

Universidade Estadual Paulista – UNESP

“Júlio de Mesquita Filho”

Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais – POSMAT



Sheila Souza Barreto

FABRICAÇÃO DE TIJOLOS PENSADOS DE SOLO-RESÍDUOS-CIMENTO E
ÁVALIAÇÃO DE DESEMPENHOS TÉRMICO E ACÚSTICO

PRESIDENTE PRUDENTE

2020

Sheila Souza Barreto

FABRICAÇÃO DE TIJOLOS PRENSADOS DE SOLO-RESÍDUOS-CIMENTO E
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHOS TÉRMICO E ACÚSTICO

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do título de Mestre à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, sob a orientação do Prof. Dr. Aldo Eloizo Job e coorientação Prof. Dr. Fernando Sérgio Okimoto.

Presidente Prudente

2020

B273f

Barreto, Sheila Souza

Fabricação de tijolos prensados de solo-resíduos-cimento e avaliação de desempenhos térmico e acústico / Sheila Souza Barreto. -- Presidente Prudente, 2020 110 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente

Orientador: Aldo Eloizo Job

Coorientador: Fernando Sérgio Okimoto

1. Tijolos. 2. Solo-cimento. 3. Resíduo mármore e granito. 4. Resíduo de construção civil. 5. Desempenho térmico e acústico. I. Título.

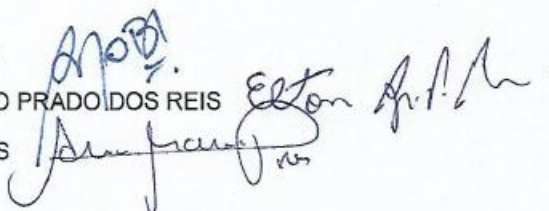
ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE SHEILA SOUZA BARRETO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 13 dias do mês de março do ano de 2020, às 14:00 horas, no(a) FCT/PRESIDENTE PRUDENTE, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. ALDO ELOIZO JOB - Orientador(a) do(a) Departamento de Física / Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP - Presidente Prudente, Prof. Dr. ELTON APARECIDO PRADO DOS REIS do(a) Toledo / Toledo Centro Universitário, Prof.ª Dr.ª ANA MARIA PIRES do(a) Departamento de Química e Bioquímica / Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP - Presidente Prudente, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de SHEILA SOUZA BARRETO, intitulada "FABRICAÇÃO DE TIJOLOS PENSADOS DE SOLO-RESÍDUOS-CIMENTO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHOS TÉRMICO E ACÚSTICO" . Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADA . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. ALDO ELOIZO JOB

Prof. Dr. ELTON APARECIDO PRADO DOS REIS

Prof.ª Dr.ª ANA MARIA PIRES



Dedico a meus pais (in memoriam) pela vida que me destes, por me ensinar o que é certo e por me amar incondicionalmente. A meu companheiro Luciano, por acreditar em mim, até quando eu mesma não acreditei.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado o sopro de vida, a força e a coragem para ir atrás dos meus sonhos.

Agradeço ao meu companheiro Luciano, por estar comigo sempre que precisei e por acreditar em mim.

Aos meus familiares, meus irmãos Dickson, Maisa e Deivid pelo incentivo de não acreditar no que se ouve externamente, mas sim no que ecoa dentro de você.

Aos meus pais Laura e Jobson (In Memoriam) vocês não puderam ver que cheguei aqui, mas sei que estão felizes por mim, amo vocês eternamente.

A minha cunhada Mirella Ottoni, por me ouvir e não me deixar cair, assim como minha amiga Jaqueline Rampazzo pelas incansáveis orações, e digo, recebi a força de cada uma delas.

Aos meus grandes amigos, Máira Braghin, Lucilene Boniolo, Ubervan Athaíde, Hudson Pontes, Luis Fernando, Valdirene, por me ajudarem com o que eu mais precisei, suas palavras. Gratidão pela vida de cada um.

Aos amigos que ganhei nessa linda jornada, Tâmisa, Nathalia, Thariany, Bruno, Luis Fernando, Diego pelas horas de estudos e afincos.

Ao Anderson Mariano, por me ajudar nas tarefas mais difíceis desse trabalho, me doando sua força de trabalho para realizar muito dos ensaios necessário.

Ao meu orientador Prof. Dr. Aldo E. Job, por me receber, apoiar e incentivar e ser e fazer sempre o melhor.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Fernando Okimoto, por acreditar, me apoiar, incentivar, e hoje posso dizer pela amizade, pelas horas de conversa, pelas horas de discussões, por me fazer entender que ainda tenho um longo caminho a percorrer, mas que ele pode ser bem mais leve, se escolher o caminho certo. Obrigada por cada palavra.

A todo o grupo LTBA em especial Giovani, Willy, Gabriel, Guilherme, Andressa, Laura, Gaby, pela ajuda e ensinamentos.

BARRETO, S. S. **Fabricação de tijolos prensados de solo-resíduos-cimento e avaliação de desempenhos térmico e acústico**. Dissertação Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais - UNESP, Faculdade de Ciências, Presidente Prudente, 2020.

RESUMO

No presente estudo realizou-se a fabricação de tijolos prensados de solo-resíduo-cimento com incorporações de resíduo de construção civil (RCC) e resíduo de pedras ornamentais (RPPO) e avaliou-se seus desempenhos térmico e acústico. Foram fabricados tijolos nos traços (Cimento: Solo + RCC + RPPO) 1:8, 1:10 e 1:12 com 10% e 20% de substituição da massa por RPPO. Os tijolos foram submetidos aos ensaios físicos de densidade, porosidade, absorção e mecânico de compressão simples para a contextualização do material estudado com as referências bibliográfica. Além disso, caracterizações dos materiais constituintes do composto, por meio das técnicas DRX, FRX, MEV, TG, análise granulométrica e densidades aparentes foram realizadas visando identificar as estruturas químicas e a microestrutura dos materiais coletados para a fabricação dos tijolos. Para a determinação da condutividade térmica seguiu-se as orientações da ABNT NBR 15220-2:2013, e a atenuação sonora as ISO 10140-2:2010, ISO 10534-2:1998. Os resultados mecânicos de compressão simples dos tijolos nos traços de 1:8 com 10 e 20% de RPPO superaram as resistências mínimas exigidas pela norma da ABNT NBR 8491:2012, com valores médios de 2,57 e 2,49 MPa respectivamente. Os tijolos apresentaram absorção abaixo de 20% e porosidade entre 19% a 29%. O ensaio de condutividade térmica mostrou que os traços 1:8 com 10 e 20% de RPPO, apresentaram valores semelhantes aos tijolos maciços comerciais, correspondente a 0,40 W/m.k. A atenuação sonora apresentou valores de 30 e 28 dB nos traços de 1:8 com 10 e 20% de RPPO para frequências médias de 1000 Hz, estando entre as atenuações encontrada em forros metálicos para isolamento acústico que estão entre 28 a 40 dB. Diante do exposto a incorporação de RCC e de RPPO pode ser uma estratégia interessante na produção de tijolos de solo-resíduos-cimento melhorando as características mecânicas do material e diminuindo o seu custo de produção.

Palavras-chave: Tijolos, solo-cimento, resíduo mármore e granito, resíduo de construção civil, desempenho térmico e acústico.

ABSTRACT

In the present study, the manufacture of pressed bricks of soil-residue-cement was carried out with incorporations of civil construction waste (RCC) and ornamental stone residue (RPPO) and their thermal and acoustic performances were evaluated. Bricks were made in the lines (Cement: Soil + RCC + RPPO) 1: 8, 1:10 and 1:12 with 10% and 20% replacement of the mass by RPPO. The bricks were subjected to physical tests of density, porosity, absorption and simple compression mechanics to contextualize the studied material with bibliographic references. In addition, characterizations of the constituent materials of the compound, using the DRX, FRX, MEV, TG techniques, granulometric analysis and apparent densities were carried out in order to identify the chemical structures and the microstructure of the materials collected for the manufacture of the bricks. For the determination of thermal conductivity, the guidelines of ABNT NBR 15220-2: 2013 were followed, and the sound attenuation was ISO 10140-2: 2010, ISO 10534-2: 1998. The mechanical results of simple compression of the bricks in the 1: 8 lines with 10 and 20% RPPO exceeded the minimum strengths required by the ABNT NBR 8491: 2012 standard, with average values of 2.57 and 2.49 MPa respectively. The bricks showed absorption below 20% and porosity between 19% to 29%. The thermal conductivity test showed that the 1: 8 traces with 10 and 20% RPPO, presented values similar to commercial solid bricks, corresponding to 0.40 W / m.k. The sound attenuation showed values of 30 and 28 dB in the 1: 8 traces with 10 and 20% RPPO for average frequencies of 1000 Hz, being among the attenuations found in metallic ceilings for sound insulation that are between 28 to 40 dB. Given the above, the incorporation of RCC and RPPO can be an interesting strategy in the production of soil-waste-cement bricks, improving the mechanical characteristics of the material and decreasing the production cost.

Keywords: Ecological bricks, soil-cement, waste marble, civil construction waste, thermal and acoustic performance

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Construção executada com tijolos de solo-cimento aparente.....	9
Figura 2 – Modelos dos tijolos fabricados por empresas regionais	16
Figura 3 – Consumo energético por classe	19
Figura 4 – (a) Depósito de RCC, (b) recicladora de RCC, (c) granulometrias disponíveis.....	26
Figura 5 – (a) Resíduo de RPPO logo após coleta; (b) RPPO em processo de secagem e totalmente seco e peneirado.	27
Figura 6 – Modelo Esquemático da produção dos tijolos de solo-cimento	28
Figura 7 – Modelo Esquemático da produção dos tijolos de solo-resíduo-cimento 1:8	28
Figura 8 – Modelo Esquemático da produção dos tijolos de solo-resíduo-cimento 1:10.....	29
Figura 9 – Modelo Esquemático da produção dos tijolos de solo-resíduo-cimento 1:12.....	29
Figura 10 – Homogeneização da mistura dos traços	31
Figura 11 – Conjunto betoneira e peneira.	32
Figura 12 – (a) Prensa hidráulica; (b) e (c) tijolos fabricados	33
Figura 13 – Processo de cura e acondicionamento dos TSRC	34
Figura 14 – Picnômetro	35
Figura 15 – Secagem dos tijolos	36
Figura 16 – Tijolo submetidos a ensaios de absorção, densidade e porosidade.....	37
Figura 17 – Diagrama de classes texturais do <i>United States Department of Agriculture</i>	38
Figura 18 – Ensaio de análise dimensional	40
Figura 19 – Preparação dos corpos de provas para ensaio de resistência à compressão.	41
Figura 20 – a) Conjunto da máquina de compressão e o rompimento do tijolo; (b) carga em quilograma força (kgf) e (c) tijolo rompido.	42
Figura 21 – Aparato térmico	44
Figura 22 – Instrumentação dos corpos de prova para ensaio de térmico.	45
Figura 23 – Zona bioclimática 6.....	46
Figura 24 – Aparato acústico.....	48
Figura 25 – Aparato acústico para ensaio de atenuação sonora.....	49

Figura 26 – Difração de raios X realizada para solo 1 e 2	52
Figura 27 – Difração de raios X realizada para RCC.....	53
Figura 28 – Difração de raios X realizada para RPPO	54
Figura 29 – Curvas Granulométricas, Solo, RCC e RPPO	57
Figura 30 – (a) Destorroamento da amostra; (b) agitação; (c) fração de areia; (d) fração de silte e (e) fração de argila.....	59
Figura 31 – TG/DTG do TSRC T1 1:8 10% RPPO	60
Figura 32 – RPPO com ampliação de (a) 1000X e (b) 4000X	61
Figura 33 – EDS RPPO 1000X.....	62
Figura 34 – RCC com ampliação de (a) 1000X e (b) 4000X	63
Figura 35 – EDS RPPO 1000X.....	63
Figura 36 – TSRC – T1 – 1:8 – 10% RPPO com ampliação de (a) 100X, (b) 250X, (c) 1000X e (d) 4000X.....	64
Figura 37 – EDS do TSRC – T1 – 1:8 – 10% RPPO 1000x	65
Figura 38 – Análise dimensional de comprimento	65
Figura 39 – Análise dimensional de largura.....	66
Figura 40 – Análise dimensional de Altura	67
Figura 41 – Densidade aparente x porosidade	70
Figura 42 – Resistência à compressão x porosidade	73
Figura 43 – Resistência à compressão, densidade e porosidade traço controle.	75
Figura 44 – Resistência à compressão, densidade e porosidade.	76
Figura 45 – Gráfico de análise térmica dos TSRCs T1 e T2.	77
Figura 46 – Gráfico de análise térmica dos TSRCs T3 e T4.	79
Figura 47 – Gráfico de análise térmica dos TSRCs T5 e T6.	80
Figura 48 – Gráfico de análise térmica do Tc2 controle.	80
Figura 49 – Gráfico de análise térmica dos Tijolo maciço e bloco cerâmico comerciais.....	82
Figura 50 – Condutividade Térmica, densidade e porosidade.....	84
Figura 55 – Atenuação sonora e porosidade dos TSRCs e traço controle Tc2	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação granulométrica do solo.....	3
Tabela 2 – Tipos de cimentos produzidos no Brasil.....	6
Tabela 3 – Compostos anidros do cimento Portland	6
Tabela 4 – Faixas dos componentes do cimento Portland.....	7
Tabela 5 – Ficha técnica de placas isolantes comerciais.....	23
Tabela 6 – Composição dos corpos de prova em teor volumétrico	30
Tabela 7 – Composição dos corpos de prova em teor volumétrico solo-cimento	30
Tabela 8 – Conjunto de peneiras	38
Tabela 9 – Critério de avaliação de desempenho térmico para condição de Verão	47
Tabela 10 – Composição (massa%) das amostras de Solo 1, Solo 2, RCC e RPPO	50
Tabela 11 – Massa específica – RCC e RPPO.....	55
Tabela 12 – Granulometria solo natural.....	56
Tabela 13 – Granulometria do RCC.....	56
Tabela 14 – Granulometria do RPPO	57
Tabela 15 – Análise textural dos solos 1 e 2.....	59
Tabela 16 – Resultado de Absorção de água, porosidade, massa específica aparente seca	69
Tabela 17 – Resultado de Compressão Simples – Média e desvio padrão	71
Tabela 18 – Condutividade térmica do TSRCs	82
Tabela 19 – Condutividade térmica traços controle e comerciais	82
Tabela 20 – Nível de desempenho dos TSRCs em °C	85
Tabela 21 – Nível de desempenho dos tijolos de controle em °C	85
Tabela 22 – Dados de atenuação sonora	86
Tabela 23 – Ficha técnica de placas isolantes comerciais.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABIROCHAS – Associação Brasileira de Industrias de Rochas

ABRELPE – Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

BTC – Bloco de Terra Comprimida

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

EDS – Espectroscopia de energia dispersiva

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EUA – Estados Unidos das Américas

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia

LaMaC – Laboratório de Materiais Cerâmicos

LaMMEV – Laboratório multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura

MDF – Medium Density Fiber

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

Mt – Milhões de toneladas

NBR – Norma Brasileira

ONU – Organização das Nações Unidas

OMS – Organização Mundial de Saúde

RCC – Resíduo de Construção Civil

RCD – Resíduo de Construção e Demolição

RPPO – Resíduo de Processamento de Pedras Ornamentais

SVVIE – Sistemas de Vedações Verticais Internas e Externa

TSRC – Tijolo de Solo-Resíduos-Cimento

UNESP – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

U.S.D.A. – United States Department of Agriculture

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
1.1. SOLO NATURAL.....	3
1.2. LATOSSOLO.....	4
1.3. CIMENTOS PORTLAND.....	4
1.4. SOLO-CIMENTO.....	7
1.5. RESÍDUO DE PROCESSAMENTO DE PEDRAS ORNAMENTAIS	9
1.6. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL	12
1.7. TIJOLOS	15
1.8. DESEMPENHO DE VEDAÇÕES VERTICAIS	18
1.9. DESEMPENHO TÉRMICO E ACÚSTICO.....	19
1.1.1. ISOLAMENTO TÉRMICO.....	19
1.1.2. ISOLAMENTO ACÚSTICO.....	21
2. OBJETIVOS.....	24
2.1. OBJETIVOS GERAIS.....	24
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1. MATERIAIS	24
3.1.1. Solo	24
3.1.2. Cimento	25
3.1.3. Água	25
3.1.4. Resíduo de Construção Civil	25
3.1.5. Resíduo de Processamento de Pedras Ornamentais.....	26
3.1.6. Confeção dos Tijolos	27
3.1.7. Preparação das Misturas.....	30
3.1.8. Moldagem.....	31

3.1.9. Cura.....	33
3.2. ENSAIOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	34
3.2.1. Caracterização das matérias-primas e tijolos fabricados.....	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
4.1. FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X	50
4.2. DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	51
4.3. MASSA ESPECÍFICA REAL DO GRÃO	55
4.4. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	56
4.5. ANÁLISE TEXTURAL	58
4.6. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG).....	60
4.7. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA.....	61
4.8. ANÁLISE DIMENSIONAL	65
4.9. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO, MASSA ESPECÍFICA APARENTE E ÍNDICE DE VAZIOS (POROSIDADE)	67
4.10. ENSAIO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	70
4.11. ENSAIO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA	76
4.12. ATENUAÇÃO SONORA	86
CONCLUSÃO.....	91
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
REFERÊNCIA	93

INTRODUÇÃO

Um dos desafios mais importantes das futuras construções é a diminuição do consumo de energia em todas as suas fases de vida, desde a construção até sua demolição. Muitos países buscam mais eficiência energética e acústica de seus edifícios, em virtude das grandes preocupações econômicas e ambientais [1].

Segundo o Ministério de Minas e Energia [2], o consumo de energia é um dos primeiros setores que mais sofre com o aumento na demanda de crescimento, levando a necessidade de buscar economia no seu consumo. Sendo assim, a construção de edifícios com eficiência energética é fortemente demandada. Esse objetivo pode ser alcançado melhorando as propriedades de isolamento térmico das construções, em especial a vedações verticais (paredes) [3].

De acordo com a Organização Mundial da Saúde [4], os efeitos da poluição sonora na saúde humana vêm aumentando. Importantes estudos epidemiológicos descobriram que as doenças cardiovasculares, estão sendo cada vez mais associadas à exposição ao ruído, relacionando seu desenvolvimento à exposição ao ruído ambiental [5].

Atualmente, espera-se que os materiais de construção desenvolvam diferentes funções e sejam sustentáveis. Como por exemplo, os materiais devem atender solicitações estruturais, térmicas e acústicas. As demandas térmicas incluem a redução da taxa da transmissão do fluxo de calor, enquanto que as acústicas incluem absorção e isolamento acústico, gerando assim ambientes mais agradáveis em relação ao conforto térmico e acústico [6].

A construção civil desempenha papel importante do ponto de vista socioeconômico, sendo uma geradora de emprego e de distribuição de renda, porém, contribui de forma agressiva com o consumo de matéria prima não renovável e com a geração de resíduos sólidos. Em boa parte de seus processos construtivos pode-se relacionar sérios impactos ambientais. Como exemplo disto a exploração exacerbada de matérias prima para consumo, como areia, brita, madeira, argila, cimento, assim como os resíduos gerados em seus processos, tanto de forma direta ou indireta [7].

De acordo com estudos recentes, a quantidade de entulho da construção civil em massa, é superior ao lixo doméstico [8]. Pesquisas apontam que algumas

idades brasileiras geram resíduos de construção que variam de 41% a 70% da massa total de resíduos sólidos urbanos [9].

Conforme a Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2018, foram gerados em média 216.629 toneladas de (RCC) por dia, volume que “não recebe solução adequada, impactando o ambiente urbano e criando local propício à proliferação de vetores na transmissão de doenças, o que pode intensificar os problemas de saneamento nas áreas urbanas” [10].

O resíduo proveniente do processamento de pedras ornamentais também tem causado problemas ambientais nos últimos anos. Apesar da atual crise, o serviço ornamental passa por um crescimento nas atividades industriais do Brasil, destacando-se especialmente a produção de mármore e granito. Nas etapas do processo de produção das rochas, como corte, polimento, encobrimento de placas, é gerado um sedimento com alto grau de finura, comumente conhecido como pó de mármore ou lama de mármore, apesar da diversidade de rochas. É estimado que sejam produzidos aproximadamente 5 a 6 milhões de toneladas de lama de mármore por ano no Brasil. Grande parte desses resíduos não possui descarte apropriado, sendo despejados em lagos de decantação e aterros sanitários [11,12]. Portanto, novas soluções que visam sua utilização devem ser consideradas [13].

Com a demanda da construção civil há um aumento por materiais com funcionalidade e eficiência, que atenda padrões específicos e ainda ajude a diminuir os impactos que seus processos geram ao planeta. Há uma necessidade pelo uso de técnicas de planejamento e gestão que evitem retrabalhos e desperdícios, bem como o reaproveitamento de resíduos e reciclagem de produtos [14].

A expectativa da reciclagem dos resíduos de construção civil e de mármore está relacionada, principalmente, à indústria da construção civil, promovendo efeitos reais na diminuição da degradação do meio ambiente e no desenvolvimento de materiais eficientes. Este presente trabalho apresenta uma alternativa para a utilização desses resíduos com a fabricação de tijolos de solo-resíduo-cimento, baseando-se em resultados obtidos por meio da caracterização e ensaios tecnológicos, dando uma aplicação direta para os resíduos.

Ora em diante, serão utilizadas as siglas RCC, para os resíduos de construção civil e demolição, e RPPO, para os resíduos do processamento de

pedras ornamentais e quando se tratar dos tijolos de solo-resíduo-cimento, será utilizada a sigla TSRC.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. SOLO NATURAL

O solo é definido como um material natural composto por fases sólidas, com minerais e matéria orgânica, e seus grãos são envolvidos por meios líquidos e/ou gasosos, resultante de milhares de anos expostos à ação do tempo e suas intempéries na superfície das rochas originais [15].

Segundo Barros e colaboradores [15], a argila é considerada um material natural, terroso, de granulação fina e que apresenta marcante plasticidade quando umedecida com água. Quimicamente, a argila é a junção de silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. Os solos argilosos têm como propriedade principal a plasticidade, tornando-os resistentes às deformações permanentes, sem apresentar ruptura, fissuramentos ou variação volumétrica, sob condições determinadas de umidade [16].

A utilização das argilas na fabricação de objetos é conhecida desde os tempos antigos. O “barro cozido” era utilizado na fabricação de tijolos, vasos, panelas, utensílios para cozinha, e ainda na moldagem de estatuetas e peças ornamentais. Tem inúmeras aplicações na construção civil, principalmente como matéria prima em telhas, pisos, placas para revestimento, argamassas e tijolos [17]. Os solos podem ser classificados de acordo com o seu uso na engenharia, como descrito na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação granulométrica do solo

Nomenclatura/classificação	Diâmetro dos grãos (mm)
Bloco de rocha	$\varnothing > 1000$
Matacão	$200 < \varnothing < 1000$
Seixo	$60 < \varnothing < 200$
Grânulo	$2 < \varnothing < 60$
Areia grossa	$0,6 < \varnothing < 2$
Areia média	$0,2 < \varnothing < 0,6$
Areia Fina	$0,06 < \varnothing < 0,2$
Silte	$0,002 < \varnothing < 0,06$
Argila	$\varnothing < 0,002$

Fonte: ABNT NBR 6502/1995.

1.2. LATOSSOLO

O solo classificado como latossolo é um solo cuja gênese foi influenciada pelo processo de laterização, processo esse, de transformação lenta de rochas em solos, passando-se por processo de lixiviação e intemperismos químicos, entre climas quentes e úmidos, caracterizado pela presença de óxidos e hidróxidos, principalmente de alumínio e ferro [15].

O latossolo é um solo comumente encontrado na região de Presidente Prudente/SP, caracterizado a partir de solos de intemperização, constituídos pela presença de horizonte diagnóstico latossólico. Apresentando particularidades gerais como, por exemplo, argilas com predominância de óxidos de ferro, alumínio, silício e titânio, influenciando no processo de retenção de água dos solos [18].

Trata-se de um solo comum no território Brasileiro, frequentes em regiões equatoriais e tropicais, podendo ser encontrado também em regiões subtropicais. Tendo origem em superfícies antigas expostas a erosão como chapadas, planaltos, terraços fluviais, e associados, a relevos planos e suave ondulados [19].

Para o uso em obras o latossolo também é indicado para aterros e, também, na execução de bases de solo-cimento em pavimentos, pois é um solo que tem uma resistência bem elevada devido a sua composição com altos teores de silício [20].

1.3. CIMENTOS PORTLAND

O cimento Portland é resultado de uma atividade integrada de exploração e beneficiamento de substâncias minerais, calcário e argila. Após um processo de sinterização, estes são transformados em clínquer, elemento base do cimento, que, após moagem, terá aspecto fino e pulverulento [26].

Pode ser definido como material fino com propriedade aglomerantes, que endurece sob ação da água. Após seu contato com água inicia-se o processo de endurecimento o que, após iniciado, não retorna às suas características primitivas. Um produto que adicionando água, brita (materiais oriundos de rochas), areia, cal, etc. resulta na produção de concretos e argamassas [24].

Considerado um produto básico do setor da construção, em 2018 sua produção foi de aproximadamente 54 milhões de toneladas. De acordo com Ashish [21], a produção mundial de cimento é de 366 milhões de toneladas por ano. Mesmo sendo um produto considerado imprescindível na produção de materiais essenciais da construção civil, o cimento tem destaque como grande contribuinte para a carga

ambiental do ciclo de vida de todos os tipos de concreto. Sua produção é responsável por cerca de 5% a 7% da emissão global de dióxido de carbono (CO_2), seja com a transformação química da matéria-prima em cimento ou com a queima de combustíveis utilizados para possibilitar essa transformação [22].

Existem compostos que ao serem adicionados na produção do cimento conferem melhorias nas suas propriedades.

A Pozolana, que é caracterizado por ser um material silicoso ou silico-aluminoso, pode ser encontrado de forma natural ou sintética. Ela reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), dando origem a fase do hidrato de silicato de cálcio $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (C-S-H), responsável pela resistência mecânica e durabilidade da matriz de cimentícias [14]. Além disso, proporciona uma diminuição dos poros, levando a redução na permeabilidade e porosidade, bem como no aumento da resistência à compressão. Também auxilia na redução do calor de hidratação, segregação de agregados, permeabilidade e propicia maior trabalhabilidade e estabilidade de volume. Essas propriedades podem influenciar de maneira positiva na fabricação dos tijolos em estudo [23].

A escória de alto-forno, um subproduto da produção de ferro e aço de altos-fornos, é um produto vítreo de forma granulada que é seco e moído. São adicionados diferentes teores junto à moagem do clínquer, o que resulta em cimentos com características diversas, como a maior resistência final e maior durabilidade, menor risco de fissuração, trabalhabilidade e plasticidade, menores porosidade e permeabilidade [23].

O fíler calcário, corresponde ao calcário moído adicionado com o intuito de promover a diminuição do índice de vazios, melhorando assim a trabalhabilidade e diminuindo a porosidade e permeabilidade [24].

Segundo a Associação Brasileira de Normas técnicas ABNT NBR 16697:2018, os cimentos possuem características e propriedades diferentes que os tornam mais adequados para determinados usos. Dentre os principais tipos de cimento Portland, destacam-se o cimento Portland comum (CP I), cimento Portland composto (CP II), cimento Portland de alto-forno (CP III), cimento Portland pozolânico (CP IV), e cimento Portland de alta resistência inicial (CP V) [24].

Segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC (2013) o Brasil alcançou a 5ª posição no ranking mundial de produção de cimento, com aproximadamente 70,2 milhões de toneladas ao ano, ficando na 4ª posição com 71,0

milhões de toneladas no ranking de consumo. No Brasil, são produzidos os cinco tipos de cimento Portland supracitados, além do cimento branco, que são normatizados pela ABCP e estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Tipos de cimentos produzidos no Brasil

Tipo de Cimento – Sigla	Classe de resistência (MPa)	Clinquer + gesso (%)	Escória de Alto-forno (%)	Pozolana (%)	Filler (%)
Cimento Portland comum – CP I	25,32,40	100	0	0	0
Cimento Portland comum – CP I-S	25,32,40	95 – 99	0	01 – 05	0
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno – CP II-E	25,32,40	56 – 94	06 – 34	0	0 – 10
Cimento Portland composto com material pozolânico – CP II-Z	25,32,40	76 – 94	0	06 – 14	01 – 05
Cimento Portland composto com material carbonático – CP II-F	25,32,40	90 – 94	0	0	6 – 10
Cimento Portland de alto forno – CP III	25,32,40	25 – 65	35 – 70	0	0 – 5
Cimento Portland pozolânico – CP IV	25,32	45 – 85	0	15 – 40	0 – 5
Cimento Portland de alta resistência inicial – CP V - ARI		95 – 100	0	0	0 – 5
Cimento Portland de alta resistência – CP V – ARI RS		*	*	*	0 – 5

Fonte: ABNT NBR 16697:2018

* não fixa limites para o CP V-ARI RS no que se refere às adições de escória ou material pozolânico – Fonte: Cimento Itambé (2019).

Os constituintes principais do cimento Portland contêm, uma série de compostos anidros, os principais encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Compostos anidros do cimento Portland

Composto	Constituintes	Símbolo
Silicato tricálcico	3CaOSiO_2	C_3S
Silicato dicálcico	2CaOSiO_2	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: França [11].

De acordo com França e colaboradores [11], cada composto apresenta características diferentes no processo de hidratação do cimento Portland, sendo esses aspectos importantes para sua aplicação, uma vez que englobam diversos fatores e propriedades ligadas as fases constituintes.

O silicato tricálcico é responsável pelo ganho de resistência nas idades iniciais, em especial aos 28 dias, liberando em média 40% em massa de hidróxido de cálcio (CH), também conhecida como Portlandita. O silicato dicálcico é responsável pelo ganho de resistência ao longo do tempo, produzindo cerca de 18% em massa de Portlandita. O aluminato tricálcico, com reação imediata, eleva o calor de hidratação, sendo necessário a adição de gesso para controlar a hidratação. O ferroaluminato tetracálcico apresenta um desenvolvimento de resistência lento e baixo, e não influencia na pasta endurecida.

A Tabela apresenta a composição em faixas aproximadas dos componentes do cimento Portland.

Tabela 4 – Faixas dos componentes do cimento Portland

Componente	Proporção (%)
C ₃ S	35% a 65%
C ₂ S	10% a 40%
C ₃ A	0% a 15%
C ₄ AF	5% a 15%

Fonte: França [11].

1.4. SOLO-CIMENTO

O solo-cimento é um material produzido pela mistura entre solo, cimento e água, em quantidades e proporções pré-estabelecidas, seguidas de homogeneização, compactação em sua umidade ótima e cura úmida. Definido como material de boa resistência à compressão, durabilidade, impermeabilidade e com baixa retração volumétrica [25,26].

A ABNT NBR 12254:2013 ratifica a definição de solo-cimento, afirmando ser um produto de característica firme e rígida, pré-estabelecidos por meio de traço [27]. Em suas generalidades, vale lembrar que a parcela inserida de cimentos no conjunto é pequena, sendo de um percentual entre 5 a 10% de cimento em relação a massa,

em que já é suficiente, tanto para caracterizá-lo como solo-cimento quanto para que o mesmo desenvolva as propriedades desejadas [28].

