HELLEN MARA ALVES CHAVES RODRIGUES

UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO

LAVRAS – MG

2025

HELLEN MARA ALVES CHAVES RODRIGUES

UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Biomateriais, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor.

Orientadora
Dra. Maria Alice Martins

Co-orientador
Dr. José Benedito Guimarães Junior

LAVRAS – MG

2025

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Rodrigues, Hellen Mara Alves Chaves.
Utilização de agregados reciclados para produção de blocos de concreto / Hellen Mara Alves Chaves Rodrigues. - 2025.
75 p. : il.

Orientadora: Maria Alice Martins
Coorientador: José Benedito Guimarães Junior

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2025.
Bibliografia.

1. Resíduos de construção e demolição. 2. Alvenaria. 3. Partículas naturais. I. Martins, Maria Alice . II. Guimarães Junior, José Benedito. III. Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

HELLEN MARA ALVES CHAVES RODRIGUES

UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO

USE OF RECYCLED AGGREGATES FOR THE PRODUCTION OF CONCRETE BLOCKS

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Biomateriais, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 22 de maio de 2025.
Dra. Evelize Aparecida Amaral – UFLA
Dr. Felipe Gomes Batista – UFLA
Dr. Lorran de Souza Arantes - DCF/ESAL
Dra. Cinthia Aparecida Silva – UFG

Orientadora
Dra. Maria Alice Martins

Co-orientador
Dr. José Benedito Guimarães Junior

LAVRAS – MG

2025

Aos amores da minha vida:

Meus pais Ricardo e Magda, por serem meus exemplos de vida.

Meu esposo João Vagner por ser meu porto seguro.

Minhas irmãs Nayara e Carol por serem luz em minha vida.

E a Sarah, meu sonho realizado, que nasce junto com essa conquista.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Jesus Cristo, Senhor e salvador da minha vida, por ter me concedido sabedoria e discernimento para realização deste trabalho.

Aos meus pais Ricardo e Magda pelo amor incondicional. Vocês são minha estrutura e meus maiores exemplos de honestidade e caráter. Devo tudo o que sou a vocês.

As minhas irmãs Nayara e Carol por serem minha referência de amizade, cuidado e amor. Vocês são parte de mim.

Ao meu esposo João Vagner, por estar ao meu lado em todos os momentos me incentivando e torcendo por mim. Seu amor e dedicação me motivam a ser melhor a cada dia.

A professora Dra. Maria Alice Martins pela orientação, suporte e dedicação durante a realização deste trabalho. Sua ajuda deixou essa jornada mais leve.

Ao professor Dr. José Benedito Guimarães Junior pela coorientação e suporte durante a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais (PPGBIOMAT) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Aos membros de todas as bancas de defesa de projeto, qualificação e tese pela disposição e por todas as contribuições ao trabalho.

Aos demais *funcionários e amigos* do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, por todo auxílio e suporte.

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois, o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar”.

(Josué 1:9)

