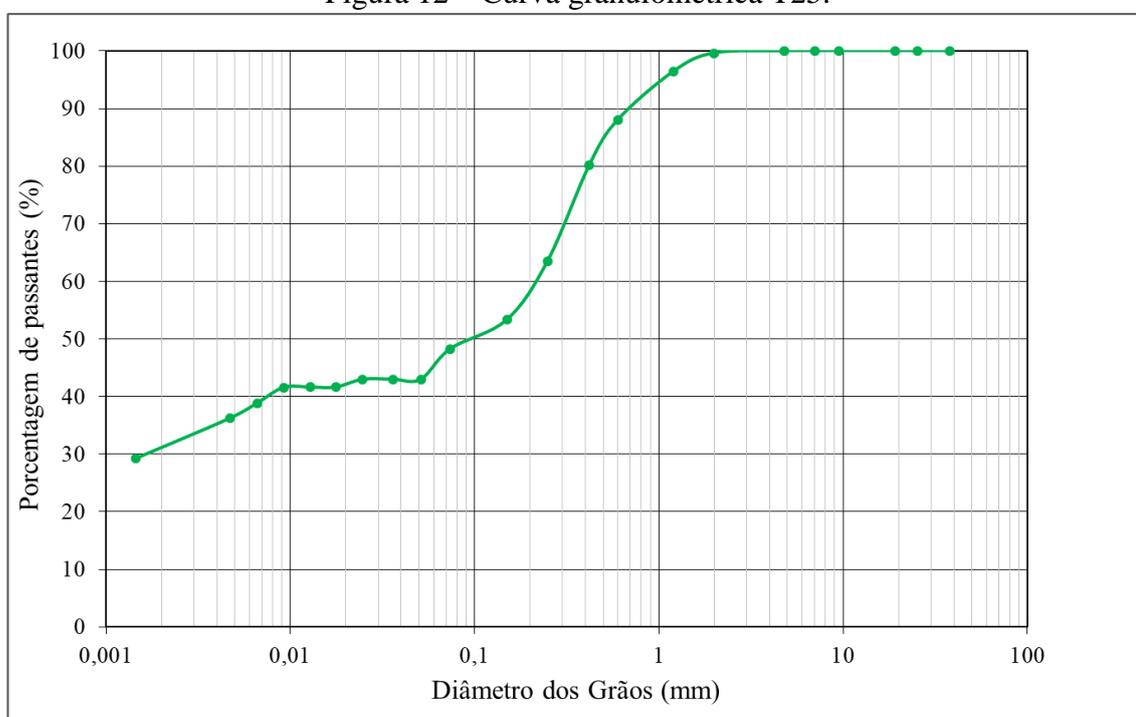
As Figuras 11, 12, 13 e 14 apresentam, respectivamente, as curvas de distribuição granulométrica das partículas dos tratamentos, T0, T25, T50 e T 100.

Figura 11 – Curva granulométrica T0.



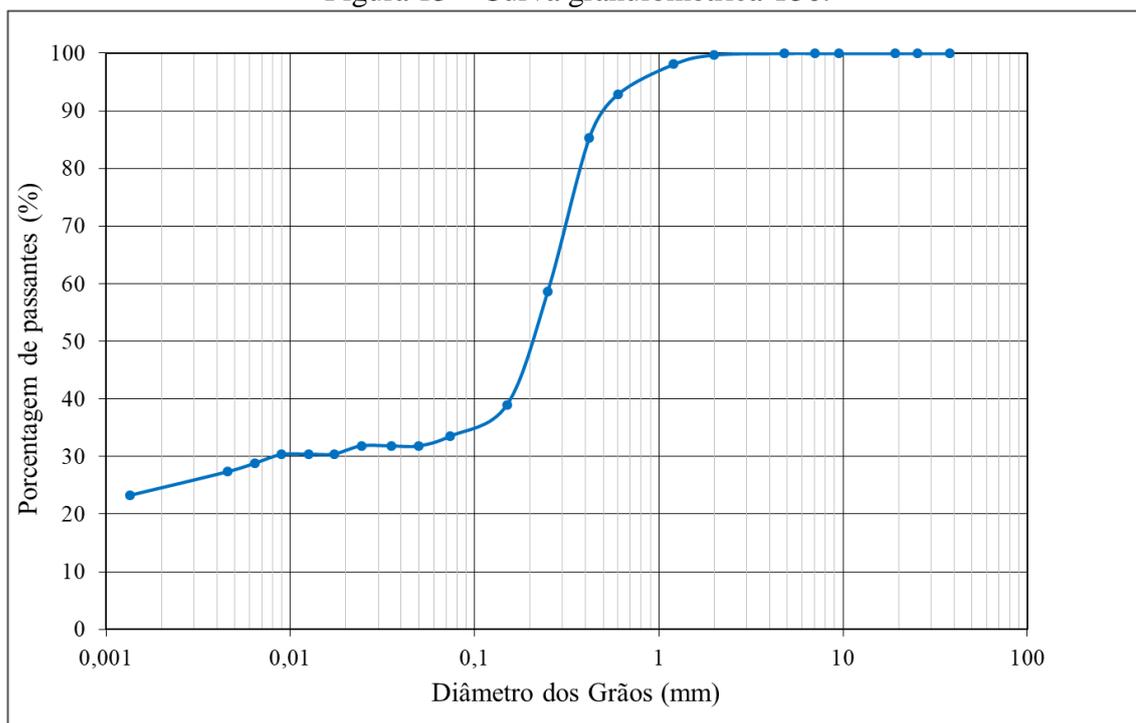
Fonte: Do autor (2022).

Figura 12 – Curva granulométrica T25.