Para a mistura, os solos ideais são aqueles que em sua curva granulométrica seja definida pela boa distribuição dos grãos, sendo isentos de matéria orgânica, e dispensando sempre que possível, os argilo-minerais do tipo montmorilonitas. Estes argilo-minerais são um tipo de esmectitas que, de acordo com seus planos cristalográficos, permite que cátions, água e outras substâncias penetrem facilmente tornando a massa muito expansiva e absorvente, exigindo então muita água de amassamento, o que pode prejudicar a qualidade final da pasta de cimento [29].

Além disso, é indicado o uso de solos com teor de areia entre 45% e 70% em sua composição granulométrica [29].

A mistura solo-cimento apresenta consistência como a de uma “farofa-úmida” em que não há a necessidade de muita água, pois o sistema de prensagem acaba por garantir a hidratação das partículas de argilo-cimento da mistura [30].

O composto solo-cimento tem ampla aplicação, podendo ser indicado para: bases ou sub-base de pavimentos em vias urbanas, pátios industriais ou estacionamentos 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 [31].

Os tijolos de solo-cimento são produtos com potencial de mercado e vem sendo utilizados em obras, principalmente obras com fundamentação ecológica. Sua matéria-prima é de fácil acesso e dispensa a queima. Em sua estrutura interna há furos (septos) que permitem a passagem de tubulações elétricas e hidráulicas dispensando os rasgos feitos em métodos construtivos atuais. Seu processo construtivo, ajuda na redução ao desperdício de material, reduzindo o consumo de argamassa de assentamento e regularização. Por ser um produto com acabamento fino, em muitas edificações são usados como tijolos aparentes [32], como mostra a Figura 1.



Figura 1 – Construção executada com tijolos de solo-cimento aparente

Fonte: Próprio do autor

1.5. RESÍDUO DE PROCESSAMENTO DE PEDRAS ORNAMENTAIS

Nos últimos anos, o Brasil experimentou um importante crescimento nas atividades da cadeia produtiva do setor de pedras ornamentais e revestimentos. Os mais significativos foram decorrentes do aumento das exportações, ao exportar blocos de granito para a Itália. O setor da indústria brasileira cresceu de maneira sem precedentes tornando-se o 5º maior produtor mundial de pedras ornamentais em volume físico, e ocupando hoje o 2º lugar em exportação de blocos de granito, de acordo com o Ministério de Minas e Energia em 2019 [33,34].

Segundo dados da ABIROCHAS [33], a produção mundial estimada de rochas ornamentais alcançou a marca mundial de 123,5 milhões de toneladas e de 9 milhões no Brasil, no ano de 2018, sofrendo um declínio de 2,6% do ano anterior. O Brasil está em quarto lugar no ranking mundial, com a marca de 8,5 % da produção, com destaque para o mármore, o granito, o diorito e o gnaisse. Os estados do Espírito Santo, Bahia, Ceará e Paraíba são classificados como os maiores produtores nacionais, sendo o Espírito Santo o principal polo de rochas ornamentais do país, com sede estabelecida na região de Cachoeiro do Itapemirim/ES [38].

De acordo com a Comissão Europeia, em 2010 a extração de minerais da construção foi o maior subsetor na indústria de extração não energética e, devido ao

aumento na demanda por pedras ornamentais na construção civil, há a tendência de aumento da produção nesse setor [8].

No Brasil, granitos e mármore são significativos em termos de produção, com 60% e 20%, respectivamente. O mármore é um calcário metamórfico cristalino, essencialmente constituído por calcita (CaCO_3) e o granito é uma rocha ígnea, constituída principalmente por feldspatos, quartzo e micas, ou seja, rico em sílica e/ou silicatos [13].

De modo geral, os resíduos de mármore e granito apresentam comportamento não plástico devido a sua composição, assemelhando-se aos materiais cerâmicos tradicionais. Seus elementos químicos predominantes, apresentam-se na forma de óxidos, sendo sílica (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3), seguidos pelo óxido de cálcio (CaO) e os óxidos alcalinos (Na_2O , K_2O) e que segundo Silva e colaboradores [35], os teores de óxidos de ferro também podem ser marcantes, já sua função durante o processamento nem tanto.

Moreira e colaboradores [36], caracterizaram o resíduo proveniente do beneficiamento do mármore e indicaram que os principais constituintes desse resíduo são a sílica (SiO_2), microclima (feldspato potássico - KAlSi_3O_8), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), mica e calcita (CaCO_3). Demonstrando indícios da presença de dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e hematita (Fe_2O_3) no resíduo.

A produção do mármore envolve diferentes etapas, além de abranger outros segmentos do conhecimento, como geológico e tecnológico. O manejo das rochas para a aplicação na construção civil consiste em seu desdobramento, que inclui a separação da rocha e serragem para obtenção de blocos e chapas brutas. Durante seu beneficiamento para realizar o corte é utilizado água, dando origem aos resíduos de pedras ornamentais, conhecido também como lama de mármore e corresponde a 30% da pedra bruta. Podendo também ser encontrado dentro dessa lama granelhas metálicas e cal, oriundos dos materiais usados no processo de corte e polimento. O resíduo em estado sólido é não biodegradável, classificado como classe III – inerte, de acordo com ABNT NBR 15113:2004 [12,33,37].

De acordo com Torres e colaboradores [38], o descarte inadequado de lamas inertes pode levar a sérios problemas ambientais e de saúde, como assoreamentos, diminuindo assim níveis de lenções freáticos. Quando secas partículas finas podem ser depositadas nos pulmões dos mamíferos por meio da respiração [39].

Estudos apresentam a viabilidade do uso do pó de mármore na produção de blocos cerâmicos e de concreto. A substituição de areia por pó de mármore pode melhorar as propriedades mecânicas com o uso de 15 a 20 %. Na matéria-prima de cerâmica vermelha acima de 950°C, a quantidade de resíduos pode ser acrescida sem gerar perda de qualidade [40,41].

Corinaldesi e colaboradores [42] observaram que, devido ao aspecto fino elevado, o pó de mármore provou ser capaz de promover coesão em argamassas e nos concretos, mesmo com adição de superplastificante, desde que a relação água/cimento fosse suficientemente baixa. Quanto ao desempenho mecânico, a substituição de 10% de areia pelo pó de mármore e com adição de superplastificante proporcionou uma resistência à compressão máxima ao mesmo nível de trabalhabilidade, em comparação com a mistura de referência. Além disso, observou-se efeitos positivos do pó de mármore em idades precoces, devido à sua capacidade de preenchimento dos vazios.

Singh e colaboradores [12], perceberam resultados favoráveis à resistência à compressão e à tração com adições nas faixas de 10 a 15% no concreto. Outras propriedades foram observadas, tais como leve aumento em relação ao tempo de solidez do concreto, diminuição de ar incorporado, permeabilidade ao ar e à água e a resistividade da superfície do concreto também melhora para uma substituição de 15 % do cimento. Ademais, é favorável a fatores econômico devido à redução no uso do cimento.

Vardhan e colaboradores [43], constataram que até 10% do pó de mármore em substituição ao cimento ajuda a melhorar a trabalhabilidade da mistura argamassa e cimento, e mantém os resultados a resistência à compressão da mistura, não afetando as características de expansão e fixação do cimento.

Estudo sobre a viabilidade do uso de resíduo de mármore e resina de poliéster na fabricação de tijolos ecológicos demonstraram resultados de até 600 % maiores dos valores de referência da ABNT NBR 8491:2012. Os compósitos calcário/poliéster foram compostos nas proporções de 70/30, 80/20, 85/15 e 90/10 (porcentagem em peso). As taxas de absorção de água encontradas foram abaixo de 16,3% para todos os corpos de prova da amostra calcário/resina (90/10), além de apresentar baixa propagação de chamas nos teste de inflamabilidade, possivelmente devido à presença de calcário [44].

Llajaruna e colaboradores [45], realizaram estudos com a substituição parcial dos dois resíduos, pó de mármore e RCC, na fabricação de tijolos de solo-cimento auto adensável. Como resultados a resistência à compressão teve maior contribuição por parte do pó de mármore em até 20 %, apresentando característica de filler. Acima desse valor houve diminuição nas propriedades mecânicas, o RCC não apresentou aumento significativo quanto às propriedades mecânicas, mas atuou como material granular na mistura de solo-cimento-resíduo e sua contribuição foi de até 10 %. Diante do exposto, o uso associado dos dois resíduos, pó de mármore e RCC, tiveram influência positiva na fabricação de tijolos.

1.6. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Os resíduos na construção civil são sem dúvida um problema ambiental, que impacta a natureza e a vida, em suas atividades usuais. A construção civil gera um montante de aproximadamente de 2 a 3 bilhões de toneladas de entulho por ano em todo mundo [46]. Só no Brasil, em 2018, foi gerado aproximadamente 79 milhões de toneladas de resíduo sólidos urbanos segundo a ABRELPE (2019).

Conforme o CONAMA N.307/2002, alterada pela Resolução N.348/2004, a definição de resíduos oriundos da construção civil é encontrada em seu artigo 2º, inciso I. “Para efeito desta Resolução, são adotadas as seguintes definições: I. Resíduos da construção civil são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (BRASIL, 2002)”.

Existem diferenças entre os resíduos sólidos, onde são classificados em quatro classes: Classe “A” resíduos recicláveis ou reutilizáveis, oriundos de obras de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentações, em que também se inclui os solos provenientes de terraplanagem. Construção, demolição e reforma de edificações. Componentes cerâmicos, tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, etc.). Argamassa, concretos de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto, blocos, tubos, meio-fios etc.

A classe “B” são constituídos por resíduos recicláveis que tem outro tipo de destinação, como plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras, gesso. A Classe “C” é composta por resíduos que ainda não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis, para permitir sua reciclagem ou recuperação. Por fim, a classe “D” classificam os resíduos perigosos provenientes de processos construtivos como tintas, solventes, óleos e ainda aqueles materiais prejudiciais à saúde. Na resolução CONAMA Nº 348 de 2004 enquadra-se o amianto, material destinado a fabricação de telhas e demais objetos [47].

Os resíduos de construção e demolição, tanto no Brasil quanto no exterior, podem chegar a representar 67% dos resíduos de uma cidade. No Brasil, o percentual de massa de RCC varia entre 41 % a 70 % dos RSU. Vale salientar que pode não existir locais próprios para o descarte dos resíduos sólidos, fazendo com que sejam depositados de maneira clandestina e/ou irregular. Nas cidades paulistas, em números, são geradas 103.248 toneladas ao ano e aproximadamente 20% não é depositado corretamente, sendo disposto na malha urbana [48, 49, 10].

No que se refere aos municípios, em Presidente Prudente, cidade localizada no oeste Paulista, de acordo com o Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (2012), estima-se uma geração de 212,6 toneladas de RCC por dia, representa 45,65 % dos resíduos de construção urbanos da cidade. Nesse cálculo só está incluso a coleta em logradouros públicos, o que deixa claro que o volume é bem maior [50].

Há esforços para que esses problemas sejam solucionados. Estão sendo criadas leis com o intuito de mitigar as consequências sociais, econômicas e ambientais resultantes da falta de estruturação de um sistema de manejo dos resíduos, que abrange desde a produção até o descarte. Em 2010, foi sancionada a Lei Federal nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a qual fornece diretrizes e ações para uma gestão integrada e um gerenciamento de resíduos sólidos [51].

Há diretrizes e estratégias abordadas na lei n 12.305/2010 para os resíduos provenientes da construção civil que indica a necessidade da eliminação de áreas irregulares, destinando financiamentos, monitoramentos, indicadores e padronização a nível nacional. Define, também, estratégias para a criação de áreas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final dos RCC. Estipula-se a realização de inventários com dados estatísticos a nível nacional, a tratar da

implementação de ações e técnicas atrativas para que seja reutilizado e reciclado os RCC nos próprios empreendimentos em que são gerados. [51].

No Brasil, o RCC já vem sendo estudado como substitutos de material granular. Pode ser empregado como agregado na produção de base e sub-base para pavimentação, cobertura de vicinais, fabricação de argamassas de assentamento e revestimento, concretos e pré-moldados, blocos de vedação, dentre outros [52]. Para a aplicação de RCC é preciso estudos mais aprofundados de metodologias de dosagem, pois em geral, possuem propriedades de grande variabilidade de comportamento, em detrimento da procedência, e do tratamento que estes recebem [53].

Com base nos agregados reciclados, estes apresentam complexidade estrutural em relação aos agregados naturais, devido às zonas de transição entre o agregado e as matrizes cimentícias presentes, sendo a nova e antiga. Isso acontece, uma vez que a antiga matriz cimentícia forma uma ligação fraca, apresentando mais poros e micro-fissuras, afetando de modo crítico a resistência final. Vale salientar que esta porosidade e fissuras tendem aumentar o consumo de água na mistura, ocasionando uma quantidade de água maior na zona de transição da nova matriz cimentícia desse agregado reciclado [54].

O concreto com agregado reciclado demanda maiores teores de cimento para obter os mesmos valores de trabalhabilidade e resistência à compressão em comparação com o concreto convencional [55, 56]. A densidade dos agregados reciclados é menor em relação aos naturais devido à textura mais rugosa, gerando maior porosidade e influenciando na absorção a água [57]. A porosidade é um dos fatores no qual tem sido considerado mais influente sobre as propriedades dos agregados reciclados, uma vez que é maior quando comparada aos agregados naturais [58].

De acordo Thomas e colaboradores [57], a absorção é uma propriedade física do agregado reciclado que o torna diferente do natural. O agregado reciclado tem essa propriedade amplificada. O coeficiente de absorção de agregados naturais está, geralmente, entre 0 e 4% enquanto na argamassa esse valor alcance patamares entre 15 e 17%.

Quanto à resistência à compressão e ao módulo de elasticidade dos agregados reciclados há uma tendência a diminuir à medida que a relação de

substituição aumenta. A porosidade também é outro aspecto negativo observado quanto a resistência à compressão [55, 59, 60, 61].

Nos estudos de Tenório e colaboradores [56], o concreto de agregado reciclado apresenta maior absorção de água e maior conteúdo de ar quando comparado ao concreto natural, depreendendo assim a influência negativa que o agregado reciclado provoca em relação a porosidade do compósito. O maior percentual dessa propriedade nos agregados reciclados resulta, segundo Thomas e colaboradores [57], da alta porosidade residual.

De acordo com Bui e colaboradores [62], a porcentagem de substituição do agregado reciclado deve ser menor que 30 %. Quanto a utilização dos RCC em solo-cimento, Souza e colaboradores [63], após substituição de até 100 % de agregado reciclado em relação a massa total, não houve prejuízos quanto a resistência à compressão. Os tijolos apresentaram redução na retração material, favorecendo ao aspecto alvenaria de vedação.

De acordo com Gaspareto e colaboradores [64], a adição do RCC promoveu a redução no índice de plasticidade do solo, na retração e o aumento na resistência à compressão, tornando um bom material para produção do solo-cimento.

1.7. TIJOLOS

O Brasil está buscando experimentar mudanças na construção civil, apresentando novas aplicações na industrialização e racionalização dos processos construtivos. Para Santiago e colaboradores [65], este caminho está baseado na construção industrializada, contratação de mão de obra qualificada, otimização dos custos, padronização, produção seriada e em escala, racionalização dos processos e cronogramas rígidos de planejamento e execução [66].

Atualmente, o uso do tijolo ecológico é uma alternativa, em virtude do processo de produção sistematizado e econômico, não havendo a necessidade de queima, processo este de grande impacto ambiental. O uso solo como elemento do tijolo ecológico pode se dar tanto na forma como ele é encontrado na natureza (solo natural) como obtido após a realização de correções em algumas de suas propriedades de engenharia, como a granulometria, peso específico aparente do solo-seco e a umidade ótima [67].

A apresentação dos tijolos de solo-cimento pode ser em formato furado ou maciço e canaletas, como ilustrado na Figura 2. De acordo com Motta e

colaboradores [68], durante o processo de produção deve-se atentar para detalhes que possam interferir na qualidade dos tijolos como a umidade de moldagem, o tipo de solo, proporção de solo e de cimento, tipo de prensa, processo de cura e tipo de estabilizante.



Figura 2 – Modelos dos tijolos fabricados por empresas regionais

(Fonte: Próprio autor)

Segundo Motta e colaboradores [67], assim como qualquer outro componente utilizado na construção civil, o tijolo ecológico deve proporcionar praticidade e segurança para a obra, com vistas a atender as necessidades exigidas ao mesmo. Deste modo, de acordo com o autor, é necessário que, antes de optar pela sua

utilização, se considere os requisitos prescritos em ensaios das normas como a absorção, a resistência à compressão e análise dimensional.

A Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP [69], preconiza que para a fabricação de tijolos ecológicos, sejam moldados corpos de prova para análise da resistência à compressão com traços de 1:10, 1:12 e 1:14 de solo-cimento, para que seja escolhido o traço que atenda às solicitações de projeto bem como utiliza a menor quantidade de cimento visando economia.

Normas nacionais estabelecem requisitos gerais para o preparo, seleção dos materiais e validação dos blocos e tijolos de solo-cimento. Sendo assim, a ABNT NBR 8491:2012 estabelece requisitos padrões para blocos de solo-cimento. Já a norma ABNT NBR 10833:2013 descreve, de modo geral, a fabricação e cura dos tijolos, bem como suas dimensões, idade e unidade de compra, ainda determina os requisitos para utilização de prensa manual ou hidráulica. Por fim, a ABNT NBR 8492:2012 especifica o método para análise dimensional, a determinação da resistência à compressão e da absorção de água nos tijolos de solo-cimento [70,71, 72].

Os valores referentes a absorção de água de 15,32% em tijolos de solo-cimento, é relativamente baixo quando comparados com tijolos convencionais, apurados em torno de 45,39%, a norma ABNT NBR 8491:2012 determina que os tijolos estejam abaixo de 20%. Outro fator importante a se considerando para fabricação de tijolos de solo-cimento, é a quantidade de cimento incorporado na mistura, dado que para maiores valores de resistência à compressão, é necessário maiores quantidades de cimento na mistura [73].

Souza e colaboradores [63], também perceberam a necessidade de aumentar os teores de cimentos na confecção de tijolos. Eles observaram que em tijolos de solo-cimento com 6% de cimento os valores obtidos de resistência à compressão não atenderam aos requisitos da norma. Porém, o mesmo traço com adição de resíduos de até 60% de RCC, obtiveram valores superiores ao de solo-cimento.

Em relação a características mecânicas, após 7 dias de cura, as resistências à compressão podem variar geralmente entre 1,7 a 5 MPa de acordo com os percentuais de adição de cimento, podendo ser realizados ensaios de compressão nos tijolos com 7, 14 e 28 dias. Contudo, a ABNT NBR 8491:2012 determina que o resultado de compressão para um tijolo de solo-cimento seja de 1,7 MPa para resultados individuais e de 2,0 MPa para média. Do mesmo modo do concreto, o

solo-cimento continua a ganhar resistência com o tempo de cura, até alcançar a resistência à compressão desejada. De acordo com tal norma, aos 28 dias ele já se encontra com condições apropriadas para utilização.

1.8. DESEMPENHO DE VEDAÇÕES VERTICAIS

A ABNT NBR 15.575:2013 surge com o intuito de considerar e avaliar a vida útil, desempenho, eficiência, sustentabilidade e a manutenção das edificações residenciais até seis pavimentos. A norma vem para atender as necessidades básicas de economia, saúde, higiene e segurança de edifícios, podendo é claro ser aplicada a residências de modo geral. Possui o foco no comportamento e uso dos elementos e sistemas do edifício no atendimento dos requisitos do usuário, independentemente dos materiais constituintes e do seu sistema construtivo utilizado.

A avaliação de desempenho estabelecida pela ABNT NBR 15575:2013 - parte 1 se dá por meio da definição de requisitos qualitativos e critérios quantitativos, em função das exigências do usuário. Atende apenas a cinco sistemas construtivos diferentes: vedações verticais, coberturas, estrutura, sistemas hidrossanitários e pisos. Os Sistemas de Vedações Verticais Internas e Externas (SVVIE), seguido nesse estudo, é tratado na ABNT NBR 15.575:2013 - parte 4 e podem ser definidos como as partes da edificação que compartimentam horizontalmente a edificação e os seus ambientes, como as fachadas e paredes ou divisórias internas, respectivamente.

Os SVVIE, quanto à volumetria, promovem a divisão dos espaços, sendo agente influenciador no desempenho da edificação habitacional. Exercendo ainda funções como estanqueidade à água, isolamento térmico e acústico, capacidade de fixação de peças suspensas, dentre outros.

A ABNT NBR 15.575:2013 - parte 4 define, também, requisitos e critérios para a verificação do isolamento acústico entre os ambientes externo e interno, unidades autônomas, dependência e áreas comuns, devendo atender à níveis de ruídos permitidos na habitação. O isolamento sonoro pode variar devido aos diferentes tipos de ruído e ambientes, assim como entre ambiente externo e interno.

1.9. DESEMPENHO TÉRMICO E ACÚSTICO

1.1.1. ISOLAMENTO TÉRMICO

Um dos grandes desafios do século XXI é conciliar crescimento econômico com sustentabilidade em todos os níveis, dos recursos energéticos aos impactos ambientais. No setor de energia, a preocupação se deve principalmente ao desequilíbrio entre o consumo e os recursos limitados de energia, de acordo com o ministério de Minas e Energia (2018), o consumo de energia é um dos primeiros setores que sofre aumento de demanda [14,2]. No setor ambiental, a preocupação se deve ao rápido crescimento populacional com sua taxa de consumo [1].

O consumo de energia elétrica é ampliado em todos os setores, na produção, iluminação, ventilação, na utilização de ares condicionados esse que tem seu uso cada vez mais solicitado em residências. De acordo com a Figura 3, o consumo energético por classe de uso das edificações, indica que o setor residencial consome quase 29% de energia elétrica [2].

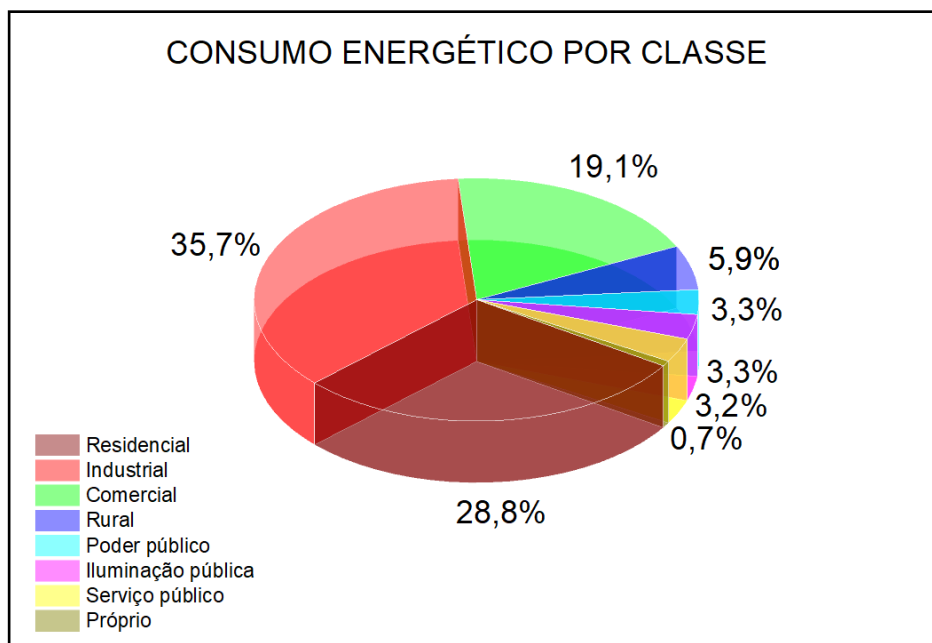


Figura 3 – Consumo energético por classe

Fonte: Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2019

As propostas que objetivam a redução de consumo energético no ambiente construído são cada vez mais prementes. Sendo assim, é importante desenvolver alternativas com uso de tecnologia que amortizam a demanda de energia nas

edificações, além de estudar as propriedades térmicas e acústicas de materiais, uma vez que estão ligadas diretamente ao conforto de ambiente.

O isolamento térmico é uma característica do material que permite a redução do fluxo ou da transferência de calor. Essa propriedade poder ser alcançada usando superfícies absorventes ou refletivas. A transferência de calor por condução pode ser minimizada usando materiais com baixa condutividade ou que apresentem fraturas de estrutura contínua [74].

Os materiais fibrosos são muito utilizados com a finalidade de promover redução na transferência de calor. Aspectos como espessura, porosidade, tortuosidade (razão entre comprimento dos poros e a espessura), são procurados em materiais, para que possam desenvolver propriedade isolantes. A propriedade de isolamento térmico de um material geralmente é medida por condutividade térmica (λ). A condutividade térmica pode ser determinada pela taxa na qual o calor é transferido pela espessura de um material na direção perpendicular à superfície de uma área de seção transversal, tendo como resultado do gradiente de temperatura. Suas unidades são expressas em watts por metro vezes Kelvin (W/mK) [75, 76].

Em relação ao conforto térmico, de acordo com Bassiouny e colaboradores [77], o tijolo de alvenaria é bastante usado em obras no Egito e suas propriedades contribuem para a carga transmitida e, como resultado, interfere no conforto térmico dos ambientes das edificações. Logo, é importante compreender o desempenho térmico do comportamento do tijolo para assim propor modificações para mitigar a carga térmica transmitida.

Isolamento térmico em divisórias como paredes, conserva energia, auxiliando tanto no ganho como na perda de calor. Ainda ajuda na redução da flutuação de temperatura em espaços não fechados ou parcialmente fechados [78]. Desse modo Del Coz Díaz e colaboradores [79], estudaram a transferência de calor não linear de paredes de tijolo vazado de concreto. A não linearidade é devida à condição de contorno de radiação dentro dos orifícios internos ou septos dos tijolos. Os autores utilizaram os fenômenos de condução e a convecção para valores diferentes de condutividade conhecidos com duas amostras de tijolo vazado. Os resultados numéricos e experimentais foram comparados e uma boa concordância foi demonstrada.

Ainda de acordo com Li e colaboradores [80], que realizaram estudo com tijolos de argila, concluiu que dependendo da importância relativa da convecção

natural, radiação de superfície e condução de calor através do sólido de argila, a condutividade térmica equivalente obtida 0,419 W/m.K podendo diminuir ou aumentar com o número de cavidades no tijolo.

Moraes e colaboradores [81], estudaram o comportamento térmico e acústico de placas cerâmicas recicladas com poliestireno expandido (EPS), identificou-se que a adição de EPS variando de 10 até 70% formam poros em proporções de 37 a 77%, sem trazer prejuízos quanto a resistência à compressão. Exibindo condutividade térmica de $\pm 0,061$ W/m.K e suas propriedades térmicas e acústicas se assemelharam a materiais naturais como madeira e cortiça.

1.1.2. ISOLAMENTO ACÚSTICO

O aumento da população e do número de atividades desenvolvidas no cotidiano levou o surgimento de um componente na vida urbana: o ruído. Sendo definido como sons cujas frequências provocam sensações desagradáveis ao ouvido. A poluição sonora e sua conseqüente influência ao meio ambiente e a qualidade de vida humana têm motivado estudos ao redor do mundo. A maior preocupação vem do fato de que este ruído é capaz de provocar efeitos danosos à saúde da humana [82].

Os elementos construtivos dos edifícios precisam ser capazes de proteger os indivíduos da ação negativa do ruído causado pelo ambiente. A Organização Mundial de Saúde (OMS) estima que a cada ano a qualidade de vida é reduzida em conseqüência dos ruídos do tráfego [4].

Com o crescimento das cidades as pessoas se tornam vulneráveis a distúrbios devido à exposição a ruídos, principalmente na faixa de frequência de 1000 a 8000 Hz as mesmas encontradas nas cidades. Esse tipo de ruído ambiental é capaz de interferir na comunicação, recreação ou concentração [83].

De acordo com Halperin [84], o ruído ambiental, especialmente causado por meios de transporte, é visto como um fator relacionado aos distúrbios do sono. Tal distúrbio é considerado como um efeito não auditivo de magnitude destrutiva e danoso a qualidade de vida e desempenho diurno de indivíduos. Apesar de não ser dada importância às propriedades de isolamento acústico dos materiais de revestimento, a aplicação de materiais de parede com isolamento acústico, deverá reduzir a deterioração da saúde mental e psicológica da população.

O isolamento acústico é certamente uma das ações que podem ser aplicadas para reduzir os efeitos nocivos do ruído. Para se obter boas propriedades acústicas, é importante saber que existe uma diferença entre materiais absorventes e isolantes. A absorção é uma propriedade em que o material pode absorver parte ou toda energia sonora incidente que é transformada em energia térmica; já o isolamento é a capacidade do material em refletir parte ou toda a energia aplicada [85].

Os materiais com alta absorção devem apresentar porosidade em sua estrutura. Materiais porosos permitem que as frequências entre em sua matriz e se dissipe. Quando as ondas sonoras se adentram em materiais porosos, as moléculas de ar dentro dos poros vibram, transmudando a energia sonora em calor térmico e viscoso [86].

Essa energia em baixas frequências é dissipada pelo processo isotérmico; em quantidade limitada, mas em altas frequências, a energia é perdida pelo processo adiabático de acordo com Berardi e colaboradores [87], concluindo-se que para baixas frequências há uma pequena quantidade de som absorvida, mas a quantidade aumenta em frequências mais altas.

Há estudos que evidenciaram que para materiais apresentarem propriedades de isolamento, os mesmos apresentam alta densidade, compactação e rigidez, de acordo com Lamounier [85], quanto mais densos, menor será a transmissão sonora, fazendo o material ter característica isolantes.

Já Binici e colaboradores [88] verificaram que os tijolos de barro reforçados com fibra atendem as normas no quesito resistência à compressão e que pedrapomes basáltica, como ingrediente, melhora o desempenho de absorção acústico de tijolos de barro. Observaram que a diminuição na densidade melhorou o desempenho do isolamento acústico na propriedade absorção.

Segundo Grota [89], os testes para avaliar a eficácia de forros, são realizados em campo e em laboratório. Os níveis de controle acústico (absorção, isolamento e atenuação sonora) são determinados pelo NRC (Noise Reduction Coefficient), apresentando classificação de 0,75 – 1,00; como indicador mais utilizado para forros, a AC (Articulation Class) classe de articulação, medindo índice de absorção de ruído em frequências críticas; o CAC (Ceiling Attenuation Class) como classe de atenuação, aplicado para a privacidade acústica, principalmente entre áreas adjacentes fechadas, é estabelecida pela média aritmética de todas as frequências realizadas em dBs e o α_w (Coeficiente de absorção); o coeficiente α_w é representado

por um índice adimensional, sendo uma estimativa da média de absorção em faixas compreendidas entre 125 Hz a 4000 Hz.

Outro fator importante quanto ao desempenho acústico se trata das espessuras dos materiais [90]. Ferreira e colaboradores [91], estudaram a diferença de tijolos cerâmicos entre Brasil e Portugal com espessuras de 11,5 cm e 14,0 cm, e 11,0 cm e 15,0 cm respectivamente. Concluiu que a espessura, a estrutura dos tijolos e a argamassa de assentamento corroboraram para um desempenho satisfatório dos tijolos.

A Tabela 5 apresenta a linha de produtos THERMATEX® Varioline Metal com a ficha técnica de seus produtos de isolamento acústico, incluindo a absorção e atenuação de seus materiais. Estão apresentados 3 produtos da linha THERMATEX® Varioline Metal, produzidas pelo processo *wetfelt* (modelagem úmida) que foram elaboradas com lã mineral biossolúvel, perlita, argila e aglomerantes orgânicos [92].