RESUMO

A crescente demanda por soluções sustentáveis na construção civil tem impulsionado pesquisas voltadas à reutilização de resíduos como alternativa à extração de recursos naturais não renováveis. Nesse contexto, a produção de blocos de concreto com insumos reciclados se apresenta como estratégia promissora para mitigar impactos ambientais, ao mesmo tempo em que busca manter o desempenho técnico requerido para aplicações estruturais e não estruturais. Esta tese teve como objetivo geral investigar alternativas sustentáveis para a produção de blocos de concreto, com foco na substituição parcial de agregados naturais por resíduos de construção e demolição (RCDs) e resíduos lignocelulósicos provenientes de madeiras amplamente utilizadas na construção civil, como pinus e eucalipto. A pesquisa se fundamentou em um amplo levantamento teórico sobre resíduos sólidos, políticas públicas, classificação e reaproveitamento de materiais, além da caracterização dos blocos de concreto convencionais e daqueles produzidos com materiais alternativos. A partir dessa base, foram realizadas formulações experimentais para avaliar os efeitos físicos, térmicos e mecânicos da incorporação dos resíduos na matriz cimentícia. A análise crítica dos dados revelou que, em proporções controladas, o uso desses resíduos pode contribuir para a redução do impacto ambiental do setor da construção, sem comprometer significativamente o desempenho dos blocos. Os resultados destacam o potencial técnico e ecológico dessa abordagem, incentivando a adoção de práticas mais sustentáveis e circulares na cadeia produtiva da construção civil.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição; Alvenaria; Partículas naturais.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable solutions in the construction industry has driven research into the reuse of waste as an alternative to the extraction of non-renewable natural resources. In this context, the production of concrete blocks with recycled inputs is a promising strategy for mitigating environmental impacts while maintaining the technical performance required for structural and non-structural applications. The general aim of this thesis was to investigate sustainable alternatives for the production of concrete blocks, focusing on the partial replacement of natural aggregates with construction and demolition waste (CDW) and lignocellulosic waste from wood widely used in construction, such as pine and eucalyptus. The research was based on a broad theoretical survey of solid waste, public policies, the classification and reuse of materials, as well as the characterization of conventional concrete blocks and those produced with alternative materials. On this basis, experimental formulations were carried out to assess the physical, thermal and mechanical effects of incorporating waste into the cement matrix. Critical analysis of the data revealed that, in controlled proportions, the use of this waste can contribute to reducing the environmental impact of the construction sector, without significantly compromising the performance of the blocks. The results highlight the technical and ecological potential of this approach, encouraging the adoption of more sustainable and circular practices in the construction production chain.

Keywords: Construction and demolition waste; Masonry; Natural particles.

INDICADORES DE IMPACTO

Os indicadores de impacto da presente pesquisa destacam-se por sua relevância no contexto de sustentabilidade. Em função da crescente demanda por soluções sustentáveis, o trabalho oferece uma análise aprofundada em relação a reutilização de resíduos como alternativa à extração de recursos naturais não renováveis. Tal análise, permite compreender a possibilidade de mitigar impactos ambientais, ao mesmo tempo em que busca manter o desempenho técnico requerido para aplicações estruturais e não estruturais de blocos de concreto. Sendo assim, o objetivo deste estudo foi investigar alternativas sustentáveis para produção de blocos de concreto, com foco na substituição parcial de agregados naturais por resíduos de construção de demolição (RCDs) e resíduos lignocelulósicos provenientes de madeiras utilizadas na construção civil, como pinus e eucalipto. Os resultados obtidos nesse estudo evidenciam que a reutilização dos resíduos lignocelusicos e dos RCDs é promissora. Além disso, a variação dos traços dos blocos deve ser aprimorada, de maneira que sejam incorporados maiores teores de partículas visando conferir melhoria nas propriedades mecânicas físicas e térmicas, resultando em um maior potencial de utilização.

IMPACT INDICATORS

The impact indicators of this research stand out for their relevance in the context of sustainability. Due to the growing demand for sustainable solutions, the work offers an in-depth analysis of the reuse of waste as an alternative to the extraction of non-renewable natural resources. This analysis allows us to understand the possibility of mitigating environmental impacts, while seeking to maintain the technical performance required for structural and non-structural applications of concrete blocks. Therefore, the aim of this study was to investigate sustainable alternatives for the production of concrete blocks, focusing on the partial replacement of natural aggregates with demolition construction waste (CDW) and lignocellulosic waste from wood used in construction, such as pine and eucalyptus. The results obtained in these studies show that the reuse of lignocellulosic waste and CDW is promising. In addition, the variation in the design of the blocks should be improved, so that higher levels of particles are incorporated to improve the mechanical, physical and thermal properties, resulting in greater potential for use.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE

Figura 1- Resíduos de construção e demolição. 18
Figura 2 - Resíduos de madeira gerados pela construção civil.....21
Figura 3 - Comparação da coleta de resíduos de construção e demolição (RCDs) nos municípios do Brasil.....22
Figura 4 - Coleta de resíduos de construção e demolição pelos municípios nas regiões. .22
Figura 5 - Conjunto habitacional Central Park Lapa.....24
Figura 6 - Bloco vazado de concreto simples.....24
Figura 7 - Dimensões dos principais blocos comercializados.....26