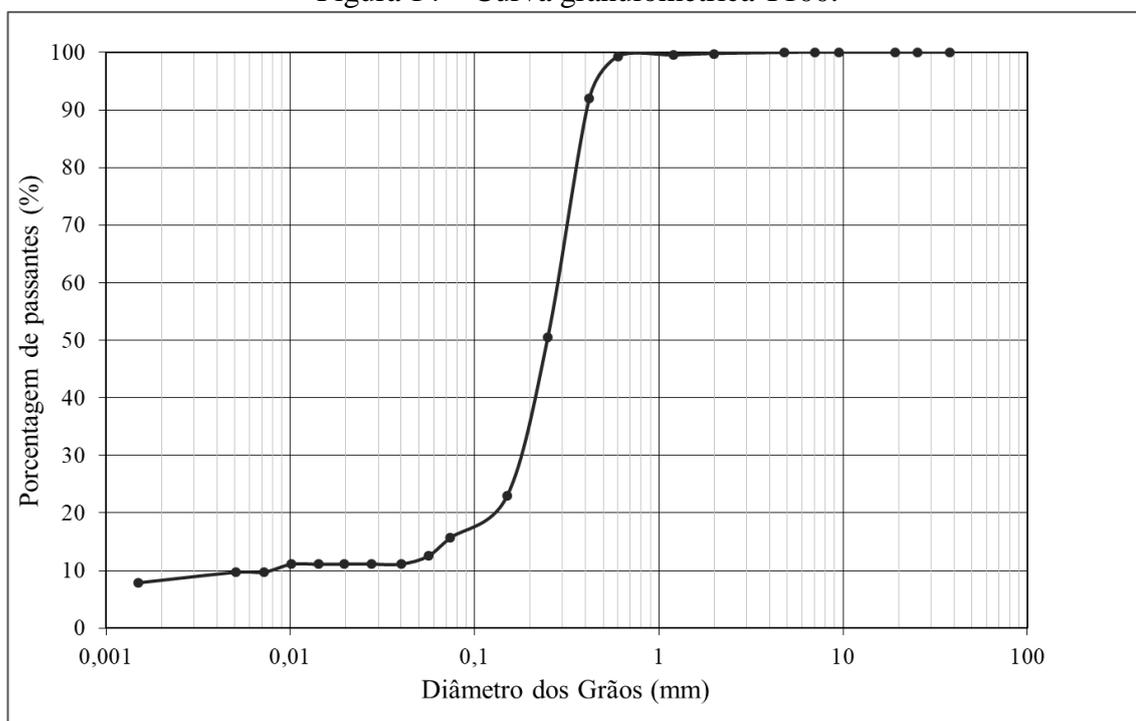
Fonte: Do autor (2022).

Figura 13 – Curva granulométrica T50.



Fonte: Do autor (2022).

Figura 14 – Curva granulométrica T100.



Fonte: Do autor (2022).

A Figura 11 apresenta a curva de distribuição granulométrica das partículas do solo (T0). É possível observar que a composição granulométrica do solo apresenta um percentual de 42% de argila, 10% de silte e 48% de areia. Com 100% de passante na peneira de 4,8 mm e 53,8 % na peneira de 0,075 mm, o solo não atende ao requisito da NBR 10833 (ABNT, 2012), que estabelece 10 a 50% de passantes na peneira de 0,075 mm., porém, analisando pelo resultado do peneiramento seco (Tabela 5), o material atende ao requisito estabelecido.

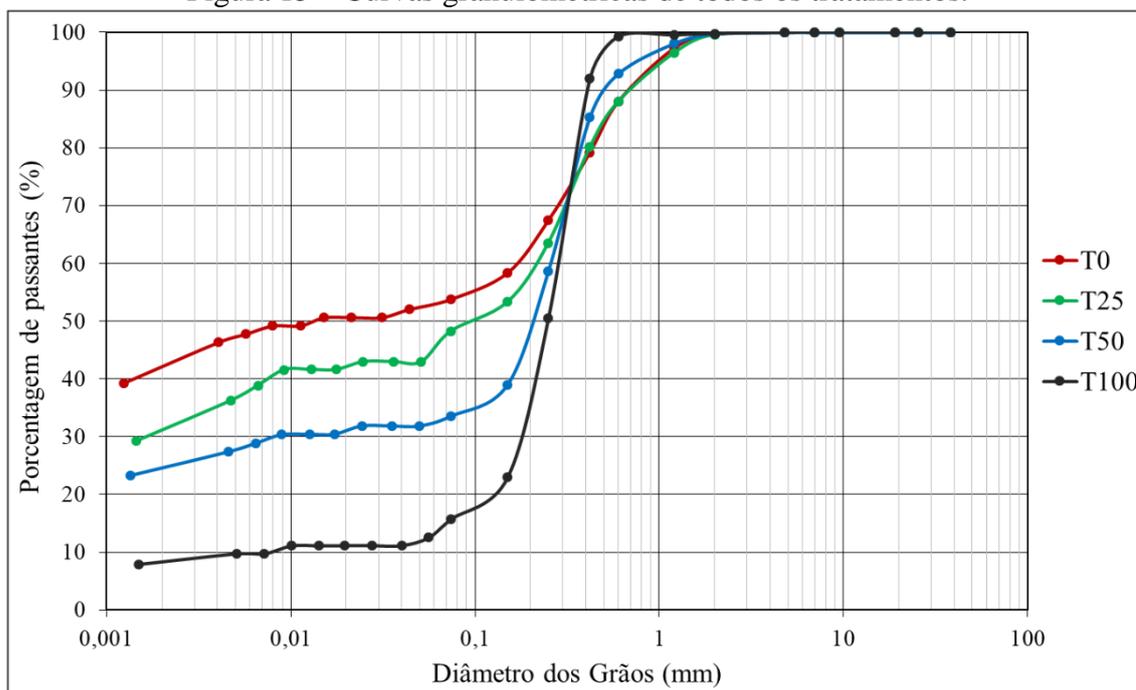
A Figura 12 apresenta a curva de distribuição granulométrica das partículas do segundo tratamento (T25). Com a incorporação de 25% de ADF, a composição granulométrica do T25 apresentou 31% de argila, 12% de silte e 57% de areia. Com 100% de passantes na peneira de 4,8 mm e 48,3 % na peneira de 0,075 mm, T25 atende aos parâmetros da norma citada anteriormente.