Tabela 5 – Ficha técnica de placas isolantes comerciais

THERMATEX®	Espessura / peso	Formato	Absorção sonora (EN ISO 11654)	Atenuação sonora (EN 20140-9 / EN ISO 10848)
Varioline	19 mm (3,0 kg/m ²)	600 x 600, 625 x 625	$\alpha_w = 0,95$ NRC = 0,90	Dn,f,w = 28 dB
Varioline SF	24 mm (8,4 kg/m ²)	600 x 600, 625 x 625	$\alpha_w = 0,65$ (H) NRC = 0,70	Dn,f,w = 38 dB
Varioline Acoustic	19 mm (4,6 kg/m ²)	1200-1800 x 300	$\alpha_w = 0,65$ (H) NRC = 0,70	Dn,f,w = 40 dB

Fonte: Site Thermatex acessado em 13 de janeiro de 2020.

Souza e colaboradores [39], utilizaram vários resíduos na fabricação de blocos com área de 0,2 m² como, polietileno tereftalato (PET), pó de mármore e isopor. Os blocos alcançaram resultados positivos para aplicação de uso residencial. Apresentando características como baixo custo, boa resistência à compressão, baixa condutividade térmica, níveis superiores de absorção acústica ao serem comparados a tijolos convencionais.

A necessidade por materiais que desenvolvam um bom isolamento térmico e acústico só aumenta. Materiais de vedação como paredes, pisos e telhados, são cada vez mais estudados com esse objetivo [1].

Dessa forma, a revisão bibliográfica indica o potencial positivo da inserção que os resíduos propostos podem contribuir nas propriedades mecânicas, térmicas e acústicas, além da certeza de mitigar impactos ao meio ambiente, em função da substituição, proporcionando desenvolvimento sustentável ao setor.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

Fabricar tijolos de solo-cimento com incorporações de resíduo de construção civil e do processamento de pedras ornamentais, e avaliar seus desempenhos térmico e acústico em relação da condutividade térmica e atenuação sonora.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma revisão bibliográfica temática;
- Caracterizar os materiais relevantes: RCC, RPPO, solo natural;
- Realizar ensaios tecnológicos nos blocos de solo-resíduos-cimento (TSRC) estudados;
- Analisar os resultados;

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Solo

Para dar início aos estudos práticos, no dia 14 de novembro de 2018 foi realizada uma visita à empresa “ECOTIJO”, fabricante de tijolos ecológicos de solo-resíduos, para a produção dos tijolos. A empresa possui fábrica em operação, localizada em Presidente Epitácio – SP, onde funciona sua sede, e onde foram fabricados os blocos.

O solo foi fornecido pela empresa “ECOTIJO”, porém o solo que foi utilizado foi coletado na cidade de Presidente Venceslau – SP, sua localização exata não nos foi fornecida, não sendo possível fazer um rastreamento exato do local; vale ressaltar que o solo da região não tem grandes variações. Segundo Quaresma e Filho 2010, as principais classes de solos encontradas no Oeste Paulista são o

Latossolo Vermelho-Amarelo, Argissolo Vermelho-Amarelo e Argissolo Vermelho, sendo que todos apresentam textura média ou arenosa/média [93].

O solo foi devidamente coletado em caçambas e destinado a fábrica que é localizada em Presidente Epitácio; o material foi selecionado, passado em peneira de malha 16, abertura 1,19 mm e armazenado em área coberta em baias, protegido da ação de intempéries. Ainda vale ressaltar que foram coletados os solos separadamente, um solo mais arenoso aqui identificado como Solo 1 e o outro mais argiloso identificado como Solo 2, em que ambos foram utilizados na mistura para confecção dos tijolos.

Foi retirado 2 kg de cada solo, para realização de ensaios de caracterização sendo eles: Fluorescência de raios X, Difração de raios X e Granulometria textural.

3.1.2. Cimento

O cimento Portland utilizado neste trabalho foi do tipo Cimento Portland CP II - Z – 40RS Obras estruturais – fabricante VOTORATIN.

3.1.3. Água

Neste trabalho foi utilizada água de chuva, capitada por sistema desenvolvido na própria fábrica.

3.1.4. Resíduo de Construção Civil

O RCC, foi cedido pela empresa ECOTIJO, ao qual fez todo o beneficiamento do mesmo, a origem do resíduo foi da própria cidade de Presidente Epitácio, sendo fornecido por caçambeiros contratado por pessoa física ou jurídica.

Para o beneficiamento do RCC, foi utilizado uma recicladora de resíduos de construção civil, Modelo Queixada QI 300, móvel, com produção média (finos + Brita) de 2,2 m³/h, altura de descarga de finos de 400 mm, Motor elétrico trifásico, blindado, 200/380V e 5,5/7,5 kW/vc, com consumo de energia de 5,5 kWh e peso 1477 kg, conforme mostra Figura 4 (b) e (c).

O RCC utilizado na fabricação dos tijolos, recebeu pré-seleção, assim a mistura foi estabelecida por resíduos de concreto e argamassa. A seleção deve ser realizada na obra, porém como mostra a Figura 4 (a) ainda é tarefa difícil obter esse

tipo de separação, sendo necessária a seleção no momento do beneficiamento. Em algumas cooperativas de recebimento, os resíduos estão sendo aceitos somente quando já selecionados nas próprias caçambas.

Foi coletado 2 kg do material para realização dos ensaios de caracterização, como massa específica, difração de raios X, fluorescência raios X e granulometria.



Figura 4 – (a) Depósito de RCC, (b) recicladora de RCC, (c) granulometrias disponíveis.

Fonte: Próprio Autor

3.1.5. Resíduo de Processamento de Pedras Ornamentais

O RPPO, foi coletado em uma marmoraria da cidade de Presidente Prudente – SP; o resíduo é originado do processo de beneficiamento de peças, tais como pias, soleiras, pisos, bancadas entre outros. Foi coletado em forma de lama, ainda bem saturado, em baldes de 20 litros como mostra a Figura 5(a) e depois levado

para ser secado com mostrada Figura 5(b). Foram coletados quinze baldes, tendo em massa aproximadamente 150 kg.

Para secagem o resíduo foi disposto em área aberta, bem protegido por lona plástica, tanto para seu depósito, quanto para sua proteção quanto a chuva. Após seco, foi peneirado e colocado em baldes de 20 litros para ser levado até a fábrica em Presidente Epitácio – SP.

Foi coletado 2 kg do material para realização dos ensaios de caracterização, sendo massa específica, difração de raios X, fluorescência de raios X e granulometria.



Figura 5 – (a) Resíduo de RPPO logo após coleta; (b) RPPO em processo de secagem e totalmente seco e peneirado.

Fonte: próprio autor

3.1.6. Confecção dos Tijolos

De acordo com a norma ABNT NBR 10833:2012 para a definição de traços de solo-cimento, deve-se preparar 3 traços com diferentes teores de cimento. Fabricar 20 corpos de prova de cada traço e realizar a cura úmida conforme estabelecido no item 5.3 da mesma norma. Realizar os ensaios de compressão, absorção e dimensional conforme ABNT NBR 8492:2012 para que após os resultados seja escolhido o traço que melhor atenda a solicitação de projeto.

Neste estudo, em virtude da parceria firmada com a empresa ECOTIJO foram definidos os traços em volume já convencionais, sendo os traços 1:8, 1:10 e 1:12, ou seja, 1 unidade de cimento + 8 unidades de solo e assim sucessivamente.

A escolha dos traços se deu por meio de estudos e pela intenção de fabricar tijolos com menores taxas de cimento. Vale lembrar que de acordo com estudos os

ensaios feitos com amostras produzidas em laboratório tendem a ter seus valores de compressão maiores do que os quando produzindo em ambiente industriais [94, 95].

Traço 1:8 solo-cimento



Traço 1:10 solo-cimento



Traço 1:12 solo-cimento



Legenda:

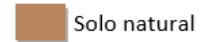


Figura 6 – Modelo Esquemático da produção dos tijolos de solo-cimento

As parcelas de Solo + RCC foram variando de modo que, o solo fosse sendo substituído pelo RCC, ou seja, para cada 1 unidade retirada de solo, essa unidade fosse substituída por uma unidade de RCC, até que pudesse chegar em uma proporção de 50% solo e 50% RCC. Já a substituição do RPPO foi definida em teores de 10% e 20%. Nas figuras 7, 8 e 9 são apresentados os modelos sistemáticos da formulação dos traços em volume.

Traço 1:8 = Solo + resíduo + cimento com 10% de RPPO



Legenda:

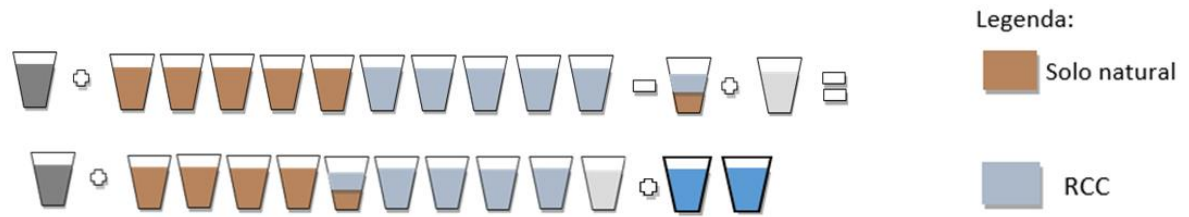


Traço 1:8 = Solo + resíduo + cimento com 20% de RPPO



Figura 7 – Modelo Esquemático da produção dos tijolos de solo-resíduo-cimento 1:8

Traço 1:10 = Solo + resíduo + cimento com 10% de RPPO



Traço 1:10 = Solo mais resíduo + cimento com 20% de RPPO

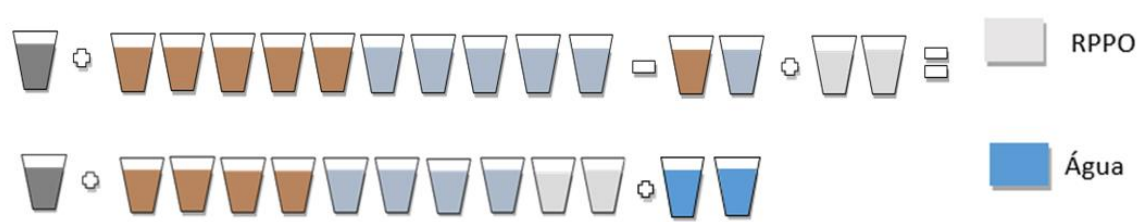


Figura 8 – Modelo Esquemático da produção dos tijolos de solo-resíduo-cimento 1:10

Traço 1:12 = Solo + resíduo + cimento com 10% de RPPO



Traço 1:12 = Solo + resíduo + cimento com 20% de RPPO



Legenda:



Figura 9 – Modelo Esquemático da produção dos tijolos de solo-resíduo-cimento 1:12

Para a substituição do resíduo de RPPO foram retiradas parcelas proporcionais de solo e RCC em volume, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição dos corpos de prova em teor volumétrico

Nome do Traço	Cimento (volume)	RPPO (volume)	RCC (volume)	Solo 1 + Solo 2 (volume)
T1 – 1:8 – 10% RPPO	1	0,8	3,6	3,6
T2 – 1:8 – 20% RPPO	1	1,2	3,4	3,4
T3 – 1:10 – 10% RPPO	1	1,0	4,5	4,5
T4 – 1:10 – 20% RPPO	1	2,0	4,0	4,0
T5 – 1:12 – 10% RPPO	1	1,2	5,4	5,4
T6 – 1:12 – 20% RPPO	1	2,4	4,8	4,8

Para efeito de análise foram fabricados traços de solo-cimento nos mesmos volumes 1:8, 1:10 e 1:12, respectivamente, como mostra Tabela 7.

Tabela 7 – Composição dos corpos de prova em teor volumétrico solo-cimento

Nome do Traço	Cimento (volume)	RPPO (volume)	RCC (volume)	Solo 1 + Solo 2 (volume)
Tsc – 1:8	1	-	-	8
Tsc – 1:10	1	-	-	10
Tsc – 1:12	1	-	-	12

3.1.7. Preparação das Misturas

A primeira etapa para a confecção dos TSRCs foi a colocação dos materiais em baldes, para a quantificação dos volumes utilizados.

Estes foram misturados e homogeneizados (na ordem solo, RCC, RPPO, cimento) em betoneira até que formassem uma massa suficientemente uniforme Figura 11. Após homogeneizada a mistura a água foi adicionada.



Figura 10 – Homogeneização da mistura dos traços

3.1.8. Moldagem

Após a homogeneização e com água acrescentada, a mistura é conduzida por meio de esteira transportadora acoplada a prensa hidráulica, modelo Eco Premium 2600 CH-MA marca Ecomáquinas, pertencente à empresa ECOTIJO. No conjunto dos equipamentos para fabricação dos tijolos como mostra a Figura 11 (a) e (b), há uma peneira mecânica que realiza o processo de peneiramento da mistura já pronta, ou seja, umedecida, antes de ir para a moldagem dos tijolos, para retirada de materiais graúdos, e também grumos que possam ser formados durante o processo de rotação dos materiais secos na betoneira logo após a adição da água, peneira com abertura 2,38 mm.

Com o material seco e homogeneizado, a água adicionada é absorvida rapidamente, o que geralmente possibilita a formação de grumos, ou seja, pequenas porções de matéria coagulada, de forma arredonda nas dimensões de 2,0 mm a 4,0 mm, que devem ser evitados.

A quantidade de água inserida de acordo com o fabricante é de 1,5 medida e para cada 8 medidas de solo + resíduo, 2 medidas para 10 medidas de solo + resíduo e 2,5 medidas para cada 12 medidas de solo + resíduo.

A esteira transportadora, leva o material já homogeneizado, umidificado e peneirado até o molde da prensa. A prensa hidráulica utilizada para moldagem dos TSRC funciona com a capacidade de prensagem de até 6 toneladas por ciclo. As dimensões do equipamento em sua prensagem padrão de 6 toneladas sobre uma

área de 312,0 cm² (área do TSRC), resulta em uma pressão de 19,23 kgf/cm², a prensa é apresentada na Figura 12 (a).

Assim, os TSRCs foram confeccionados no tamanho 25,0 cm x 12,50 cm (comprimento x largura) e altura variável de 6,5 cm ± 1,0 cm, com 2 furos de 6 cm de diâmetro, com área útil de 80% como mostra a Figura 12 (b) e (c), seguindo a ABNT NBR 10834:2013.



Figura 11 – Conjunto betoneira e peneira.

Fonte: próprio autor

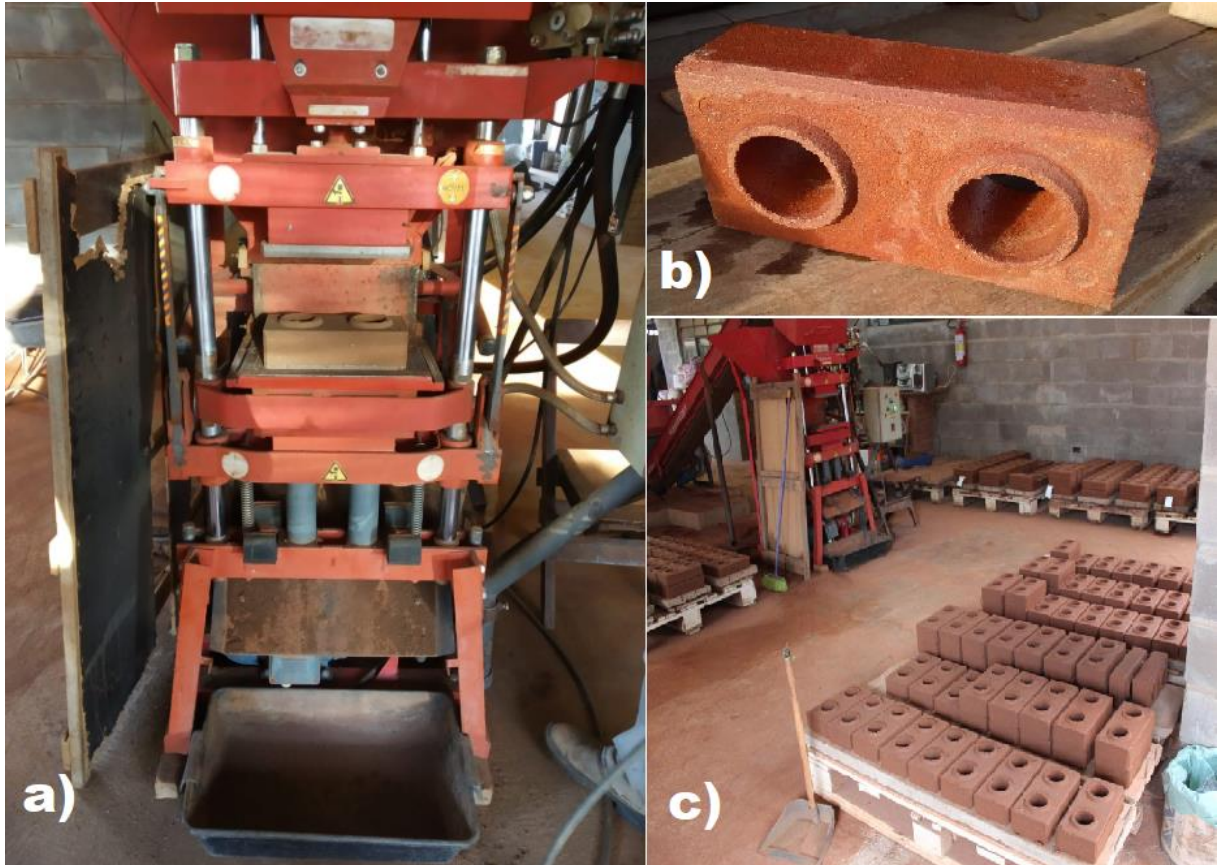


Figura 12 – (a) Prensa hidráulica; (b) e (c) tijolos fabricados

Fonte: próprio autor

3.1.9. Cura

Os TSRCs após prensados e desmoldados, foram retirados do equipamento e acondicionado em placas de concreto pré-moldadas em sequência, identificados e então, realizado o processo de cura úmida.

O processo de cura realizado na fábrica ECOTIJO foi por meio de regador manual em que os tijolos foram sendo molhados como mostra a figura 13. De acordo com ABNT NBR 10833:2012 deve-se manter os tijolos úmidos por um período de 7 dias consecutivos.

Sendo assim, foram realizadas molhagens dos tijolos por 7 dias consecutivos, sendo uma realizada no período da manhã e outra no período da tarde.



Figura 13 – Processo de cura e acondicionamento dos TSRC

Fonte: próprio autor

3.2. PARTE EXPERIMENTAL

3.2.1. Caracterização das matérias-primas e tijolos fabricados

3.2.1.1. *Fluorescência de raios X*

A técnica de fluorescência de raios X foi utilizada para a análise química das amostras de Solo natural (solo 1 e solo 2), do RCC e do RPPO. Os ensaios foram realizados no LaMaC Laboratório de Materiais Cerâmicos, localizado no Departamento de Física da FCT-UNESP. Os espectros de fluorescência de raios X foram obtidos utilizando o equipamento XRF-700 (modelo Shimadzu), determinando assim a composição química das amostras.

3.2.1.2. *Difração de Raios X*

As matérias-primas utilizadas (solo, RCC, RPPO) foram analisadas pela análise de difratometria de raios X (DRX) usando um difratômetro da marca Shimadzu modelo DRX-6000 e fonte de radiação Cu- $K\alpha$ – $\lambda \sim 1,54 \text{ \AA}$ (radiação característica) em uma varredura angular de 10 até 90° (2θ). Os difratogramas foram identificados utilizando o *software* Search-Match® e o banco de dados PDF (Powder Diffraction Files), disponível no Departamento de Física da FCT-UNESP LaMaC Laboratório de Materiais Cerâmicos.

3.2.1.3. Massa específica, massa específica aparente seca

Para a determinação da massa específica, tanto as amostras do RCC como as do RPPO foram submetidas aos ensaios em conformidade com as Normas Mercosul NM 52:2009 [96].

Inicialmente, pesou-se ($500,0 \pm 0,1$) g de amostra (m_s), colocando-a no frasco e registrando a massa do conjunto (m_1). Encheu-se o frasco com água até próxima da marca de 500 ml. Movendo-o de forma a eliminar as bolhas de ar e depois colocando-o em um banho mantido a temperatura constante de $(21 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

Após o período de 1 h, completou-se com água até a marca de 500 cm^3 e determinou-se a massa total com precisão em gramas (m^2). Retirou-se o agregado miúdo do frasco e secou a $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ até massa constante ($\pm 0,1$ g). Os cálculos se deram por meio da Equação 1.

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (1)$$

Em que:

d_3 = é a massa específica do agregado (g/cm^3).

m = é a massa da amostra seca em estufa (g);

V = é o volume do frasco (cm^3)

V_a = é o volume de água adicionado ao frasco (cm^3)

m_s = é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g).

ρ_a = é a massa específica da água (g/cm^3).

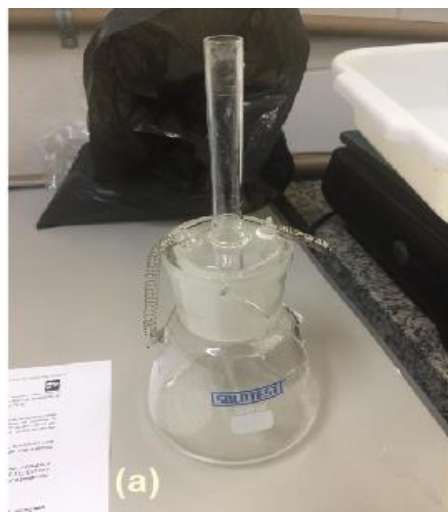


Figura 14 – Picnômetro

Fonte: próprio autor

A massa específica aparente seca foi obtida por meio do método de imersão. Neste procedimento, foram separados 3 tijolos de cada traço e acondicionados em estufa em temperatura de 105 °C, para secagem como mostra a figura 15. As medidas foram realizadas durante 72 horas até que as variações de medida não ultrapassem 0,5% da pesagem anterior.

Após estabilidade das medidas, foram imersas em tanque com água por período de 24 horas como mostra a figura 16 (b) conforme estabelecido pela Norma Mercosul NM 53:2009.

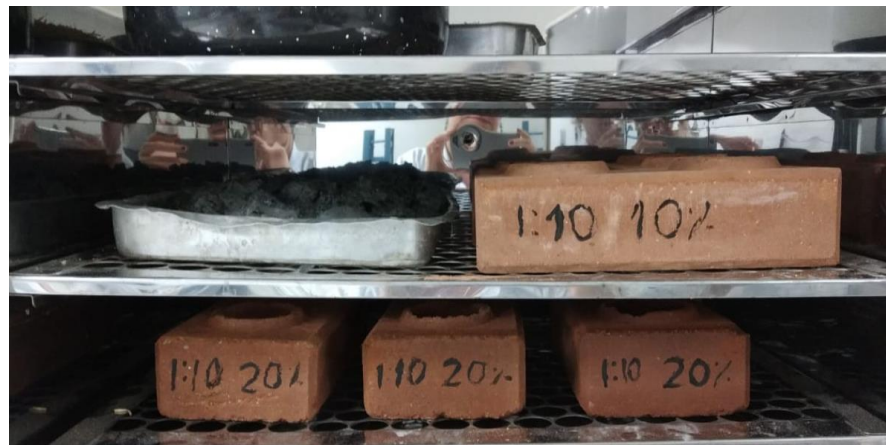


Figura 15 – Secagem dos tijolos

Fonte: próprio autor

Após esse período de encharque, foram avaliadas a massa imersa (m_i), a massa úmida (m_u) para a determinação da massa específica da amostra seca, massa específica da amostra saturada e da porosidade por meio das equações 2:

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (2)$$

Em que:

m_s : massa da amostra seca (g)

m_{sat} : massa da amostra saturada após imersão (g)

m_i : massa da amostra saturada imersa (em balança hidrostática) (g).

A massa específica da amostra saturada (ρ_{sat}) ou densidade, foi calculada pela Equação 3:

$$psat = \frac{msat}{msat - mi} \quad (3)$$

A Porosidade de cada amostra, em porcentagem, foi calculada pela Equação 4.

$$P(\%) = \frac{msat - ms}{msat - mi} \times 100 \quad (4)$$



Figura 16 – Tijolo submetidos a ensaios de absorção, densidade e porosidade.

Fonte: próprio autor

3.2.1.4. Análise Granulométrica

A distribuição dos tamanhos dos grãos das amostras de solo e dos resíduos de RCC e RPPO foi realizada conforme os procedimentos de peneiramento e sedimentação da ABNT NBR 7181:2018 [97].

A determinação da composição granulométrica realizada por peneiramento foi realizada de acordo com a NBR NM 248:2003.

Para cada amostra foi utilizado 1 kg de cada para a realização do ensaio: o conjunto de peneiras e os limites de Zona ótima e utilizável também foram determinados em seguimento da NBR NM 248:2003. A Tabela 8 mostra o conjunto de peneiras utilizado [98].

Tabela 8 – Conjunto de peneiras

Peneiras	Abertura de malha (mm)
4	4,76
8	2,38
16	1,19
30	0,59
50	0,29
100	0,149
200	0,0074
Fundo	0

Fonte: ABNT NBR NM 248:2003

3.2.1.5. Análise Textural

As amostras de solo foram submetidas a análises texturais, enviadas ao Laboratório de Sedimentologia e Análise de Solos da FCT/UNESP, adaptadas do Manual de métodos de análise de solos da Embrapa e da ABNT NBR 6458:2017. Com as análises foi possível definir as porcentagens de areia, silte e argila, depois foram transpostas para o diagrama de classes texturais do *United States Department of Agriculture* (U.S.D.A., 1951) para classificação de acordo com Figura 17 [99].



Figura 17 – Diagrama de classes texturais do *United States Department of Agriculture*

Fonte: FUSHIMI, Melina. Vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos lineares nas áreas rurais do município de Presidente Prudente-SP. 2012.

3.2.1.6. Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia de Energia Dispersiva

A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada com a finalidade de avaliar a morfologia dos resíduos separadamente e do tijolo de solo-resíduo-cimento traço 1:8 com 20% de adição de RPPO para analisar a interação dos grãos. As imagens foram obtidas a partir de um microscópio eletrônico de varredura Carls Zeiss Modelo LS15. As amostras foram recobertas em ouro, depositado pela técnica de sputtering, num equipamento Quorum-modelo Q150TE. As imagens foram obtidas no laboratório multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura (LaMMEV) pertencente à FCT UNESP. A análise por espectroscopia de energia dispersiva-EDS, foi implementada com objetivo de identificar a composição elementar dos resíduos, como complemento à fluorescência de raios X.

3.2.1.7. Análise dimensional, determinação da absorção de água e da resistência à compressão

Os ensaios para estes procedimentos foram realizados seguindo o procedimento descrito pela ABNT NBR 8492:2012.

Foram utilizados 10 tijolos, de cada traço, os quais foram devidamente identificados. Inicialmente, as amostras foram submetidas ao ensaio de análise dimensional e em seguida, 7 tijolos submetidos aos ensaios de compressão simples e 3 tijolos aos ensaios de absorção de água. O total de tijolos rompidos foram 49 e para absorção de água foram um total de 27 tijolos.

Foi aplicado a análise estatística nos resultados e os mesmos foram apresentados por médias ponderadas.

3.2.1.7.1. Análise dimensional

A análise dimensional dos tijolos foi realizada utilizando um paquímetro nas dimensões largura e altura (mm); já para as dimensões de comprimento foi utilizado régua graduada. Para cada dimensão do corpo de prova foi executado três determinações em pontos distintos de cada face, realizando-se uma determinação em cada extremidade e uma no meio do corpo de prova, com exatidão de 0,5 mm.

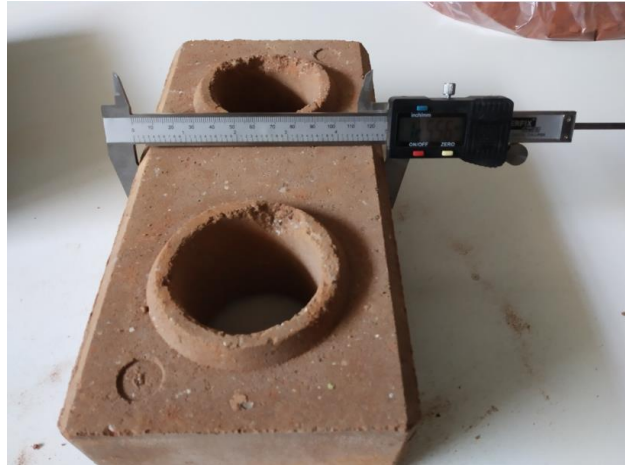


Figura 18 – Ensaio de análise dimensional

Fonte: próprio autor

3.2.1.7.2. Ensaio de Compressão Simples

Foram ensaiados 7 tijolos de cada traço, com a utilização de uma equipamento EMIC PCE 100, com capacidade de 100Tf que atende aos requisitos da ABNT NBR NM ISO 7500-1. Antes da realização do ensaio, os tijolos tiveram que passar por processo de corte, remonte e capeamento.

Os tijolos foram cortados ao meio, perpendicularmente à sua maior dimensão, remontados e sobrepostos, de maneira a ficar com as superfícies cortadas invertidas. Foram ligados com uma fina camada de pasta de cimento Portland (cimento e água) sendo resistentes às forças que os tijolos foram expostos e mantidos em repouso por 30 mim. As superfícies dos tijolos foram submetidas ao processo de capeamento para nivelamento conforme a Figura 20 ilustra.



Figura 20 – a) Conjunto da máquina de compressão e o rompimento do tijolo; (b) carga em quilograma força (kgf) e (c) tijolo rompido.

Fonte: próprio autor

A tensão de ruptura à compressão é obtida dividindo-se a carga máxima até a ruptura pela área da seção transversal do corpo de prova, segundo a Equação 5:

$$\sigma = \frac{f}{S} \quad (5)$$

Em que:

σ = tensão de ruptura à compressão (MPa);

F = carga de ruptura do tijolo ou carga máxima alcançada (kN);

S = área da seção transversal (m²).

3.2.1.7.3. Ensaio de Absorção de Água

Foram reservados 3 tijolos de cada traço, identificados e acondicionados a estufa programada entre as temperaturas 105 e 110°C por 24 horas. Pesou-se os tijolos até que os mesmos estivessem com suas medidas estabilizadas, podendo

apresentar variação com diferença de até 0,5% da pesagem anterior. Cada registro foi adotado como (m_1) massa do corpo de prova seco em estufa, em gramas. Após a estabilidade dos mesmos foram imersos em caixas com água por um período de 24 horas. Após retirá-los da água, foi necessário enxugá-los superficialmente com um pano e pesá-los antes de 3 minutos, obtendo-se assim (m_2) massa do corpo de prova saturado, em gramas.

Para cálculo de porcentagem de absorção da água, utilizou-se a Equação 6, conforme descrita abaixo:

$$A = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \times 100 \quad (6)$$

Em que:

A = absorção de água (%);

m_1 = massa do corpo de prova saturado (g);

m_2 = massa do corpo de prova seco em estufa (g).

3.2.1.8. Termogravimetria

A técnica de análise Termogravimetria (TG) baseia-se nas medidas de perda de massa de uma amostra, resultante de uma transformação física ou química em função da temperatura. Esta análise possibilitou o estudo da estabilidade térmica dos tijolos bem como as influências dos resíduos incorporados. Utilizou-se equipamento da marca TA Instruments, modelo SDTQ 600. As curvas termogravimétricas foram medidas por meio da pesagem de cerca de 10 mg das amostras transferidas em um cadinho de alumina e tratadas até 1000°C com razão de aquecimento de 10°C/minuto sob fluxo de 100ml/minuto de ar sintético, localizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos – LaMaC, FCT- Unesp

3.2.1.9. Ensaio de Condutividade térmica

A análise da condutividade térmica dos tijolos de solo-resíduo-cimento foi realizada com a sobreposição dos tijolos formando uma pequena parede nas medidas de 375 mm x 200 mm x 125 mm. O mesmo foi seguido para os tijolos comerciais de referência, cada um seguindo as medidas possíveis de acordo com suas dimensões. Os blocos cerâmicos foram feitos com duas unidades com uma medida final de 380 mm x 190 mm x 90 mm e os de tijolos maciços foram utilizados 8 unidades totalizando 400mm x 160mm x 95mm, as diferentes medidas dos corpos-de-prova não geram interferência nos resultados visto que os dados de área e espessuras são dados de entrada na formulação que calcula a condutividade.