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

Fig. 1. Resíduos das madeiras de pinus e eucalipto 38
Fig. 2 Resíduos de construção e demolição.....39
Fig. 3 Dimensões dos blocos de concreto. 40
Fig. 4 Curvas de difração de raios X (DRX) e Índice de cristalinidade (I.C.) para as partículas. 44
Fig. 5 Curvas de TG e DTG para as partículas de eucalipto em atmosfera oxidativa com ar sintético (a), e em atmosfera inerte com nitrogênio (b).....45
Fig. 6 Curvas de TG e DTG para as partículas de pinus em atmosfera oxidativa com ar sintético (a), e em atmosfera inerte com nitrogênio (b). 46
Fig. 7 Espectros obtidos por espectroscopia na Região do Infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) das partículas de eucalipto.....47
Fig. 8 Espectros obtidos por espectroscopia na Região do Infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) das partículas de pinus.....47
Fig. 9 Análise granulométrica dos resíduos de construção e demolição. 48
Fig. 10 Composição granulométrica dos resíduos de construção e demolição. 49
Fig. 11 Composição química dos resíduos de construção e demolição.....50
Fig. 12 Principais elementos químicos obtidos na amostra de RCD.....51
Fig. 13 Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura do RCD.....52
Fig. 14 Densidade aparente dos blocos confeccionados com resíduos de construção e demolição (RCDs), com e sem adição de 2,5% de partículas de eucalipto e pinus.....53
Fig. 15 Média da densidade aparente dos blocos dos 3 tratamentos em função do teor de RCD, em nível de 95% de confiança.....54

Fig. 16 Porosidade aparente dos blocos confeccionados com resíduos de construção e demolição (RCDs), com e sem adição de 2,5% das partículas de eucalipto e pinus. 55
Fig. 17 Média da porosidade dos blocos dos 3 tratamentos em função do teor de RCD, em nível de 95% de confiança. 56
Fig. 18 Absorção de água dos blocos confeccionados com resíduos de construção e demolição (RCDs), com e sem adição de 2,5% de partículas de eucalipto e pinus. 57
Fig. 19 Média da absorção de água dos blocos dos 3 tratamentos em função do teor de RCD, em nível de 95% de confiança. 58
Fig. 20 Resistência à compressão dos blocos confeccionados com resíduos de construção e demolição (RCDs), sem de partículas de madeira. 59
Fig. 21 Resistência à compressão dos blocos confeccionados com resíduos de construção e demolição (RCDs), com adição de 2,5% das partículas de eucalipto. 60
Fig. 22 Resistência à compressão dos blocos confeccionados com resíduos de construção e demolição (RCDs), com adição de 2,5% das partículas de pinus. 61
Fig. 23 Médias da resistência à compressão dos blocos dos 3 tratamentos, em função do teor de resíduo de construção e demolição (RCD), em nível de 95% de confiança. 62
Fig. 24 Médias dos 3 tratamentos para a condutividade térmica dos blocos em função do teor de resíduos de construção e demolição (RCDs). 65
Fig. 25 Médias dos 3 tratamentos para a resistência térmica dos blocos em função do teor de resíduos de construção e demolição (RCDs). 66
Fig. 26 Imagens da superfície dos blocos com resíduos de construção e demolição (RCDs) sem adição de partículas, obtidas por um microscópio estereoscópio, com aumento de 75 x. (a) 0% RCDs. (b) 20% RCDs. (c) 40% RCDs. (d) 50% RCDs. 67
Fig. 27 Imagens da superfície dos blocos com resíduos de construção e demolição (RCDs) com adição das particulas de madeira de eucalipto, obtidas por um microscópio estereoscópio, com aumento de 75 x. (a) 0% RCDs. (b) 20% RCDs. (c) 40% RCDs. (d) 50% RCDs. 67
Fig. 28 Imagens da superfície dos blocos com resíduos de construção e demolição (RCDs) com adição das partículas da madeira de pinus, obtida por um microscópio estereoscópio, com aumento de 75 x. (a) 0% RCDs. (b) 20% RCDs. (c) 40% RCDs. (d) 50% RCDs. ...68

