



**ANA FLÁVIA DUARTE MENDES**

**ESTUDO DE DOSAGEM DE RESÍDUOS FINOS DE  
QUARTZITO INDUSTRIAL EM SUBSTITUIÇÃO AO SOLO  
NA MATRIZ DE TIJOLO SOLO-CIMENTO**

**LAVRAS - MG  
2019**

**ANA FLÁVIA DUARTE MENDES**

**ESTUDO DE DOSAGEM DE RESÍDUOS FINOS DE QUARTZITO INDUSTRIAL  
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 Civil, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro  
Orientador

**LAVRAS - MG  
2019**

**ANA FLÁVIA DUARTE MENDES**

**ESTUDO DE DOSAGEM DE RESÍDUOS FINOS DE QUARTZITO  
INDUSTRIAL EM SUBSTITUIÇÃO AO SOLO NA MATRIZ DE TIJOLO  
SOLO-CIMENTO**

**DOSING STUDY OF FINE RESIDUES OF INDUSTRIAL QUARTZITE 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 Civil,  
para obtenção do título de Bacharel.

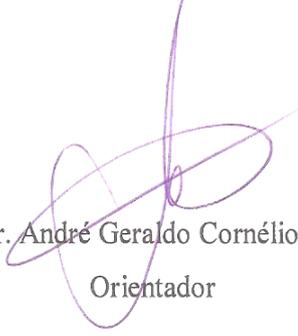
APROVADA em 03 de julho de 2019

Prof. Me. Eduardo Souza Cândido

UFLA

Prof. Me. Raquel Mariano Linhares

UFLA

  
Prof. Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro

Orientador

**LAVRAS - MG  
2019**

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador André Geraldo Cornélio Ribeiro com quem foi um grande prazer trabalhar. Muito obrigada pelo apoio, paciência e ensinamentos passados. Obrigada também por ser uma grande inspiração para mim.

Ao professor Eduardo Souza Cândido pela ajuda, paciência e contribuição ao meu trabalho.

À estudante de pós-graduação Ticyane Freire pela paciência em me ensinar e ajuda nos experimentos.

À técnica do laboratório Juliana Giacoppo pela paciência e ajuda toda vez que eu precisei.

Aos queridos Carlos Fonseca, Mariana Lasmar e Ivison Ferreira pela ajuda desde o início. Sem vocês eu não teria conseguido.

Ao André do Carmo Junior pela grande ajuda na reta final.

Ao querido colega e companheiro de laboratório Rubens Boaventura pela enorme paciência que sempre teve comigo, pela ajuda, pelo incentivo e pelo bom-humor.

À minha irmã Marcela pela grande ajuda, por todo o apoio, pelo incentivo e também pelos ensinamentos passados.

Aos meus queridos Hérica Duarte e Guilherme Duarte que tanto me ajudaram, incentivaram e apoiaram.

Aos meus pais, Marcos e Kelle, por serem meus maiores incentivadores e apoiadores. Sem vocês eu jamais teria conseguido.

À toda a minha família pela torcida, amparo e orações.

Às minhas amigas Mariana Nayara, Rafaela Murari, Renata Aguiar e Maria Vitória Ferraz pelo apoio, conforto e por vibrarem comigo nas conquistas.

Às queridas colegas de apartamento Thalita Santos e Laura Sette pelo apoio e palavras de conforto.

À Universidade Federal de Lavras pela oportunidade concedida.

E por último, mas não menos importante, a Deus pelas bênçãos e proteção.

**MUITO OBRIGADA!**

## RESUMO

Um dos maiores problemas causados pela atividade mineradora são os rejeitos gerados ao final do processo de beneficiamento do minério, surgindo a necessidade de se estudar formas mais sustentáveis, viáveis e adequadas para sua destinação. A utilização de resíduos da mineração na indústria da construção civil tem se tornado uma alternativa viável, seja do ponto de vista econômico, por se tratar de um material sem custo de aquisição e que pode ser aplicado em uma gama de materiais de construção civil (Ex.: tijolos, blocos e telhas), seja do ponto de vista ambiental, pois minimiza o passivo ambiental provocado pela atividade minerária. A incorporação de resíduos à matriz do tijolo solo-cimento é uma ideia com grande potencial, pois permite a substituição parcial do solo ou do cimento e também pelo fato de que a utilização de rejeitos de mineração para fabricação desses tijolos popularizaria esse material no Brasil. Nesse trabalho objetivou-se fazer um estudo de dosagem para fabricação de tijolo solo-cimento com resíduos finos de quartzito industrial em substituição ao solo. Foram realizados ensaios de caracterização do solo e do resíduo para determinação da massa específica dos sólidos, da distribuição granulométrica e dos limites de consistência. Também foi determinado o índice de atividade pozolânica do resíduo, para verificação da substituição parcial do cimento pelo resíduo na matriz do tijolo. Para o estudo de dosagem, foram realizadas misturas de solo e resíduo nas proporções de 20, 25, 30, 35, 40 e 45% de resíduo em relação à massa de solo. Essas porcentagens foram definidas conforme os valores observados de limites de consistência recomendados pela NBR 10833 (ABNT, 2012 b) para fabricação de tijolo solo-cimento. Em seguida, foram realizados os ensaios de compactação do solo para determinação da massa específica aparente seca máxima e umidade ótima. O índice de atividade pozolânica obtido foi de 49%, o que leva à conclusão que não é possível atribuir potencial pozolânico ao resíduo e que não é viável a substituição parcial do cimento por este resíduo. Pode-se concluir que o resíduo fino de quartzito industrial avaliado no presente trabalho tem potencial para ser utilizado na fabricação de tijolo-solo-cimento, sendo recomendado para próximos trabalhos a confecção de tijolos na dosagem de 45% de resíduos e 55% de solo e verificação da resistência à compressão e absorção de água, conforme estipulado pela NBR 8491 (ABNT, 2012.)

**Palavras-chave:** Dosagem. Rejeitos de mineração. Areia industrial. Incorporação de resíduo. Tijolo ecológico.

## ABSTRACT

One of the biggest problems caused by the mining activity are the tailings generated at the end of the ore beneficiation process, arising the necessity to study forms of destination more sustainable, viable and appropriate for these residues. The use of mining residues in the construction industry has become a viable alternative both from an economic and an environmental point of view, because it is a material with no acquisition cost and can be applied in a range of materials (e.g. bricks, blocks and roof tiles) and also because it minimizes the environmental passives caused by mining activity. The incorporation of residues into the soil-cement brick matrix is an idea with great potential, because enables the replacement of the soil or the cement and also because the use of mining tailings to produce these bricks would popularize this material in Brazil. In this work the goal was to make a dosage study for the production of soil-cement bricks with fine residues of industrial quartzite in substitution of the soil. Soil and residue characterization tests were carried out to determine the specific mass of the solids, the granulometric distribution and the consistency limits. The pozzolanic activity index of the residue was also determined, to verify the partial replacement of the cement by the residue in the brick matrix. For the dosage study, mixtures of soil and residue were performed in the proportions of 20, 25, 30, 35, 40 and 45% of residue in relation to the soil mass. These percentages were defined according to the observed values of consistency limits recommended by NBR 10833 (ABNT, 2012 b) for the manufacture of soil-cement brick. Subsequently, the soil compaction tests were performed to determine the maximum dry apparent specific mass and optimum moisture content. The pozzolanic activity index was 49%, which leads to the conclusion that it is not possible to attribute pozzolanic potential to the residue and that it is not viable to partially replace the cement with this residue. It can be concluded that the fine industrial quartzite residue evaluated in the present work has the potential to be used in the production of brick-soil-cement, being recommended for the next works the production of bricks in the dosage of 45% of residues and 55% of soil and verification of the resistance to compression and absorption of water, as stipulated by NBR 8491 (ABNT, 2012).

**Keywords:** Dosage. Mining tailings. Industrial sand. Incorporation of residue. Ecologic brick.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	8
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	9
2.1	Rejeitos de mineração .....	9
2.2	Quartzito industrial .....	10
2.3	Estabilização do solo.....	11
2.4	Estudo de dosagem .....	13
2.5	Tijolo solo-cimento.....	13
2.6	Incorporação de resíduos.....	15
2.6.1	Incorporação de resíduos em materiais de construção civil .....	15
2.6.2	Incorporação de resíduos na matriz de tijolos solo-cimento .....	16
3	MATERIAL E MÉTODOS .....	18
3.1	Obtenção do Resíduo fino de quartzito industrial .....	18
3.2	Obtenção do Solo.....	23
3.3	Ensaio de caracterização.....	25
3.4	Ensaio de Pozolanicidade.....	25
3.5	Determinação das porcentagens de solo e resíduo .....	27
3.6	Ensaio de compactação .....	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	29
4.1	Ensaio de caracterização.....	29
4.2	Ensaio de Pozolanicidade.....	30
4.3	Determinação das porcentagens de solo e resíduo .....	30
4.4	Ensaio de compactação .....	33
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	40
5.1	Conclusões .....	40
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	40
	REFERÊNCIAS .....	41

## 1 INTRODUÇÃO

Os problemas causados pela mineração, principalmente em relação aos impactos ambientais gerados pelos seus rejeitos, têm sido muito discutidos nos últimos anos, especialmente após o rompimento da barragem do Fundão em Mariana/MG em novembro de 2015 e da barragem 1 da Mina do Feijão em Brumadinho/MG em janeiro de 2019. Assim, cada vez mais têm surgido estudos com o objetivo de aprimorar as formas de disposição desses rejeitos, bem como mostrar alternativas viáveis e sustentáveis para a sua utilização.

O setor da construção civil, além de ser um grande poluidor, utiliza inúmeros materiais que advêm de matérias primas com fontes não renováveis. A utilização dos rejeitos de mineração nesse setor se torna uma alternativa muito adequada, uma vez que colabora tanto para a minimização dos problemas causados pela mineração quanto para tornar o setor da construção civil mais sustentável e ambientalmente correto.

Vários são os materiais de construção civil que tem potencial para incorporação de rejeitos de mineração a sua matriz. Dentre eles, destaca-se o tijolo solo-cimento, pois a incorporação do rejeito pode se dar tanto em substituição ao solo quanto em substituição ao cimento. O tijolo solo-cimento, também conhecido como tijolo ecológico, é um material de construção civil ambientalmente correto, pois ele não precisa ser queimado e conseqüentemente não polui a atmosfera com o lançamento de  $CO_2$ . Além de ser um material de simples e rápida execução e de baixo custo.

Outra vantagem da incorporação de rejeitos de mineração à matriz do tijolo solo-cimento é a popularização desse material e incentivo a sua produção. Esse tijolo ainda não é muito utilizado no Brasil devido a cultura local de utilizar os tradicionais tijolos cerâmicos para vedação, sendo que esses tijolos precisam ser queimados e poluem a atmosfera.

Dentro desse contexto, o objetivo desse trabalho é estudar a dosagem adequada de resíduos finos de quartzito industrial (rejeito de mineração) para uma possível incorporação à matriz do tijolo solo-cimento em substituição parcial do solo.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Rejeitos de mineração

A História do Brasil tem uma relação íntima com a busca e o aproveitamento dos recursos naturais do país, tanto que a mineração foi um fator decisivo para a efetiva ocupação de parte do território brasileiro (FARIAS, 2002; BACCI *et al.*, 2006 *apud* AMARAL *et al.*, 2013).

Duarte (2008) definiu a mineração como “um complexo de atividades necessárias à extração econômica de bens minerais da crosta terrestre, provocando transformações no meio ambiente”.

No processo de mineração, os minérios são submetidos a processos de beneficiamento visando extrair os elementos de interesse econômico (produto final). O beneficiamento regulariza o tamanho dos fragmentos, remove minerais associados sem valor econômico e aumenta a qualidade, a pureza ou o teor do produto final (ESPÓSITO, 2000).

Os procedimentos empregados no processo de beneficiamento são inúmeros e dependem basicamente do tipo e da qualidade do minério a ser extraído. Alguns procedimentos comumente utilizados são britagem, moagem, concentração, peneiramento, lavagem, secagem e calcinação (ESPÓSITO, 2000).