Desse modo, foi confeccionada uma estrutura utilizando MDF – *Medium Density Fiber* revestido de poliestireno expandido ($\lambda = 0,035 \text{ W/m.K}$) gerando isolamento de borda evitando a dissipação de calor. Trata-se de uma câmara isolada dividida pelo corpo de prova e duas câmaras distintas em que uma delas tem a fonte de calor e ambas são instrumentadas com termopares para leitura dos fluxos de calor ao longo da subcâmaras como mostra a Figura 21.

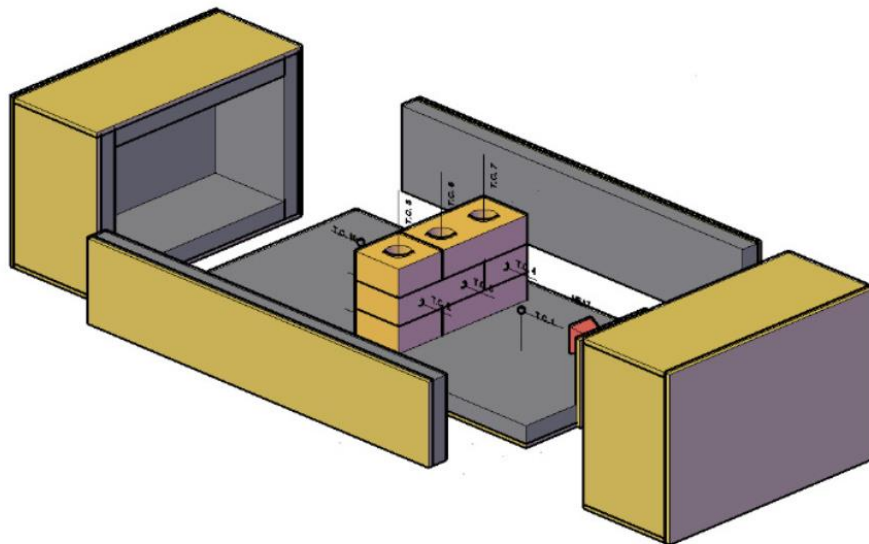


Figura 21 – Aparato térmico

Os corpos de prova foram instrumentados por 3 termopares de cada lado, 2 termopares nos septos e foi colocado um termopar entre a fonte de calor e o corpo de prova, e outro termopar equidistante do corpo de prova, mas na outra subcâmara.

As medições das temperaturas tanto internas como externas foram realizadas, durante um ciclo de 23 horas, pelos termopares e um sistema de aquisição de dados. O aparato de análise é similar ao equipamento conhecido como placa quente protegida, em que uma fonte de calor conhecida é transmitida pelo material e termopares fazem a leitura do fluxo através do material, conforme mostra Figura 22.

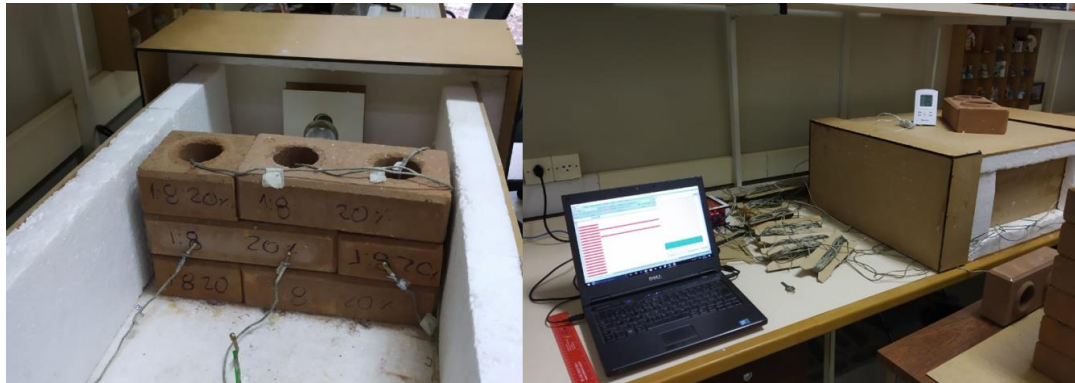


Figura 22 – Instrumentação dos corpos de prova para ensaio de térmico.

O procedimento de obtenção de condutividade térmica foi conduzido seguindo as orientações da ABNT NBR 15575:2013 e fundamentado na análise do gradiente de temperatura de um corpo de prova submetido à um fluxo de calor conhecido, segundo ASTM C518:2017, procedimento também conhecido como método em placa quente/fria. A calibração foi realizada com uma amostra de condutividade já conhecida. A partir desse valor, ficou estabelecida as perdas de calor do aparato e o fluxo de calor que passa pelos corpos-de-prova submetidos ao experimento. A calibração mostrou que o calor que chega no corpo de prova é de $\alpha_{ef}=10,89\%$ do emitido, tendo o restante se perdido na trajetória. Assim, a formulação a seguir pode ser aplicada pela Equação 7

$$Q_{apl} = Q_g \cdot \alpha_{ef} = \lambda_{mat} \cdot S_{esp} \cdot \frac{\Delta T}{e_{esp}}$$

Em que:

Q_{apl} = calor aplicado;

Q_g = calor gerado;

α_{ef} = calor aplicado;

λ_{mat} = condutividade térmica do material;

S_{esp} = área do corpo de prova;

ΔT = Gradiente de Temperatura nas faces do Corpo de prova;
 e_{esp} = espessura do corpo de prova.

A fonte de calor escolhida foi uma lâmpada incandescente da marca Philips, com 40 W de potência. A partir do momento em que a lâmpada era acesa, a mesma permanecia assim por um período de 8 horas.

Foi analisado também o desempenho térmico para a condição Verão, segundo a ABNT NBR 15.575:2013. Para isto, é levado em consideração o valor máximo diário da temperatura do ar no interior e exterior da edificação, a análise é realizada pelos critérios de classificação em mínimo, intermediário e superior. De acordo com a norma ABNT NBR 15.220:2005, Presidente Prudente – SP encontra-se na zona bioclimática 6 conforme Figura 25, para esta zona não é preciso fazer para o inverno como menciona a norma. As classificações dos níveis de desempenho estão dispostas na Tabela 9.

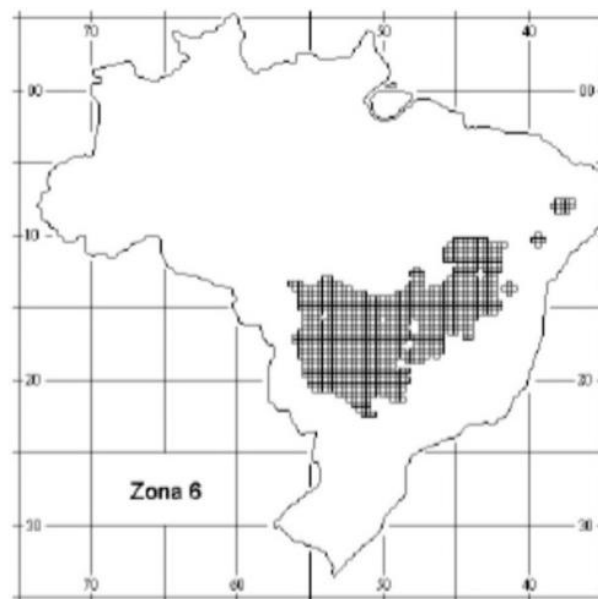


Figura 23 – Zona bioclimática 6

Fonte: ABNT NBR 15.220:2005

Tabela 9 – Critério de avaliação de desempenho térmico para condição de Verão

Nível de desempenho	Critério zona bioclimática 1 A 7
M (mínimo)	$T_{im\acute{a}x} \leq T_{em\acute{a}x}$
I (intermediário)	$T_{im\acute{a}x} \leq (T_{em\acute{a}x} - 2^{\circ}\text{C})$
S (superior)	$T_{im\acute{a}x} \leq (T_{em\acute{a}x} - 4^{\circ}\text{C})$

* NOTA: $T_{im\acute{a}x}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius; $T_{em\acute{a}x}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no exterior da edificação, em graus Celsius.

Fonte: ABNT NBR 15.575:2013.

É necessário também que haja uma proteção contra as perturbações devido ao ambiente, controlando a temperatura do ar ambiente e realizando um isolamento térmico lateral.

3.2.1.10. Ensaio de Atenuação Acústica

O método mais utilizado para medição da perda de transmissão sonora em materiais de construção basicamente consiste em: duas salas adjacente, com o material a ser estudado entre elas. É gerando um som (ruído) na sala de origem e captado por equipamentos na sala de receptora, as medições são feitas nas duas salas.

Para isso é necessário a construção de dois ambientes em escala real, ou em uma escala menor do real, mas ainda em tamanhos que compreendem a simulação de edifícios ou casas. No entanto, para realização desses métodos o investimento financeiro se torna inviável, por conta das grandes quantidades de amostras utilizadas, além da necessidade de espaços para a construção das salas.

Com o objetivo de tornar o ensaio de perda de transmissão sonora mais acessível economicamente e devido a fatores de ordem prática, foi construído um aparato de tubo de impedância, seguindo os procedimentos descritos ASTM E1050-12. Tal norma considera a utilização de aparatos seguindo requisitos mínimos, que são: uma fonte emissora de som; dois receptores de som; um corpo de prova e uma cápsula, com dimensões constantes, podendo ser cilíndrica ou retangular conforme mostra Figura 24. Os materiais utilizados podem ser de metal, de plástico, de

madeira ou de cimento, sendo que seu revestimento interno deve possuir superfície reta, não-porosa, limpa para não altere os valores da atenuação sonora.

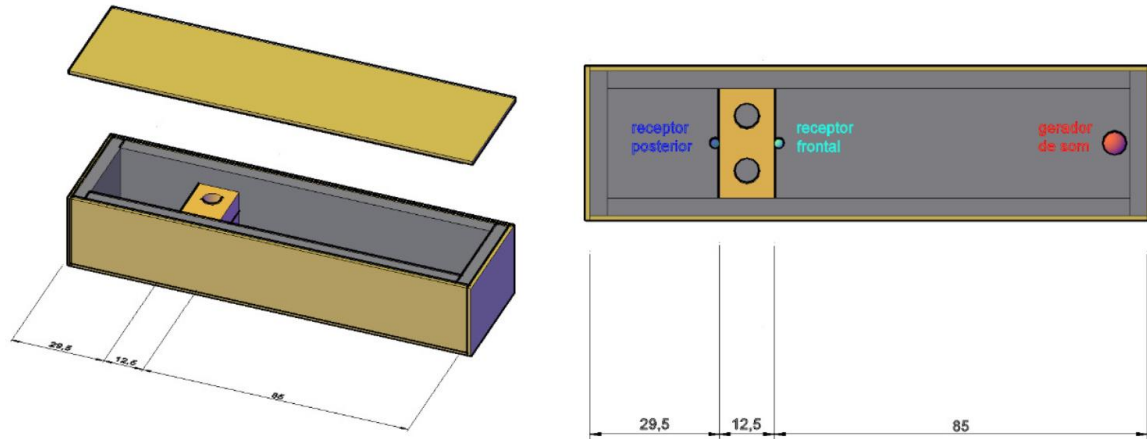


Figura 24 – Aparato acústico

Fonte: Proprio autor

O aparato foi moldado segundo as dimensões das amostras, sendo dois tijolos medindo 12,5 x 25 x 6,7 cm sobrepostos. Para garantir a vedação das arestas dos corpos de prova de acordo com a norma americana ASTM E1050-12, foi utilizado vaselina entre os corpos de provas e o aparato. Sendo construído assim de MDF – Medium Density Fiber e Poliestireno Expandido ($\lambda = 0,035 \text{ W/m.K}$). Foram colocados três decibelímetros da marca Instrutherm, modelo DEC-405, posicionados no exterior do aparato com o objetivo de determinar o ruído de fundo, a Figura 25 mostra a realização do ensaio.

A construção do aparato seguiu as orientações previstos pela norma ASTM E1050 – 12, que estabelece a necessidade de uso de um aparato na forma retangular tomado como base a multiplicação por 3 vezes do maior lado do corpo de prova fabricado, que neste caso foi de (3 x 250 mm) e somando aos espaços ocupados pelo aparelho emissor e pelo receptor de som obtendo 115,0 cm). Essa relação proporcional é importante para que possa garantir que a onda emitida pela fonte sonora se estabilize até chegar ao leitor prévio e ao corpo de prova.

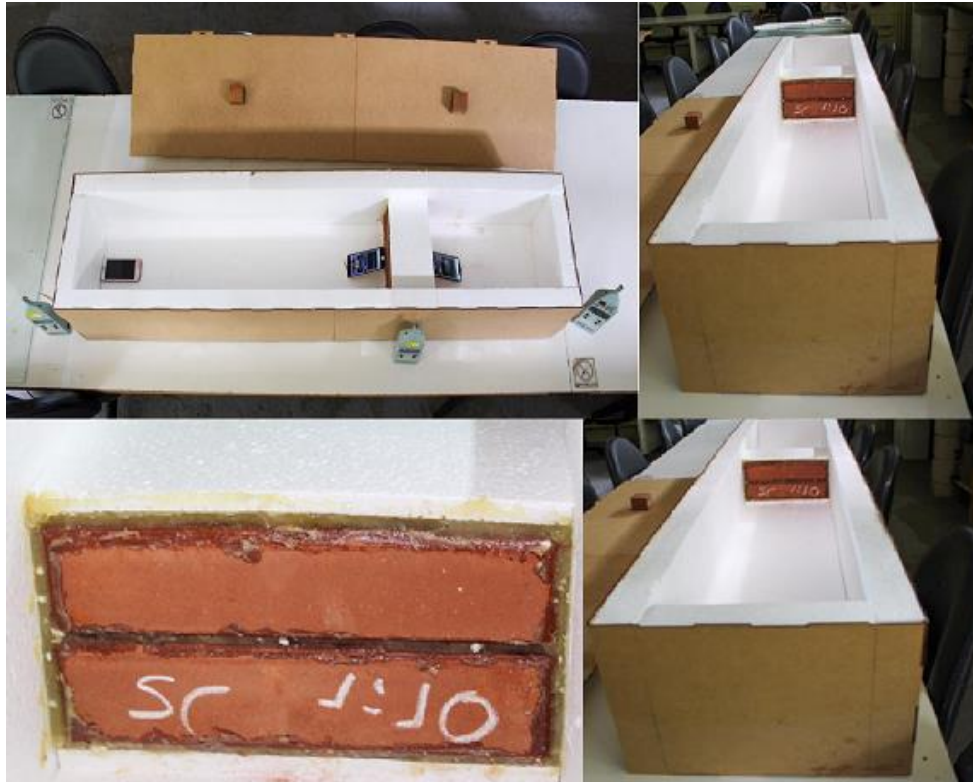


Figura 25 – Aparato acústico para ensaio de atenuação sonora.

Fonte: Proprio autor

A emissão se deu por meio de um aplicativo IOS chamado “Function Sound Generator” um som grave com frequência de 250 Hz durante um minuto, enquanto que outros dois aparelhos IOS, registravam as leituras por meio do aplicativo “Decibel X Pro”, do nível sonoro ponderado em curva A (efetua medições do ruído de acordo com a sensibilidade do ouvido humano) e ponderação temporal Fast (135 ms). Deste modo, o procedimento foi repetido por duas vezes, mudando a frequência para 1000 Hz e depois para 4000 Hz. Os *smartphones* foram previamente ajustados pelo método de comparação através de decibelímetros calibrados.

De acordo com a ISO 10140-4 a duração de emissão e captação do som, deve ser de no mínimo 4 segundos (para frequências maiores que 400 Hz) e 6 segundos (para frequências entre 100 e 400 Hz). Seguindo essa orientação foi estabelecido três frequências (250 Hz, 1000 Hz, 4000 Hz) classificadas como: baixa, média e alta, de acordo com estudos realizados essa faixa são de frequências da voz humana, sendo medidas em um tempo de aproximadamente um minuto.

A partir dos valores obtidos de entrada e saída do nível sonoro, foi possível determinar a atenuação sonora resultante dos tijolos de cada traço.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais desenvolvidos para este trabalho. Em primeiro lugar, estão os resultados e discussões das caracterizações dos materiais e, em seguida, são apresentados os resultados e discussões dos ensaios tecnológicos dos tijolos.

4.1. FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

Foram realizados os ensaios de fluorescência de raios X das amostras de solo 1 (solo mais arenoso), solo 2 (solo mais argiloso), RCC e o RPPO.

A Tabela 10 apresenta as análises químicas das amostras analisadas.

Tabela 10 – Composição (massa%) das amostras de Solo 1, Solo 2, RCC e RPPO

Constituintes (%)	Solo 1	Solo 2	RCC	RPPO
SiO ₂	73,427	66,177	58,594	64,807
CaO	-	0,144	24,046	6,110
Al ₂ O ₃	18,593	24,580	10,168	17,326
Fe ₂ O ₃	3,452	6,570	3,593	5,308
TiO ₂	2,443	1,935	1,237	1,139
SO ₃	0,342	0,351	1,085	0,277
K ₂ O	1,570	0,126	0,991	4,597
MnO	0,043	0,030	0,092	0,083
ZrO ₂	0,060	0,090	0,067	0,093
SrO	0,003	-	0,035	0,069
V ₂ O ₅	-	-	0,035	0,068
CuO	0,014	0,16	0,023	0,050
	100%	100%	100%	100%

Nos solos 1 e 2, verificou-se a presença majoritária de 73,4 % e 66,1 % de óxido de silício, em seguida 18,5% e 24,5% de óxido de alumínio e 3,4% e 6,5% de óxido de ferro, respectivamente. Esses elementos são encontrados em solos da região de Presidente Prudente - SP de acordo com Gaspareto e colaboradores [64], que realizaram a caracterização de solos da região, identificando os mesmos elementos. As características predominantes como alto teor de silício e a presença de óxidos de ferro confere uma coloração avermelhada aos solos.

A composição química da amostra de RCC, apresentou 58,5% de óxido de silício, como esperado, visto que o RCC é um subproduto de materiais naturais como areia, agregados graúdos, solos, que tem como elemento majoritário o óxido

de silício. Os óxidos de cálcio (24,0%), alumínio (10,1%) e ferro (3,5%) estão associados ao cimento e cal, produtos com vasta utilização na indústria da construção civil, conforme observado por Gaspareto e colaboradores [64].

A amostra de RPPO é constituída predominantemente de SiO_2 (64,8%), Al_2O_3 (17,3%), contendo também CaO (6,1%), Fe_2O_3 (5,3%) e K_2O (4,5%). Os altos teores de SiO_2 e Al_2O_3 obtidos são típicos de rochas ígneas graníticas. O CaO e Fe_2O_3 podem estar associados a composição química do granito, dado que algumas rochas graníticas contêm essas composições, podendo ainda serem encontrados em constituintes lubrificantes e abrasivos utilizados no processo de corte e serragem do granito. De acordo com Moreira e colaboradores [36], incorporações de resíduos provenientes de mármore e granitos à argila resultam em alterações apenas dos teores dos óxidos de cálcio e de ferro, sendo que os óxidos de silício e alumínio serão mantidos como componentes majoritários [35, 100].

4.2. DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Os solos, RCC e RPPO também foram caracterizadas por DRX e os difratogramas estão apresentados respectivamente nas Figuras 26, 27 e 28. Essa técnica foi realizada como complemento a técnica de fluorescência de raios X.

Os difratogramas das amostras de solo 1 e 2 indicado na Figura 26, foram identificadas duas fases cristalinas, quartzo SiO_2 e Clorita $\text{Al-Fe-SiO}_2\text{-O}$ (hidróxido de silicato de alumínio e ferro). A fase clorita é um nome dado a vários argilominerais que são difíceis de se distinguir por métodos comuns. Estes minerais são todos encontrados no grupo de Cloritas de minerais. Cloritas são, em geral, considerados pertencentes ao grupo de filosilicatos encontrado nas argilas. Este mineral está associado a: biotita $\text{K}(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH},\text{F})_2$, quartzo SiO_2 , magnetita Fe_3O_4 , entre outros de acordo com Pal e colaboradores [101] e Albers e colaboradores [102], podem apresentar-se pelas cores verde, amarelo, rosa, vermelho, marrom.

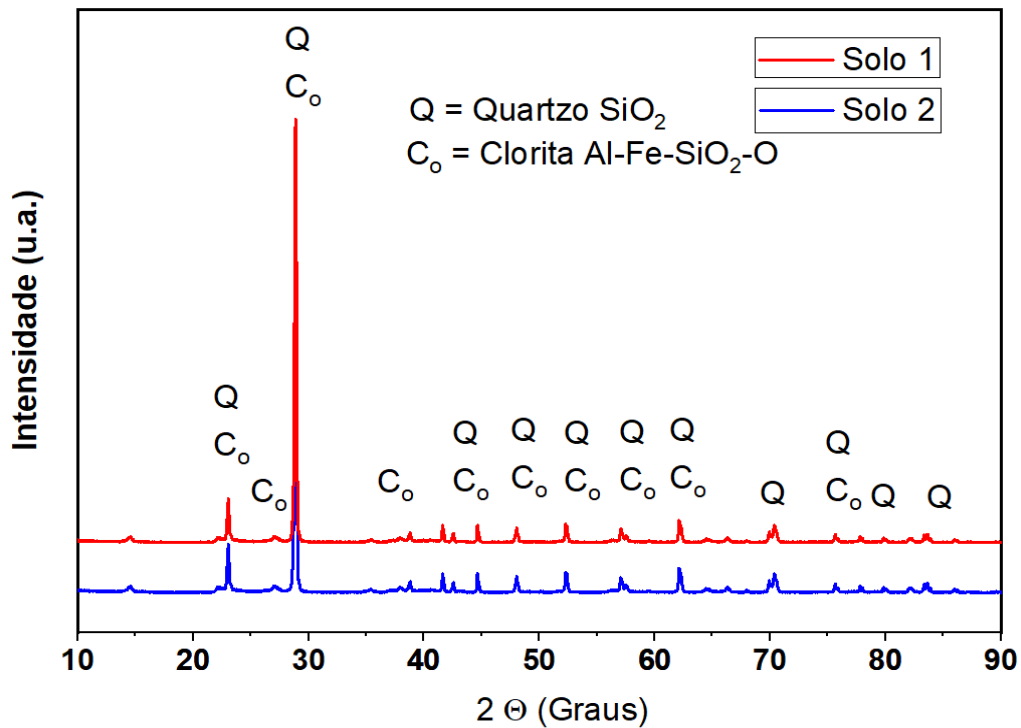


Figura 26 – Difração de raios X realizada para solo 1 e 2

O difratograma do RCC apresentado na Figura 27, mostra a presença de picos de difração das fases cristalinas referente ao quartzo (SiO_2), carbonato de cálcio (CaCO_3) e óxido de alumínio (Al_2O_3). Também foram identificados na análise de FRX. O quartzo é da classe mineral dos tectossilicatos e representa 12% das rochas da crosta terrestre. O óxido de cálcio encontrado pode estar associado a Calcita, dominante em rochas sedimentares. Essas fases também podem estarem relacionados a natureza do próprio resíduo sendo constituído por cimento e cal (CaCO_3), agregados (SiO_2), e solos (Al_2O_3).

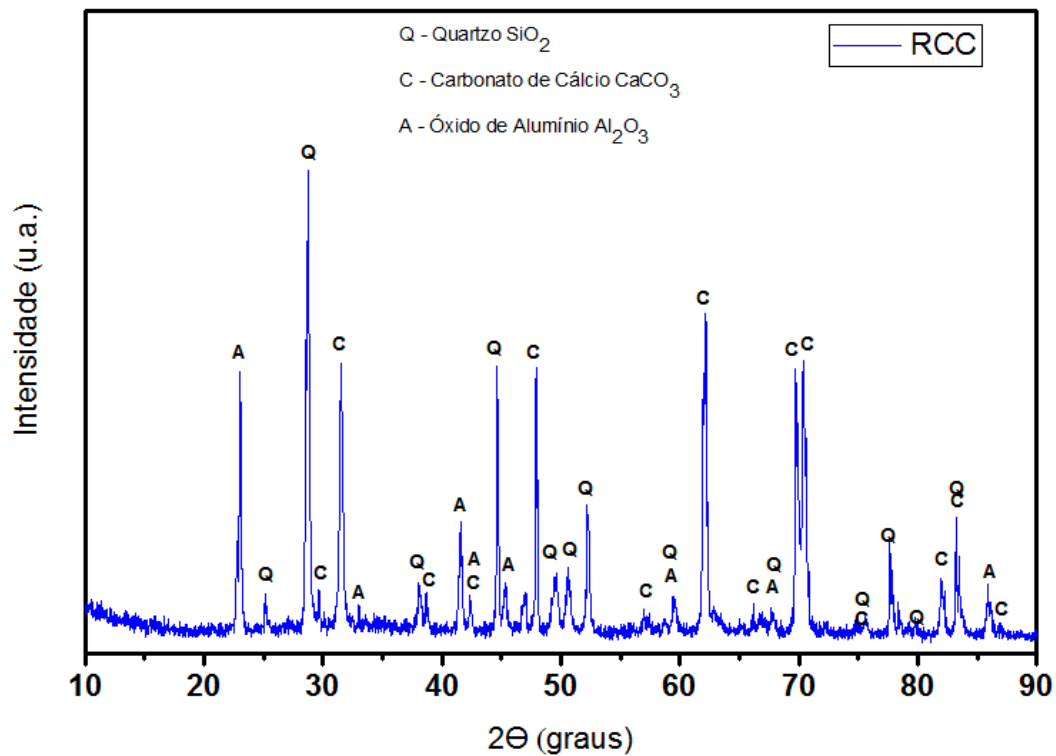


Figura 27 – Difração de raios X realizada para RCC

A Figura 28 apresenta o difratograma de raios X do RPPO. Nota-se que é constituído predominantemente por óxido de silício, mostrando a fase cristalina do quartzo característico do granito, como também foi identificado pela fluorescência de Raios X, apresentando 64% de (SiO_2). O carbonato de cálcio mostra a fase cristalina da Calcita (CaCO_3) que está presente tanto no mármore quanto na fabricação do cimento e da cal.

As fases cristalinas referentes ao óxido de alumínio Al_2O_3 podem estar associadas a Caulinita e Mica ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e Albite identificado como feldspato sódico – ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Também foram encontrados nas análises realizadas por Moreira e colaboradores [36] que utilizaram o resíduo como carga em cerâmicas vermelhas e Silva e colaboradores [35], aplicando-os em massas argilosas.

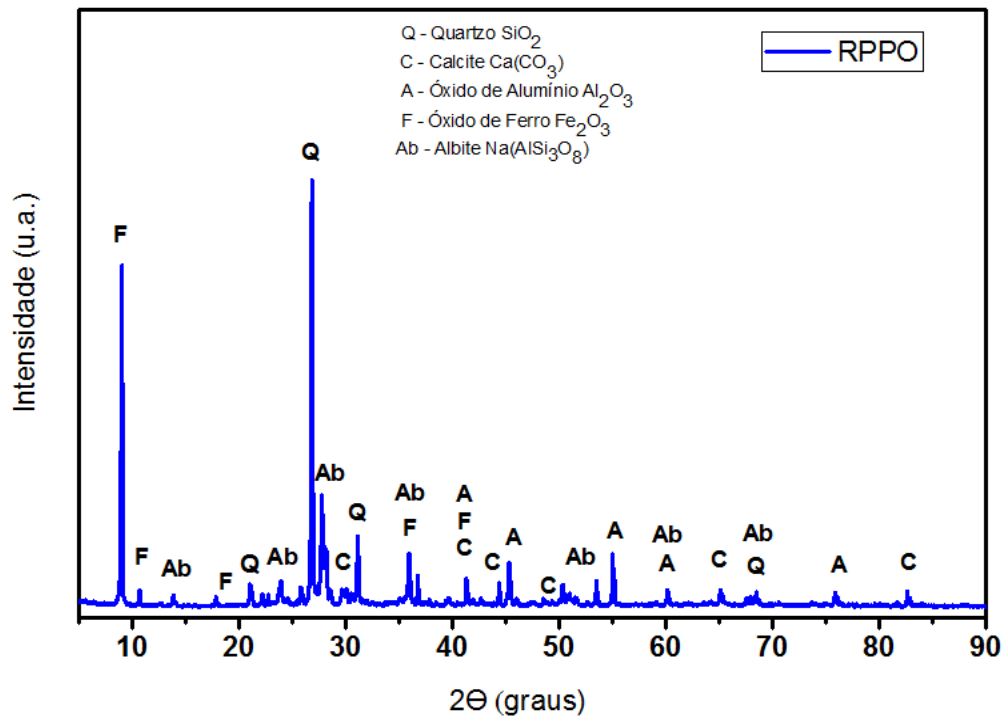


Figura 28 – Difração de raios X realizada para RPPO

Esses resultados eram esperados em virtude dos estudos realizados, o RCC e o RPPO mesmo sendo caracterizados como rejeito, seus resultados mostraram que os elementos presentes em suas composições, são comumente encontradas em materiais naturais, demonstrando a possibilidade de reutilização dos mesmos na manufatura de tijolos e afins [13, 14, 35, 36].

Contudo de acordo com Ashish [21] e Bacarji e colaboradores [13], o RPPO deve ser adicionado com cautela, pois para resíduos com composições predominantemente de óxidos de silício, não oferece propriedade pozolânica, servindo somente como preenchimento de vazios o que, em quantidades adequadas, pode contribuir para a resistência à compressão, mas, se em excesso, tendem a propiciar a redução da resistência à compressão.

O RCC apresenta-se com percentuais maiores de CaCO_3 , o que poderia indicar uma contribuição no ganho de resistência à compressão em virtude desse material também estar presente no cimento Portland.

4.3. MASSA ESPECÍFICA DO GRÃO

As massas específicas do grão (ou absolutas) dos resíduos são apresentadas na Tabela 11. O resultado para RCC foi de 2,54 g/cm³, valor relativamente alto para um agregado reciclado, sendo que para um agregado natural foi encontrado 2,84 g/cm³ por Tavares [103]. Esse valor pode ter ocorrido pela quantidade de finos que compõem o RCC, como mostra os resultados de granulometria de acordo com a ABNT NBR NM 248:2003, que foram usadas as peneiras com abertura de malha entre 4,76 mm a 0,0074 mm.

Outro aspecto que pode ter influenciado é a natureza do próprio resíduo, sendo originado por materiais naturais como, areia, cimento, cal, solo, gesso, pedras.

Contudo o aspecto principal do RCC é definido pela rugosidade de seus grãos que apresenta argamassa aderida a sua superfície de sua antiga matriz cimentícia, compreendendo-se o resultado de 2,54 g/cm³, dentro do esperado, sendo um valor menor do que de um agregado natural.