A Figura 13 apresenta a curva de distribuição granulométrica das partículas do terceiro tratamento (T50). O tratamento T50 é composto de 25% de argila, 7% de silte e 68% de areia. A adição de 50% de ADF promoveu um aumento de 20% de areia na composição do tratamento T50, em relação ao tratamento T0. Tendo 100% de passantes na peneira de 4,8 mm e 33,6 % na peneira de 0,075 mm, T50 atende os requisitos para a fabricação de tijolos solo-cimento.

A Figura 14 apresenta a curva de distribuição granulométrica das partículas da areia de fundição (T100). A ADF é composta de 8% de argila, 4% de silte e 87% de areia. Apresentou 100% de passantes na peneira de 4,8 mm e 15,7 % na peneira de 0,075 mm, atendendo aos dois primeiros requisitos da norma.

A Figura 15 apresenta um gráfico comparativo das curvas granulométricas dos quatro tratamentos. Observa-se que, à medida que se aumenta a porcentagem de ADF, na faixa de diâmetro 0,001 a 0,1 mm, as curvas se deslocam para baixo, indicando uma redução nas frações de argila e silte. Já na faixa de diâmetro 0,1 a 2 mm, o comportamento das curvas é deslocar para cima, indicando um aumento na fração de areia.

Figura 15 – Curvas granulométricas de todos os tratamentos.



Fonte: Do autor (2022).

Em seu estudo, Klinsky (2013), também observou que a adição de areia de fundição alterou a distribuição granulométrica dos dois solos avaliados, aumentando a porcentagem da fração areia das misturas.

Reus (2021), avaliou a viabilidade da utilização de ADF em camadas estruturais de pavimento, com misturas de 75% ADF + 25% solo residual de gnaiss e 50% ADF + 50% solo residual de gnaiss. A autora observou o mesmo comportamento das curvas granulométricas das misturas com adição de ADF, o aumento na fração de areia, obtendo cerca de 78% de areia na amostra 75/25 e 67% na amostra 50/50.

4.1.3 Limites de consistência

Os limites de consistência e os índices de plasticidade obtidos para os quatro tratamentos podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 – Limites de consistência.

Tratamento	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
T0	39	28	11
T25	25	18	7
T50	23	16	7
T100	20	16	4

Fonte: Do autor (2022).

Observa-se que o limite de liquidez e o índice de plasticidade de todos os tratamentos atendem aos requisitos estabelecidos pela NBR 10833 (ABNT, 2012) e que a adição de ADF promoveu uma redução dos limites de consistência. Do tratamento T0 para o tratamento T50, o limite de liquidez teve uma redução de 16%, o limite de plasticidade uma redução de 12% e consequentemente o índice de plasticidade reduziu 4%.

De acordo com o índice de plasticidade e com a classificação de Jenkins (CAPUTO, 2015), o solo pode ser classificado como: fracamente plásticos ($1 < IP < 7$); medianamente plásticos ($7 < IP < 15$); e altamente plásticos ($IP > 15$). Assim, o solo é classificado como medianamente plástico, já a ADF e os outros dois tratamentos são classificados como fracamente plásticos.

A redução nos limites de consistência de dois tipos de solo com a incorporação de ADF também foi verificada por Klinsky (2013) ao incorporar 20%, 40%, 60% e 70% do material para construção de camadas de pavimento. Em um dos solos analisado, o autor obteve, para o tratamento com 25% de ADF, um limite de liquidez de 39%, limite de plasticidade de 26% e índice de plasticidade de 13%, enquanto, para o tratamento com 70% de ADF, o limite de liquidez foi de 23%, limite de plasticidade de 16% e um índice de plasticidade de 7%.

Angst e Vendruscolo (2008), que avaliaram o aproveitamento do resíduo areia de fundição (RAF) na fabricação de tijolos de solo-cimento com teores de teores de areia de fundição adicionados ao solo de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, também observaram a redução nos limites de consistência conforme aumentava o teor de RAF. Para o tratamento com 25% de RAF, obtiveram um valor de 37,2% para o limite de liquidez, 20,8% para o limite de plasticidade e 16,3% para o índice de plasticidade, e para o tratamento com 75% de RAF, os valores encontrados foram 21,6% para o limite de liquidez, 14,5% para o limite de plasticidade e 7,1% para o índice de plasticidade.

4.2 Ensaio de retração

A Tabela 10 apresenta os resultados do ensaio de retração dos quatros tratamentos.

Tabela 10 – Ensaio de retração.

Tratamento	Retração ≤ 20 mm	Aparição de trincas
T0	Sim	Sim
T25	Sim	Sim
T50	Sim	Sim
T100	Sim	Sim

Fonte: Do autor (2022).

As Figuras 16 a 18 ilustram a comparação da condição das amostras no primeiro e no sétimo dia do teste de retração.

Figura 16 – Ensaio de retração T0.



Fonte: Do autor (2022).

Figura 17 – Ensaio de retração T100.



Fonte: Do autor (2022).

Figura 18 – Ensaio de retração T25 e T50.



Fonte: Do autor (2022).

Para que o solo seja viável para a confecção de tijolo solo-cimento, o manual do CEPED (1984) recomenda que o total da retração nas extremidades não ultrapasse 20 mm e não ocorra trinca na amostra.

De acordo com os resultados, todos os tratamentos obtiveram valores de retração menores que 20 mm. Também foi possível observar que o aumento do teor de ADF diminuiu a retração da amostra.

Conforme exposto nas Figuras 16, 17 e 18, todos os tratamentos apresentaram fendas transversais na parte central das amostras. Porém, conforme ressaltado por Segantini e Wada (2011), o ensaio de retração linear do CEPED (1984), é empírico cujo resultado aponta a tendência de comportamento do solo frente à retração na secagem. Assim, observando as figuras é possível constatar que a adição de ADF promoveu uma redução no tamanho das trincas transversais.