Os resíduos gerados nesses processos de beneficiamento são conhecidos como rejeitos e, de acordo com o tipo de minério processado e com os tipos de procedimentos utilizados, são encontrados rejeitos com variadas características geotécnicas, físico-químicas e mineralógicas. Os rejeitos são classificados em duas categorias de acordo com a sua granulometria: quando de granulometria fina (abaixo de 0,074 mm) são chamados de lama e quando de granulometria grossa (acima de 0,074 mm) são chamados de rejeitos granulares (ESPÓSITO, 2000).

O descarte dos rejeitos pode ser na forma a granel ou na forma de polpa (suspensão de rejeitos e água, sendo a porcentagem de água de cerca de 70%). Quando na forma a granel eles são transportados por meio de caminhões ou correias. Quando na forma de polpa eles são transportados em tubulações com sistemas de bombeamento ou somente por gravidade (DUARTE, 2008; LOZANO, 2006).

A disposição dos rejeitos pode ser feita a céu aberto, de forma subterrânea, ou subaquática. A disposição subaquática não é muito utilizada devido aos problemas ambientais que ela gera, uma vez que os impactos aos ecossistemas aquáticos são negativos e algumas vezes irreversíveis. A disposição subterrânea é feita em câmaras exauridas de minas, ou seja,

em câmaras que restam após a extração do minério, sendo que, na maioria dos casos, os rejeitos são bombeados e preenchem essas câmaras (DUARTE, 2008; LOZANO, 2006).

A forma mais utilizada de disposição é a céu aberto, podendo ser feita de duas maneiras: em pilhas controladas ou em estruturas de contenção localizadas em bacias ou vales. Uma forma menos usual de disposição dos rejeitos é quando a sua disposição está vinculada ao próprio sistema de extração dos minérios. Nesse caso, os rejeitos formam camadas de fundação para os equipamentos de extração (LOZANO, 2006).

Duarte (2008) afirma que a escolha do método de disposição dos rejeitos depende de diversos fatores, entre eles: da natureza do processo de mineração, das condições topográficas e geológicas da região, das propriedades mecânicas dos materiais e do poder de impacto ambiental do contaminante dos rejeitos.

É fato que os rejeitos são produzidos em grandes quantidades e afetam o meio ambiente de forma qualitativa e quantitativa. Por essa razão, as empresas têm se preocupado cada vez mais com esse material, buscando minimizar os impactos ambientais e custos associados aos processos de contenção desses rejeitos (ESPÓSITO, 2000).

## 2.2 Quartzito industrial

O quartzito pode ser classificado geologicamente como uma rocha metamórfica, composta quase que na sua totalidade por grãos de quartzo. A origem do quartzito está relacionada principalmente à ação de processos metamórficos sobre rochas sedimentares ricas em quartzo como os arenitos e os cherts (ABIROCHAS, 2001 apud BABISK *et al.*, 2012).

As areias com elevado teor de quartzo, também conhecidas como areias industriais, são empregadas, em estado natural ou beneficiadas, na fabricação de vidros e de moldes para fundição, em produtos cerâmicos e cimento, como carga mineral em tintas e plásticos, na fabricação de ácidos e fertilizantes, dentre outros processos e produtos. Dessa forma, são amplamente utilizadas na indústria da construção civil, na indústria vidreira, na engenharia de materiais e na metalurgia (RUIZ *et al.*, 2013).

De acordo com Ruiz *et al.* (2013) a areia industrial somente começou a receber atenção na literatura técnica brasileira a partir do final do século XX, porque até então os estudos sobre mineração e matérias-primas, em sua maioria, abrangiam somente à produção de minérios metálicos de alto valor e de bens minerais destinados à produção de insumos agrícolas.

Devido ao crescimento da economia brasileira desde o início do século XXI, os principais segmentos consumidores da areia industrial impulsionaram a expansão e a

descentralização da sua indústria extrativa. Porém, é importante observar que a obtenção da areia industrial, como qualquer outra atividade mineradora, causa impactos ambientais relevantes que devem ser considerados e devidamente amenizados. Principalmente porque, durante os processos de beneficiamento do quartzito industrial, existem perdas significativas de material e geração de rejeitos, os quais têm sido, muitas vezes, depositados de forma inadequada na natureza, sem nenhuma previsão de utilização (RUIZ *et al.*, 2013; BABISK *et al.*, 2012).

Babisk *et al.* (2012) afirmam que a incorporação de resíduos de quartzitos em cerâmica vermelha se mostra viável, pois os menores valores de incorporação mantiveram as propriedades tecnológicas da massa cerâmica pura e os maiores valores de incorporação possuem propriedades dentro dos limites estabelecidos por normas. Nesse sentido, torna-se interessante o estudo da incorporação de resíduos de quartzito industrial em outros materiais de construção civil como, por exemplo, os tijolos solo-cimento.

### **2.3 Estabilização do solo**

A estabilização pode ser entendida como um processo que melhora as características e altera as propriedades de um solo (FRANÇA, 2003 *apud* SOUZA e CASTOR, 2016). Os princípios que regem o processo de estabilização consistem em conferir ao produto final: estabilidade dimensional, maior resistência mecânica para patamares definidos pela utilização, diminuição da permeabilidade, maior resistência à erosão, e à abrasão superficial, controle de fissuração por retração por secagem, o que provoca um consequente aumento da durabilidade do material (INGLES; METCALF, 1972 *apud* GRANDE, 2003).

Silva (2001) garante que todo processo de estabilização modifica as propriedades do sistema solo-água-ar e que a estabilização pode ser direcionada somente para a textura e para a estrutura do solo.

De acordo com Grande (2003), a estabilização do solo promove o preenchimento dos vazios, além de melhorar a aderência entre os grãos do solo. A redução do volume de vazios influencia diretamente na porosidade e na permeabilidade do solo, enquanto que a melhoria na aderência dos grãos confere maior compactidade ao solo o que influi diretamente na sua resistência mecânica do mesmo.

É notável que desde os tempos mais remotos o homem utiliza inúmeras técnicas para conferir melhor comportamento ao solo, aumentando sua resistência ao intemperismo. Pode-se citar a incorporação ao solo de fibras vegetais, urina e excremento de gado, melaço, goma arábica, gordura de baleia, resinas, cal e asfalto (ABIKO, 1973).

São três os principais métodos utilizados para a estabilização do solo: estabilização mecânica, estabilização física e estabilização química. A escolha do tipo de estabilização depende das propriedades naturais do solo, das propriedades desejadas e dos efeitos no solo após a estabilização (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996 apud ANDRADE, 2018).

Para se fazer uma estabilização mecânica deve-se aplicar uma determinada carga que compacta o solo, aumentando sua densidade e diminuindo sua porosidade e permeabilidade. Na estabilização física as propriedades do solo são modificadas, alterando-se sua textura; dessa forma o solo é corrigido granulometricamente, buscando uma otimização das frações de areia, silte e argila, melhorando o empacotamento dos grãos. Já na estabilização química adicionam-se pequenas quantidades de ligantes nos pontos de contato entre os grãos o que garante uma melhora na resistência ao cisalhamento do solo, sendo que os ligantes normalmente utilizados são fibras, betume, cal e cimento Portland (ANDRADE, 2018; SILVA, 2001).

Existem também outros três métodos utilizados para estabilização do solo que são métodos relativamente novos se comparados aos citados anteriormente, sendo eles: estabilização elétrica, estabilização térmica e estabilização por inclusões (VEIGA, 2008; SOUZA e CASTOR, 2016).

A estabilização elétrica consiste em uma passagem de corrente elétrica no solo por descargas sucessivas de alta ou baixa tensão. Alta tensão é utilizada para adensamento de solos arenosos saturados e baixa tensão é utilizada em solos argilosos (VEIGA, 2008; SOUZA e CASTOR, 2016).

A estabilização térmica pode acontecer de três modos distintos: por congelamento, por aquecimento ou por termosose. A estabilização térmica por congelamento promove uma melhoria temporária no comportamento do solo pela alteração de sua textura, pois as baixas temperaturas promovem um ordenamento das partículas do solo em direções preferenciais. Já a estabilização térmica por aquecimento busca rearranjos na rede cristalina dos minerais constituintes do solo. Enquanto que a estabilização térmica por termosose promove a difusão de um fluido em um meio poroso pela ação de gradientes de temperatura (VEIGA, 2008; SOUZA e CASTOR, 2016).

A estabilização por inclusões consiste na inclusão de elementos curtos discretos que podem ser fibras ou partículas naturais ou sintéticas que atuam como agente de reforço no solo (VEIGA, 2008; SOUZA e CASTOR, 2016).

## 2.4 Estudo de dosagem

A dosagem de um solo-cimento se baseia na realização de uma sequência preestabelecida de ensaios seguida de uma interpretação por meio de critérios determinados pelas normas técnicas. O objetivo de um estudo de dosagem é a fixação de três quesitos básicos: o teor de cimento a ser adicionado no solo, a umidade a ser incorporada na mistura e a massa específica aparente seca desejada após a compactação (ABCP, 1980).

Os solos arenosos se estabilizam com menores quantidades de cimento, porém deve-se haver argila na composição do solo, visto que a argila concede à mistura, quando umedecida e compactada, coesão suficiente para a imediata retirada das formas (ABCP, 1985).

Grande (2003) afirma que por mais rigoroso que seja o método de dosagem não necessariamente se obterá uma mistura de boa qualidade, já que outros fatores interventores devem ser observados, como por exemplo: tempo e condições de cura, teor de umidade da mistura e operações de mistura e de compactação.

A dosagem de solo-cimento destinado à moldagem de tijolos, blocos ou paredes monolíticas para a construção de alvenaria está condicionada a obedecer a especificações de valores mínimos, prescritos por norma, de resistência à compressão e absorção de água (GRANDE, 2003).

Segantini e Wada (2011) estudaram a adição de resíduos de construção e demolição (RCD) a tijolos solo-cimento e chegaram à conclusão de que a dosagem adequada deve ser de 4% de cimento, com adição de, no mínimo, 20% de RCD, obtendo-se melhores resultados na medida em que se aumenta a dosagem de RCD na mistura, até 100% em relação à massa de solo.

O trabalho de Milani e Freire (2006) mostra que a dosagem ideal para a fabricação de elementos construtivos de solo-cimento com adição de casca de arroz é de 12% de cimento e 12% da combinação cimento mais casca de arroz.

Em se tratando da adição de resíduos a matriz solo-cimento é de grande relevância fazer um estudo da dosagem da mistura, tentando-se encontrar uma dosagem ótima que utilize a maior quantidade de resíduo possível sem prejudicar a qualidade do tijolo.

## 2.5 Tijolo solo-cimento

Segundo a NBR 8491 (ABNT, 2012a) o tijolo de solo-cimento é definido como “componente de alvenaria constituído por uma mistura homogênea, compactada e endurecida

de solo, cimento Portland, água e, eventualmente, aditivos e/ou pigmentos em proporções que permitam atender às exigências desta Norma”.

A NBR 8491 (ABNT, 2012) ainda especifica que a água utilizada não deve possuir impurezas nocivas ao processo de hidratação do cimento e que o solo utilizado não deve possuir teores de matéria orgânica prejudiciais às características exigidas para o tijolo.

O tijolo solo-cimento deve possuir às seguintes dimensões nominais: 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). Ainda pode possuir dimensões diferentes das citadas anteriormente desde que a altura seja menor que a largura (ABNT, 2012a).

Ainda de acordo com a NBR 8491 (ABNT, 2012a) o valor médio de resistência à compressão da amostra ensaiada não deve ser inferior a 2,0 MPa ou 20,0 kgf/cm<sup>2</sup> e o valor de resistência à compressão individual não deve ser inferior a 1,7 MPa ou 17,0 kgf/cm<sup>2</sup> com idade mínima de 7 dias. Já em relação à absorção de água, a norma recomenda que a média dos valores não seja superior a 20% e que os valores individuais não sejam superiores a 22% com idade mínima de 7 dias.

O solo utilizado para a produção do tijolo solo-cimento deve possuir as características mostradas na Tabela 1, e o cimento, de acordo com o tipo empregado, deve atender às NBR 5732, NBR 5733, NBR 5735 e NBR 5736 (ABNT, 2012 b).