O RPPO apresenta resultado de 2,66 g/cm³. A variação encontrada entre o RCC e RPPO era esperada, de modo que existem diferenças quanto a natureza dos mesmos. O RPPO é composto predominantemente por minerais naturais, como foi possível identificar no difratograma de raios X, mostrando a presença de fases cristalinas de Quartzo, Calcita, podendo ter contribuído para o valor de 2,66 g/m³. De acordo com Siqueira 2013 [30], a massa específica do mineral quartzo varia entre 2,65 a 2,67 g/cm³.

Tabela 11 – Massa específica – RCC e RPPO

Amostra	NM 52
RCC	2,54 g/cm ³
RPPO	2,66 g/cm ³

Fonte: Próprio autor

Não foram realizados os ensaios de massa específicas para o cimento e solos, visto que massa específica realizada nesse estudo teve caráter de caracterização dos resíduos utilizados e não para efeito de cálculo para traços.

4.4. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Os dados obtidos por meio do ensaio de granulometria, estão apresentados nas Tabelas 12, 13 e 14. Os gráficos de limite ótimo e utilizado para agregados miúdos foram elaborados seguindo a ABNT NBR 7211:2019.

As zonas de limite ótima e utilizável aplicadas a este estudo, tem intuito de classificar os resíduos quanto a sua utilização para solo-cimentos bem como de maneira geral, pois esses limites podem ajudar em análises posteriores.

Tabela 12 – Granulometria solo natural

Solo Natural – 1000 g							
Peneira	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	% Retida Acumulada	Limites Zona Utilizável (%)		Limites Zona Ótima (%)	
4	4,76	0,00	0,0	0	10	0	5
8	2,38	185,00	18,5	0	25	10	20
16	1,19	70,00	25,5	5	50	20	30
30	0,59	235,00	49,0	15	70	35	55
50	0,29	140,00	63,0	50	95	65	85
100	0,149	230,00	86,0	85	100	90	95
200	0,0074	90,00	95,0	-	-	-	-
FUNDO	0	50,00	100,0	-	-	-	-
Conforme ABNT NBR NM 248:2003				Conforme ABNT NBR 7211: 2019			

Fonte: Próprio autor

Tabela 13 – Granulometria do RCC

RCC – 1000 g							
Peneira	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	% Retida Acumulada	Limites Zona Utilizável (%)		Limites Zona Ótima (%)	
4	4,76	0,00	0,0	0	10	0	5
8	2,38	46,00	4,6	0	25	10	20
16	1,19	146,00	19,2	5	50	20	30
30	0,59	416,00	60,8	15	70	35	55
50	0,29	150,00	75,8	50	95	65	85
100	0,149	132,00	89,0	85	100	90	95
200	0,0074	60,00	95,0	-	-	-	-
FUNDO	0	50,00	100,0	-	-	-	-
Conforme ABNT NBR NM 248:2003				Conforme ABNT NBR 7211: 2019			

Fonte: Próprio autor

Tabela 14 – Granulometria do RPPO

Peneira	Abertura (mm)	RPPO – 1000 g		Limites Zona Utilizável (%)		Limites Zona Ótima (%)	
		Massa Retida (g)	% Retida Acumulada				
4	4,76	16,00	1,6	0	10	0	5
8	2,38	14,00	3,0	0	25	10	20
16	1,19	40,00	7,0	5	50	20	30
30	0,59	82,00	15,2	15	70	35	55
50	0,29	36,00	18,8	50	95	65	85
100	0,149	320,00	50,8	85	100	90	95
200	0,0074	388,00	89,6	-	-	-	-
FUNDO	0	104,00	100,0	-	-	-	-

Conforme ABNT NBR NM 248:2003 **Conforme ABNT NBR 7211: 2019**

Fonte: Próprio autor

Por meio dos dados obtidos das Tabelas foi possível obter as curvas granulométricas, como mostra a Figura 29.

O solo utilizado está parcialmente inserido nas faixas granulométricas de zona de limite utilizável, mostrando que contém mais da metade dentro dos limites ótimos, sendo dentre as peneiras (4, 8, 16, 30 e 50). O RCC apresenta comportamento semelhante ao solo, estando inserido boa parte dentro dos limites ótimos e com uma pequena parcela dentro dos limites utilizáveis. O RPPO encontra-se com uma pequena parcela inserida dentro dos limites utilizáveis.

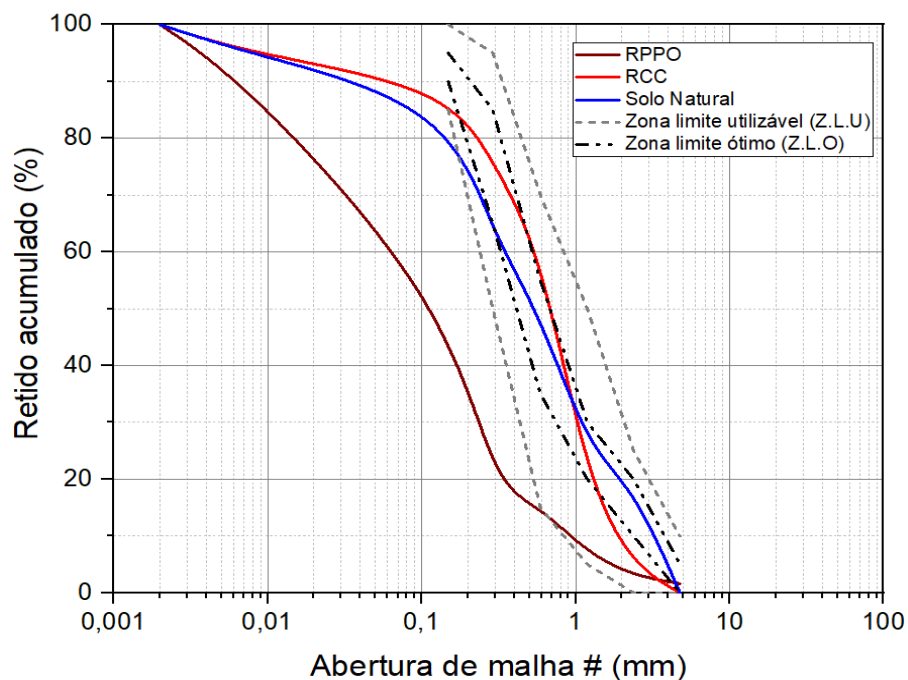


Figura 29 – Curvas Granulométricas, Solo, RCC e RPPO

De acordo com as curvas granulométricas relativas ao RCC e solo natural é possível identificar que são constituídos predominantemente por areia, o que pode ser confirmado por meio dos resultados de Fluorescência e Difração de Raios X. A partir da análise das curvas, observa-se que o RCC tem distribuição granulométrica contínua, fator que deve proporcionar um empacotamento satisfatório dos grãos. Matias e colaboradores [60] e Souza e colaboradores [63] optaram por inserir somente as faixas granulométricas que se encaixam dentro das zonas de limite ótimo e utilizável, por estarem mais próximos aos agregados miúdos naturais como a areia.

O RPPO caracteriza-se pelo excesso de finos, sua maior parcela está entre as peneiras (30, 50, 100 e 200), com 74,4% retido, estando dentro da faixa de material siltoso, o percentual de areia contém apenas 15,2%, o que de acordo com Souza e colaboradores [62] para solo-cimento, o ideal é que tenha predominância de solos arenosos, e de acordo com Bragança [29], o percentual de solos arenoso para uma mistura de solo-cimento deve estar entre 45% a 75%.

Deste modo, o RPPO deve ser inserido em pequenas quantidades para avaliar a possibilidade de contribuir com material filler, tal como o filler existente no cimento Portland composto CP II F, com efeito de preencher os vazios da mistura de solo-cimento [26].

4.5. ANÁLISE TEXTURAL

Na Tabela 15, apresentam-se os resultados da análise textural dos solos. Verifica-se que o solo 1 utilizado possui 80,2% da fração areia ($>75 \mu\text{m}$), 6,6% da fração silte ($2 - 75 \mu\text{m}$) e 13,1% da fração argila ($< 2 \mu\text{m}$), e o solo 2 com 55,4% da fração areia ($>75 \mu\text{m}$), 26,7% da fração silte ($2 - 75 \mu\text{m}$) e 22,8% da fração argila ($< 2 \mu\text{m}$), confirmando as análises de FRX e DRX as quais indicaram alto teor de silício. Demonstra-se que o solo utilizado é predominantemente arenoso, como igualmente identificado pelo ensaio de granulometria, podendo ser encontradas partículas de quartzo, comumente presentes na faixa granulométrica das areias. Na fração argila geralmente são encontrados os óxidos de alumínio, ferro e magnésio. Com a junção dos solos tem-se então um somatório dessas frações, e um solo resultante com 67,8% de fração de areia, 17,4% de argila e 14,7% de silte.

Tabela 15 – Análise textural dos solos 1 e 2.

Amostra	Solo 1		Solo 2	
	g/Kg	%	g/Kg	%
Areia	802,56	80,26	554,67	55,47
Argila	131,33	13,13	217,00	21,70
Silte	66,10	6,61	228,33	22,83
Análise Textural	Franco arenoso		Franco argilo arenoso	

Fonte: Próprio autor

De acordo com Barros [15], a fração de areia no solo para que o mesmo seja utilizado na produção solo-cimento é de 45% a 70%, bem semelhante a Bragança [29], o que conferiria uma distribuição granulométrica contínua com possibilidade de resultar em maior densidade à mistura, devido a melhor acomodação dos grãos, podendo favorecer tanto o ganho de resistência mecânica quanto de minimizar a absorção de água. A Figura 30 mostra a realização do ensaio de análise textural e suas fases.

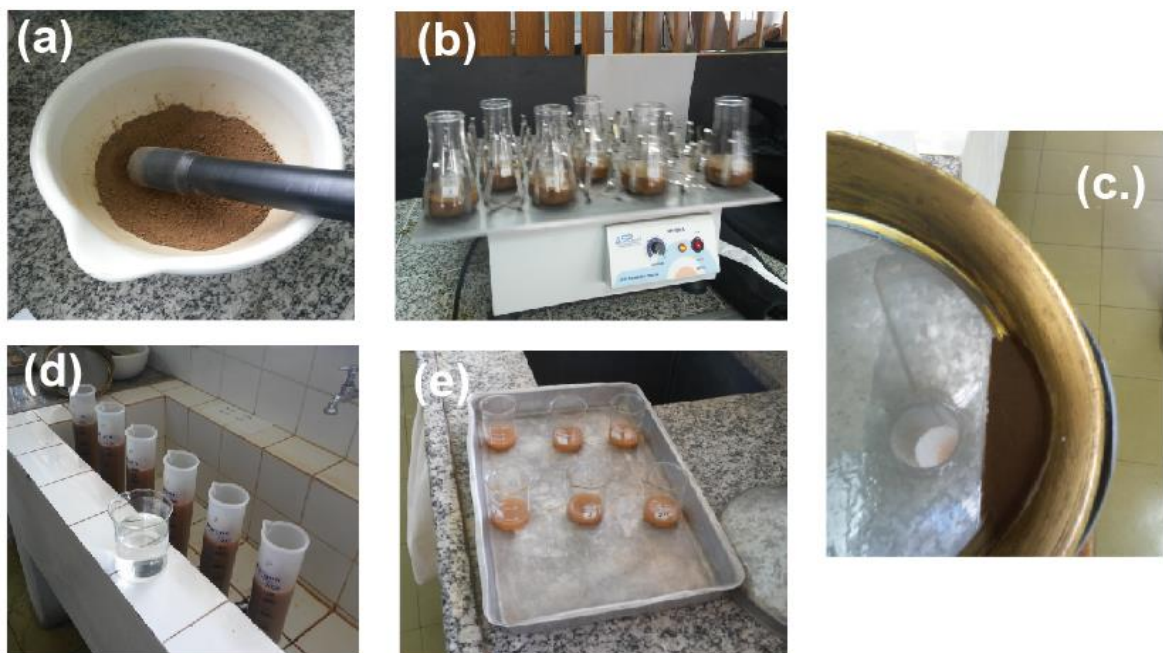


Figura 30 – (a) Destorroamento da amostra; (b) agitação; (c) fração de areia; (d) fração de silte e (e) fração de argila.

Fonte: próprio autor

4.6. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG)

A Figura 31 apresenta o TG/DTG do TSRC T1 1:8 10% RPPO. Foi escolhido somente uma amostra para conhecer o comportamento de perda de massa em relação a temperatura exposta, não havendo a necessidade de ser aplicar os outros traços por terem os mesmos constituintes.

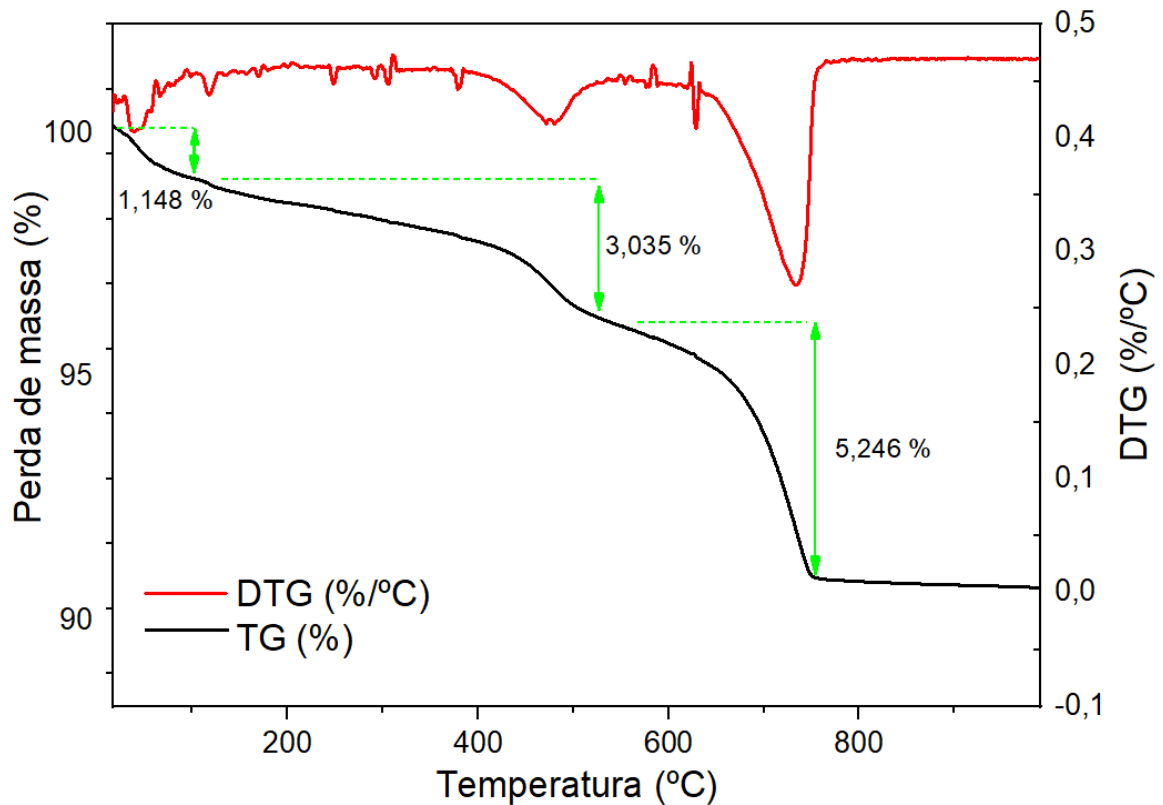


Figura 31 – TG/DTG do TSRC T1 1:8 10% RPPO

O primeiro evento acontece da temperatura ambiente até aproximadamente 100 °C e está relacionado a perda de água absorvida ou umidade da amostra. As perdas intermediárias entre 110 °C até 400 °C podem estar associadas à perda das hidroxilas pelo hidróxido de alumínio, uma vez que o resultado do FRX indicou a presença de Al_2O_3 , ou a queima da matéria orgânica de acordo com Gaspareto e colaboradores [64].

O segundo evento térmico que se inicia em, aproximadamente, 400 °C e se estende até 550 °C, pode associar-se a dois eventos, um corresponde à desidroxilação da caulinita, ou seja na transformação da caulinita em metacaulinita ou desidratação do hidróxido de cálcio [41]. Uma perda de massa de 5,246 % ocorre

em torno de 650 a 780°C e pode estar associada é a decomposição térmica do CaCO_3 [37,64].

De acordo com Aliabdo e colaboradores [37], que analisou o RPPO para aplicação em concreto, estes autores concluíram que a relação entre a massa relativa das amostras e suas massas originais e a temperatura aplicada, sendo dentro da faixa de temperatura de 450 a 500 °C, não afeta drasticamente a perda de massa do hidróxido de cálcio, não tendo assim mudança na fase química, o que mostra que o RPPO não tem papel reativo no processo de hidratação do cimento.

4.7. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA

A Figura 32 ilustra a microscopia eletrônica de varredura (MEV) do RPPO. Nota-se que esta amostra é constituída por sólidos irregulares com formatos angular, pontiagudos e arredondados.

Na Figura 32(a), na ampliação de 1000X, é possível identificar partículas densas de tamanhos variados. Na Figura 32(b), ampliação de 4000X, é identificado a presença de aglomerados nas superfícies dos grãos do RPPO. As variações das partículas foram calculadas e apresentaram partículas entre 2,2 a 37 μm .

A presença de partículas que se destacam pelo tamanho e pela forma, são característicos do carbonato de cálcio (CaCO_3) observado por Vardhan e colaboradores [43] em seus estudos. O EDS apresentado na Figura 33 revela-se os elementos Si, Ca, Fe, que também foram encontrados na análise química de FRX, Tabela 10.

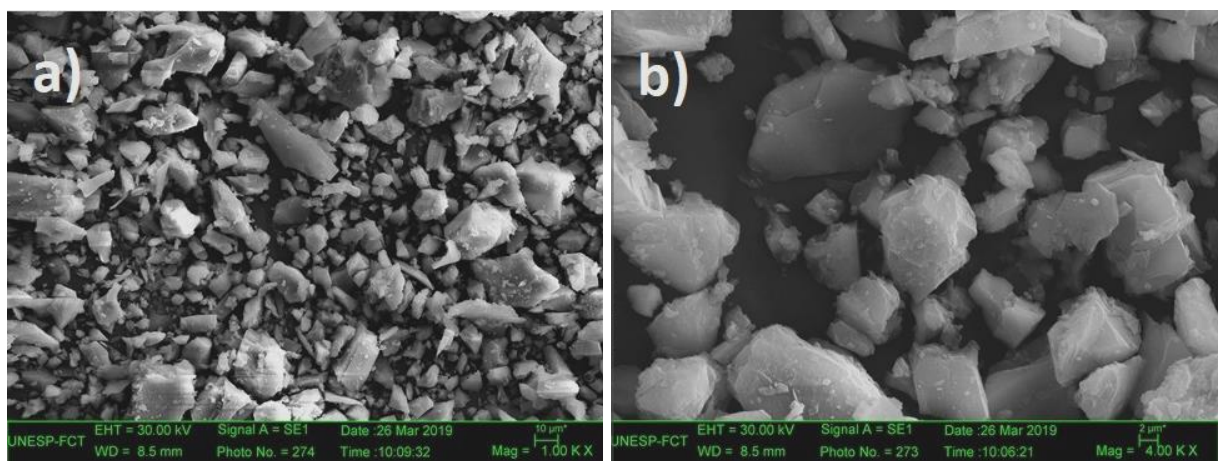


Figura 32 – RPPO com ampliação de (a) 1000X e (b) 4000X

O resultado do EDS na Figura 33, identifica a presença O, C, Na, Mg, Al, Si, Cl, K, Ca, Ti, Fe e Cu, revelando os elementos esperados para o RPPO. A presença desses elementos é também apontada pelos minerais encontrados na análise química, Tabela 10.

O elemento ouro (Au) identificado no espectro de EDS, Figura 33, é devido ao recobrimento metálico realizado na amostra para execução da análise.

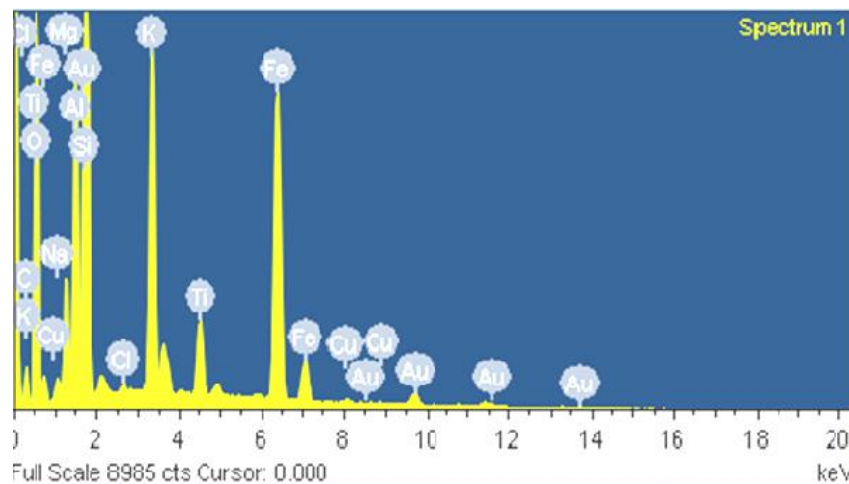


Figura 33 – EDS RPPO 1000X

Na Figura 34(a), ampliação de 1000X, observa-se que a forma do RCC é desordenada, heterogênea e de tamanhos variados, bem como é possível identificar partículas, arredondadas e pontiagudas. Na Figura 34(b), ampliação de 4000X, é visível a presença de pequenos fragmentos aglomerados em sua superfície e grãos de aspecto esponjoso medindo 20 μm .

Os diâmetros das partículas foram avaliados, tendo ficado na faixa entre 2 a 53 μm .

Os poros e os diferentes formatos encontrados podem ser explicados pela variedade de materiais que constitui o RCC, como cimento, cal, areia, rochas entre outros. Contudo, ao sofrerem a ação dos esforços da estrutura e de grandes tensões de ruptura no processo de britagem, esses resíduos podem perder suas características originais e ainda sofrer transformações que, de acordo com Tavares e colaboradores e Thomas e colaboradores [54,57], prejudicam na aderência e absorção dos grãos com matrizes cimentícias.

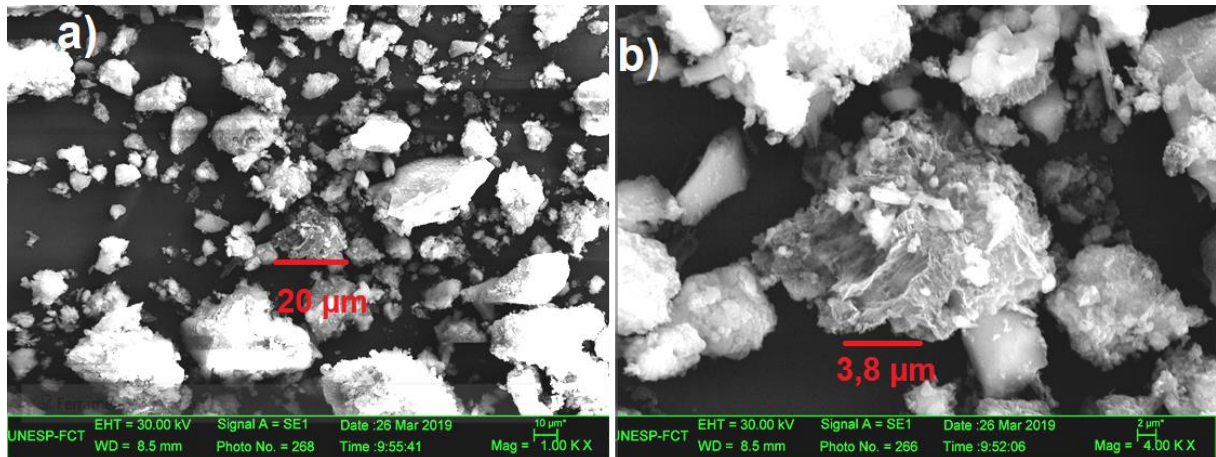


Figura 34 – RCC com ampliação de (a) 1000X e (b) 4000X

No espectro de EDS na Figura 35, identifica-se a presença de O, C, Mg, Al, Si, S, K, Ca, e Fe; estes resultados estão em concordância com o resultado de FRX e DRX.

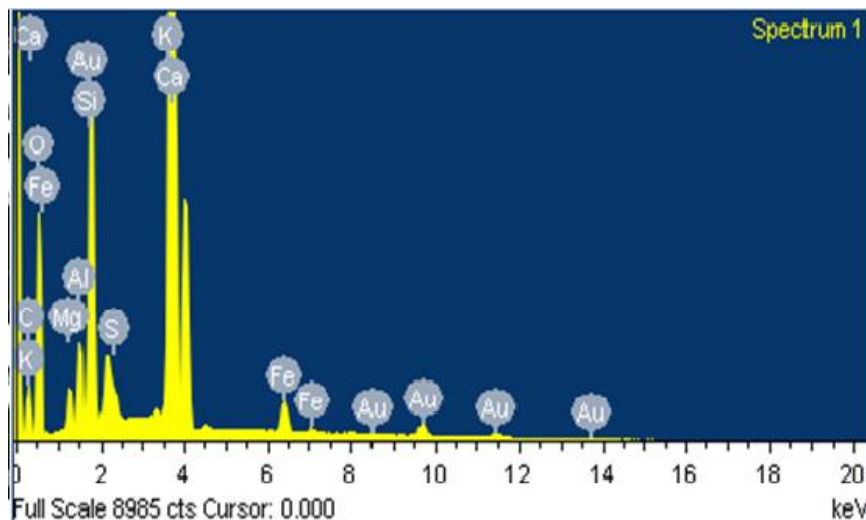


Figura 35 – EDS RPPO 1000X

As imagens microestruturais da amostra do TSRC T2 1:8 20% RPPO é apresentada na Figura 36. A escolha por realizar o MEV somente desse traço se deu na intenção de analisar a interação dos constituintes no compósito, visto que entre os traços T1 e T2 com incorporação de RPPO não observou-se diferenças significativas quanto ao ensaio de resistência à compressão mostrado mais a frente nesse estudo.

A amostra com incorporação de 20% de RPPO apresenta uma estrutura homogênea com cobertura satisfatória dos grãos, entretanto, é notório a formação

de poros abertos de forma irregular em alguns pontos interconectados, assim como microfissuras.

De acordo com Vardhan e colaboradores [43], que identificaram a formação de poros com o aumento da incorporação de RPPO em seus espécimes de até 50%, quanto maior a incorporação maior o número de poros observado.

No TSRC T1 1:8 20% RPPO não foi possível analisar tendência por ser tratar de somente uma amostra.

Aliabdo e colaboradores [37], identificaram que, incorporações de até 15% de RPPO em tijolos queimados, o resíduo apresenta características de preenchimento de poros.

Outro aspecto que pode ter contribuído para a formação de poros seria a incorporação do RCC que de acordo com a Figura 34(b), é constituído de grãos com sulcos medindo 0,8 μm , 1,0 μm , 3,8 μm , 4,3 μm aproximadamente dentro de uma partícula medindo 20 μm , não comportaria um preenchimento total, visto que os grãos de RPPO que poderiam exercer essa função estão medindo entre a faixa de 2,2 a 37 μm .

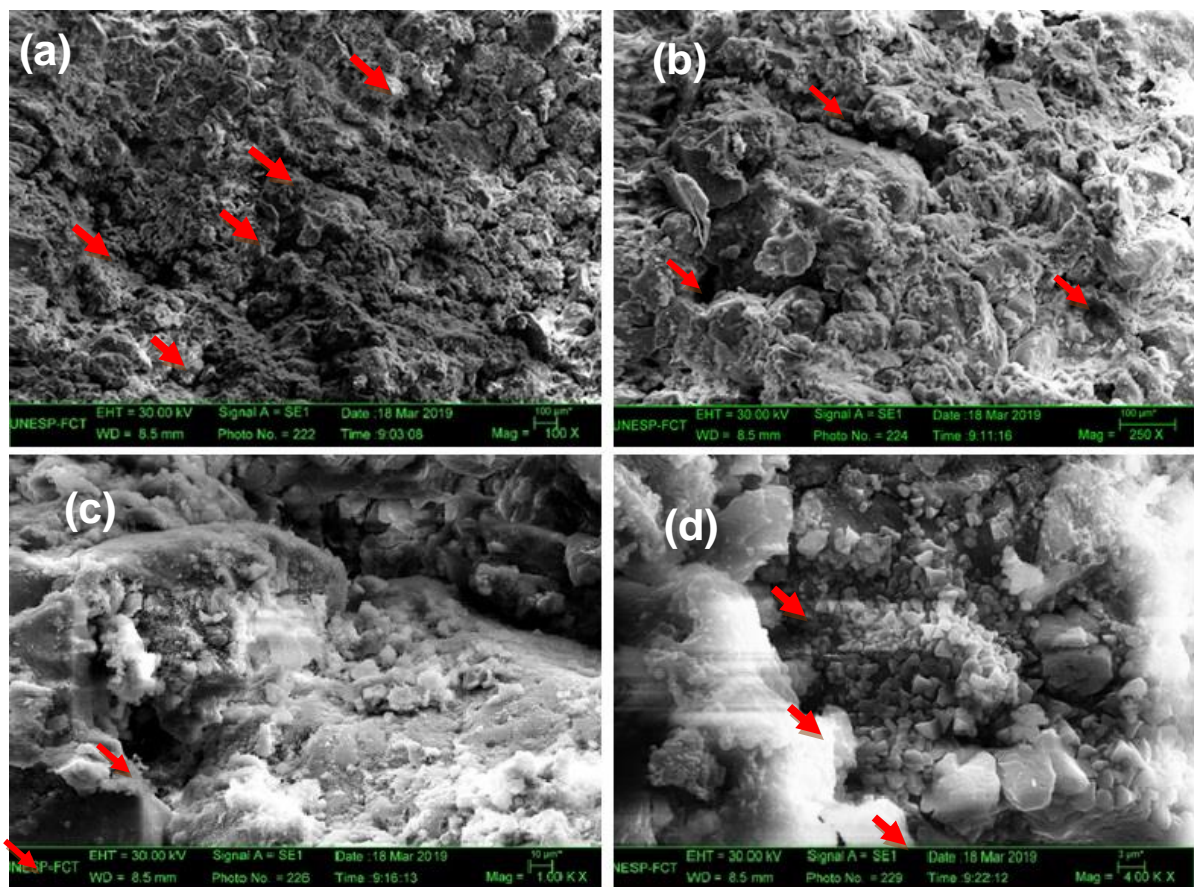


Figura 36 – TSRC – T1 – 1:8 – 10% RPPO com ampliação de (a) 100X, (b) 250X, (c) 1000X e (d) 4000X

Conforme o espectro de EDS na Figura 37, identifica-se a presença de O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Mn e Fe; estes resultados estão em concordância com o resultado de FRX e DRX.

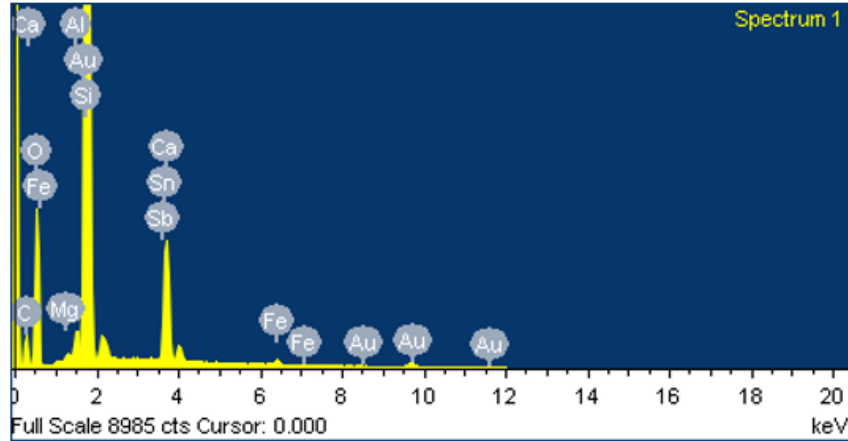


Figura 37 – EDS do TSRC – T1 – 1:8 – 10% RPPO 1000x

4.8. ANÁLISE DIMENSIONAL

A análise dimensional realizada nos TSRCs, atendem as especificações da ABNT NBR 8492:2012, foi possível comparar os valores de comprimento, largura e altura. Na Figura 38, tem-se o gráfico representativo das médias e desvio padrão dos Tc1 1:8 Tc2 1:10, Tc3 1:12, T1 1:8 10% RPPO, T2 1:8 20% RPPO, T3 1:10 10% RPPO, T4 1:10 20% RPPO, T5 1:12 10% RPPO e T6 1:12 20% RPPO do comprimento. Para essa medição foi utilizado régua metálica e esquadro, o desvio padrão Zero (0).