LISTA DE TABELAS

PRIMEIRA PARTE

Tabela 1 - Designação por classe, largura dos blocos e espessura mínima das paredes. ..25
Tabela 2 - Requisitos para resistência à compressão, absorção e retração de blocos de concreto. 26

SEGUNDA PARTE

Tabela 1 - Formulação dos blocos com resíduo de construção e demolição (RCD).....41
Tabela 2 - Formulação dos blocos com resíduo de construção e demolição (RCD) e resíduo de madeira de eucalipto e ou pinus. 41
Tabela 3 - Ensaios físicos e mecânico para caracterização dos blocos 42
Tabela 4 - Densidade aparente e absorção de água dos resíduos de construção e demolição. 50
Tabela 5 - Propriedades térmicas para os blocos com resíduos de construção civil (RCDs) sem adição das particulas de madeira de eucalipto e pinus. 63
Tabela 6 - Propriedades térmicas para os blocos com resíduos de construção civil (RCDs) com adição das particulas de madeira de eucalipto. 64
Tabela 7 - Propriedades térmicas para os blocos com resíduos de construção civil (RCDs) com adição das particulas de madeira de pinus. 64

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE 15
1 INTRODUÇÃO 15
2 OBJETIVOS 16
2.1 Objetivo geral 16
2.2 Objetivos específicos 16
3 REFERENCIAL TEÓRICO 17
3.1 Contexto dos resíduos sólidos 17
3.1.1 Resíduos de construção civil 18
3.1.2 Resíduos de demolição 19
3.1.3 Classificação dos resíduos sólidos 19
3.1.4 Geração de resíduos de construção e demolição no Brasil 21
3.2 Compósitos 22
3.3 Blocos de concreto 23
3.4 Resíduos utilizados como agregados em blocos de concreto 27
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 29
REFERÊNCIAS 30
SEGUNDA PARTE – ARTIGO 34
1 INTRODUÇÃO 36
2 MATERIAL E MÉTODOS 38
2.1 Materiais Utilizados 38
2.2 Processamento dos resíduos de construção e demolição e dos resíduos de madeira 38
2.3 - Caracterização dos materiais 39
2.4 Produção dos blocos 40
2.5 Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos blocos 41
2.6 Determinação das propriedades térmicas 42
2.7 Morfologia 43
2.8 Análise estatística 43
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 44
3.1 Caracterização dos materiais lignocelulósicos 44
3.2 Caracterização dos RCDs 48
3.3 Propriedades físicas dos blocos 52

3.4 Propriedade mecânica dos blocos 59
3.5 Propriedades térmicas dos blocos 63
3.6 Morfologia 66
4 CONCLUSÃO 69
REFERÊNCIAS 70

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

Os blocos de concreto estão entre os principais materiais utilizados na indústria da construção devido à sua facilidade de instalação, versatilidade e a ampla gama de formas, tamanhos e texturas disponíveis para atender as diferentes demandas do mercado (KOURIBO et al., 2024). Porém, o processo de fabricação dos blocos dependente integralmente de recursos naturais não renováveis, como areia e pó de brita. Além disso, a produção do cimento, aliada a esses materiais, gera uma significativa emissão de CO_2, o que agrava as preocupações ambientais relacionadas ao setor (NEDELJKOVIĆ, 2021).