Segantini e Wada (2011), avaliaram uma dosagem ótima de resíduos de construção e demolição (RCD) para fabricação de tijolos solo-cimento. Os autores utilizaram um solo arenoso fino e incorporaram os resíduos em porcentagens de 10, 20, 40, 60 e 80%. No ensaio de retração, os autores concluíram que a adição dos RCD promoveu acentuada redução na retração do material.

Beutler (2017), estudou o aproveitamento de subprodutos industriais (areia de fundição, escória de alto-forno e fosfogesso) para a fabricação de blocos de solo-cimento. Para o ensaio de retração utilizou uma mistura composta por 25% de solo e 75% ADF, que apresentou retração superior a 20 mm e trincas transversais. A proporção 20% de solo e 80% de ADF apesar de apresentar trincas, diminuiu o tamanho da retração. A terceira mistura contendo 10% de solo e 90% de areia de fundição não apresentou trincas e a retração foi inferior a 20 mm.

Mello (2019), avaliou a incorporação de resíduos de alvenaria na fabricação de tijolos solo-cimento e verificou a retração linear do material com e sem adição de resíduos. O autor observou que o aumento do teor de resíduo diminuiu os valores de retração. O solo natural obteve uma retração de 25 mm, com a adição de 30% de resíduo reduziu para 18 mm e com a adição de 60% de resíduo ficou com 3 mm.

4.3 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação foi realizado para os quatros tratamentos propostos, ou seja, tratamento T0 com 0% de ADF e 100% solo, tratamento (T25) com 25% de ADF e 75% solo, tratamento (T50) com 50% de ADF e 50% solo e tratamento T100 com 100% de ADF.

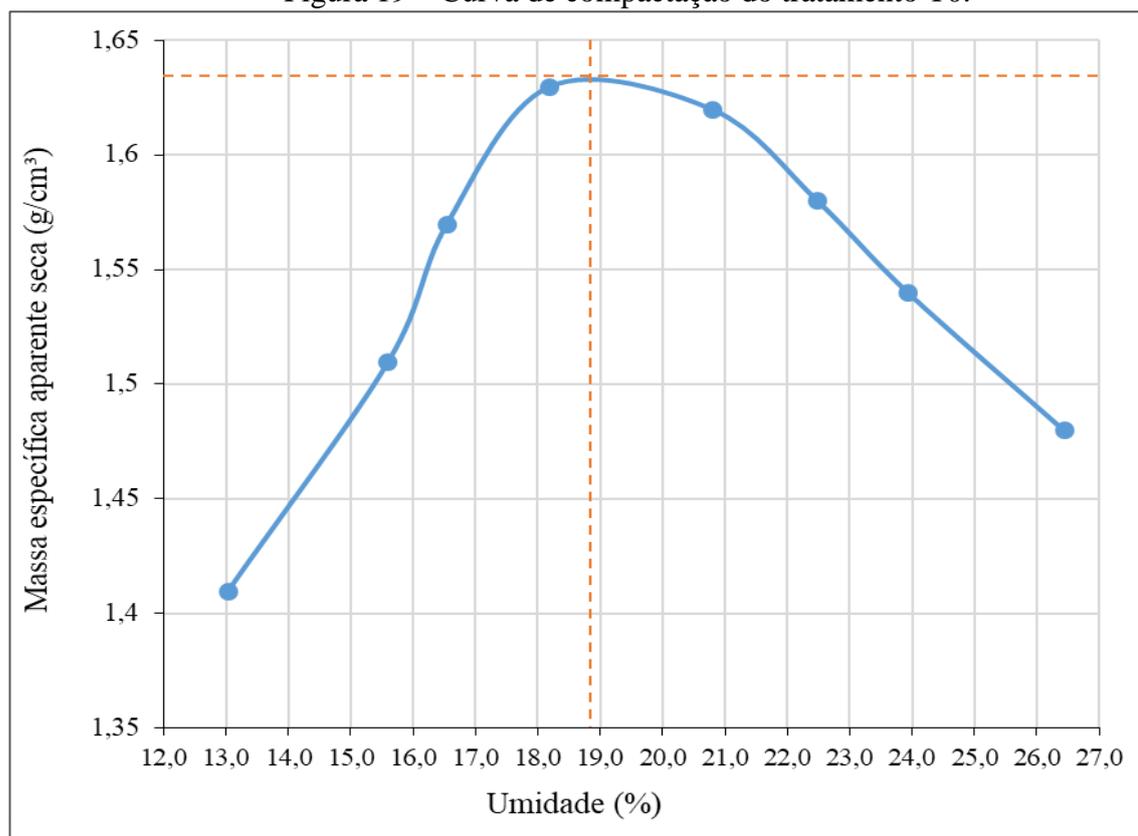
A Tabela 11 apresenta os valores obtidos para umidade ótima (W_{ot}) e massa específica aparente seca máxima (ρ_{dmax}) nos ensaios de compactação para os quatros tratamentos. As curvas de compactação obtidas para T0, T25, T50 e T10 estão ilustradas na Figura 19, Figura 20, Figura 21 e Figura 22, respectivamente.

Tabela 11 – Valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima.

Tratamento	$W_{ot}(\%)$	ρ_{dmax} (g/cm ³)
T0	18,8	1,63
T25	16,3	1,72
T50	14,4	1,79
T100	10,0	1,91