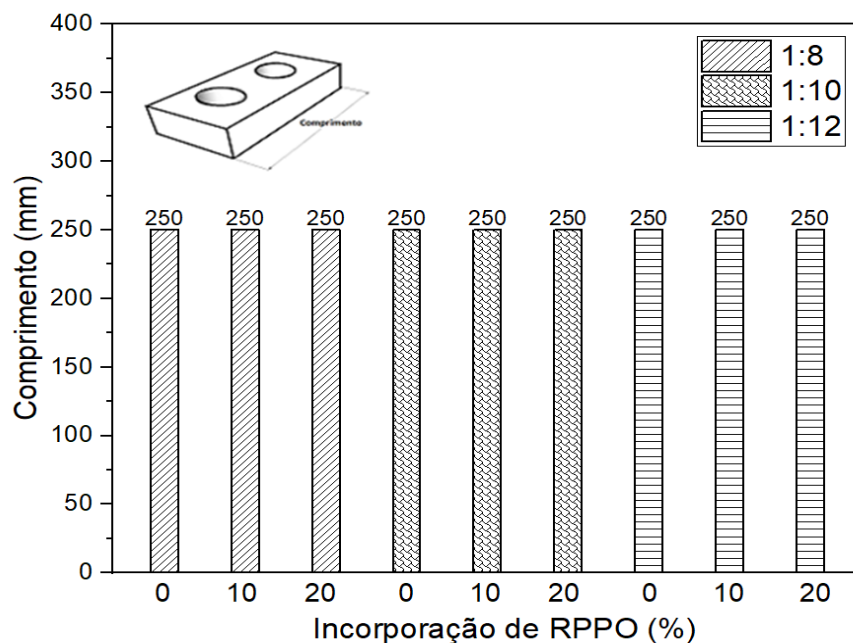


Figura 38 – Análise dimensional de comprimento

Na Figura 39, está o gráfico das médias dos Tc1, Tc2, Tc3, T1, T2, T3, T4, T5 e T6 de largura, apresentando 3 medidas fora dos padrões com 125,70 mm de largura nos TSRCs, Tc 1:10, T5 e T6. Variação menor que 0,5 mm.

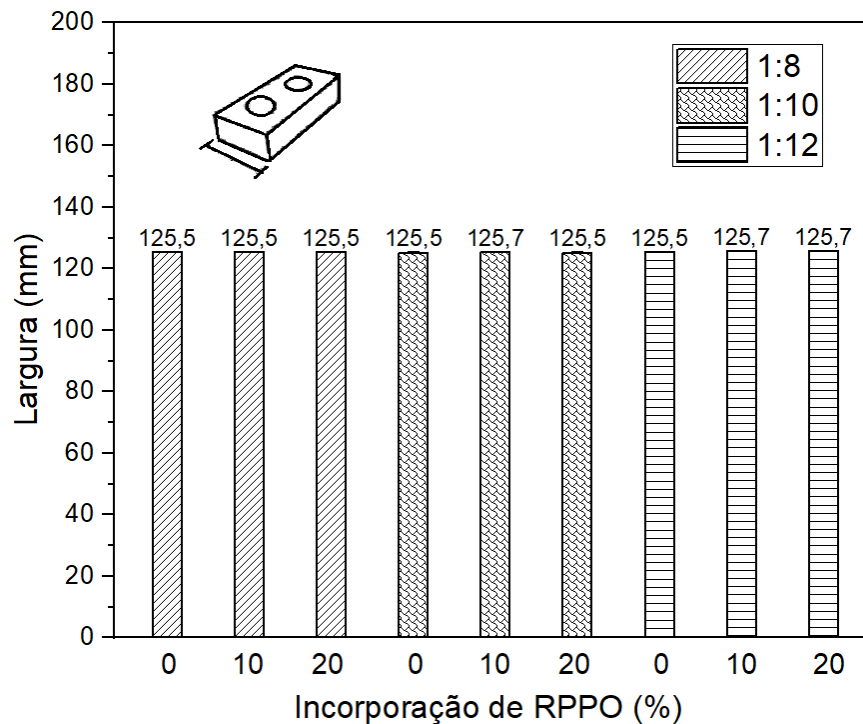


Figura 39 – Análise dimensional de largura

Já na Figura 40, tem-se o gráfico das médias e desvio padrão dos Tc1, Tc2, Tc3, T1, T2, T3, T4, T5 e T6 para altura, os quais apresentam desvio padrão de 0,45, 0,50, 0,55, 0,4, 0,48, 0,44, 0,28, 0,28, 0,61, respectivamente.

De acordo com os resultados, pode-se observar que há alterações nos valores da altura. Essa variação pode estar associada à regulação do equipamento quanto à altura, pois a força de prensagem utilizada foi a mesma para todos os traços.

Os TSRCs possuem em sua composição RCC, que tem distribuição granulométrica contínua podendo conter entre seus grãos rochas, concretos, areia, o que dificulta a prensagem levando a alturas maiores do no traço de solo-cimento composto sem resíduos.

Como se trata de prensa comercial com fôrmas metálicas, o comprimento e a largura deveriam apresentar pequenas variações dimensionais.

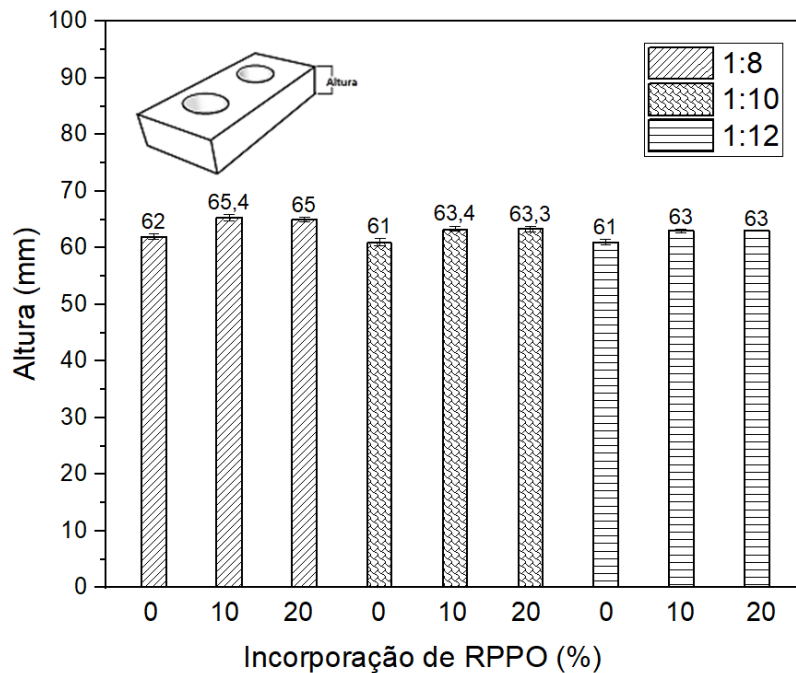


Figura 40 – Análise dimensional de Altura

4.9. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO, MASSA ESPECÍFICA APARENTE E ÍNDICE DE VAZIOS (POROSIDADE)

Em relação aos ensaios de absorção de água realizados pelo método de imersão, a Tabela 17 apresenta um resumo dos resultados. Os traços com a incorporação de resíduos obtiveram valores abaixo dos exigido por norma ABNT NBR 8492:2012 [72]. Estes mostram uma tendência de crescimento em relação ao acréscimo de resíduos. Todos os valores observados variaram entre 13,8% a 16,5%, estando entre os valores encontrados nas literaturas realizadas, mostrando que os tijolos apresentaram comportamento semelhante aos estudados por Barros e colaboradores [44], Tenório e colaboradores [56]. Entretanto, Llajaruna [45] observou resultado de 19,7% em seu compósito de solo + RCC e mármore.

Comparando as absorções nos traços T1 1:8 10% RPPO e T2 1:8 20% RPPO, nota-se um aumento de 13,8% e 14,2%, respectivamente, sendo de 0,4% a diferença entre eles. Esta é uma diferença relativamente pequena, entretanto o T2 com maior incorporação de RPPO, obteve maior absorção.

O RPPO é um material fino, ao passo que consegue ter característica de material de preenchimento. Contudo, tanto o RCC como o RPPO, o aumento de incorporação dos resíduos levaram a um aumento de absorção de água bem como

porosidade. A rugosidade superficial do RCC dificulta a adesão em matrizes cimentícias, auxiliando a formação de poros.

O MEV mostrou que o RPPO tem granulometria semelhantes ao RCC quanto ao tamanho de grãos, o que pode dificultar o preenchimento dos poros do RCC. Observa-se que a tendência de preenchimento de poros do compósito se deu para incorporações de RPPO em até 10%. Aparentemente, para os traços com 20% de RPPO foi a característica do RCC que mais predominou [44, 45, 56, 57].

Essa tendência seguiu-se para os TSRCs do mesmo grupo, ou seja, entre os T3 1:10 10% RPPO e T4 1:10 20% RPPO, e T5 1:12 10% RPPO e T6 1:12 20% RPPO.

Em se tratando dos traços de solo-cimento Tc1 1:8, Tc2 1:10 e Tc3 1:12, a absorção de água foi menor que nos TSRCs, apresentando os valores de 10, 11, e 12,8%, sendo o resultado esperado, por se tratar de solo arenoso, confirmado pelo ensaio de granulometria e análise textural. Porém, o grupo solo-cimento apresentou o mesmo comportamento de aumento identificado nos TSRCs.

Outro aspecto observado é que a quantidade de solo em relação a quantidade de cimento incorporado nas misturas pode ter favorecido para um aumento na absorção de água. Para baixas concentrações de cimento percebeu-se um aumento de poros na estrutura dos tijolos, afetando assim a absorção a água. Isso também pode ser observado nos ensaios de resistência à compressão, em que os traços de solo-cimento não obtiveram resultados satisfatórios a resistência à compressão simples [73,63].

Tabela 16 – Resultado de Absorção de água, porosidade, massa específica aparente seca

Traço	Média Abs. (%)	Porosidade (%)	Massa Específica Aparente seca (kg/cm³)
Tc1 – 1:8	10,0	19	1,91
Tc2 – 1:10	11,0	21	1,89
Tc3 – 1:12	12,8	24	1,80
T1 1:8 10% RPPO	13,9	24	1,79
T2 1:8 20% RPPO	14,2	25	1,75
T3 – 1:10 10% RPPO	15,3	27	1,74
T4 – 1:10 20% RPPO	16,1	28	1,72
T5 – 1:12 10% RPPO	16,4	29	1,72
T6 – 1:12 20% RPPO	16,5	29	1,72

Fonte: próprio autor

Na Figura 41 estão apresentados os resultados de densidade e porosidade dos tijolos, complementando o ensaio de absorção de água. De acordo com o gráfico, é possível identificar que os traços de solo-cimento, apresentam densidade mais alta em comparação aos TSRCs.

Os procedimentos para a obtenção da absorção de água, da densidade aparente e da porosidade trabalham com os mesmos dados, existindo uma correlação entre eles, que possibilita a realização de uma avaliação conjunta.

Conforme a absorção aumenta, a porosidade também, enquanto que a densidade diminui. Essa relação foi possível ser observada em todos os traços. Nos traços de solo-cimento é observado um declínio de sua densidade. Observa-se que para o Tc1 a densidade calculada foi de 1,90 kg/cm³, o Tc , foi 1,87 kg/cm³, e para o Tc3 foi de 1,80 kg/cm³. Verificou-se que para os traços Tc2 e Tc3, os quais possuem maior quantidade de solo em se tratando do Tc1, e tendo como resultante uma redução no percentual de cimento, gerando assim microporos e contribuindo para a diminuição da densidade.

Acredita-se que o RCC possa ter influência em se tratando dos poros formados nos traços dos TSRCs, mostrando essa característica também nas densidades e na porosidade dos mesmos.

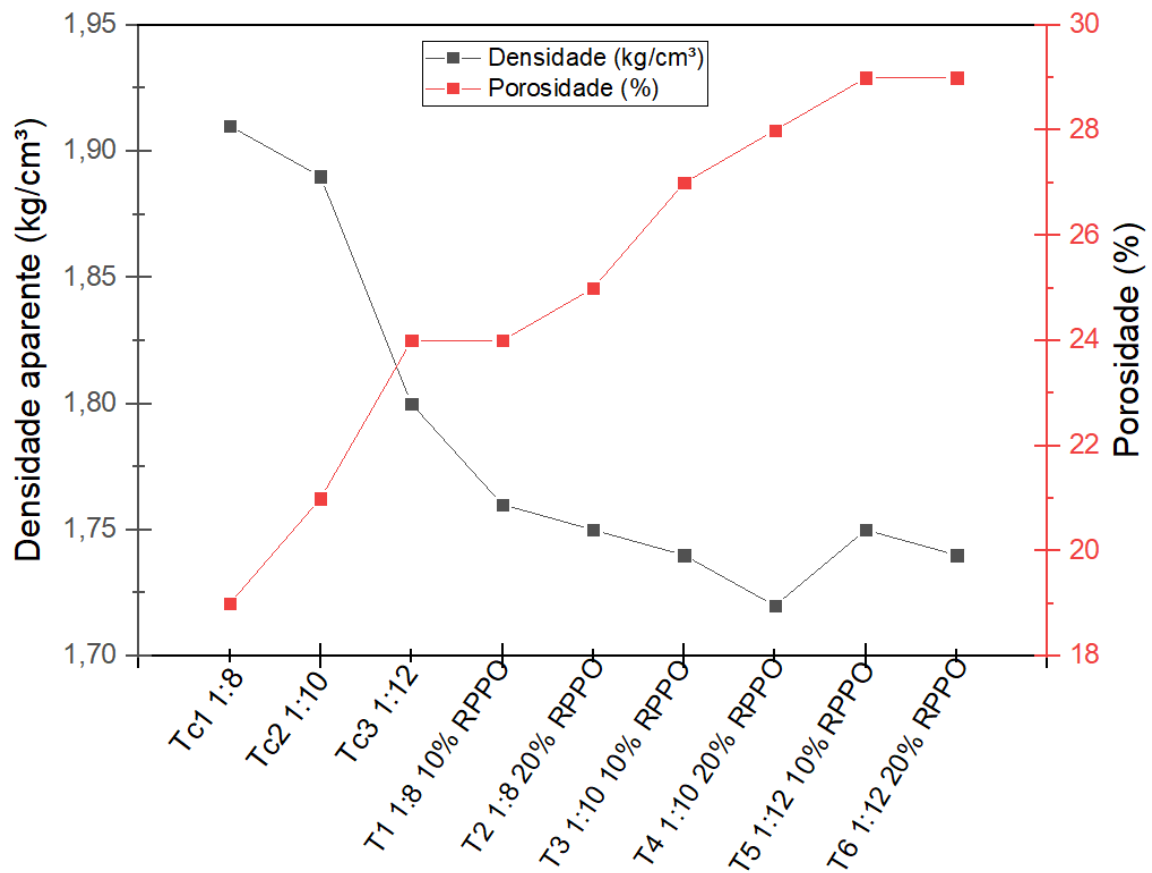


Figura 41 – Densidade aparente x porosidade

Fonte: próprio autor

4.10. ENSAIO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Na Tabela 17 estão apresentados as médias dos resultados de resistência à compressão simples e desvio padrão dos traços controle Tc1 1:8, Tc2 1:10 e Tc3 1:12, e os TSRCs T1 1:8 10% RPPO, T2 1:8 20% RPPO, T3 1:10 10% RPPO, T4 1:10 20% RPPO, T5 1:12 10% RPPO e T6 1:12 20% RPPO.

A ruptura foi realizada com 28 dias para os traços controle e 70 dias para os traços TSRCs.

Tabela 17 – Resultado de Compressão Simples – Média e desvio padrão

Traço	Média (MPa)	Desvio Padrão
Tsc – 1:8	1,53	0,045
Tsc – 1:10	1,18	0,03
Tsc – 1:12	0,91	0,13
T1 – 1:8 10% RPPO	2,57	0,05
T2 – 1:8 20% RPPO	2,49	0,05
T3 – 1:10 10% RPPO	1,70	0,27
T4 – 1:10 20% RPPO	1,27	0,10
T5 – 1:12 10% RPPO	1,07	0,06
T6 – 1:12 20% RPPO	1,02	0,04

Fonte: próprio autor

Como observa-se a Tabela 17 os traços T1 e T2, registraram valores acima do exigido pela norma ABNT NBR 8492:2012, atingindo respectivamente em suas médias, 2,57 MPa e 2,49 MPa, a norma estabelece média mínimo de 2,0 MPa.

Nota-se uma pequena variação entre os traços, sendo que para o T2 traço com uma maior incorporação de RPPO registrou o menor valor. Essa variação pode ter ocorrido mediante o aumento da incorporação do RPPO.

O RPPO de acordo com os ensaios de caracterização realizados, apresentam um percentual resultante entre óxidos de silício (SiO_2), ferro (Fe_2O_3) e alumínio (Al_2O_3) de 87,4%, elementos químicos necessários, de acordo com a ABNT NBR 12653:2015 [23] a materiais pozolânicos. A norma preconiza que para efeitos pozolânicos a resultante dos elementos químicos $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ deve ser > 70%. Fatores como perda ao fogo de até 6 % e resistência à compressão de argamassas devem ser avaliados.

O percentual de óxido de cálcio CaO encontrado no RPPO foi de 6,1% e no RCC 24%, que de acordo com a ABNT NBR 16697:2018 deve-se aplicar um fator de correção de 0,56 (divisão) sobre o percentual de CaO, e deve-se chegar em um valor de mínimo de 75% de CaCO_3 para efeito pozolânico. Após aplicado esse fator

de 0,56 sobre os valores de 6,1% e 24% de CaO dos resíduos obteve-se uma resultante de 53,75% de CaCO_3 .

Deste modo, averiguou-se que o RPPO não apresenta pozolanicidade na mistura, pois não atende aos requisitos da norma, entretanto apresenta-se com característica de preenchimento e refinamento dos poros, contribuindo para um melhor empacotamento dos grãos. De acordo com Vardhan e colaboradores [43], mesmo que o RPPO não tenha apresentado pozolanicidade, a reação entre a Calcita (CaCO_3) presente no RPPO e o Aluminato tricálcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$, C_3A) do cimento, pode formar uma estrutura compacta, promovendo ligações químicas mais estáveis. Para substituições de até 10% de resíduo no cimento, a resistência à compressão foi satisfatória.

O mesmo comportamento pode-se esperar do RCC, atuando como material de enchimento, contribuindo para o empacotamento dos grãos, por apresentar granulometria contínua.

Os Traços T3 e T4 apresentam valores de resistência à compressão, respectivamente, 1,70 MPa e 1,27 MPa. Ambos não atingiram a média estabelecida pela ABNT NBR 8492:2012 de 2,0 MPa, porém de acordo com a mesma norma alguns espécimes atingiram os valores individuais estabelecidos de 1,7 Mpa; de acordo com a ABNT NBR 15270-1:2017, para vedação o T3 estaria dentro dos padrões do VED15 que exige 1,5 MPa de resistência mínima.

A diferença entre os resultados foi de 25%, maior que a diferença encontrada nos traços T1 e T2 que foi de 3%. A incorporação de 20% de RPPO pode ter influenciado para a redução entre os traços.

Os traços T3 e T4 foram fabricados com 2 parcelas a mais de solo + resíduos, resultando em um percentual menor de cimento em se comparado aos traços T1 e T2. Observou-se que os traços mais ricos em cimento, como T1 e T2, obtiveram valores acima de 2,0 MPa. Já os T3 e T4, não atingiram os valores pré-estabelecidos.

Outro aspecto que influencia a resistência à compressão é a porosidade dos TSRCs. Mesmo após a compactação, apresentaram poros abertos, os quais foram possíveis serem identificados por meio da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), em que se mostrou a existência de poros e microfissura na fratura do TSRC, bem como no ensaio de porosidade. Munir e colaboradores [3], identificaram que para a diminuição de poros são necessários tratamentos térmicos.

A porosidade é uma propriedade ligada diretamente a resistência à compressão. Na Figura 42, verifica-se a redução da resistência à compressão dos traços T3, T4, T5 e T6 em relação aos traços T1 e T2, de acordo com o gráfico conforme a porosidade aumenta resistência diminui. Os poros reduzem a área de seção transversal quando submetido a uma força, e atuam como condensadores de tensões, para um poro esférico, uma tensão de tração aplicada é potencializada por 2.

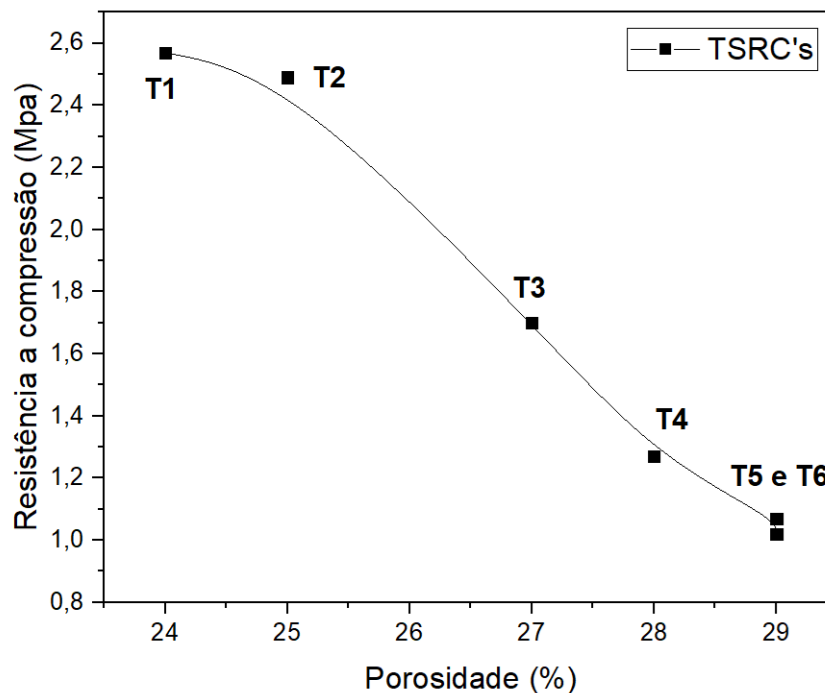


Figura 42 – Resistência à compressão x porosidade

Os traços T5 e T6, apresentam valores de 1,07 MPa e 1,02 MPa, respectivamente, valores estes que não atendem às especificações da norma. Os TSRCs T5 e T6, indicam que para os traços aqui estudados com baixos teores de cimento, mesmo com adição do RCC e RPPO e exercendo melhor empacotamento no compósito, não contribuíram para o aumento de resistência.

Os traços de controle obtiveram valores de compressão de 1,53 MPa, 1,18 MPa e 0,91 MPa, respectivamente para os traços Tc1 1:8, Tc2 1:10 e Tc3 1:12. Todos os traços registraram valores abaixo do estabelecido pela ABNT NBR 8492:2012.

Na Figura 43 tem-se o gráfico em que relaciona os dados obtidos de resistência à compressão, densidade e porosidade dos traços de controle.

Para o Tc1 1:8, a densidade foi de 1,9 g/cm³ e o valor de resistência à compressão foi de 1,53 Mpa e a porosidade registrada em 19%; com esses dados é observado que quanto menor a porosidade, maiores a densidade e a resistência. O Tc2 1:10, com densidade de 1,89 g/cm³, resistência à compressão de 1,19 MPa e porosidade de 21%, apresenta o mesmo comportamento. Do mesmo modo, o traço Tc3 1:12, obteve respectivamente os valores, 0,92 MPa, 1,80 g/cm³ e 24%. Esses resultados abaixo de 2,0 MPa, podem ter ocorrido pelas características do próprio solo.

Outro aspecto observado é a quantidade de cimento incorporado na mistura de solo-cimento. Como também visto por Souza e colaboradores [62], traços com baixos teores de cimento não conferem resultados altos de resistência à compressão.

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) o cimento representa uma parcela que varia entre 5% e 10% da massa do solo, sendo suficiente para promover a estabilização da mistura. Entretanto, deve considerar a diversidade de solos e suas características, que pode resultar por vezes em baixas resistência.

Por esse motivo, há vários tratamentos sugeridos como o uso de aditivos, correção do solo com areias ou resíduos, modificações nos métodos e processos de fabricação para garantir as características desejadas.

Corpos de provas realizados em laboratório são geralmente isentos de defeitos e, por isso, tendem a ter os resultados superiores em relação a realidade industrial e comercial, já que quando são produzidos em ambientes industriais estão expostos a muitas variáveis difíceis de serem controladas.

A umidade ótima do material para a fabricação de solo-cimento é um dado importante para adquirir a maior eficiência na compactação. Informação que não foi possível controlar na produção dos corpos de prova aqui analisados, visto que a fabricação deles se deu em ambiente industrial.

Para garantir os resultados elevados para a fabricação de tijolos de solo-cimento com solos da região, devem ser propostos traços mais ricos em cimento, como por exemplo 1:7 ou 1:6.

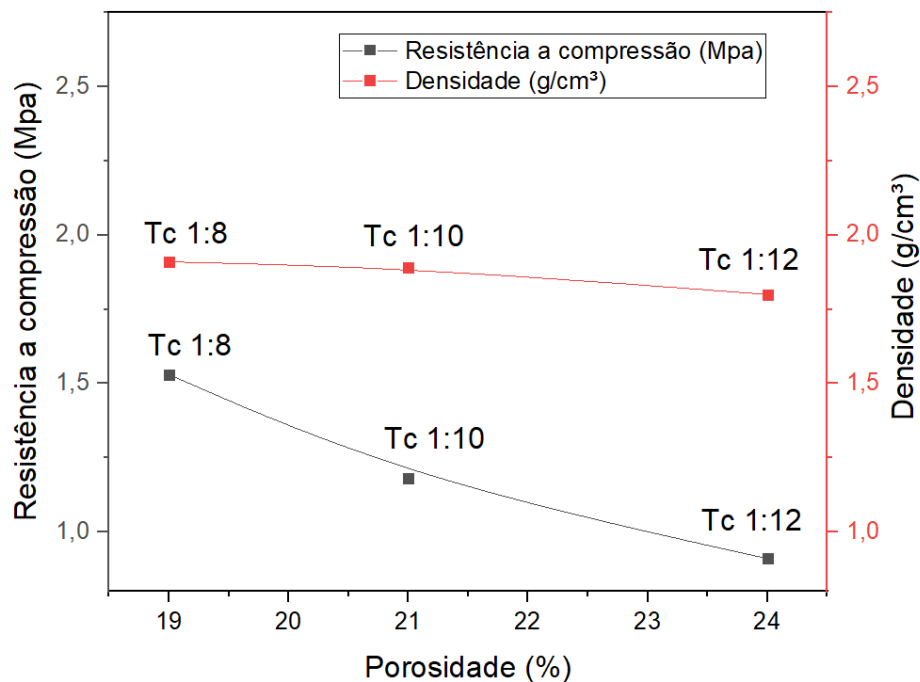


Figura 43 – Resistência à compressão, densidade e porosidade traço controle.

Na Figura 44, onde tem-se os resultados dos traços de controle e dos TSRCs, é verificado que os traços de T1 e T2 1:8 tendo em sua composição a incorporação de RCC e RPPO, apresenta em todos os grupos resultados maiores que os de controle, apontando que as incorporações dos resíduos corroboraram para o aumento de resistência à compressão.

Há um outro fator importante identificado nos resultados desse estudo. Observou-se que a incorporação dos resíduos de RCC e RPPO, alterou sobremaneira as características físicas do compósito, mudando seus valores de densidade, absorção, porosidade e resistência.

Mesmo o solo-cimento apresentando densidade mais alta que os TSRCs registraram resistência à compressão menor. A característica do solo predominantemente arenoso, com alta densidade, baixa absorção, baixa porosidade, não foi suficiente para garantir a resistência à compressão, característica essa adquirida pela incorporação dos resíduos. Isso pode ser constatado pela análise da Figura 44.

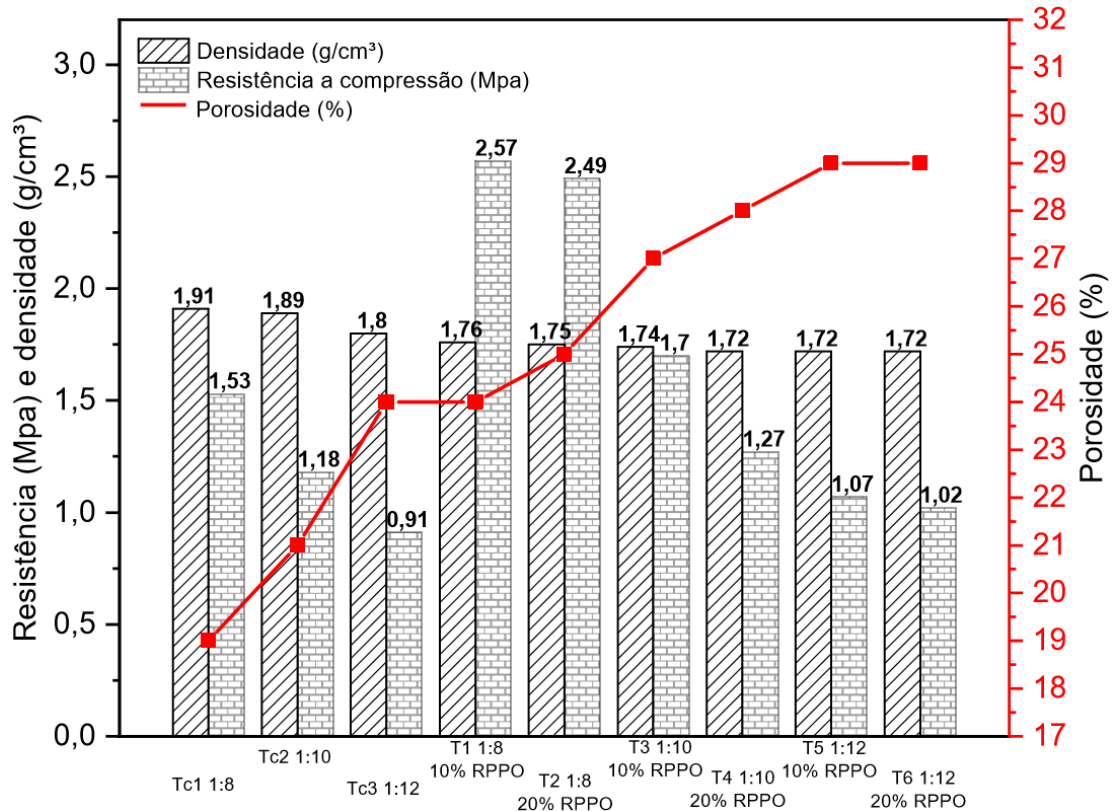


Figura 44 – Resistência à compressão, densidade e porosidade.