Tabela 1 – Características do solo utilizado para produção do tijolo solo-cimento.

Passante na peneira de 4,8 mm (n° 4)	100%
Passante na peneira de 0,075 mm (n°200)	10% a 50%
Limite de Liquidez	≤ 45%
Índice de Plasticidade	≤ 18%

Fonte: Adaptado de NBR 10833 (ABNT, 2012 b).

O teor de cimento que deve ser incorporado ao solo para produção do tijolo foi definido pela ABCP (2004) e depende diretamente do tipo do solo escolhido (TABELA 2).

Tabela 2 – Relação entre o tipo de solo e o teor de cimento que deve ser utilizado para a produção do tijolo.

Classificação do solo segundo a American Association of State Highway and Transportation Officials (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).

A mistura do solo e do cimento deve ser mecânica, adicionando-se sempre o cimento ao solo destorroado e peneirado. Deve-se misturar até se obter uma mistura de coloração uniforme. A água deve ser adicionada em pequenos incrementos até se atingir a umidade ideal de trabalho (ABNT, 2012 b).

A prensagem deve ser feita imediatamente após a mistura e os tijolos devem ser mantidos úmidos de 6 horas após a moldagem até completar sete dias, sendo que os tijolos somente podem ser utilizados após completar 14 dias da moldagem (ABNT, 2012 b).

## 2.6 Incorporação de resíduos

### 2.6.1 Incorporação de resíduos em materiais de construção civil

A indústria da construção civil ocupa o segundo lugar no ranking das indústrias emissoras do gás dióxido de carbono ( $CO_2$ ) na atmosfera e transforma 50% dos recursos naturais extraídos da Terra (IZQUIERDO e RAMALHO, 2014). Dessa forma, é extremamente necessário o desenvolvimento de materiais de construção alternativos e de tecnologias construtivas alternativas como um caminho para a sustentabilidade dessa indústria (IZQUIERDO e RAMALHO, 2014).

Uma opção interessante para o desenvolvimento de materiais de construção civil alternativos é por meio da incorporação de resíduos a eles, uma vez que a utilização, pela indústria da construção civil, de resíduos gerados por outras indústrias é vantajosa não somente em virtude do aumento da atividade industrial e, por conseguinte, de subprodutos, mas, principalmente, devido à redução da disponibilidade de matérias-primas não renováveis e extremamente necessárias às atividades da construção civil convencional. Boa parte dos

resíduos gerados hoje podem ser reciclados, reutilizados, transformados e incorporados, de modo a produzir novos materiais de construção civil e atender à crescente demanda por tecnologias de construção alternativas mais eficientes, econômicas e sustentáveis (SAVASTANO, 2003 *apud* PAULA *et al.*, 2009).

São inúmeros os exemplos de materiais de construção civil com adição de resíduos que obtiveram resultados satisfatórios. Entre eles, pode-se citar o trabalho de Fioriti e Akasaki (2004) que estudou a incorporação de resíduos de borracha de pneus em blocos estruturais de concreto e chegou à conclusão de que com a quantidade de 13% de resíduo na composição do concreto o bloco demonstra capacidade técnica podendo vir a competir com o bloco de concreto tradicional.

Paula *et al.* (2009) obtiveram um resultado satisfatório ao estudar a incorporação de um resíduo a um material de construção civil, uma vez que ficou comprovada a possibilidade de substituição, sem prejuízo algum, de até 20% de cimento Portland pelo resíduo cinza de bagaço de cana-de-açúcar em argamassas.

Em alguns casos, a reciclagem de resíduos em materiais de construção civil pode, inclusive, melhorar o desempenho dos materiais (BREHM *et al.*, 2013). Um caso como esse pode ser encontrado no trabalho de Souza *et al.* (2008) que mostra que a incorporação de resíduos de concreto em tijolos prensados de solo-cimento proporcionou melhoria nas propriedades mecânicas do tijolo, favorecendo a redução do consumo de cimento e a obtenção de tijolos de melhor qualidade.

### **2.6.2 Incorporação de resíduos na matriz de tijolos solo-cimento**

Um material de construção civil que ocupa um lugar de destaque como promissor na incorporação de resíduos a sua matriz é o tijolo solo-cimento. Existe uma vasta gama de trabalhos que obtiveram resultados positivos quando algum tipo de resíduo foi incorporado a matriz desse tipo de tijolo.

Como exemplo pode-se citar o trabalho de Mendes *et al.* (2014). Os autores estudaram a incorporação de resíduo do polimento de grés de porcelanato a tijolos solo-cimento e chegaram à conclusão de que o tijolo solo-cimento com adição desse resíduo atende as normas ABNT de resistência à compressão e absorção de água.

O trabalho de Dallacort *et al.* (2002) comprovou que as substituições de 25 e 57% do teor de cimento por resíduo cerâmico moído podem produzir blocos de solo-cimento com resistências superiores a 2,0 MPa, com teor de material ligante de 6 a 8 %, respectivamente.

Valenciano (1999) estudou a incorporação de resíduos agroindustriais ao tijolo solo-cimento e chegou à conclusão que a incorporação de até 20% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar na mistura solo-cimento não influencia as características de resistência à compressão e absorção de água do tijolo.

Alguns autores estudaram a incorporação de Grits, que é um resíduo proveniente do processo de Kraft na indústria de celulose. Miranda *et al.* (2011) estudaram a substituição do solo por Grits e observaram que os tijolos atenderam os requisitos da norma em até 50% de resíduo incorporado. Siqueira e Holanda (2015) substituíram o cimento pelo Grits na matriz de tijolos solo-cimento, e observaram que incorporações de até 20% do resíduo resultaram em valores de resistência à compressão e absorção de água dentro das faixas estabelecidas pela norma.

Outro exemplo de êxito na incorporação de resíduo a matriz do tijolo solo-cimento é apresentado no trabalho de Lima (2013) que estudou incorporação de resíduo de argamassa de cimento e areia, proveniente do assentamento e revestimento de paredes, na produção de blocos de solo-cimento e chegou à conclusão de que a adição do resíduo é indicada para a fabricação do tijolo, sendo o melhor traço aquele com 20% de resíduo.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Obtenção do Resíduo fino de quartzito industrial

A unidade de Barbacena/MG da empresa Carbetto de Silício SIKA Brasil (Grupo FIVEN) produz carbetto de silício (SiC) que é um mineral cerâmico sintético produzido a partir de uma mistura de coque de petróleo (fonte de carbono), silício e areia de quartzito (quartzito industrial). Devido as características do SiC de inércia térmica em qualquer temperatura, resistência ao choque térmico e à abrasão, dureza e sinterabilidade, este é utilizado na produção de acessórios de forno, bocais de queima, empunhadouros deslizantes, componentes de processo para a indústria de semicondutores, blindagem passiva para as indústrias de segurança e defesa, anéis de vedação e filtros de partículas de diesel para a indústria em geral e para a indústria automotiva (SAINT-GOBAIN, 2019).

A areia utilizada para produção do SiC na unidade de Barbacena é extraída de uma mina localizada na cidade de Itutinga/MG e é beneficiada em uma planta de beneficiamento na cidade de Nazareno/MG. A areia passa pelos processos de lavagem e peneiramento (FIGURA 3.1), pois, para produção de SiC, a areia deve ter baixo percentual de ferro e alumina que são contaminantes geralmente encontrados na porção mais fina da areia. Dessa forma, o processo de beneficiamento tem o intuito de separar a areia grossa da areia fina (FIGURA 3.2), sendo que a areia fina, como não é utilizada para nenhum fim, se torna um resíduo, denominado nesse trabalho como resíduo fino de quartzito industrial.

Como no processo de beneficiamento se utiliza água para lavagem da areia, a areia fina acaba se misturando à água e se forma uma lama. Essa lama é levada, por meio de calhas, até bacias de decantação (FIGURAS 3.3 e 3.4).

Nas bacias de decantação acontece a separação da água e da areia fina por meio do processo de decantação. A água é então levada para outra bacia para ser tratada e retorna ao processo de beneficiamento (FIGURA 3.4). A areia passa por um processo de secagem (FIGURA 3.5). Após seca, a areia fina, que nesse momento já é chamada de resíduo, é retirada das bacias de decantação por máquinas e levada até as pilhas controladas.

Figura 3.1 – Processo de beneficiamento da areia: (a) Lama passando por peneira; (b) Separação da lama e da areia grossa e (c) Areia grossa na esteira.



Fonte: Da autora (2019).

Figura 3.2 – Final do processo de beneficiamento: areia grossa separada da areia fina.



Fonte: Da autora (2019).

Figura 3.3 – Caminho percorrido pela lama, dentro das calhas, do final do processo de beneficiamento até às bacias de decantação.



Fonte: Da autora (2019).

Figura 3.4 – Bacias de decantação: (a) Lama na bacia de decantação e (b) Água que foi separada do resíduo passando por processo de tratamento em outra bacia.

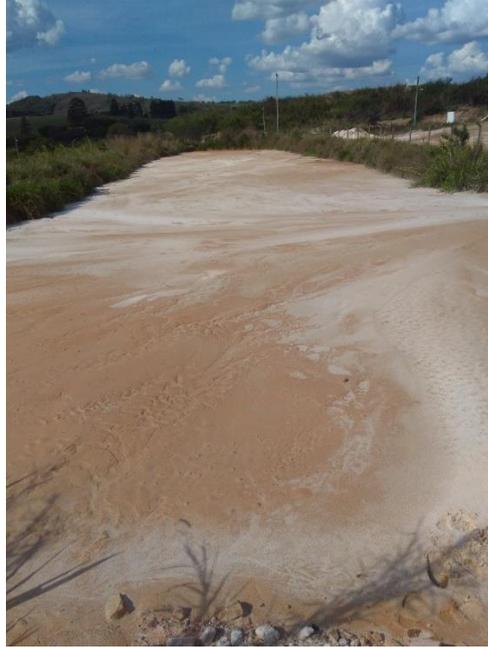


(a)

(b)

Fonte: Da autora (2019).

Figura 3.5 – Resíduo já seco, aguardando para ser levado até as pilhas controladas.



Fonte: Da autora (2019).

Para obtenção de uma amostra representativa do resíduo fino de quartzito industrial (areia fina), foi utilizada uma retroescavadeira que retirou o resíduo de vários locais da pilha controlada e despejou em local reservado para a obtenção da amostra representativa (FIGURA 3.6).

Figura 3.6 – Processo de amostragem: (a) Retroescavadeira pegando resíduo na pilha controlada e (b) Retroescavadeira despejando resíduo coletado.



(a)

(b)

Fonte: Da autora (2019).

Ainda com auxílio da retroescavadeira iniciou-se o processo de mistura do material coletado para homogeneização da amostra. Após a homogeneização, foi descartada, de volta para a pilha controlada, aproximadamente metade da amostra coletada. Esse processo foi repetido três vezes, até obter uma amostra equivalente a 200 kg do resíduo. Em seguida, foi realizado o processo de quartejamento que consiste em dividir a amostra em quatro partes aproximadamente iguais (FIGURA 3.7), das quais duas partes opostas foram descartadas e as outras duas foram utilizadas para encher cinco sacos de papelão com aproximadamente 20 kg de resíduo em cada (FIGURA 3.8). Esse procedimento foi definido conforme sugestão da NBR 10007 (ABNT, 2004).

Todo o material coletado foi levado para o laboratório de Geotecnia Ambiental e Resíduos Sólidos do Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento (DRS) da Universidade Federal de Lavras (UFLA) e armazenado em um recipiente de plástico de 200 litros, conhecido como “bombona” devidamente fechado.

Figura 3.7 – Amostra quarteeada.



Fonte: Da autora (2019).

Figura 3.8 – Sacos preenchidos com resíduo.



Fonte: Da autora (2019).

Todo o material coletado foi levado para o laboratório de Geotecnia Ambiental e Resíduos Sólidos do Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento (DRS) da Universidade Federal de Lavras (UFLA) e armazenado em um recipiente de plástico de 200 litros, conhecido como “bombona” devidamente fechado.