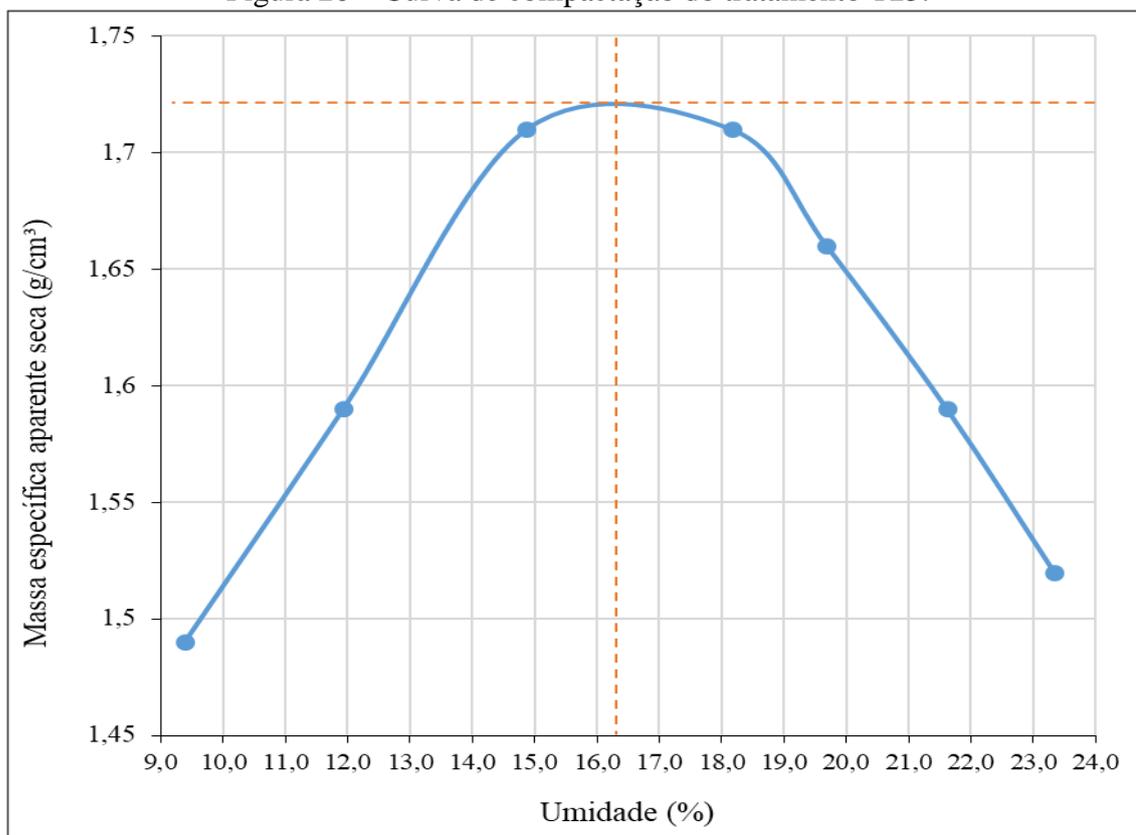
Fonte: Do autor (2022).

Figura 19 – Curva de compactação do tratamento T0.



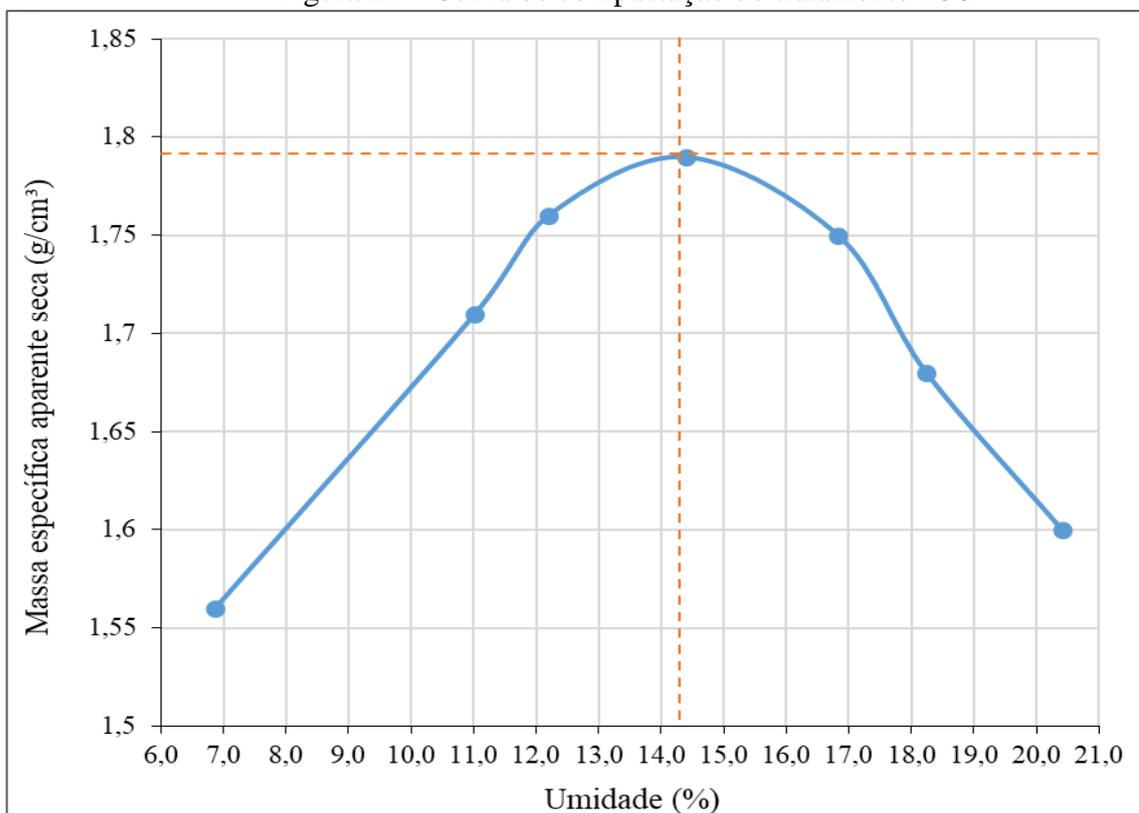
Fonte: Do autor (2022).

Figura 20 – Curva de compactação do tratamento T25.