4.11. ENSAIO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A partir dos resultados dos ensaios calculou-se a condutividade térmica, por meio dos registros de gradiente de temperatura entre a face exposta ao calor e a face oposta dos corpos-de-prova.

Na Figura 45 estão apresentados os gradientes de temperatura obtidas no ensaio. É possível observar que o traço T1 1:8 10% RPPO apresenta um gradiente de 16,1 °C entre a face frontal que recebe o calor diretamente, e a face posterior, que estaria transmitindo o calor. O gradiente entre os termopares frontal e septo, foi de 7,1 °C.

Já no traço T2 1:8 20% RPPO, o gradiente entre as faces foi de 15,7 °C e entre a face e o septo, de 6,5 °C.

A medida das temperaturas nos septos dos blocos permitiu verificar a influência do ar confinado. Sabendo que a condutividade térmica do ar é de $\lambda = 0,026 \text{ W/m.k}$, próxima da do poliestireno expandido com $\lambda = 0,035 \text{ W/m.k}$, são criadas colunas de ar dentro da estrutura da alvenaria montada para a realização do ensaio. Assim o ar estaria agindo como um isolante térmico, de acordo com

Asdrubali e colaboradores [1]. Deste modo, acredita-se que os resultados dos gradientes de temperatura sofreram essa influência.

Os gradientes de temperatura entre as faces, do grupo de traços 1:8 (T1 e T2), foram pequenas, porém podem ter sido promovidas por meio da incorporação de RPPO.

Esperava-se que o traço com maior adição de RPPO apresentasse maior gradiente térmico, pois o T2 com 20% RPPO apresenta porosidade 1% maior que o T1 com 10%. Entretanto, não foi o observado. Uma possibilidade de explicação para esse comportamento está na característica térmica do próprio resíduo. De acordo com Zhang e colaboradores [76], a condutividade térmica do granito varia entre 1,7 a 4 W/m.k de acordo com sua composição, e a do mármore de 2,8 W/m.k, mesmo com a formação de poros evidenciados pelos ensaios de porosidade e MEV, a condutividade térmica do próprio resíduo é alta, o que pode ter contribuído para a transferência de calor.

Materiais finos em matrizes cimentícias, se agrupam de diferentes formas e também entre as partículas primárias do solo que, por vezes, podem posicionar-se orientadas paralelamente à direção do fluxo de calor ou ao gradiente de temperatura. Deste modo, a condutividade térmica poderia aumentar de acordo com o arranjo das partículas na fase sólida. O contato entre essas partículas promove a transferência de calor mais rapidamente, gerando materiais mais condutores [76].

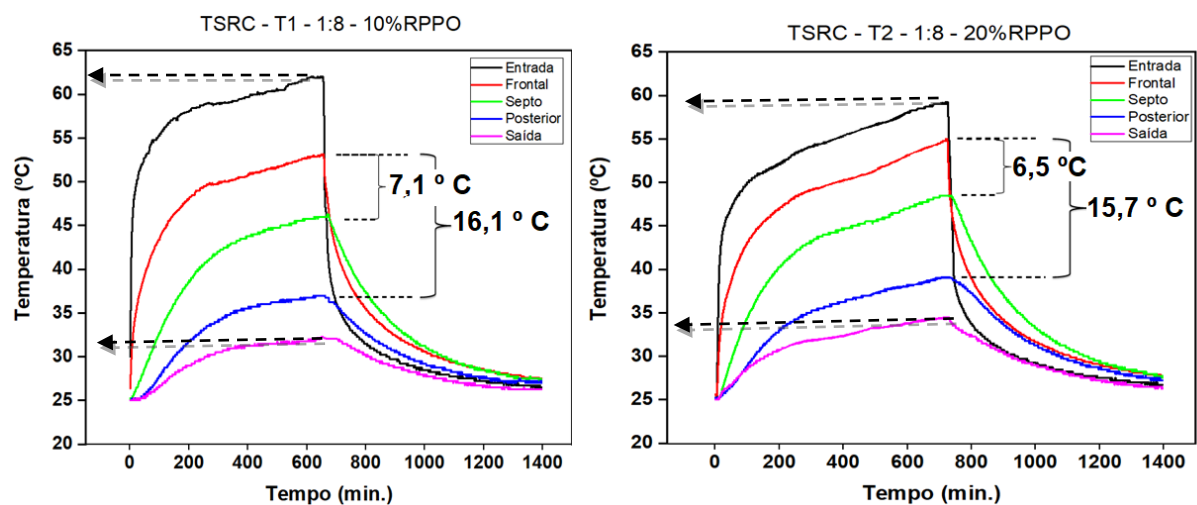


Figura 45 – Gráfico de análise térmica dos TSRCs T1 e T2.

Em observação dos resultados gerais do ensaio para ambos os traços, nota-se uma diferença em relação aos dados de entrada, em que T1 sofre mais ações das condições externas, visto que a maior temperatura registrada foi de 62 °C, enquanto que o T2 atingiu 59 °C. Entretanto, o T1 apresenta maior gradiente demonstrando um comportamento de isolamento térmico maior que o T2.

Na Figura 46 as variações dos traços T3 1:10 10% RPPO e T4 1:10 20% RPPO são apresentadas. No T3 é mostrado um gradiente maior em comparação com os traços anteriores. Seu gradiente foi de 10,8 °C entre a face frontal e o septo, e de 21,3 °C entre as faces frontal e posterior. O T4 com os valores de 11,9 °C e 21,9 °C, respectivamente. De mesmo modo aos traços anteriores, as diferenças encontradas com relação aos septos se dão pelo ar confinado entre os tijolos.

As diferenças observadas entre os traços T3 e T4, são relativamente pequenas. Entre os valores das faces, 0,9 °C foi observado e a face e septo foi de 1,1 °C. Esse comportamento era esperado pelo alto valor de porosidade de T4, sendo registrado em 28%.

Ao se comparar os T3 e T4 com os traços T1 e T2, apresentam, resultados superiores. Isso porque o T3 e T4, são traços com maior volume de solo + resíduos, sendo traços de 1:10. Como foi mostrado no ensaio de porosidade, os traços com volume de 1:10 têm elevado índice de vazios, o que se explica a baixa resistência à compressão e melhores resultados de condutividade térmica, exatamente pela quantidade de poros internos nos tijolos.

Outro dado analisado no gráfico é a variação nas condições de entrada. O T3 atingiu 70 °C e o T4, 67 °C, tendo uma diferença de 3 °C, sendo observada a mesma diferença entre os traços T1 e T2. Essa diferença pode ser atribuída às condições externas.

Em se comparando o comportamento de T3 e T4, o T4 com 20% RPPO, deve ter sofrido maiores influências quanto aos poros internos, e o T3, com uma quantidade menor de RPPO, é maior condutor térmico em relação ao T4.

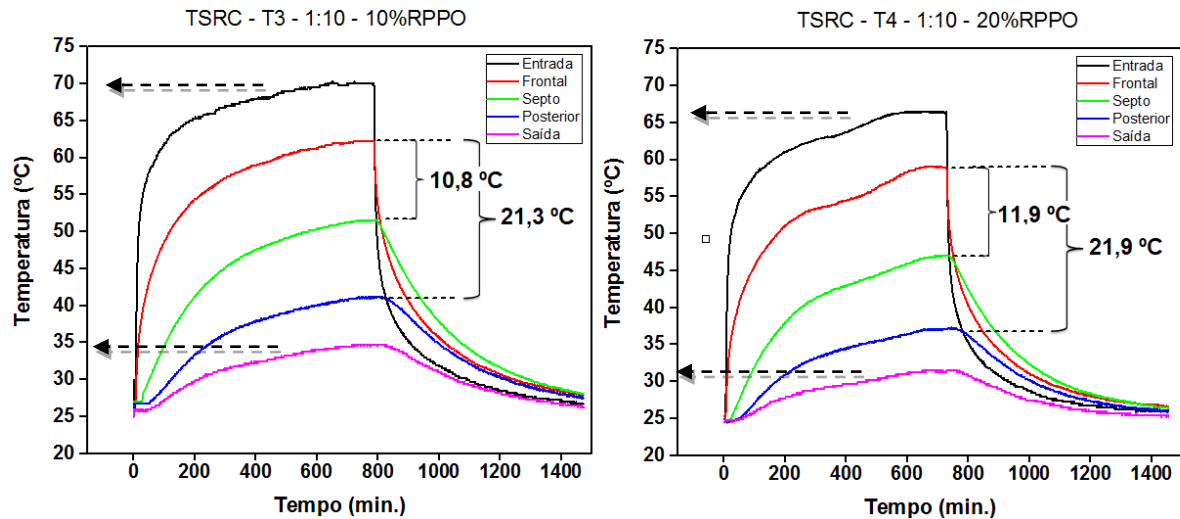


Figura 46 – Gráfico de análise térmica dos TSRCs T3 e T4.

Na Figura 47, estão descritas as diferenças de temperatura obtidas nos traços T5 e T6. Sendo T5 com 21,1 °C entre as faces frontal e posterior e de 10,6 °C entre os termopares frontal e do septo. Já em T6 a diferença de fluxo de calor obtida foi de 20,6 °C face frontal versus face posterior e de 10,0 °C face frontal versus septo.

Os traços T5 e T6, apresentam valores bem próximos aos valores dos traços T3 e T4. A relação de cimento versus solo + resíduos para esses traços é ainda maior sendo de 1:12 em volume.

De acordo com os dados analisados averiguou-se que para os traços T5 e T6, a incorporação não contribui de maneira efetiva nos resultados, pois há evidência de maior quantidade de poros nesses traços, estando os dois com 29% de porosidade. O aumento do RPPO no traço T6, pode ser contribuído para aumentar a transferência de calor pelas partículas, reduzindo assim o gradiente de temperatura.

O gradiente nas condições de entrada, mostra que o T5 atingiu 67 °C e o T4, 66,7 °C. Essa diferença é pequena podendo ser considerada normal em virtude das condições expostas.

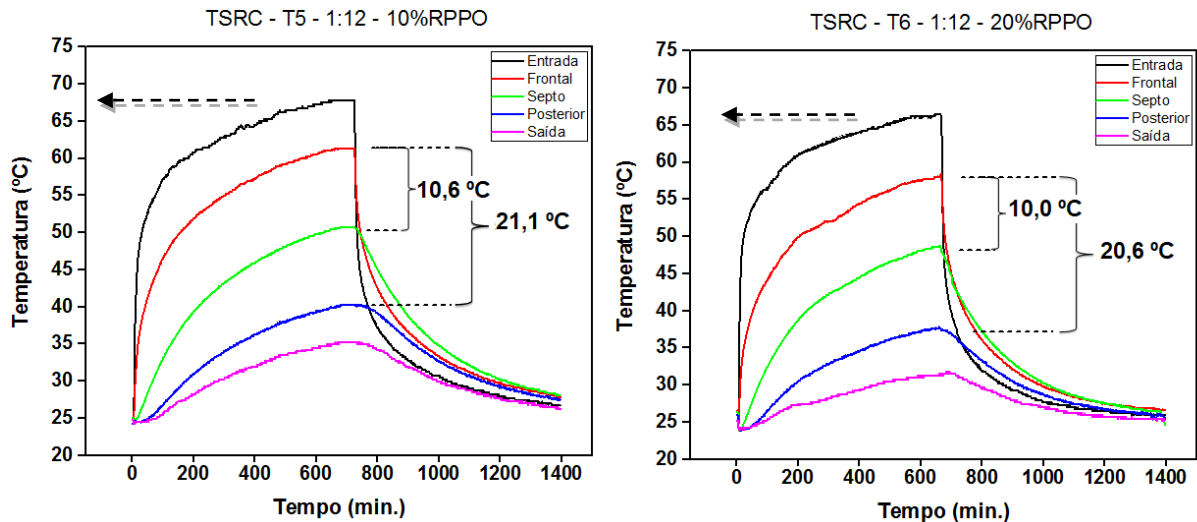


Figura 47 – Gráfico de análise térmica dos TSRCs T5 e T6.

Todos os TSRCs, registraram valores de saída, menor que 35 °C, mostrando que as áreas internas apresentaram conforto térmico.

O traço de controle Tc2 1:10 apresenta características semelhantes aos TSRCs. O gradiente observado é de 19,8 °C entre as faces frontal e posterior e de 10,3 °C entre a face frontal e o septo. O tijolo de solo cimento, obteve 21% de porosidade de acordo com os ensaios, resultado abaixo dos encontrados nos TSRCs; contudo, contribui para o gradiente de temperatura, além de também apresentar a diferença de 10,3 °C entre septo e face frontal, que possa ter sido provocada pelo ar contido dentro da estrutura interna dos tijolos.

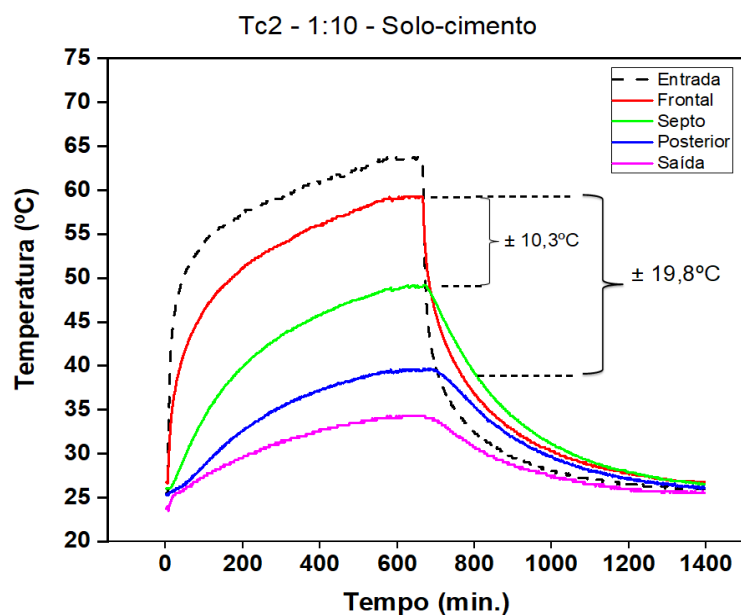


Figura 48 – Gráfico de análise térmica do Tc2 controle.

De modo geral, a análise do gradiente térmica, dos tijolos fabricados neste estudo, apresentam resultados próximos entre si, tendo um gradiente maior somente nos traços com maior porcentagem de cimento, ou seja, os traços 1:8.

Foram realizados também ensaios de determinação da condutividade térmica para tijolos comerciais, para fins de comparação entre os fabricados e os já comercializados.

Os tijolos maciços e blocos cerâmicos foram comprados para que pudessem ser submetidos ao ensaio térmico nas mesmas condições que os tijolos fabricados nesse estudo. Foram adquiridos 10 tijolos maciços nas medidas de 200 mm x 40 mm x 95 mm sendo comprimento x altura x largura, e os blocos cerâmicos foram 4 unidades nas medidas de 190 mm x 190 mm x 9 mm.

A Figura 49a) apresenta o gradiente térmico do tijolo maciço em que obteve valor menor que o bloco cerâmico com 8 furos apresentado na Figura 49b).

O gradiente registrado entre a face frontal e o septo do bloco cerâmico de 8 furos, é relativamente alta, ao se comparar todos os demais traços ensaiados. Isso pode ter ocorrido devido a sua estrutura, possuindo 65,79% de área livre interna por conta de seus 8 furos, os outros 34,21% é a estrutura sólida do tijolo.

Foram registrados os valores de 15,2 °C para o tijolo maciço, e 20,5 °C para o bloco cerâmico entre as faces externas e interna. A densidade e porosidade dos corpos de prova maciço e cerâmico foram obtidas para complementação dessa análise, tendo sido densidade de 1,85 g/cm³ e 26% de porosidade para o tijolo maciço e 2,01 g/cm³ e 24% de densidade e porosidade para o bloco cerâmico.

O Tijolo maciço apresenta resultados semelhantes aos T1 e T2 1:8 com 10 e 20% de RPPO. Em se tratando de porosidade, densidade e de gradiente de temperatura, a utilização dos TSRSs T1 e T2 mostra-se uma alternativa viável. Sua estrutura dimensional é isenta de defeitos supercificiais, diferentemente dos tijolos maciços, que além de serem dimensionalmente pequenos, apresentam em sua área superficial muitas trincas e fissuras decorrentes de seu processo construtivo.

O bloco cerâmico obteve pequena diferença na porosidade, entretando, em termo de densidade foi mais alta e o gradiente térmica próxima oas TSRCs T3 a T6. Tanto o tijolo maciço como o cerâmico são produzidos industrialmente em fornos em temperaturas média, de 900 a 1000 °C. Sob estas temperaturas tijolos tendem a ter maiores probalidades de formação de poros, por conta dos óxidos fundente.

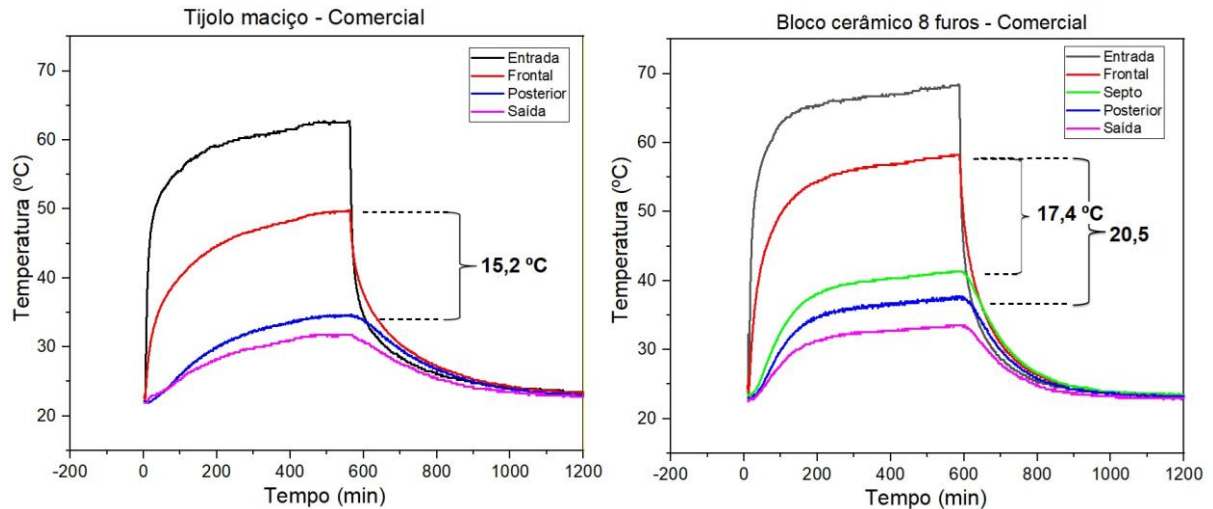


Figura 49 – Gráfico de análise térmica dos Tijolo maciço e bloco cerâmico comerciais.

Os valores das condutividades térmicas estão resumidos nas Tabelas 19 e 20.

Segundo Zhang e colaboradores [76], condutividade é uma propriedade termofísica de um material, sendo importante seu conhecimento para definir a capacidade do material em reduzir ou acelerar a troca de calor.

Tabela 18 – Condutividade térmica do TSRCs

Traço	Condutividade térmica (W/m.K)
T1 1:8 10% RPPO	0,42
T2 1:8 20% RPPO	0,43
T3 1:10 10% RPPO	0,32
T4 1:10 20% RPPO	0,31
T5 1:12 10% RPPO	0,32
T6 1:12 20% RPPO	0,33

Tabela 19 – Condutividade térmica traços controle e comerciais

Traço	Condutividade térmica (W/m.K)
Tc 1:10	0,34
Tijolo Maciço	0,40
Bloco Cerâmico (8 furos)	0,32

Os valores obtidos nos traços T1 e T2, de 0,42 e 0,43 W/m.k para condutividade térmica, correspondem aos valores de gradiente térmica encontrados para os mesmos traços, sendo uma condutividade alta para os tijolos aqui estudados, porém próximos ao tijolo comercializados. O tijolo maciço com 0,40 W/m.K e o bloco cerâmico com 0,32 W/m.K.

Nota-se que nas análises de gradiente térmica a condutividade é a capacidade de um material realizar a transferência de calor e está diretamente relacionada a densidade e porosidade dos materiais.

Na Figura 50 tem-se os valores de densidade, condutividade térmica e porosidade. Observa-se que, de maneira geral, as densidades dos TSRCs foram relativamente baixas, e quando comparadas aos tijolos maciço e bloco cerâmico, também são baixas. Entretanto para a condutividade térmica, densidade baixas são positivas, visto que materiais de baixa densidade apresentam baixa condutividade.

Contudo, analisando os traços T1 e T2, com densidades de 1,79 e 1,75 g/cm³ e porosidade de 24% e 25%, verifica-se condutividade de 0,42 e 0,43 W/m.k.

O T2 com a densidade mais baixa, apresenta condutividade mais alta, isso porque, a inserção de RPPO, sendo que seus constituintes já apresentam alta condutividade. Outra característica pode ser atribuída devido a seus arranjos de partículas, em que podem ter se posicionado de forma orientada na direção do fluxo de calor, o que contribui para o aumento da condutividade do material.

Os T3 e T4 1:10 10% e 20% RPPO, T5 e T6 1:12 10 e 20% RPPO, apresentam densidade de 1,74 g/cm³ para T3 e 1,72 g/cm³ para os, T4, T5 e T6, esses tiveram resultados esperados.

Com a diminuição da densidade a condutividade térmica também diminui, e com relação à porosidade, estes apresentam valores similares a 27%, 28%, e 29% respectivamente. Entretanto, o T6 apresenta-se com o mesmo comportamento que os T1 e T2, tendo um leve aumento na condutividade, deduzindo-se que a maior quantidade de RPPO incorporado no traço contribui para o aumento da condutividade, pois os dois traços T1 e T2 apresentam o mesmo percentual de porosidade, tendo somente como diferença a quantidade de inserção de resíduo incorporado nos traços.

Já os traços de controle, Tc2 1:10, tijolo maciço e bloco cerâmico, o Tc2 e o bloco cerâmico apresentam característica diferente na relação densidade/condutividade. A baixa condutividade do bloco cerâmico pode ser

atribuída à quantidade de septo que compõe sua estrutura, tendo aproximadamente 34,21% de massa sólida; o restante ocupado por ar, atua como isolador térmico, além de apresentar porosidade mais alta também, ou seja, de 24%. O Tc2 também possui septo em sua estrutura, porém menor em relação ao bloco cerâmico.

A condutividade de solos arenosos, de acordo com Zhang e colaboradores [76], é de 1,6 a 2,6 W/m.K, condutividade um pouco mais baixa que aquela dos resíduos aqui estudados. A porosidade de 21% indicava que a condutividade dos térmica do Tc2 deveria ser maior, por apresentar maior densidade, o que não ocorreu. A baixa condutividade do solo-cimento pode ser atribuída a baixa condutividade de solos arenosos.

De acordo com os resultados e análises realizadas, o que foi observado é que a constituição solo-cimento após receber a inserção dos resíduos mudou suas propriedades térmicas, acústicas e mecânicas, indicando que a mistura de solo + cimento + RCC + RPPO pode ser entendida como um novo material.

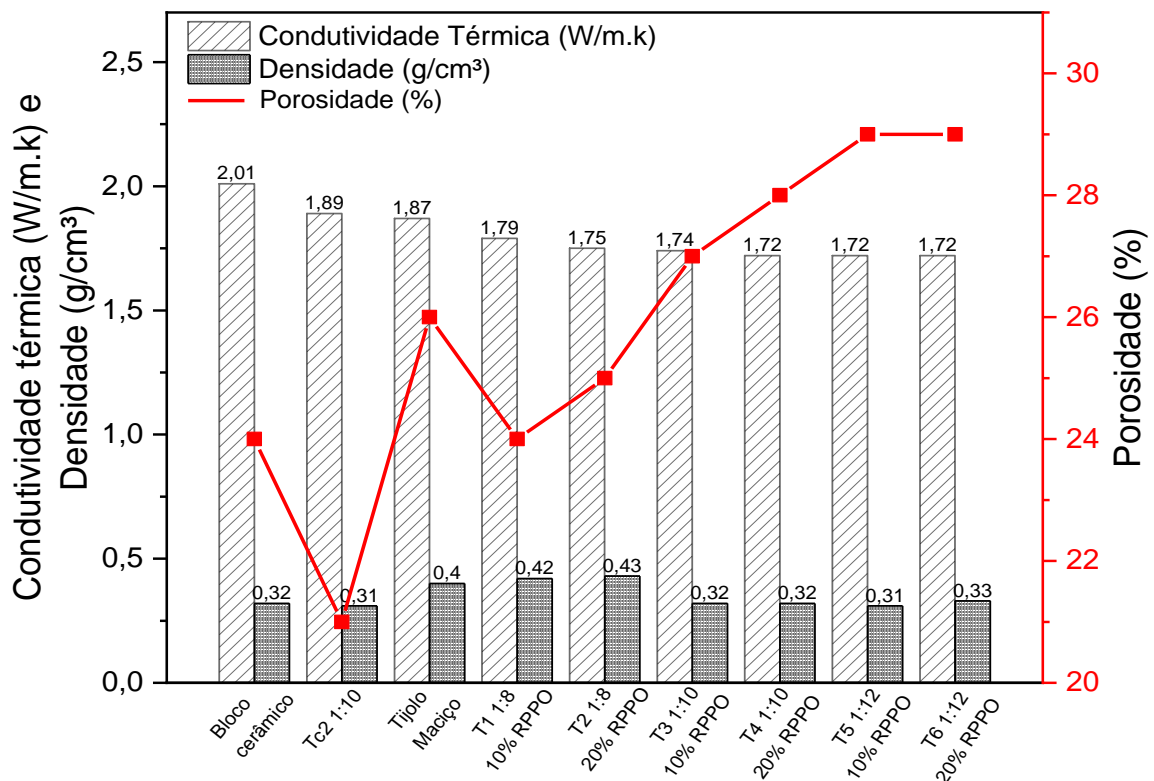


Figura 50 – Condutividade Térmica, densidade e porosidade.

Em se tratando do nível de desempenho dos tijolos, segundo a ABNT NBR 15.575/2013, segue a Tabela 20 e 21 com os valores encontrados para o nível de desempenho.

De acordo com a mesma norma a região estudado é classificada como Zona bioclimática 6 que tem como temperatura máxima para áreas interna 35 °C. Os valores registrados de todos os tijolos foram menores de 35 °C, mostrando que os tijolos atendem a norma.

Em relação ao nível de desempenho nota-se que todos os tijolos submetidos a ensaios térmicos apresentaram nível de desempenho superior, nas condições de realização do ensaio.

Tabela 20 – Nível de desempenho dos TSRCs em °C

Traço	Temp. Int. Máxima	Temp. Ext. Máxima	Nível de desempenho
T1 1:8 10% RPPO	33	63	S
T2 1:8 20% RPPO	34	70	S
T3 1:10 10% RPPO	32	67	S
T4 1:10 20% RPPO	32	67	S
T5 1:12 10% RPPO	35	67	S
T6 1:12 20% RPPO	32	67	S

M (mínimo) $T_{imáx} \leq T_{emáx} - I$ (intermediário) $T_{imáx} \leq (T_{emáx} - 2^{\circ}C) - S$ (superior) $T_{imáx} \leq (T_{emáx} - 4^{\circ}C)$

Tabela 21 – Nível de desempenho dos tijolos de controle em °C

Traço	Temp. Int. Máxima	Temp. Ext. Máxima	Nível de desempenho
Tc 1:10	34	64	S
Bloco cerâmico (8 furos)	34	67	S
Tijolo Maciço	32	63	S

M (mínimo) $T_{imáx} \leq T_{emáx} - I$ (intermediário) $T_{imáx} \leq (T_{emáx} - 2^{\circ}C) - S$ (superior) $T_{imáx} \leq (T_{emáx} - 4^{\circ}C)$

4.12. ATENUAÇÃO SONORA

A Tabela seguir apresenta os resultados das atenuações sonoras dos TSRCs e traço controle. Os resultados expostos são os dados registrados nas câmaras de emissão e recepção nas frequências 250, 1000 e 4000 Hz.

Tabela 22 – Dados de atenuação sonora

Frequência – Hz	Câmara emissora – dB	Câmara receptora – dB	Atenuação – dB
T1 1:8 10% RPPO			
250 Hz	78 dB	47 dB	31 dB
1000 Hz	83 dB	53 dB	30 dB
4000 Hz	87 dB	56 dB	31 dB
T2 1:8 20% RPPO			
250 Hz	77 dB	49 dB	28 dB
1000 Hz	84 dB	55 dB	29 dB
4000 Hz	85 dB	58 dB	27 dB
T3 1:10 10% RPPO			
250 Hz	78 dB	49 dB	29 dB
1000 Hz	84 dB	58 dB	26 dB
4000 Hz	87 dB	54 dB	33 dB
T4 1:10 20% RPPO			
250 Hz	78 dB	49 dB	29 dB
1000 Hz	84 dB	58 dB	26 dB
4000 Hz	87 dB	54 dB	33 dB
T5 1:12 10% RPPO			
250 Hz	77 dB	48 dB	29 dB
1000 Hz	87 dB	58 dB	29 dB
4000 Hz	84 dB	58 dB	26 dB
T6 1:12 20% RPPO			
250 Hz	77 dB	49 dB	28 dB
1000 Hz	83 dB	54 dB	29 dB
4000 Hz	87 dB	60 dB	27 dB
Tc2 – 1:10			
250 Hz	78 dB	59 dB	19 dB
1000 Hz	83 dB	63 dB	20 dB
4000 Hz	76 dB	54 dB	32 dB

As ondas sonoras, são ondas mecânicas, que necessitam de um meio para se propagar, são classificadas como ondas longitudinais. Em meios sólidos, a velocidade do som é maior que no meio líquido e gasoso, pois a onda sonora se transmite pela vibração das moléculas. No meio sólido as moléculas estão mais próximas, ou seja, em um meio mais denso, aumentando assim a capacidade de propagação de ondas sonoras. Contudo no ar, onde as moléculas estão em um meio menos denso, a propagação é menor.

Assim sendo, a porosidade é uma característica que corrobora para uma diminuição na propagação do som.

A Figura 55, apresenta os dados de atenuação sonora calculados após a obtenção dos dados dos espectros do traço controle Tc2 e dos TSRCs.

Para o traço controle submetido ao ensaio de desempenho acústico, o mesmo apresenta uma atenuação de 19 dB para a frequência de 250 Hz, 20 dB para a frequência 1000 Hz e 32 dB para a frequência de 4000 Hz. Deste modo é possível identificar que, apresenta maior atenuação na frequência alta de 4000 Hz.

As frequências altas, são frequências agudas, com menor comprimento de onda, porém como já foi visto, a propagação se dá pelo meio ao qual a onda está sujeita. Desta maneira a quantidade de poros no traço controle, mesmo sendo a menor porcentagem encontrada, mostrou-se competente no quesito redução sonora, chegando a uma atenuação na frequência alta de 32 dB, que de acordo com alguns fabricantes de forros metálicos que avaliam seus produtos com atenuação entre 28 a 40 dB.