### 3.2 Obtenção do Solo

O solo foi coletado dentro do campus da UFLA às margens da estrada que leva até a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), próximo ao G-ÓLEO – Núcleo de Estudos em Plantas Oleaginosas, Óleos Vegetais, Gorduras e Biocombustíveis (FIGURA 3.9). As coordenadas geográficas do local de coleta são: 21°13'25''S e 44°58'07''N.

A partir da conversão das coordenadas geográficas para UTM em Datum SIRGAS2000 e da observação da Figura 3.10 é possível inferir que a jazida se encontra em uma área construída, sendo que o solo dessa área pode ser um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (PVAd1), um Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd2) ou um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (LVAd3). O PVAd1 é o tipo de solo mais encontrado no município de Lavras, sendo que 29,94% da área possui esse tipo de solo, o LVd2 está presente em 10,88% do município e o LVAd3 em 2,95% (SILVA, 2018).

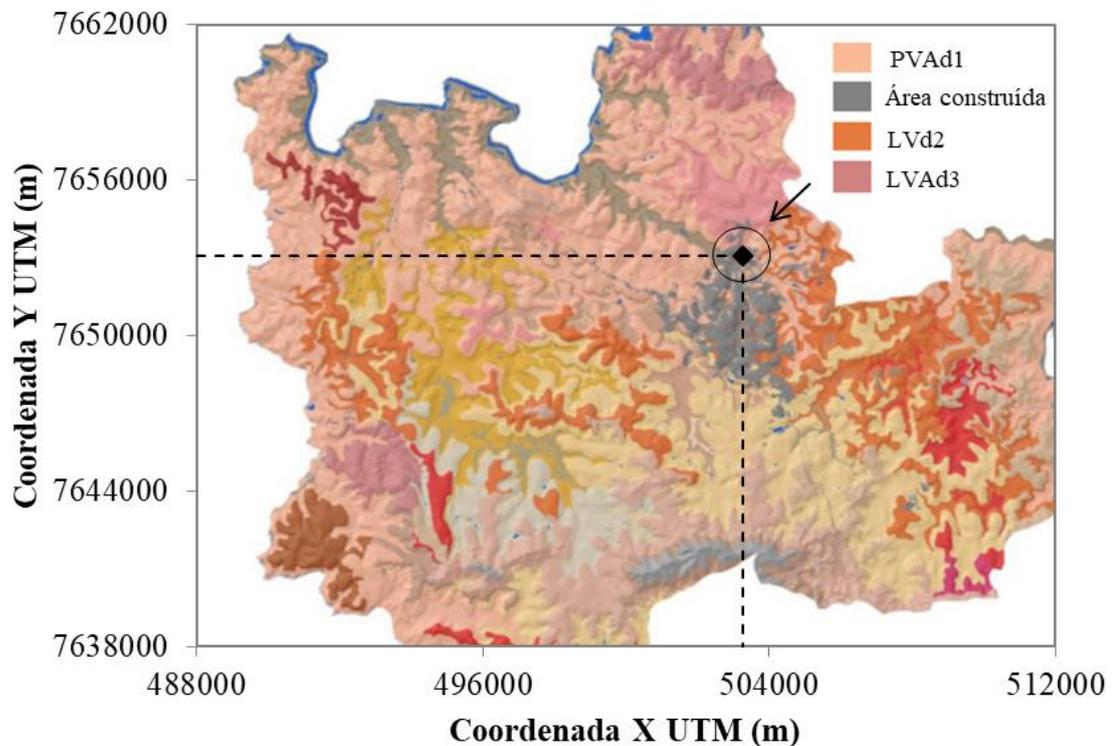
Embora essa classificação não tenha relevância geotécnica, ela é importante para mostrar a abrangência dos possíveis tipos do solo que foi coletado o que interfere diretamente na possibilidade de uso do solo para fabricação do tijolo.

Figura 3.9 – Local de coleta do solo.



Fonte: Google Earth (2019).

Figura 3.10 – Situação da jazida no mapeamento de classes de solo no município de Lavras/MG.



Fonte: Adaptado de Silva (2018).

Para retirada da amostra de solo, foi descartada uma camada de aproximadamente 30 cm de solo superficial contendo material orgânico e a partir dessa cota foi realizada a coleta de aproximadamente 50 kg de solo.

O solo coletado também foi levado ao laboratório de Geotecnia Ambiental e Resíduos Sólidos do DRS e armazenado dentro de outra “bombona”.

### 3.3 Ensaios de caracterização

A Tabela 3 apresenta os ensaios de caracterização realizados tanto para o solo quanto para o resíduo fino de quartzito industrial.

Tabela 3 – Ensaios de caracterização do solo e resíduo fino de quartzito industrial.

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

Fonte: Da autora (2019).

### 3.4 Ensaio de Pozolanicidade

Ao analisar a composição química do resíduo (TABELA 4) fornecida pela empresa que o cedeu para o presente estudo, observa-se a grande porcentagem de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) presente. Dessa maneira, optou-se por realizar o ensaio de pozolanicidade para verificar se o resíduo apresenta atividade pozolânica e assim poder substituir o cimento na matriz do tijolo solo-cimento. A determinação do índice de atividade pozolânica do resíduo foi feita de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014).

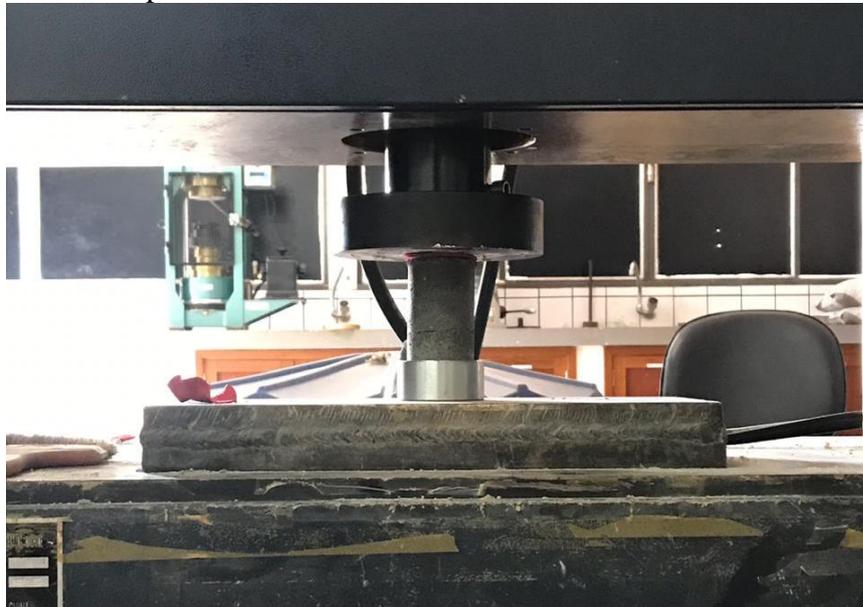
Tabela 4 – Composição química do resíduo fino de quartzito industrial em %.

Elementos	Análise Química				
	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4	Análise 5
Si+SiO <sub>2</sub>	95,074	93,694	88,426	95,160	86,707
C livre	2,160	2,060	2,321	1,024	3,162
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,162	0,365	0,571	0,267	0,801
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,311	3,445	7,685	3,173	8,501
CaO	0,013	0,017	0,031	0,027	0,056
MgO	0,027	0,036	0,070	0,034	0,077
TiO <sub>2</sub>	0,047	0,081	0,131	0,057	0,119
K <sub>2</sub> O	0,206	0,302	0,765	0,258	0,577

Fonte: Carbetto de Silício SIKA Brasil (Grupo FIVEN) (2019).

A resistência à compressão simples dos corpos de prova foi determinada aos 28 dias de acordo com a prescrição da norma. Para isso foi utilizada a máquina universal de ensaios, modelo WDW-300 E, situada no Laboratório de Materiais e Mecânica das Estruturas do Departamento de Engenharia (DEG) (FIGURA 3.11).

Figura 3.11 – Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova para determinação da atividade pozolânica.



Fonte: Da autora (2019).

Foram confeccionados 12 corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro, sendo 6 do grupo de controle (sem resíduo) e 6 do grupo de estudo (com resíduo). Os valores individuais de resistência à compressão dos corpos de prova foram calculados por meio da equação abaixo:

$$T = \frac{F}{A} \quad (1)$$

onde:

T é a tensão de ruptura à compressão simples;

F é a carga de ruptura;

A é a área superficial do corpo de prova<sup>2</sup>.

Tanto para os corpos de prova controle, quanto para os corpos de prova com resíduo foi feita uma média aritmética para determinação da resistência média à compressão.

O índice de atividade pozolânica foi calculado de acordo com a Equação 2.

$$I = \frac{f_{CB}}{f_{CA}} \times 100\% \quad (2)$$

onde:

I é o índice de atividade pozolânica em porcentagem;

$f_{CB}$  é a resistência média dos corpos de prova com resíduo;

$f_{CA}$  é a resistência média dos corpos de prova controle.

### 3.5 Determinação das porcentagens de solo e resíduo

Conforme a NBR 10833 (ABNT, 2012 b), na matriz de tijolo solo-cimento a parte constituinte do solo deve ter 100% de partículas passando na peneira de 4,8 mm e de 10 a 50% passando na peneira de 0,075 mm, além do limite de liquidez ser menor ou igual a 45% e índice de plasticidade menor ou igual a 18%. Dessa forma, para definição das porcentagens de incorporação de resíduo em relação à massa de solo que atendam os critérios da NBR 10833 (ABNT, 2012 b), foram realizados peneiramento e ensaios de limites de consistência das misturas. Para isso, foram definidas 6 misturas de 500 g contendo diferentes porcentagens de solo e resíduo. Essas misturas foram nomeadas pela letra R seguida do número que representa a porcentagem de resíduo fino de quartzito industrial incorporado, por exemplo, R20 indica 20% de resíduo.

Com o auxílio do agitador eletromagnético de peneiras, todas as misturas foram passadas nas peneiras de 4,8 mm e 0,075 mm.

Os limites de plasticidade e liquidez das misturas foram determinados de acordo com a NBR 7180 (ABNT, 2016) e com a NBR 6459 (ABNT, 2016) respectivamente.

Não foram definidas misturas inferiores a 20% de resíduo, pois nos ensaios de limite de plasticidade e limite de liquidez referente à mistura R20 foram encontrados os valores máximos recomendados pela NBR 10833 (ABNT, 2012 b). Sendo assim, para porcentagens menores que 20% implicaria ao não atendimento à norma, pois seriam menos granulares, e apresentariam valores de índice de plasticidade maiores que 18%.

Para mistura de 50% de resíduo, não foi possível a realização do ensaio de limite de plasticidade atendendo as recomendações da NBR 7180 (ABNT, 2016) e também do ensaio de limite de liquidez atendendo as recomendações da NBR 6459 (ABNT, 2016). Dessa forma, essa mistura é considerada não-plástica e não poderia ser utilizada na fabricação de tijolos solocimento.

### 3.6 Ensaio de compactação

Foi realizado o ensaio de compactação Proctor Normal de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2016), utilizando-se o compactador mecânico modelo LR-T0131 (FIGURA 3.12), para obtenção das curvas de compactação e definição da massa específica aparente seca máxima e umidade ótima das misturas R0, R20, R25, R30, R35, R40 e R45.

Figura 3.12 – Compactador mecânico utilizado nos ensaios de compactação.



Fonte: Da autora (2019).