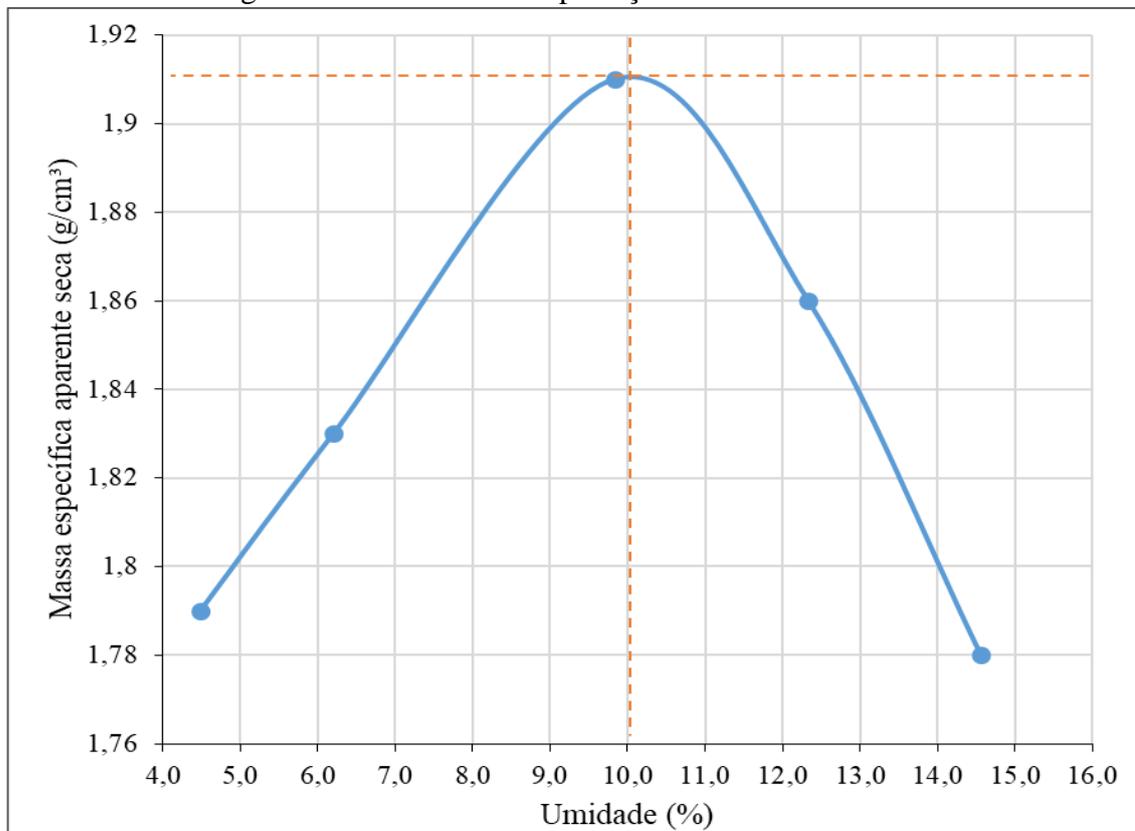
Fonte: Do autor (2022).

Figura 21 – Curva de compactação do tratamento T50.



Fonte: Do autor (2022).

Figura 22 – Curva de compactação do tratamento T100.



Fonte: Do autor (2022).

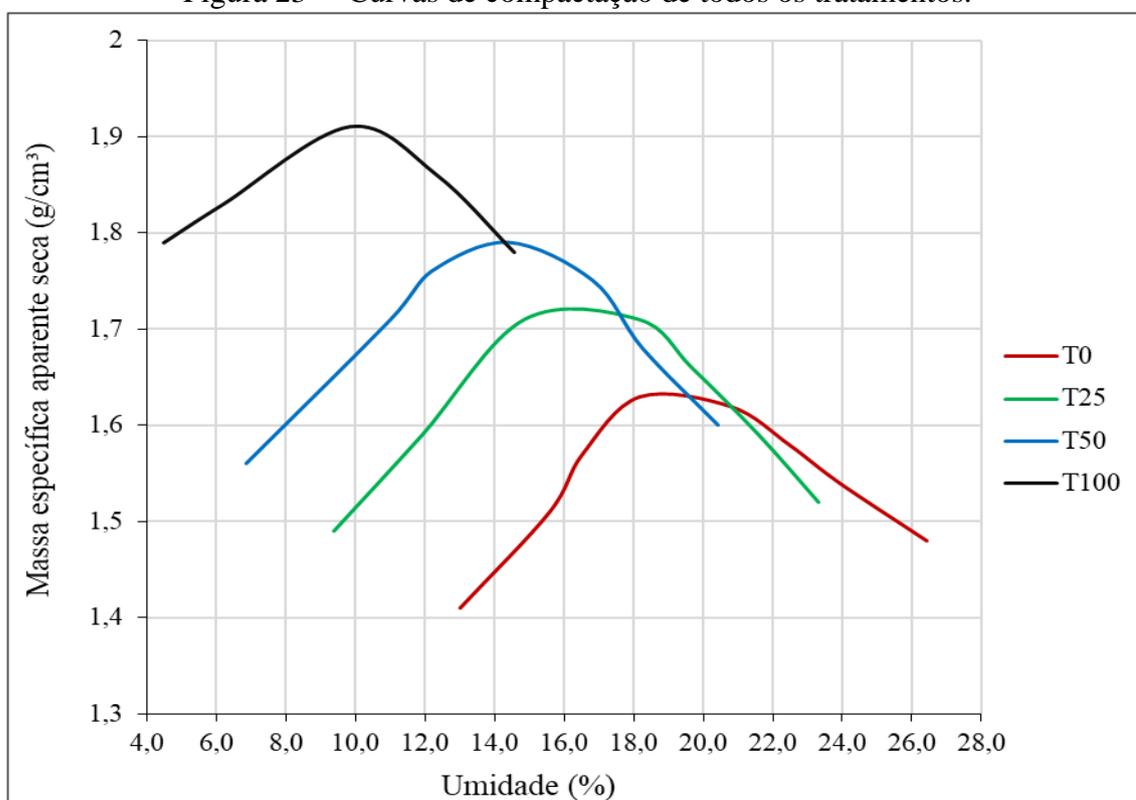
Observa-se pela Tabela 11 que o tratamento T0, composto apenas por solo, obteve a menor massa específica aparente seca máxima de $1,63 \text{ g/cm}^3$ e a maior umidade ótima de 18,8%, enquanto o tratamento T100, composto apenas por ADF, obteve a maior massa específica aparente seca máxima de $1,91 \text{ g/cm}^3$ e a menor umidade ótima de 10,0%. Então, quanto maior a porcentagem de ADF incorporada, maior é a massa específica aparente seca máxima e menor é a umidade ótima.