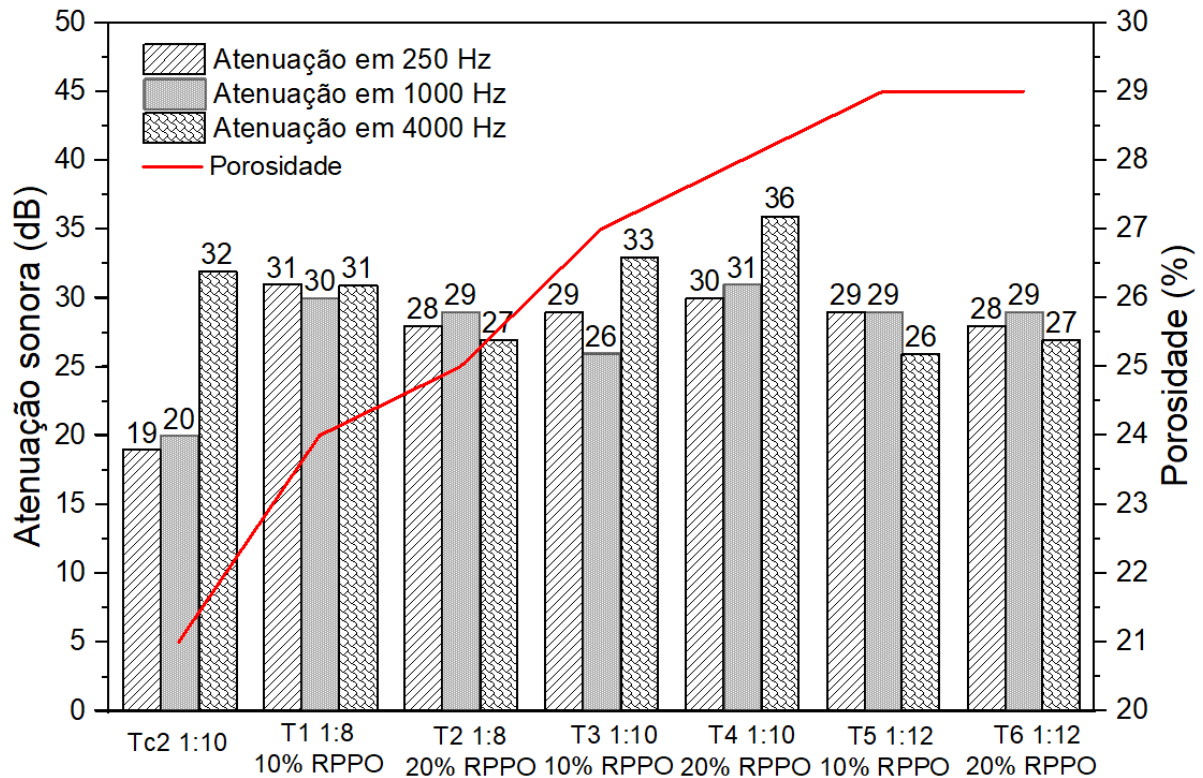


Figura 51 – Atenuação sonora e porosidade dos TSRCs e traço controle Tc2

Do mesmo modo nota-se que o traço T1 1:8 10% RPPO teve valores próximos em todas as frequências analisadas. Para as frequências (250, 1000 e 4000 Hz), as atenuações foram 31, 30 e 31 dB. Demonstrando que um percentual de 24% de porosidade, contribui para atenuações acima de 30 dB.

Percebe-se uma variação grande nos valores de Tc2 traço controle e T1 nas frequências baixa e médias, com uma diferença de 12 dB para 250 Hz e de 10 dB para 1000 Hz. Essa diferença devido à natureza estrutural dos resíduos incorporados, como foi visto na análise de MEV na Figura 36, o RCC contém rugosidade em sua superfície, o que pode ter contribuído para o aumento de porosidade nos TSRCs, conforme também observado por Tenório e colaboradores, Thomas e colaboradores [56,57].

Comportamento semelhante é observado no traço T2 1:8 20% RPPO, em que os registros obtidos para o traço T2 1:8 20% RPPO são, frequência baixa de 250 Hz, atenuação de 28 dB, frequência média 1000 Hz, 25 dB e frequência alta de 4000 Hz, 26 dB. Neste traço observa-se que a atenuação para as frequências média e alta são menores, mesmo com o aumento da porosidade 25%, tendo uma unidade a mais que o T1.

Esse comportamento pode estar relacionado ao aumento do RPPO. Sendo um material fino e podendo preencher vazios. Facilitando, portanto, a transferência de calor originada pela vibração das partículas em contato com as ondas sonoras.

Os TSRCs T3 1:10 10% RPPO e T4 1:10 20% RPPO, apresentam os valores, 29, 26 e 33 dB, para as frequências 250, 1000 e 4000 Hz, e para o T4 obtiveram valores de 30, 31 e 36 dB, respectivamente. Entre a frequência baixa os valores foram próximos, encontrando-se a maior diferença nas frequências média e alta, com uma variação de 5 dB para 1000 Hz e 3 dB para 4000 Hz. Em frequência alta quanto maior a porosidade, maior será a capacidade de reduzir a vibração das moléculas. O que evidencia que o fato do T4 apresentar uma porosidade de 28%, contribuindo para a absorção sonora das ondas dentro de sua estrutura.

Outro aspecto relevante para a atenuação e desempenho acústico de materiais é a temperatura. De acordo com Randazzo e colaboradores [74], materiais absorvente, são materiais com capacidade de absorver a energia sonora, transformada em energia térmica, pela vibração das moléculas [89]. Conforme analisado a condutividade térmica dos tijolos o T4 apresentou a menor condutividade calculada de 0,31 W/m.k, apontando que, além da porosidade, a baixa condutividade térmica contribui para minimizar a movimentação das moléculas, reduzindo então a transmissão de energia e resultando em atenuação sonora.

Os resultados do TSRCs T5 1:12 10% RPPO e T6 1:12 20% RPPO, se mantem próximos em todas as frequências analisadas. Sendo para a 250 Hz, 29 e 28 dB, 29 e 29 dB para 1000 Hz, e 26, 27 dB para 4000 Hz. Nota-se que com o aumento da porosidade dos traços a atenuação se manteve, tendo uma pequena redução na frequência alta. Contudo, entre os traços a diferença é pequena, não tendo grande relevância.

Entende-se que os resultados obtidos quanto à atenuação sonora, podem ser explicados da mesma forma que o feito para o desempenho térmico. Pois o RPPO tem aspecto fino, atuando como preenchedor nos TRSC's, diminuindo os espaços vazios o que para o desempenho térmico e acústico não é satisfatório. Entretanto, o RCC, conforme visto em sua microestrutura, há presença de poros, e conforme Thomas e colaboradores 2016, a rugosidade de sua superfície por conta de sua natureza contribui para o aumento da porosidade. Aspecto esse importante para o desempenho térmico e acústico.

Outros aspectos relevantes quanto ao desempenho térmico e acústico dos TSRCs, se deve a estrutura do componente e sua espessura, os tijolos com dois septos mantem o ar confinado internamente e sua espessura cria uma área maior para ser vencida tanto pelas ondas sonoras como para o fluxo de calor. Sendo assim a estrutura e a espessura dos TSRCs, coopera para o desempenho térmico e acústico.

Na Tabela 23, é apresentado atenuações sonoras de placa de forro para isolamento acústico desenvolvida pela fabricante *THERMATEX®*, mostrando os valores admissíveis para atenuação sonora de suas placas são de 28 A 40 dB. Assim é observado que os TSRCs, apresentam atenuação sonora dentro dos valores já comercializados, o que mostra um excelente material a ser utilizado para essa finalidade.

Tabela 23 – Ficha técnica de placas isolantes comerciais

<i>THERMATEX®</i>	Espessura / peso	Formato	Absorção sonora (EN ISO 11654)	Atenuação sonora (EN 20140-9 / EN ISO 10848)
Varioline	19 mm (3,0 kg/m ²)	600 x 600, 625 x 625	$\alpha_w = 0,95$ NRC = 0,90	Dn,f,w = 28 dB
Varioline SF	24 mm (8,4 kg/m ²)	600 x 600, 625 x 625	$\alpha_w = 0,65$ (H) NRC = 0,70	Dn,f,w = 38 dB
Varioline Acoustic	19 mm (4,6 kg/m ²)	1200-1800 x 300	$\alpha_w = 0,65$ (H) NRC = 0,70	Dn,f,w = 40 dB

Fonte: Site *Thermatex* acessado em 13 de janeiro de 2020.

CONCLUSÃO

Baseado nos resultados obtidos e analisados neste presente estudo, considera-se que o mesmo traga contribuições significativas para outros trabalhos que visem a incorporação de resíduos de construção civil e de marmorarias.

O RCC com granulometria abaixo da peneira nº 16, mostrou que pode ser usado como substitutos do solo natural, o que trouxe melhorias quanto às propriedades físicas dos tijolos ecológicos.

Entretanto o RPPO, corroborou-se para um efeito de preenchimento, não tendo atividades pozolânicas, como era desejado.

A taxa de substituição para cada tipo de resíduo foi diferente devido aos requisitos de trabalhabilidade para a fabricação de traços. Assim, para o RCC, a taxa de substituição foi de 50% para todos os tijolos, entretanto, para o RPPO foi de 10% e 20%.

A incorporação do RCC, favoreceu a resistência a compressão dos traços T1 e T2, em que atingiram o valor estabelecido na norma ABNT NBR 8492:2012. Entretanto, foi identificado que para traços com proporções de volume acima de 1:8 os mesmos não atenderam a norma.

Para os traços de solo-cimento aqui estudados, identificou-se que é necessária incorporação de maiores teores de cimento, para que possam atingir os valores estabelecidos na norma ABNT NBR 8492:2012, sendo necessário trabalhar com traços de 1:7 e 1:6. De acordo com os resultados analisados o traço de 1:8 de solo-cimento não atingiu o estabelecido pela norma.

Em se tratando da caracterização dos materiais básicos e dos resíduos para os TSRCs, esses apresentaram valores em concordância com os já estudados.

Os ensaios de absorção de água, densidade e porosidade, foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR NM 52:2009. E os resultados de absorção atenderam ao estabelecido na norma. ABNT NBR 8492:2012.

Em se tratando do desempenho térmico e acústico, as inserções dos resíduos demonstraram uma capacidade de promover melhoria quanto a esses aspectos. O RCC aumentou a formação de poros na estrutura dos tijolos.

De acordo com os ensaios térmico realizados, foi possível identificar que as porcentagens de 24% a 29% de porosidade, promoveram resultados satisfatórios quanto à condutividade térmica dos tijolos. Demonstrando que seus resultados estão semelhantes a tijolos comerciais.

O mesmo foi observado para o desempenho acústico, apresentando características de atenuação sonora comparáveis aos das placas isolantes comerciais para forros com atenuações entre 28 a 40dB, sendo que os resultados dos TSRCs, os valores foram entre 28 a 32 dB.

Acredita-se que os tijolos contendo resíduo de RCC e RPPO, podem ser uma alternativa sustentável na fabricação de tijolos para vedação, com foco em adquirir conforto térmico e acústico, pois para vedações a sua utilização se torna adequada. Tendo em vista, a utilização de um produto, que ajudar a reduzir impactos ambientais proveniente da fabricação, assim como reduzir os resíduos sólidos urbanos que ainda é um problema mundial.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Diante dos resultados obtidos ao final deste trabalho, algumas sugestões para trabalhos futuros são apresentadas:
- Produzir tijolos de solo-cimento com apenas RCC para avaliar o comportamento mecânico térmico e acústico;
- Produzir tijolos com maiores adições de cimento para avaliação do comportamento mecânico;
- Realizar ensaios de LL, LP no solo para melhorar a seleção dos solos para fabricação de tijolos de solo- resíduo- cimento.
- Avaliar parâmetros como durabilidade nos tijolos fabricados;
- Analisar a influência de diferentes forças de prensagem nos parâmetros de densidade, absorção de água e resistência à compressão dos tijolos
- Realizar um estudo do potencial econômico do uso dos tijolos de solo-resíduo e cimento para aplicação na construção civil.

REFERÊNCIA

- [1] ASDRUBALI, F.; D'ALESSANDRO, F.; SCHIAVONI, S. A review of unconventional sustainable building insulation materials. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 4, p. 1-17, 2015.
- [2] ESTATÍSTICO, Anuário. Setor metalúrgico. Brasília. Secretaria de Minas e Metalurgia–SMM. **Ministério de Minas e Energia-MME**, v. 2000, 2018.
- [3] MUNIR, Muhammad Junaid et al. Thermally efficient fired clay bricks incorporating waste marble sludge: an industrial-scale study. **Journal of cleaner production**, v. 174, p. 1122-1135, 2018.
- [4] OMS, Organização Mundial da Saúde. Carga da doença devido ao ruído ambiental. Europa. Copenhagen, **Dinamarca**; 2011.
- [5] GLÉ, P.; GOURDON, E.; ARNAUD, L. Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. **Applied Acoustics**, v. 72, n. 5, p. 249-259, 2011.
- [6] MATOSKI, A.; RIBEIRO, RC Evaluation of the acoustic performance of a modular construction system: Case study. **Applied Acoustics**, v. 106, p. 105-112, 2016.
- [7] SEGANTINI, A. A. S.; ALCANTARA, M. A. M. Solocimento e solo-cal. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios da ciência e engenharia de materiais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto**, 2007. v. 2, p. 834-861.
- [8] PASCHOALIN FILHO, J, A; GRAUDENZ, G, S. Destinação irregular de resíduos de construção e demolição (RCD) e seus impactos na saúde coletiva. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v.6, n.1, p 127-142, 2012.
- [9] MORAIS G. M. D. “Diagnóstico da deposição clandestina de Resíduos de Construção e Demolição em bairros periféricos de Uberlândia: Subsídios para uma gestão sustentável”, **Diss. Mestrado de Engenharia Civil**, Universidade Federal de Uberlândia (2006) 201p.
- [10] ABRELPE - Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2018:2019. Disponível em: Acesso em: dezembro de 2019.
- [11] FRANÇA, B. R., AZEVEDO, A. R. G., MONTEIRO, S. N., GARCIA FILHO, F. D. C., MARVILA, M. T., ALEXANDRE, J., & ZANELATO, E. B. Durability of soil-cement blocks with the incorporation of limestone residues from the processing of marble. **Materials Research**, v. 21, 2018.
- [12] SINGH, M.; SRIVASTAVA, A.; BHUNIA, D. An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 471-488, 2017.
- [13] BACARJI, E., TOLEDO Filho, R. D., KOENDERS, E. A. B., FIGUEIREDO, E. P., & Lopes, J. L. M. P. Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction and Building materials**, 45, 1-10, 2013.
- [14] ULIANA, J. G., CALMON, J. L., VIEIRA, G. L., TEIXEIRA, J. E. S. L., & NUNES, E. Heat treatment of processing sludge of ornamental rocks: application as pozzolan in cement matrices. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 2, p. 100-123, 2015.
- [15] BARROS, F.S. Efeito da substituição do cimento Portland por cinza de casca de arroz e cal nas propriedades de tijolos ecológicos. **Guaratinguetá**, SP, 2016.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6502:1995** Rochas e Solos - terminologia. **Rio de Janeiro**, 1995.
- [17] PAIVA, L. B., MORALES, A. R., DIAZ, F. R. V. DE. Organophilic Clays: Characteristics, Preparation Methods, Intercalation Compounds And Characterization Techniques. **Cerâmica**, 2008.
- [18] SANTOS, HG dos; ZARONI, M. J.; CLEMENTE, E. de P. Latossolos Vermelhos. Agência Embrapa de Informação Tecnológica–AGEITEC. Brasília, DF. Disponível em:< http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000fzyjaywi02w_x5ok0q43a0r9rz3uhk.html>. Acesso em, v. 18, 2014. Disponível em: Acesso em: maio de 2019.

-
- [19] ROSETE, LANA, M. DO C., PEREIRA, M.G., SCHIAVO, J.A., RAMPIM, L., SARTO, M.V. M., Chemical and oxidizable fractions of soil organic matter under different management systems in an Oxisol. **Pesq. agropec. bras.** vol.51 no.9 Brasília Sept. 2016.
- [20] TEIXEIRA, Ivonei. Estabilização de um solo laterítico argiloso para utilização como camada de pavimento. 2014. 109 p. **Dissertação (mestrado)** - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP, 2014.
- [21] ASHISH, D. K. Feasibility of waste marble powder in concrete as partial substitution of cement and sand amalgam for sustainable growth. **Journal of Building Engineering**, v. 15, p. 236-242, 2018.
- [22] NAPOLANO, L., MENNA, C., GRAZIANO, S. F., ASPRONE, D., D'AMORE, M., DE GENNARO, R., & Dondi, M. Environmental life cycle assessment of lightweight concrete to support recycled materials selection for sustainable design. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 370-384, 2016.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR, 12653:2015** Materiais pozolânicos-Especificação, Rio de Janeiro, 2015.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR, 16697:2018**. Cimento Portland: Requisitos, Rio de Janeiro, 2018.
- [25] SILVA, SANDRA REGINA. Tijolos de solo-cimento reforçado com serragem de Madeira”. **Dissertação**, Belo Horizonte, 2005.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. Solo-cimento na habitação popular. 1985, São Paulo. 14p. ilus. 30cm, 2012.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 12254:2013** Execução de sub-base ou base de solo-cimento. Procedimento. **Rio de Janeiro**, RJ, 2013. 5p.
- [28] CEBRACE - Centro Brasileiro de Construções e Equipamentos Escolares. Solo-cimento na construção de escolas – SC01. 2ª ed. Rio de Janeiro, **MEC/CEBRACE**, 1981. 39p. il. (sistemas construtivos 2).
- [29] BRAGANÇA, FÁBIO DO CARMO. Nanocompósitos poliméricos com argila preparados a partir de dispersões aquosas: efeito dos contra-íons e autoadesão, Tese de doutorado, **Campinas**, 2008.
- [30] SIQUEIRA, F. B.; HOLANDA, J. N. F. Reuse of grits waste for the production of soil–cement bricks. **Journal of environmental management**, v. 131, p. 1-6, 2013.
- [31] SILVEIRA, PAULO EDISON MARTINS, A aplicação do resíduo de construção e Demolição reciclado no compósito solo-cimento, **Dissertação de Mestrado**, Rio Claro, 2005.
- [32] AMARAL, MATEUS CARVALHO. Avaliação da incorporação de resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em tijolo solo-cimento. Campos dos goytacazes, RJ, 2014.
- [33] ABIROCHAS. Balanço das Exportações, Importações, Produção e Consumo Interno Brasileiro de Rochas Ornamentais em 2018. 2019.
- [34] ESTATÍSTICO, Anuário. Setor metalúrgico. **Brasília. Secretaria de Minas e Metalurgia–SMM. Ministério de Minas e Energia-MME**, v. 2000, 2019.
- [35] SILVA, J.B.; HOTZA, D.; SEGADÃES, AM; ACCHAR, W. Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. **Cerâmica**, v. 51, n. 320, p. 325-330, 2005.
- [36] MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 49, n. 312, p. 262-267, 2003.
- [37] ALIABDO, A. A., ELMOATY, A. E. M. A., & AUDA, E. M. Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. **Construction and building materials**, 50, 28-41, 2014.
- [38] TORRES, P.; MANJATE, R. S.; QUARESMA, S; FERNANDES, H. R., FERREIRA, J. M. D. F. Development of ceramic floor tile compositions based on quartzite and granite sludges. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 27, n. 16, p. 4649-4655, 2007.

-
- [39] DE SOUZA, L. G. M.; SANTOS, N. R.; CAVALCANTE, A. G. utilizing residues of marble and granite for building popular homes. **Journal of Building Engineering**, v. 9, p. 192-197, 2017.
- [40] SABOYA JR, F.; XAVIER, G. C.; ALEXANDRE, J. The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 10, p. 1950-1960, 2007.
- [41] ELMOATY, A. E. M. A. Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 743-752, 2013.
- [42] CORINALDESI, V.; MORICONI, G.; NAIK, T.R. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. **Construction and building materials**, v. 24, n. 1, p. 113-117, 2010.
- [43] VARDHAN, K., GOYAL, S., SIDDIQUE, R., & SINGH, M. Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 615-621, 2015, v. 96, p. 615-621, 2015.
- [44] BARROS, M. M., DE OLIVEIRA, M. F. L., DA CONCEIÇÃO RIBEIRO, R. C., BASTOS, D. C., & DE OLIVEIRA, M. G. Ecological bricks from dimension stone waste and polyester resin. **Construction and Building Materials**, 232, 117252. 2020
- [45] LLAJARUNA, Villalobos; ANTONIO, Manuel. Estudo do solo-cimento auto adensável para a fabricação de tijolos de pó de mármore e resíduo de construção, **Dissertação**. 2017.
- [46] LEITE, Mônica Batista. Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição. **Tese (Doutorado)**. Porto Alegre, 2001.
- [47] CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 307, 5 de julho de 2002 – Alterada pela Resolução nº 348,16 de agosto de 2004. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>> Acesso: junho de 2017.
- [48] JOHN, V.M. Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. **Tese (Livre Docência)** – USP, São Paulo, 2000.
- [49] MOREIRA, L. H. H. Avaliação Da Influência Da Origem E Do Tratamento Dos Agregados Reciclados De Resíduos De Construção E Demolição No Desempenho Mecânico Do Concreto Estrutural. São Paulo. **Dissertação (Mestrado em Engenharia)**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2010
- [50] PRESIDENTE PRUDENTE. Prefeitura Municipal. Secretaria Municipal de Meio Ambiente. **Plano de Gerenciamento Integrado dos Resíduos Sólidos de Presidente Prudente**. Presidente Prudente - SP, 2012. 175p.
- [51] Lei Nº 12305:2010 - "Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências." - Data da legislação: 02/08:2010 - **Publicação DOU**, de 03/08:2010.
- [52] BRASILEIRO, L. L. Utilização de Agregados Reciclados Provenientes de RCD em Substituição do Agregado Natural no Concreto Asfáltico. Teresina – PI, 2013. 118f. Dissertação, (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Piauí, UFPI, **Centro de Ciências da Natureza, CNN**, 2013.
- [53] MIRANDA, L.F.R. Estudo de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado. São Paulo, 2000. 172p. **Dissertação (Mestrado)** - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [54] TAVARES, L. M.; DE SOUZA KAZMIERCZAK, C. Estudo da influência dos agregados de concreto reciclado em concretos permeáveis. **RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal**, 2016, 9.1.
- [55] ETXEBERRIA, M., VÁZQUEZ, E., MARÍ, A., & BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and concrete research**, v. 37, n. 5, p. 735-742, 2007.

- [56] TENÓRIO, J. J. L., GOMES, P. C. C., RODRIGUES, C. C.; DE ALENCAR, T. F. F. "Concrete produced with recycled aggregates." **RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal** 5.5 (2012).
- [57] THOMAS, C.; SETIÉN, J.; POLANCO, J. A. Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 536-546, 2016.
- [58] SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 201-217, 2014.
- [59] EGUCHI, K., TERANISHI, K., NAKAGOME, A., KISHIMOTO, H., SHINOZAKI, K., & NARIKAWA, M. Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction. **Construction and Building Materials**, 21(7), 1542-1551, 2007.
- [60] TAVAKOLI, M.; SOROUSHIAN, P. Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. **Materials Journal**, v. 93, n. 2, p. 178-181, 1996.
- [61] MATIAS, D., DE BRITO, J., ROSA, A., & PEDRO, D. Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates—Influence of the use of superplasticizers. **Construction and building materials**, v. 44, p. 101-109, 2013.
- [62] BUI, N. K.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. Improvement of mechanical properties of recycled aggregate concrete basing on a new combination method between recycled aggregate and natural aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 376-385, 2017.
- [63] 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**, p. 205-212, 2008.
- [64] GASPARETO, M. G. T.; TEIXEIRA, S. R. Utilização de Resíduo de Construção Civil e Demolição (RCD) como Material não Plástico para a Produção de Tijolos Cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 22, n. 2, p. 40-46, 2017.
- [65] SANTIAGO, A. K.; RODRIGUES, M. N.; OLIVEIRA, M.S. Light Steel Framing como alternativa para a construção de moradias populares. **CONSTRUMETAL. 4ª edição**, 2010.
- [66] PIGOZZO, B. N.; SERRA, S. M. B.; FERREIRA, M. A. A industrialização na construção e o estudo de uma rede de empresas em obra de pré-fabricados em concreto armado. 2005.
- [67] SANTANA, S. J.; CARVALHO, X. A.; FARIA, A. R. Tijolo Ecológico versus Tijolo Comum: benefícios ambientais e economia de energia durante o processo de queima. Mato Grosso: **IBEAS - Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais**, 2013.
- [68] MOTTA, J. C. S. S., MORAIS, P. W. P., ROCHA, G. N., DA COSTA TAVARES, J., GONÇALVES, G. C., CHAGAS, M. A., LUCAS, T. D. P. B. Tijolo de solo-cimento: análise das características físicas e viabilidade econômica de técnicas construtivas sustentáveis. **exacta**, v. 7, n. 1, p. 13-26, 2014.
- [69] ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland. Fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento com utilização de prensas manuais. São Paulo: ABCP, Boletim Técnico BT-111, 1985, 5p.
- [70] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 10833:2013**. Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica. Rio de Janeiro, 2013.
- [71] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 8491:2012**. Tijolo maciço de solo-cimento. Rio de Janeiro 2013.
- [72] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 8492:2012**. Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio. Rio de Janeiro 2013.
- [73] MORAIS, M. B.; CHAVES, A. M.; JONES, K. M. Análise de viabilidade de aplicação do tijolo ecológico na construção civil contemporânea. **Revista Pensar Engenharia**, v. 2, n. 2, 2014.
- [74] RANDAZZO, L. et al. Moisture absorption, thermal conductivity and noise mitigation of clay based plasters: The influence of mineralogical and textural characteristics. **Applied Clay Science**, v. 132, p. 498-507, 2016.

- [75] ISLAM, S.; BHAT, G. Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials from recycled textiles. **Journal of environmental management**, v. 251, p. 109536, 2019.
- [76] ZHANG, N.; WANG, Z. Review of soil thermal conductivity and predictive models. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 117, p. 172-183, 2017.
- [77] BASSIOUNY, R.; ALI, M. R.O.; NOURELDEEN, E. H. Modeling the thermal behavior of Egyptian perforated masonry red brick filled with material of low thermal conductivity. **Journal of Building Engineering**, v. 5, p. 158-164, 2016.
- [78] HANDBOOK, ASHRAE. HVAC systems and equipment. **American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA**, p. 1-10, 2005.
- [79] DEL COZ DIAZ, J. J., NIETO, P. G., RODRIGUEZ, A. M., MARTÍNEZ-LUENGAS, A. L., & BIEMPICA, C. B. Non-linear thermal analysis of light concrete hollow brick walls by the finite element method and experimental validation. **Applied Thermal Engineering**, v. 26, n. 8-9, p. 777-786, 2006.
- [80] LI, L. P., WU, Z. G., HE, Y. L., LAURIAT, G., & TAO, W. Q. Optimization of the configuration of 290x 140x 90 hollow clay bricks with 3-D numerical simulation by finite volume method. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 10, p. 1790-1798, 2008.
- [81] DE MORAES, E. G., SANGIACOMO, L., STOCHERO, N. P., ARCARO, S., BARBOSA, L. R., LENZI, A., ... & DE OLIVEIRA, A. N. Innovative thermal and acoustic insulation foam by using recycled ceramic shell and expandable styrofoam (EPS) wastes. **Waste Management**, v. 89, p. 336-344, 2019.
- [82] LISOT, A.; SOARES, P. F. Ressonadores de Helmholtz em barreiras acústicas: Avaliação do desempenho na atenuação do ruído de tráfego. **UEM, Coimbra, Portugal**, 2008.
- [83] DE SILVA, GHMJ S.; PERERA, B. V. A. Effect of waste rice husk ash (RHA) on structural, thermal and acoustic properties of fired clay bricks. **Journal of Building Engineering**, v. 18, p. 252-259, 2018.
- [84] HALPERIN, D. Ruído ambiental e distúrbios do sono: uma ameaça à saúde? **Ciência do sono** v. 7, n. 4, p. 209-212, 2014.
- [85] LAMOUNIER, M. M. Critérios para seleção de materiais acústicos utilizados em recintos fechados para diferentes tipologias. 2008.
- [86] BERARDI, U.; IANNACE, G. Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. **Building and Environment**, v. 94, p. 840-852, 2015.
- [87] BERARDI, U.; IANNACE, G. Predicting the sound absorption of natural materials: Best-fit inverse laws for the acoustic impedance and the propagation constant. **Applied Acoustics**, v. 115, p. 131-138, 2017.
- [88] BINICI, H., AKSOGAN, O., BAKBAK, D., KAPLAN, H. E ISIK, B. Sound insulation of fibre reinforced mud brick walls. **Materiais de Construção e Construção**, 23 (2), 1035-1041, 2009.
- [89] GROTTA, D. DE L. Materiais e técnicas contemporâneas para controle de ruído aéreo em edifícios de escritórios: subsídios para especificações. Diss. Universidade de São Paulo, 2009.
- [90] NYERS, J., KAJTAR, L., TOMIĆ, S., & NYERS, A. Investment-savings method for energy-economic optimization of external wall thermal insulation thickness. **Energy and Buildings**, 86, 268-274, 2015.
- [91] FERREIRA NETO, M. D. F., & BERTOLI, S. R. Desempenho acústico de paredes de blocos e tijolos cerâmico: uma comparação entre Brasil e Portugal. **Ambiente Construído**, 2010.
- [92] <http://www.knaufamf.com/en/competence/acoustics/index.php> acessado em 13 de janeiro de 2020.
- [93] QUARESMA, C.C., FILHO, A. P., Relações entre uso e ocupação das terras, ampliação de áreas e redução da biodiversidade do cerrado em solos arenosos do estado de São Paulo. **VI Seminário Latino Americano de Geografia Física**, Universidade de Coimbra, Maio de 2010.
- [94] PINHEIRO, M. L., ALVARENGA, R. D. C. S. S., RIBEIRO, B. C., SILVA JUNIOR, P. R., SARMET, M. S., & Fassoni, D. P. (2013). Avaliação experimental de blocos prensados de solo-cimento com adição de grãos. **Ambiente Construído**, 13(2), 29-46.

-
- [95] SILVA, L. C. F.; MENDES, J. U. L.; LADCHUMANANANDASIVAM, Rasiyah. Análise das Propriedades Mecânicas e Térmicas de Tijolos Solo-Cimento com e sem Adição de Pó da Fibra do Coco. In: **Congresso Nacional de engenharia Mecânica**. 1999.
- [96] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 52:2009**. Agregado miúdo-determinação da massa específica e massa específica aparente. **Rio de Janeiro**, 2009.
- [97] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7181:2018**. Solo-Análise granulométrica. **Rio de Janeiro**, 2018.
- [98] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR, NM 248:2003**. Agregados-Determinação da composição granulométrica. **Rio de Janeiro**, 2003.
- [99] FUSHIMI, M. Vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos lineares nas áreas rurais do município de Presidente Prudente-SP. 2012.
- [100] DANA, J. D.; HURLBUT, C. S. Manual de Mineralogia, Ed. **Livros Técnicos e Científicos SA, RJ, Brasil**, 1978.
- [101] PAL, J., GHORAI, S., NANDI, B., CHAKRABORTY, T., DAS, G., & VENUGOPALAN, T. Effect of pyroxenite and olivine minerals as source of MgO in hematite pellet on improvement of metallurgical properties. **Journal of Central South University**, v. 22, n. 9, p. 3302-3310, 2015.
- [102] ALBERS, A. P. F., MELCHIADES, F. G., MACHADO, R., BALDO, J. B., & BOSCHI, A. O. Um método simples de caracterização de argilominerías por difração de de raios X (a simple method for the characterization of clay minerals by X-ray diffraction). **Cerâmica**. v.48, n.305, p. 34, 2009
- [103] TAVARES, L. M.; DE SOUZA KAZMIERCZAK, C. Estudo da influência dos agregados de concreto reciclado em concretos permeáveis. **RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 9, n. 1, 2016.