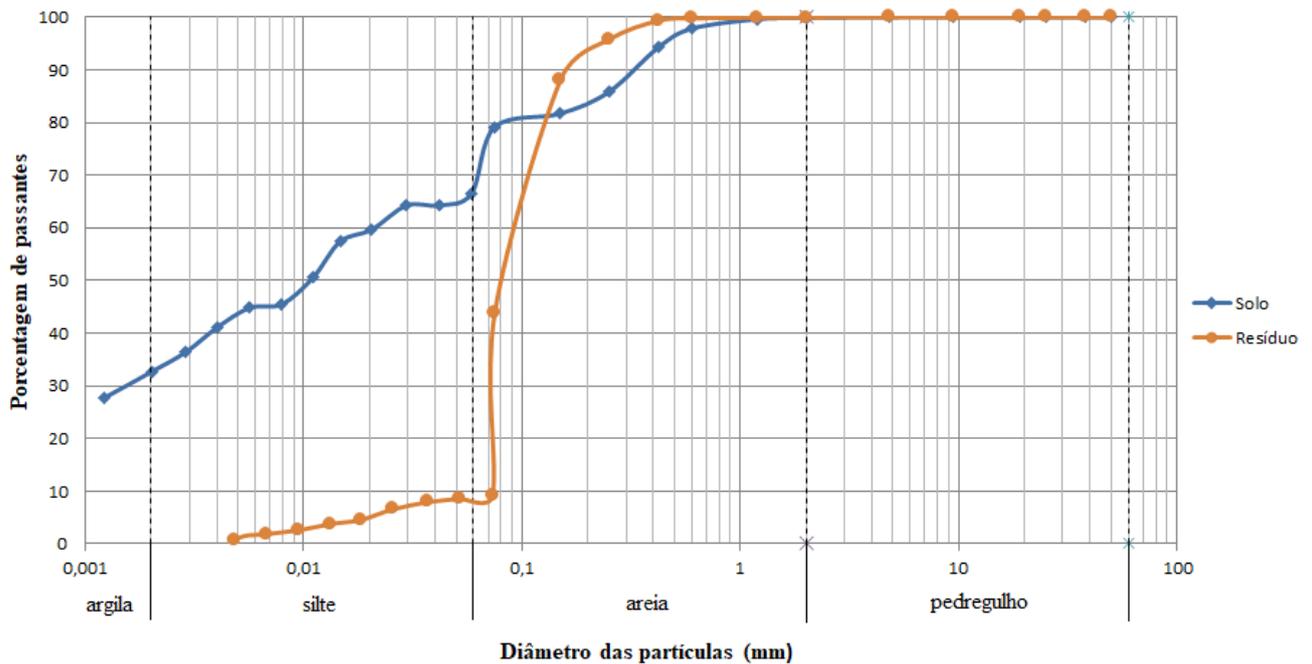
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Ensaios de caracterização

A massa específica dos sólidos determinada para o solo foi de  $2,727 \text{ g/cm}^3$  e para o resíduo foi de  $2,620 \text{ g/cm}^3$ .

A Figura 4.1 ilustra as curvas granulométricas do solo e do resíduo fino de quartzito industrial.

Figura 4.1 – Curvas granulométricas do solo e do resíduo.



Diâmetro das partículas (mm)

Fonte: Da autora (2019).

Na Figura 4.1 é possível observar que o solo é composto de por 33% de argila, 34% de silte, e 33% de areia. Dos 33% da fração areia, 42% correspondem à areia fina, 52% correspondem à areia média, e 6% correspondem à areia grossa.

A observação da Figura 4.1 também mostra que o resíduo fino de quartzito industrial é composto de 0% de argila, 7% de silte e 93% de areia. Dos 93% de areia, 87% correspondem à areia fina e 13% correspondem à areia média, não havendo fração de areia grossa.

O limite de plasticidade encontrado para o solo foi de 27%, e o limite de liquidez foi de 48%. Dessa forma, o valor do índice de plasticidade (IP) calculado foi de 21%.

Para o resíduo, não foi possível realizar o ensaio de limite de plasticidade atendendo as recomendações da NBR 7180 (ABNT, 2016) e também não foi possível realizar o ensaio de limite de liquidez atendendo as recomendações da NBR 6459 (ABNT, 2016). Dessa forma, conclui-se que o resíduo é considerado não-plástico.

Observa-se que o solo não pode ser utilizado para fabricação de tijolo solo-cimento, uma vez que não atende os requisitos de limite de liquidez e índice de plasticidade estipulados pela NBR 10833 (ABNT, 2012 b), sendo necessário a correção granulométrica com a inclusão de um material granular.

Ao analisar as curvas granulométricas fica evidente que a incorporação do resíduo ao solo tornará a mistura mais granular, dessa forma, somente a incorporação do resíduo já será suficiente, não havendo necessidade de uma correção granulométrica adicional para atendimento aos requisitos da norma supracitada.

#### 4.2 Ensaio de Pozolanicidade

A Tabela 5 apresenta os valores médios de resistência à compressão dos corpos de prova controle e dos corpos de prova com resíduo e os respectivos desvios-padrão.

Tabela 5 – Valores médios de resistência a compressão.

Corpo de prova	Resistência à compressão (MPa)
Controle	17,77 ± 0,83
Com resíduo	8,63 ± 1,50

Fonte: Da autora (2019).

O valor calculado para o índice de atividade pozolânica foi de 49%. Dessa forma, conclui-se que não é possível atribuir potencial pozolânico ao resíduo fino de quartzito industrial, pois as prescrições da NBR 12653 (ABNT, 2015) estabelecem que o percentual mínimo do índice de atividade pozolânica deve ser 75% para atribuir potencial pozolânico ao material ensaiado.

Logo, observa-se a não viabilidade de substituição do cimento pelo resíduo fino de quartzito industrial na matriz de tijolo solo-cimento.

#### 4.3 Determinação das porcentagens de solo e resíduo

Na Tabela 6 encontra-se as porcentagens de passantes das misturas de solo e resíduo nas peneiras de 4,8 mm e 0,075 mm.

Tabela 6 – Porcentagens de passantes das misturas nas peneiras de 4,8 mm e 0,075 mm.

Mistura	Passantes na peneira de 4,8 mm (%)	Passantes na peneira de 0,075 mm (%)
R20	100	17,16
R25	100	18,24
R30	100	19,48
R35	100	19,10
R40	100	20,92
R45	100	21,20

Fonte: Da autora (2019).

É possível observar que as porcentagens passantes das misturas na peneira de 0,075 mm estão todas entre 10% e 50% e que a porcentagem de passantes na peneira de 4,8 mm de todas as misturas foi 100%. Dessa forma, em relação ao peneiramento, todas as misturas atendem ao recomendado pela NBR 10833 (ABNT, 2012 b) como material para fabricação do tijolo solo-cimento.

A Tabela 7 apresenta os valores de limite de plasticidade, limite de liquidez e índice de plasticidade das misturas pré-estabelecidas.

Tabela 7 – Valores de LL, LP e IP para as misturas.

Mistura	LL (%)	LP (%)	IP (%)
R20	40	22	18
R25	38	21	17
R30	34	20	14
R35	33	19	14
R40	29	18	11
R45	28	17	11

Fonte: Da autora (2019).

É possível observar que quanto maior a porcentagem de resíduo na mistura, menores foram os valores de limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade. Esse resultado já era esperado, pois sabe-se que quanto mais granular for o solo, menor será sua plasticidade.

Della Flora (2015) realizou um estudo de solos arenosos finos lateríticos do Rio Grande do Sul, e os resultados de limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade foram significativamente menores para solos mais granulares quando comparados com os solos finos.

Picanço (2012) adicionou 10% e 50% de resíduo cerâmico a um solo o que promoveu um aumento da porção granular. Os resultados do trabalho mostraram que a adição do resíduo provocou uma diminuição dos valores dos limites de consistência quando comparados aos valores encontrados para o solo.

Como todos os valores de limite de liquidez apresentados na Tabela 7 são menores que 45% e também todos os valores de índice de plasticidade foram menores ou iguais a 18%, pode-se concluir que todas as misturas pré-estabelecidas atendem ao recomendado pela NBR 10833 (ABNT, 2012 b) como material para fabricação do tijolo solo-cimento.

A ABCP (2004) utiliza a classificação AASHTO/TBR (QUADRO 4.1) para solos, para indicar a melhor porcentagem de cimento na fabricação dos tijolos (TABELA 2), considerando a menor quantidade de cimento capaz de estabilizar o solo. Assim, conforme os resultados obtidos no peneiramento e nos limites de consistência (TABELAS 6 e 7), pode-se concluir que para todas as misturas propostas são classificadas como solo A2 (QUADRO 4.1) indicando uma porcentagem mínima de cimento para fabricação de tijolos ecológicos igual a 7% (TABELA 2).

Tabela 2 – Relação entre o tipo de solo e o teor de cimento que deve ser utilizado para a produção do tijolo.

Classificação do solo segundo a American Association of State Highway and Transportation Officials (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).

Quadro 4.1 – Classificação do solo pela Transportation Research Board – TBR adotada pela AASHTO.

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 / A-7-6
Peneiração: % que passa: Nº 10 Nº 40 Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40 Limite de Liquidez - LL (%) Índice de Plasticidade IP (%)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Grupo	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa				Solos Siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre			

Fonte: AASHTO/TBR.

#### 4.4 Ensaio de compactação

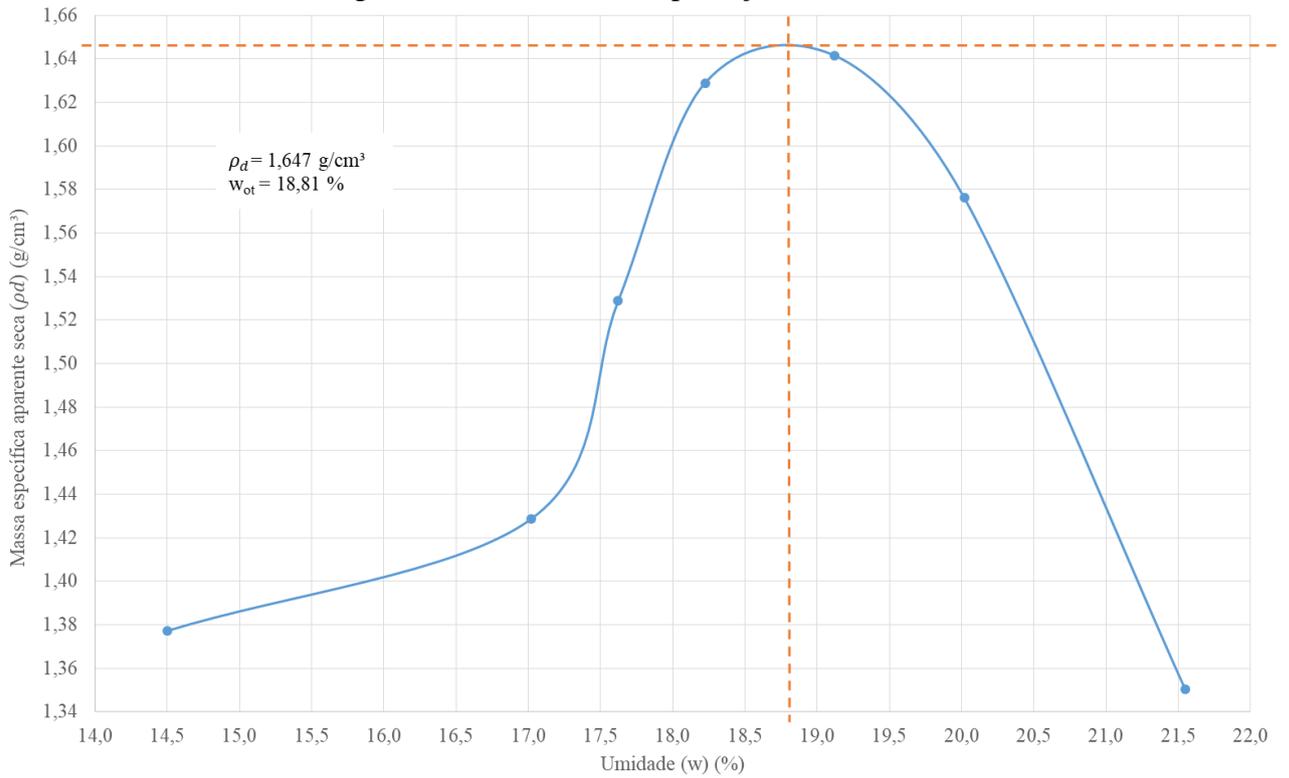
A Tabela 8 apresenta os valores de umidade ótima ( $w_{ot}$ ) e massa específica aparente seca máxima ( $\rho_d máx$ ) obtidos nos ensaios de compactação do solo e das misturas R20, R25, R30, R35, R40 e R45. As Figuras 4.2 a 4.8 ilustram as curvas de compactação do solo e das respectivas misturas e a Figura 4.9 ilustra um gráfico com todas as curvas de compactação.