Pinheiro *et al.* (2006), analisaram as características de compactação na energia normal de solos arenosos naturais e com a adição de 7% de cimento. Verificou que para solos arenosos mais grosseiros com a adição de cimento, a umidade ótima é menor e o peso específico aparente máximo seco é maior do que na compactação para o solo natural. Essas diferenças foram menores para solos arenosos mais finos, apresentando resultados maiores de umidade ótima e menores massa específica aparente seca em comparação com o tratamento sem cimento.

A partir da Figura 23 é possível observar visualmente pelas curvas de compactação o que foi dito anteriormente, que a adição de ADF fez com que a umidade ótima diminuísse e que a massa específica aparente seca máxima aumentasse. Assim, infere-se que a incorporação

de ADF proporcionou uma melhor compactação dos tratamentos reduzindo o índice de vazios, que conseqüentemente, resultou na redução da massa específica máxima.

Figura 23 – Curvas de compactação de todos os tratamentos.



Fonte: Do autor (2022).

Em seu estudo, Klinsky (2013), verificou que a adição de ADF reduziu os valores de umidade ótima e aumentos os de massa específica seca máxima, tanto nos tratamentos solo e areia como nos tratamentos solo, areia e cal, para os dois tipos de solo analisados.

Reus (2021), comparou as curvas de compactação de três tratamentos com adição de ADF submetidos a três diferentes energias. Verificou que a mistura de 75% ADF e 25% solo residual de gnaiss apresentou valores de densidade seca máxima maiores que os outros tratamentos, e notou que as amostras com 100% ADF tiveram valores inferiores de densidade seca máxima, e justificou que pode estar relacionado com a composição granulométrica, visto que a ADF possui partículas maiores que o solo residual gnaiss.

4.4 Ensaio de compressão simples

A Tabela 12 apresenta os valores individuais e médios de resistência à compressão simples (RCS) dos corpos de prova cilíndricos após sete dias de cura e os respectivos desvios-padrão.

Tabela 12 - Valores individuais e médios de resistência à compressão.

Tratamento	Valor individual de RCS (MPa)	Valor médio de RCS (MPa)
T0	0,338	0,366 ± 0,035
	0,406	
	0,356	
T25	0,709	0,673 ± 0,077
	0,725	
	0,586	
T50	0,812	0,846 ± 0,049
	0,824	
	0,901	
T100	2,167	2,212 ± 0,095
	2,321	
	2,149	

Fonte: Do autor (2022).

Analisando os valores apresentados na Tabela 12 é possível observar que quanto maior a porcentagem de ADF maior é a resistência à compressão dos corpos cilíndricos. Assim, a amostra que obteve maior resistência foi o tratamento T100 e o que apresentou menor resistência foi o tratamento T0.

Pinheiro *et al.* (2006) estudaram o comportamento da adição de cimento em solos arenosos por meio de ensaios de compressão simples em corpos de prova cilíndricos. Verificaram que solos arenosos, mais granulares (partículas maiores) e mais bem graduados, são melhores para a estabilização do cimento.

Pereira *et al.* (2018) investigaram a reutilização de a areia de moldagem descartada como substituto parcial da areia em artefatos de concreto. Nos ensaios de resistência à compressão das amostras com diferentes porcentagens de areia observou que quanto maior a porcentagem de areia de moldagem no traço, maior é a resistência final do corpo de prova. Ainda observaram que os tratamentos com adição da areia de moldagem tiveram resultados superiores em relação aos tratamentos sem incorporação do resíduo.

Leonel (2017) investigou a possibilidade de empregar areia de fundição usada em tijolos de solo-cimento preparados com porcentagens de 0-65% desse resíduo. Os autores relatam no estudo que, a substituição da areia comercial pela areia de fundição resultou na redução da resistência, mas essa redução não inviabilizou o uso desse resíduo, pois o aumento no teor do mesmo não levou a nenhuma redução significativa na resistência mecânica.

Cerqueira1 *et al.* (2022) avaliaram a resistência à compressão de blocos com teores de 5, 10, 15 e 20% de rejeito de fundição. Os autores observaram o aumento da resistência à medida que houve um aumento da quantidade de resíduo de fundição sendo incorporado à composição do bloco. Para o tratamento com 5%, a resistência média à compressão foi de 3,06 Mpa. O tratamento com 20% de resíduo apresentou o maior valor médio de resistência, que foi de 6,5 MPa.

5 CONCLUSÃO

De acordo com a caracterização preliminar dos materiais apresentadas, foi observado que misturas com até 50% ADF são adequadas para a fabricação de tijolo solo-cimento pois atende aos parâmetros estabelecidos pela NBR 10833 (ABNT, 2012). Porém, analisando pelos resultados de granulometria com sedimentação, todos os tratamentos são adequados.

Na compactação foi observado que quanto maior a porcentagem de ADF incorporada, maior é a massa específica aparente seca máxima e menor é a umidade ótima. Assim, a ADF (T100) apresentou maior massa específica e menor umidade ótima quando comparada com os outros tratamentos.

A partir dos resultados do ensaio de resistência à compressão simples, verificou-se que incorporação de areia descartada de fundição no traço aumentou a resistência à compressão dos corpos de prova. Então, quanto maior a porcentagem de incorporação do resíduo na amostra, maior foi a resistência final.

Com base nos resultados obtidos, sugere-se a dosagem de 50% areia descartada de fundição e 50% de solo para compor a matriz de tijolos solo-cimento, uma vez que foi a dosagem que apresentou a maior resistência à compressão e que atendeu à todas as NBRs utilizadas.