Com o acelerado e contínuo da população mundial, aumentou a demanda por infraestrutura, levando a uma maior necessidade de materiais para construção. Entre esses materiais, o concreto destaca-se como um dos mais utilizados globalmente, sendo composto por cimento, agregados e água. No entanto, a produção de agregados tem contribuído significativamente para o consumo de recursos naturais. Estudos realizados na Índia estimam que a demanda por concreto atingirá aproximadamente 1 bilhão de toneladas até 2027 (ATTRI et al., 2022). Outro fator que tem se tornado cada vez mais preocupante são as quantidades de resíduos de construção e demolição (RCDs) gerados pela indústria da construção. Esses resíduos, em geral, apresentam alta heterogeneidade, sendo compostos por concreto, tijolos, vidro, gesso, cerâmica, solo escavado, madeira, metais, entre outros. (LUO et al., 2022). Anualmente, bilhões de toneladas de RCDs são produzidas em todo mundo, e a maior parte desses resíduos é descartada em aterros sanitários. No entanto, a disposição de apenas 1 m² de RCDs em um aterro pode resultar na perda de 1,5 toneladas de água subterrânea, além de causar a degradação de cerca de 53 de solo (DING et al., 2016).

Diante deste cenário, torna-se fundamental aprimorar a taxa de reaproveitamento dos resíduos de construção e demolição (RCDs), visando reduzir a quantidade de subprodutos gerados que, muitas vezes, são descartados ou queimados, causando sérios impactos ambientais (MENG et al., 2018). Uma estratégia promissora para essa finalidade consiste na reutilização dos RCDs na fabricação de blocos de concreto. Essa abordagem não apenas contribui de forma sustentável para o setor da construção civil, ao preservar o solo para futuras urbanizações e proteger o meio ambiente, mas também diminui o volume de resíduos destinados a aterros sanitários (FRAJ e IDIR, 2017).

Assim, a produção de blocos de concreto utilizando materiais residuais provenientes de obras e indústrias apresenta-se como uma alternativa viável e ambientalmente responsável,

reduzindo a demanda por recursos naturais não renováveis. Nesse contexto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a viabilidade da incorporação desses resíduos na produção industrial de blocos pré-fabricados de concreto, oferecendo uma solução sustentável para o descarte de resíduos da construção civil e da indústria madeireira.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste estudo foi avaliar a utilização de resíduos de construção civil em substituição aos agregados miúdos, bem como a adição de resíduos de madeira de eucalipto e pinus (também utilizados na construção civil) na produção de blocos de concreto.

Avaliar a viabilidade do uso de RCDs e de partículas de madeira recicladas (Eucalipto e Pinus) como substitutos parciais do agregado miúdo na produção de blocos de concreto.

2.2 Objetivos específicos

a) Apresentar uma alternativa para destinação dos resíduos da construção civil e da indústria madeireira;
b) Investigar a viabilidade de utilização de resíduos da construção civil como agregado, na produção em escala industrial de blocos de concreto pré-moldado;
c) Investigar a influência da utilização de resíduos das madeiras de Eucalipto e Pinus nas propriedades de blocos de concreto pré-moldado produzidos em escala industrial.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Contexto dos resíduos sólidos

Os resíduos sólidos são resultados das atividades humanas, principalmente em áreas urbanas, onde há grande concentração de pessoas e consequentemente, o volume de resíduos produzidos é maior, tornando-se um problema para a sociedade e mostrando a necessidade de locais adequados para seu despejo. A falta de tratamento dos resíduos sólidos antes do seu despejo no solo, e o grande volume desses resíduos são um problema que têm gerado grande preocupação do governo e da sociedade. Essa preocupação contribuiu para a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que foi instituída pela lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 (DE CARVALHO et al. 2019).

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010), resíduos sólidos são definidos como:

> Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (PNRS, 2010).

Os resíduos de construção de demolição (RCDs), não são um problema recente no mundo e começaram a aumentar com o crescimento da população em função do aumento das necessidades de habitação. Conforme os anos se passaram e como consequência da rápida urbanização e o *boom* da construção civil na década de 1990, que ocorreu em quase todo o mundo, a quantidade de resíduos de construção e demolição gerados começou a aumentar a níveis incontroláveis (Figura 1). Em função do espaço limitado dos aterros, do constante aumento dos custos da proteção ambiental eficaz, e considerando que os recursos naturais estão se esgotando e ameaçando todo o planeta, são necessárias ações para reciclar ou reutilizar os resíduos de construção de demolição gerados (ELGIZAWY et al., 2016).