Tabela 8 – Valores de  $w_{ot}$  e  $\rho_d máx$ .

Material	$w_{ot}$ (%)	$\rho_d máx$ (g/cm <sup>3</sup> )
Solo	18,81	1,647
R20	16,21	1,667
R25	16,26	1,694
R30	17,15	1,737
R35	16,71	1,819
R40	16,76	1,819
R45	16,62	1,821

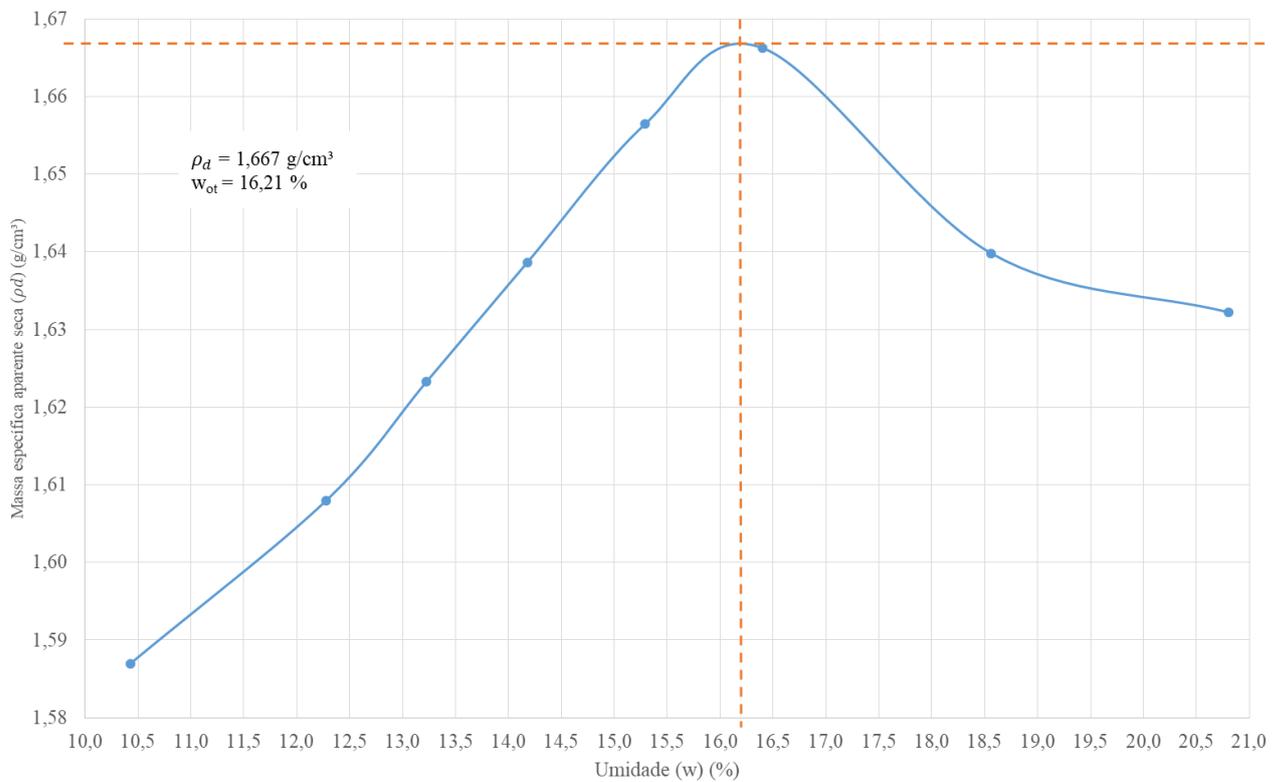
Fonte: Da autora (2019).

Figura 4.2 – Curva de compactação do solo.



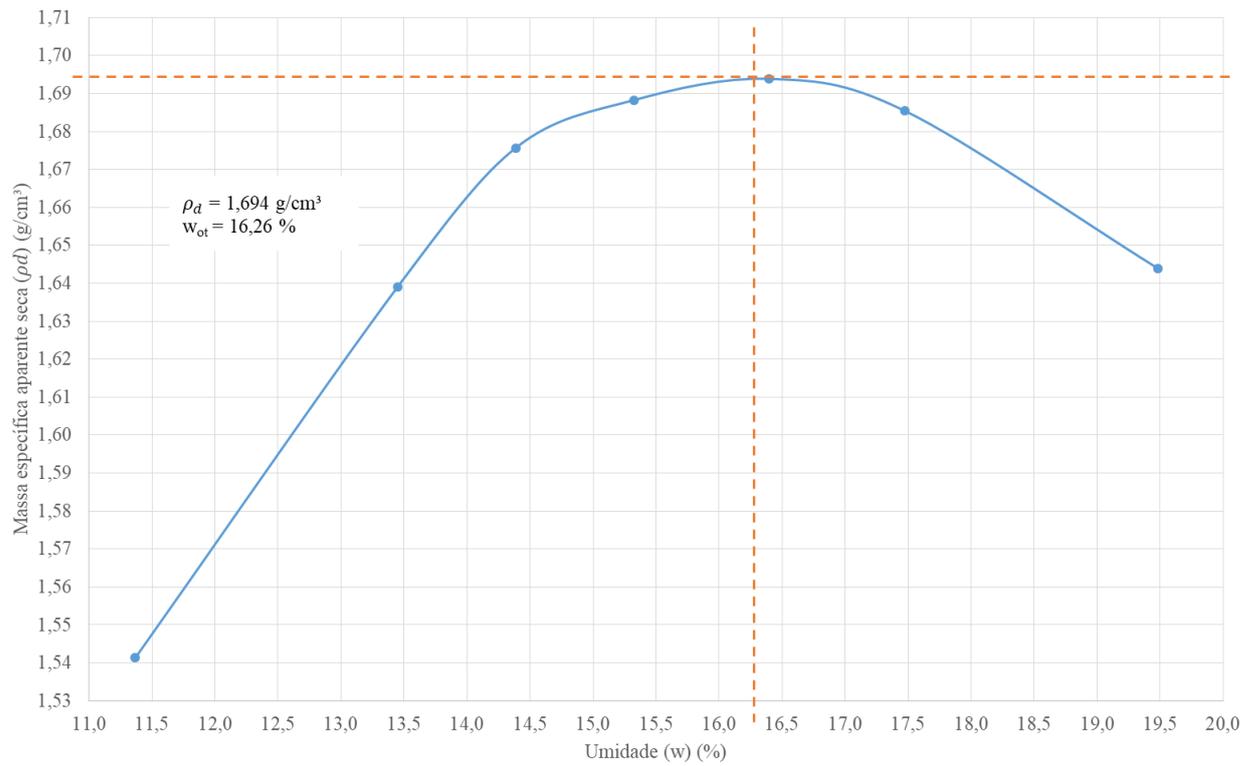
Fonte: Da autora (2019).

Figura 4.3 – Curva de compactação da mistura R20.



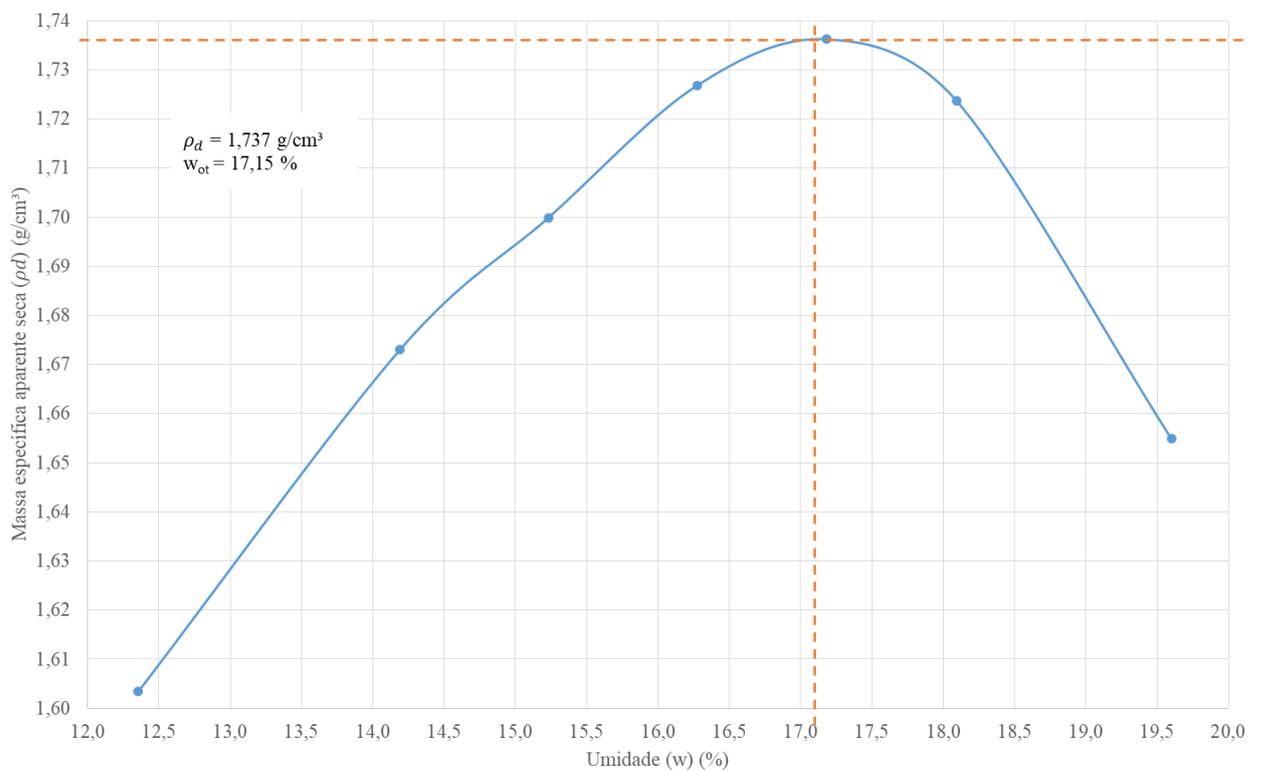
Fonte: Da autora (2019).

Figura 4.4 – Curva de compactação da mistura R25.



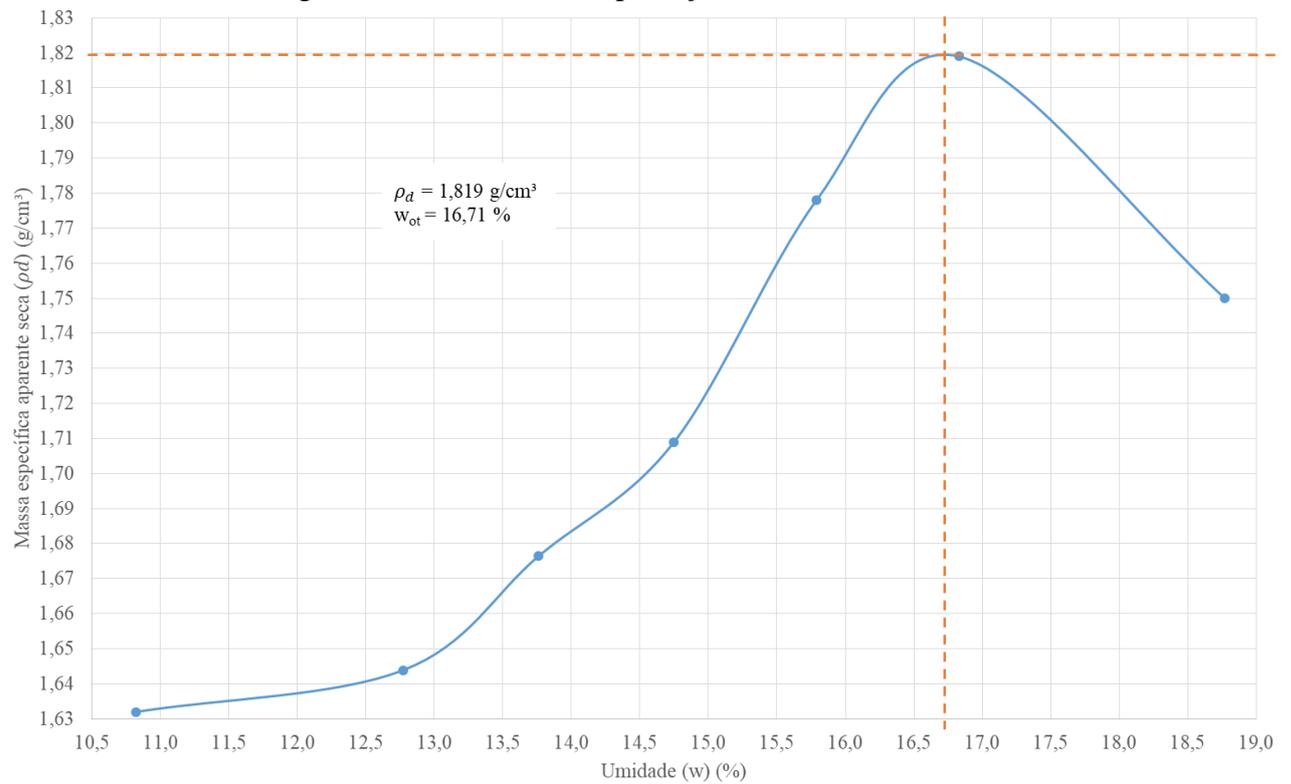
Fonte: Da autora (2019).