Assim, a partir da metodologia utilizada e nos resultados obtidos, sugere-se para os próximos trabalhos:

- Obtenção das curvas de compactação já com a adição de cimento, de acordo com a NBR 12023 (ABNT, 2012).
- Realizar ensaios de resistência à compressão simples em diferentes idades, para analisar o ganho de resistência em função do tempo de cura.
- Confeção de tijolos e posterior determinação da resistência à compressão e absorção de água para verificação do atendimento à NBR 8491 (ABNT, 2012).

REFERÊNCIAS

ALVES, B. S. Q. **Estudo da viabilidade ambiental da reutilização das areias descartadas de fundição**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

ANGST, M.; VENDRUSCOLO, M. A. aproveitamento da areia de fundição na produção de tijolos. In: Encontro de sustentabilidade em projeto do Vale do Itajaí, 2008, Balneário Camboriú. **Anais eletrônicos** [...]. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/221909>. Acesso em 17 jan. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Dosagem das misturas de solo-cimento**: normas de dosagem e métodos de ensaio. São Paulo, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491**: Tijolo de solo-cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com a utilização de prensa manual ou hidráulica: procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12024**: Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025**: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15702**: Areia descartada de fundição – Diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário. Rio de Janeiro, 2009.

BARRETO, S. S. **Fabricação de tijolos prensados de solo-resíduos-cimento e avaliação de desempenhos térmico e acústico**. 2020. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Presidente Prudente, 2020.

BEUTLER, C. S. **Estudo da adequabilidade do uso de areia de fundição e cimento supersulfatado em blocos de solo-cimento**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos n.º12.305, de 2 de agosto de 2010. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Seção 1, p.3.

CABRAL, R. N.; SANTANA, H. V. R.; REIS, E. D. Estudo comparativo de construções sustentáveis com tijolos ecológicos e cerâmicos convencionais. In: Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, 2021, Diamantina. **Anais eletrônicos [...]**. Recife: Even3, 2021. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/cobicet/381780-ESTUDO-COMPARATIVO-DE-CONSTRUCOES-SUSTENTAVEIS-COM-TIJOLOS-ECOLOGICOS-E-CERAMICOS-CONVENCIONAIS>. Acesso em 17 dez. 2022.

CAPUTO, H. P e CAPUTO, A. N. **Mecânica dos solos e suas aplicações – Fundamentos**. Vol. 1. 7 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos – LTC, 2015. 256p.

CARNIN, R. L. P. **Reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como agregado em mistura asfáltica**. 2008, Dissertação (Mestrado). Departamento de Química, UFPR. Paraná, 2008.

CEPED – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento. **Manual de construção com solo-cimento**. Camaçari: CEPED, 1984.

CERQUEIRA N. A.; SOUZA, V. B. de.; SILVA, L. X. P. da.; COUTINHO, G. M. R.; BARRETO, M. N. **Cerâmica Industrial**, Criciúma, v.27, n.1, p.1-7, jan. 2022

CURI, N.; SILVA, S. H. G.; POGGERE, G. C.; MENEZES, M. D. **Mapeamento de solos e magnetismo no campus da UFLA como traçadores ambientais**. Lavras: Ed. UFLA, 2017.

DANTAS, N. K. P. **Estudo do comportamento de tijolos de solo-cimento com substituição de solo por resíduos da construção civil**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade) – Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM: **DNER- ME**. Solos - determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994.

DYER, P. O. L.; COPPIO, L.; SILVA, A.; CIVIDANES, S.; KLINSKY, M. G.; DE LIMA, G. **ARTEFATOS COM AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO E SUA VIABILIDADE**. **MIX Sustentável**, [S. l.], v. 8, n. 4, p. 97–106, set. 2022.

GOUVEIA, N. Resíduos Sólidos Urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência e Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v.17, n.6, p. 1503-1510, 2012.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. 2003. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

KLINSKY, L. M. G. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição residual em camadas de pavimentos**. 2013. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2013.

LEONEL, R. F.; FOLGUERAS, M. V.; DALLA VALENTINA, L. V. O.; PRIM, S. R.; PRATES, G. A.; CARASCHI, J. C. Caracterização de tijolos de solo-cimento com incorporação de areia descartada de fundição. **Cerâmica**, São Paulo, v.63, p. 329-335, jul. 2017.

LIRA, D. S. da. **Tijolos ecológicos: estudo de viabilidade técnica no uso de agregados reciclados de resíduos da construção civil classe A**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência, Tecnologia e Sociedade) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

OLIVEIRA, G. V. **Aplicações potenciais para as areias descartadas de fundição: Um estudo exploratório**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 10 mar. 2023.

PEREIRA, F.; ZIMMER, V.; SILVA, D. da. Reaproveitamento da areia de desmoldagem como substituto parcial de areia em artefatos de concreto. **MIX Sustentável**, Florianópolis, v. 4, n. 1, p.66-72, mar. 2018.

PEREIRA, D. B.; PEZZUTO, C. C. Estudo do solo-cimento para fabricação de tijolos ecológicos. In: XV Encontro de Iniciação Científica da PUC-Campinas, 2010, Campinas. **Anais eletrônicos [...]**. Disponível em: <https://mac.arq.br/wp-content/uploads/2016/03/tijolo-solo-cimento.pdf>. Acesso em 15 jan. 2023.

PINHEIRO, R. J. B.; SOARES, J. M. D.; BURIOL, T. L. Caracterização de jazidas para construção de habitações populares, com solo-cimento, em Santa Maria. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, n.9, v.6, p.1-15, nov. 2006.

PINTO, L. M. **Estudo de tijolos de solo cimento com adição de resíduo de construção civil**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

REUS, A. **Comportamento geotécnico de areias de fundição visando aplicações em pavimentos**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.

SILVA, K. D. **Reutilização do resíduo de areia de fundição no Brasil e no mundo o contexto do estado de Minas Gerais: o contexto do estado de Minas Gerais.** 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Tecnologia Ambiental) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SEGANTINI, A. A. da S.; WADA, P. H. Estudo de dosagem de tijolos de solo-cimento com adição de resíduos de construção e demolição. **Acta Scientiarum, Maringá**, v. 33, n. 2, p. 179-183, 2011.