Figura 1- Resíduos de construção e demolição.

Fonte: Google imagens.

Os resíduos de construção e demolição são gerados nos canteiros de obras e são originados, como resultado direto da atividade da construção civil (MYMRIN, 2015). Esses resíduos incluem entulhos, fibra de vidro, concreto, tijolos, gesso, asfalto, metal, madeira, calafetagem, papel e cartão, resíduos de telhados, plástico, alcatrão e outros materiais semelhantes. Incluem também diversas tintas, adesivos, fixadores e selantes utilizados na construção civil, materiais de entulho, de embalagem e de limpeza de aterros (DEVI *et al.*, 2021). E existem classificações para os resíduos gerados pela construção civil.

3.1.1 Resíduos de construção civil

Os resíduos de construção civil são conceituados como materiais de construção parcialmente limpo e heterogêneos produzidos a partir das diversas atividades da construção. As prováveis fontes de geração de resíduos de construção são classificadas em seis principais categorias: fonte de aquisição, fonte de projeto, fonte de manuseio de materiais, fonte residual, fonte de operação e outras fontes (DEVI *et al.,* 2021). Contudo, a qualidade e a quantidade dos resíduos de construção originados a partir de qualquer projeto específico variam em função dos tipos de materiais e circunstâncias do projeto. A taxa anual de produção de resíduos de construção e demolição de todo o planeta está em torno de 3 bilhões de toneladas/ano (SARAVANA, 2019).

3.1.2 Resíduos de demolição

Os materiais das construções demolidas são os agregados, madeira, concreto, vidro, papel, metal e isolamento, os quais geralmente estão contaminados com fixadores, adesivos, tintas, revestimentos de parede, sujeira e resíduos de isolamento térmico e/ou acústico. Esses tipos de resíduos são originados a partir da remoção ou demolição seletiva ou completa de estruturas existentes, tanto por meios artificiais como por desastres naturais, como terremotos, furacões, inundações, entre outros (ELGIZAWY *et al*., 2016). Além dos resíduos que são gerados em obras de reforma e remodelação, estima- se que a quantidade de resíduos de demolição de edifícios residenciais seja em torno de 1,3 a 1,6 toneladas/m² da área do piso inferior da edificação. Já a demolição de estruturas industriais gera entre 1,5 a 2,0 toneladas/m² de toda a área. Os resíduos de demolição de estruturas industriais normalmente são estimados em 1,0 a 2,0 toneladas/m² de resíduos de demolição da área do nível inferior (DEVI *et al.*, 2021).

Em seu trabalho, Devi *et al.* (2021) descrevem que diversos benefícios podem ser obtidos como resultado de uma gestão dos resíduos da construção, tais como: a conservação e preservação de recursos naturais, redução de resíduos não renováveis, além de minimizar os impactos no meio ambiente e aumentar ou prevenir a longo prazo a vida útil do local de disposição/aterro. E compreender a classificação dos resíduos é fundamental para direcionar seu reaproveitamento na construção civil.

3.1.3 Classificação dos resíduos sólidos

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos devem ser classificados de acordo com seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública para que possam ser gerenciados de maneira adequada. Os resíduos são classificados em duas classes:

a) Resíduos de Classe I – Perigosos;
b) Resíduos de Classe II – Não perigosos;
   - Resíduos de Classe II A – Não inertes;
   - Resíduos de Classe II B – Inertes;

Os resíduos de Classe I são aqueles que apresentam periculosidade e risco ao meio ambiente e saúde pública. Esses resíduos necessitam de tratamento e locais especiais para disposição, visto que suas características podem variar entre reatividade, corrosividade, inflamabilidade, toxicidade e patogenicidade. Exemplos: lâmpada com vapor de mercúrio, solventes, amianto e etc.