Figura 4.5 – Curva de compactação da mistura R30.



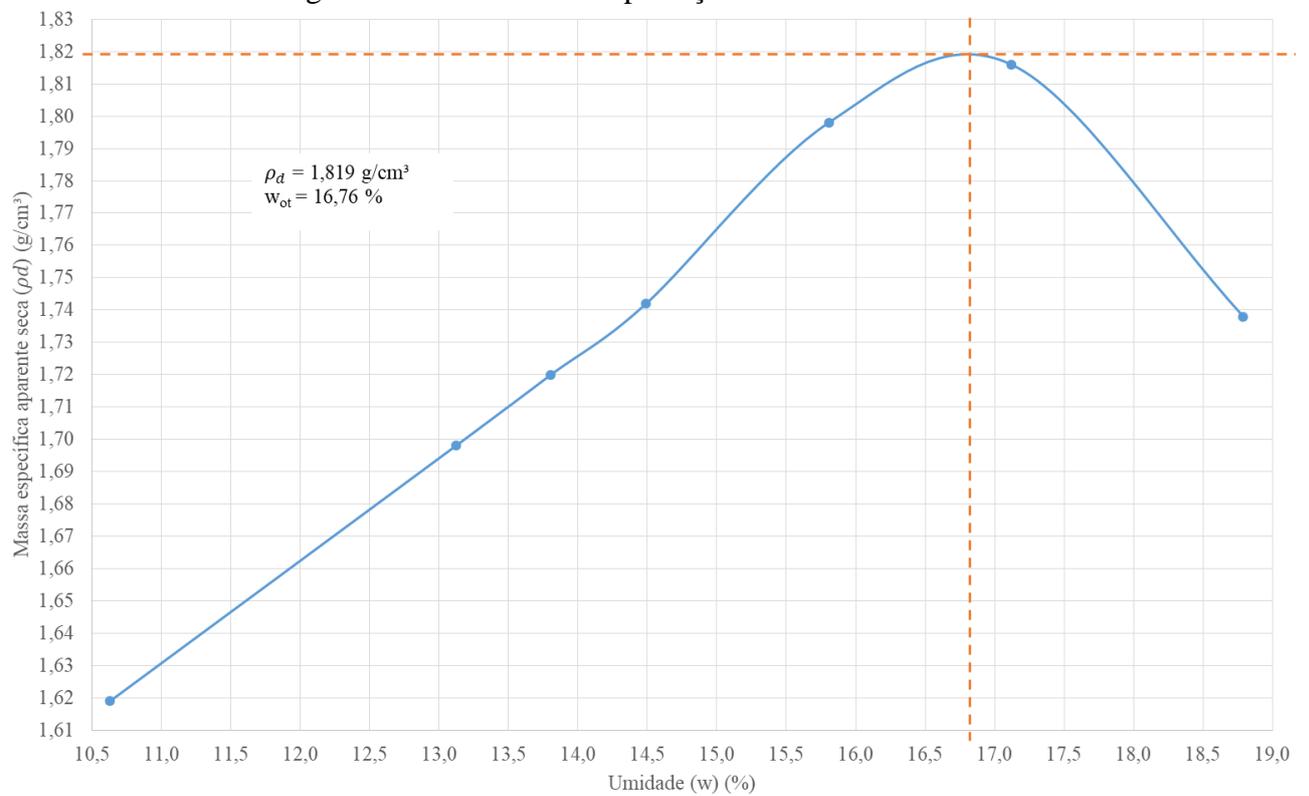
Fonte: Da autora (2019).

Figura 4.6 – Curva de compactação da mistura R35.



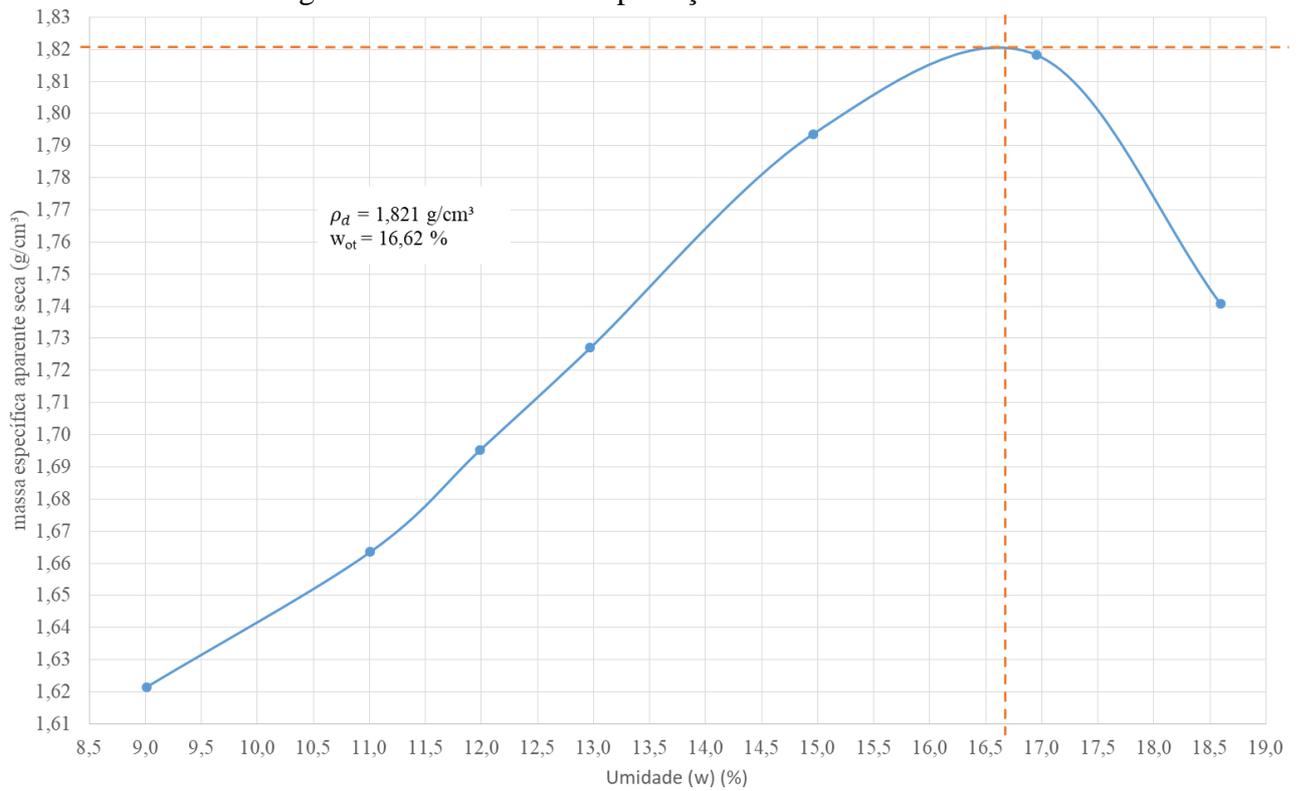
Fonte: Da autora (2019).

Figura 4.7 – Curva de compactação da mistura R40.



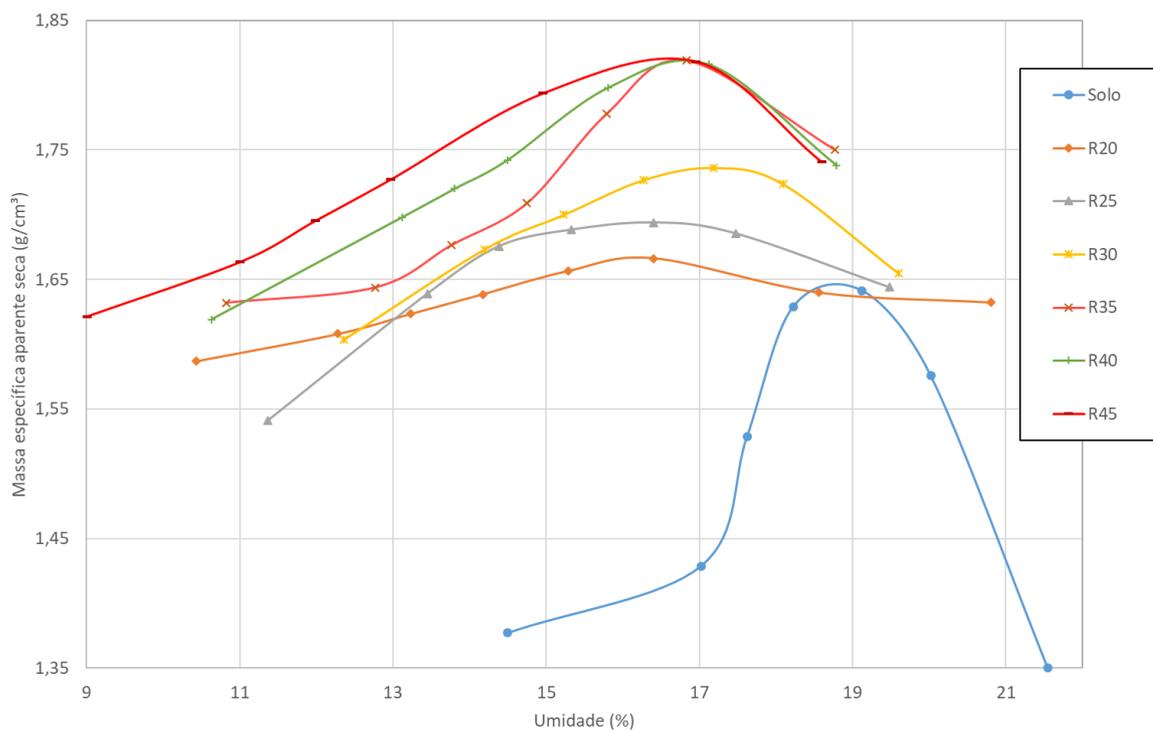
Fonte: Da autora (2019).

Figura 4.8 – Curva de compactação da mistura R45.



Fonte: Da autora (2019).

Figura 4.9 – Todas as curvas de compactação.



Fonte: Da autora (2019).

Observa-se pela Tabela 8 e pelas Figuras 4.2 a 4.8 que quanto maior a porcentagem de resíduo incorporado, maior  $\rho_d máx$  obtida. Além disso, não houve uma variação considerável de  $w_{ot}$  e  $\rho_d máx$  para as misturas R35, R40 e R45, pois o máximo e o mínimo valor de  $w_{ot}$  dessas misturas diferiram somente em 0,16%. R35 e R40 obtiveram o mesmo valor de  $\rho_d máx$  e o valor de  $\rho_d máx$  da mistura R45 diferiu somente 0,002 g/cm<sup>3</sup> do valor das outras duas misturas.

Com exceção da mistura R30, os valores obtidos para  $w_{ot}$  ficaram na faixa de 16,2% a 16,8%, sendo o  $\Delta_{w_{ot}} = 0,55\%$  o que mostra que o teor de água ideal para melhor rearranjo das partículas não difere significativamente para as misturas propostas de solo-resíduo.

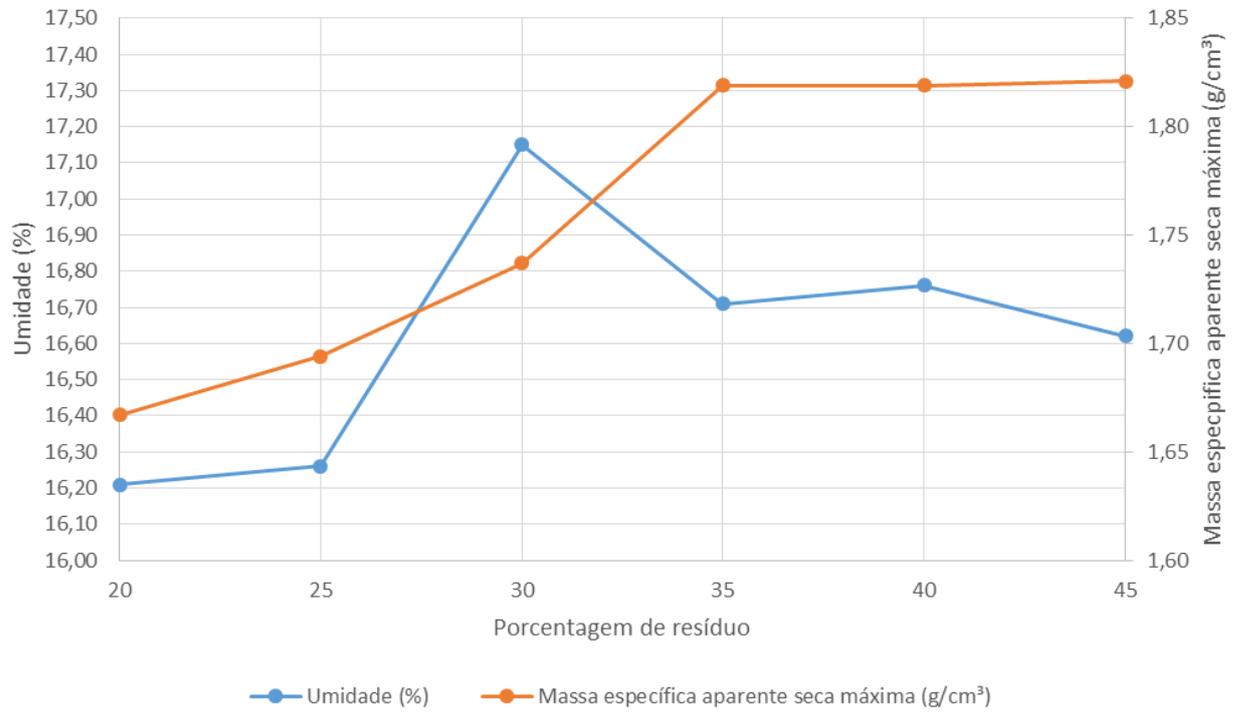
Além disso, os valores de  $w_{ot}$  foram menores em relação ao solo sem resíduo, bem como os valores de massa específica aparente seca máxima foram maiores em relação ao solo sem resíduo. Por fim, observa-se também que ocorreu uma significativa abertura das curvas de compactação das misturas em relação a curva de compactação do solo.

Della Flora (2015) também observou o aumento da  $\rho_d máx$  e a diminuição da  $w_{ot}$  com o aumento da porção granular em solos finos. Além disso, nesse mesmo trabalho foi observado a abertura das curvas de compactação com o aumento da porção granular do solo.

Picanço (2012) comparou as curvas de compactação de um solo argiloso com as curvas de compactação desse solo com adição de 10% e 50% de resíduo cerâmico que o tornou mais granular e também chegou à conclusão que houve um aumento da  $\rho_d máx$  e diminuição da  $w_{ot}$ .

A Figura 4.10 ilustra os dados da Tabela 8 convertidos em gráficos de “porcentagem de resíduo x umidade ótima” e “porcentagem de resíduo x massa específica aparente seca máxima”.

Figura 4.10 – Gráfico de porcentagem de resíduo x umidade ótima.



Fonte: Da autora (2019).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusões

A partir do exposto nesse trabalho é possível chegar as seguintes conclusões:

- Para a fabricação de tijolo solo-cimento, a substituição parcial de cimento por resíduos finos de quartzito industrial não se mostrou viável, uma vez que o resíduo não apresentou atividade pozolânica, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2015).
- Para a fabricação de tijolo solo-cimento a substituição parcial de solo por resíduos finos de quartzito industrial se mostrou viável, sendo que todas as misturas propostas atenderam os requisitos da NBR 10833 (ABNT, 2012) em relação à granulometria e limites de consistência. Além disso, para todas as misturas propostas o teor de cimento a ser utilizado é de 7%, segundo a Associação de Cimento Portland, o que mostra viabilidade econômica da substituição parcial do resíduo pelo solo, uma vez que a maioria tijolos ecológicos utilizam 10% de cimento.
- Com base nos resultados obtidos com as curvas de compactação, sugere-se a dosagem de 45% de resíduo fino de quartzito industrial e 55% de solo para compor a matriz de tijolos solo-cimento, uma vez que foi a mistura com maior  $\rho_d máx$  e também maior porcentagem de resíduo incorporado.

### 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se para próximos trabalhos:

- Obtenção das curvas de compactação com a incorporação de 7% de cimento para verificar qual deve ser o traço ideal (solo+resíduo, cimento e água) para confecção do tijolo.
- Determinação da condutividade hidráulica não saturada com os teores ótimos a serem aplicados na fabricação dos tijolos o que permitirá a determinação do fluxo de umidade no tijolo, bem como a sua absorção de tinta e materiais impregnantes.
- Produção dos tijolos e posterior determinação da resistência a compressão e absorção de água, para verificar o atendimento ou não ao estipulado pela NBR 8491 (ABNT, 2012).

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS - **ABIROCHAS**. Rochas Ornamentais no Século XXI. Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br/br/index.html>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem das misturas de solo-cimento**: normas de dosagem e métodos de ensaio. São Paulo, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem das misturas de solo-cimento**: normas de dosagem e métodos de ensaio. São Paulo, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem das misturas de solo-cimento**: normas de dosagem e métodos de ensaio. São Paulo, 2004. 63 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491**: Tijolo maciço de solo-cimento - requisitos. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 21 p.

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

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 b. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8492**: Tijolo de solo-cimento: Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção da água: método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2012 a. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - requisitos. Rio de Janeiro, 2015. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

ABIKO, A. K. **Estabilização de solo com cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz e de resíduo cerâmico**. 1973. 167 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 1973.

AMARAL, C. S. et al. Crescimento de *Dalbergia miscolobium* em substrato de rejeito da mineração de quartzito fertilizado. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 74, p. 179–187, 2013.

MILANI, A. P. S.; FREIRE, W. J. **Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e casca de arroz**. v. 26, p. 1–10, 2006.

ANDRADE, J. F. C. **Avaliação da incorporação de grits e do seu tratamento térmico na qualidade tecnológica de tijolo solo-cimento**. Lavras, 57 p, 2018.

BACCI, D. L. C.; LANDIM, P. M. B.; ESTON, S. M. Aspectos e impactos ambientais de pedreira em área urbana. **Rem: Revista Escola de Minas, Ouro Preto**, v. 59, n. 1, p. 47-54, 2006.

BABISK, M. P. Incorporação de resíduos de quartzitos em cerâmica vermelha. **Holos** v. 6, p. 169–177, 2012.

BREHM, F. A. *et al.* Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 2, p. 15–27, 2013.

DALLACORT, R. *et al.* Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 511–518, 2002.

DELLA FLORA, C. S. D. **Estudo comparativo entre solos arenosos finos lateríticos do Rio Grande do Sul para emprego em pavimentos econômicos**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2015.

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

DIAS JUNIOR, M.S. e PIERCE, F.J. Revisão de literatura. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p.175-182,1996.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. 2008. 130 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico**. 2006. 394 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2000.

FARIAS, C. E. G. **Mineração e Meio Ambiente no Brasil**. p. 396, 2002.

FIORITI, C.F; AKASAKI, J. R. Fabricação de blocos estruturais de concreto com resíduos de borracha de pneus. **Holos**. v. 4, n.2, p. 145–156, 2004.

- FRANÇA, F. C. **Estabilização de solos para fins rodoviários: estudo de caso com o produto "RBI GRADE 81"**. 2003. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.
- GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica** ativa. 2003. 180 p. Dissertação (Mestre em Arquitetura) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization: principles and practice**. Buuerworths, Sydney - Melbourne - Brisbane.
- IZQUIERDO, I. S.; RAMALHO, M. A. Aplicação de cinzas residuais e de fibra de sisal na produção de argamassas e concretos: revisão. **Ingeniería y Desarrollo.**, v. 31, n. 2, p. 344;368, 2014.
- LIMA, F. X. R. F. **Blocos de terra compactada de solo-cimento com resíduo de argamassa de assentamento e revestimento: caracterização para uso em edificações**. 2013. 128 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- LOZANO, F. A. E. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica**. 2006. 142 p. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- MENDES, R.; ZANOTTI, R. A. R.; MENEZES, J. C. S. S. Produção de Solo-Cimento (Tijolo Ecológico) Utilizando Resíduo do Polimento de Grés de Porcelanato como Fonte de Sílica. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 1, n. 1, p. 50–55, 2014.
- MIRANDA, L.A. , *et al*, Avaliação do potencial do grits como material de construção na produção de tijolos de solo-cimento. **Revista Árvore**, Viçosa, v.35, n. 6, p.1335-1340, 2011.
- PAULA, M. O. DE *et al*. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 353–357, 2009.
- PICANÇO, H. M. **Incorporação de resíduo cerâmico a um solo argiloso superficial de Manaus visando seu emprego em pavimentos**. 2012. 59 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos da Amazônia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2012.
- RUIZ, M. S. et al. Desafios e perspectivas da produção de areia industrial. **Holos**, v. 5, p. 50, 2013.
- SAINT-GOBAIN. **Processo de produção do carbetto de silício (SiC)**. 2019. Disponível em <<https://www.sic.saint-gobain.com/pt/sobre/processo-de-producao-do-carbetto-de-silicio-sic>>. Acesso em: 07/06/2019.
- SAVASTANO, Jr.; WARDEN, P. G. Special theme issue: Natural fibre reinforced cement composites. **Cement & Concrete Composites**, v.25, n.5, p.517-624, 2003.
- 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 - Technology**, v. 33, n. 2, p. 179–183, 2011.
- SILVA, E. da. **Mapeamento de solos e uso de algoritmos de aprendizagem em Lavras (MG)**. 2018. 194 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

SILVA, M.S. **A terra crua como alternativa sustentável para produção de habitação social.** 2001. 129 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia do Ambiente Construído) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 2001.

SIQUEIRA, F. B. e HOLANDA, J. N. F, Effect of incorporation of grits waste on the densification behavior of soil-cement bricks. **Cerâmica.** São Paulo, v. 61, n. 360, p.414-419, 2015.

SOUZA, G. A. P. DE; CASTOR, G. H. **Avaliação da resistência de um solo fino estabilizado com lama de cal.** Viçosa, 2016. 62 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, União de Ensino Superior de Viçosa - UNIVIÇOSA, Viçosa, 2016.

SOUZA, M. I. B.; SEGANTINI, A. A. S.; PEREIRA, J. A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** v. 12, n. 2, p. 205–212, 2008.

VALENCIANO, M. DEL C. M. **Incorporação de resíduos agroindustriais e seus efeitos sobre as características físico-mecânicas de tijolos de solo melhorado com cimento.** 1999. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

VEIGA, L. F. de M. **Caracterização físico-química de adobe estabilizado com amido de mandioca.** 2008. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais, Área de Concentração: Análise e Seleção de Materiais) - Rede Temática em Engenharia de Materais, Universidade Federal de Ouro Preto, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais e Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.