Os resíduos de classe II A, não inertes, são aqueles não apresentam periculosidade e podem apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade, ou solubilidade em água, geralmente possuem características de resíduos domésticos. Os resíduos de classe II B, inertes, são todos aqueles que quando submetidos aos testes de solubilização, não apresentam constituintes solubilizados com concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, conforme a norma NBR 10004 (2004).

3.1.3.1 Resíduos de madeira

A madeira é material natural, que apresenta propriedades físicas e mecânicas capazes de garantir a possibilidade de aplicações arquitetônicas e estruturais diversas, sendo um dos principais materiais utilizados na construção civil. Contudo, o processo de beneficiamento industrial da madeira gera grandes quantidades de resíduos que diversas vezes são dispostos de maneira inadequada (MENDES, 2015). A Resolução nº 307/02 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) classifica o resíduo de madeira em: Classe B – Resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, metais, gesso e madeiras. E os principais resíduos de madeira encontrados, são aqueles provenientes de escoras e formas (CAVALCANTI e ALVES, 2018).

Dentre todos os resíduos que são produzidos pela construção civil, de acordo com Jahan et al. (2022), os resíduos de madeira estão classificados como o segundo tipo mais importante e são responsáveis por pelo menos 20-30% do total de resíduos gerados. Somente no ano de 2020, os resíduos de madeira gerados nos Estados Unidos representaram 55,75 milhões de toneladas, enquanto que 22,72 milhões de toneladas foram geradas por Hong Kong e 4,5 milhões de toneladas produzidas pelo Reino Unido (JAHAN et al., 2022). Esses dados relatam que são geradas grandes quantidades de resíduo de madeira e também que são variáveis, em função dos diferentes tipos de sistemas construtivos que são adotados em cada região, da disponibilidade de materiais e questões culturais (ALMERON et al., 2024).

Com crescimento populacional e urbano, cada vez mais, há uma grande demanda de infraestrutura e dentre os materiais de construção que são utilizados, o concreto é a principal escolha, devido principalmente a sua flexibilidade de utilização (VAN DAMME, 2018). Porém, o concreto armado, depende de um sistema de escoramento e formas para o apoio temporário das barras de aço e do próprio concreto que é majoritariamente confeccionado com madeiras. E por se tratar de uma utilização temporária essa madeira utilizada (Figura 2), nesses sistemas de escoramentos e formas, se torna um resíduo sólido significativo da construção civil (ALMERON et al., 2024).

Figura 2 - Resíduos de madeira gerados pela construção civil.

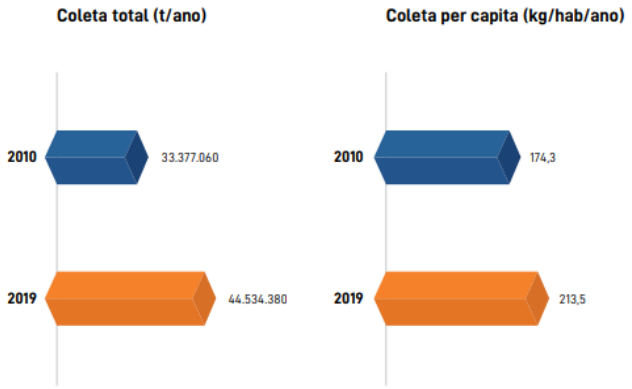
Fonte: Google imagens.

3.1.4 Geração de resíduos de construção e demolição no Brasil

No Brasil, algumas estimativas indicam que a produção de resíduos de construção e demolição é superior a 70 Mt/ano, cerca de 500 kg/ano *per capita*, porém, esse valor é variável e está correlacionado com o índice de desenvolvimento humano (IDH) (CONTRERAS *et al.* 2016). No ano de 2010, entrou em vigor a Lei 12305, proposta pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, e desde seu surgimento, melhorou significativamente os sistemas de resíduos (IBÁÑEZ-FORÉS *et al.*, 2018). Segundo dados do Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil, da ABRELPE (2020), pouco mais da metade dos resíduos sólidos urbanos são descartados em aterros sanitários (59,5%) e 73,1% dos municípios brasileiros apresentam iniciativas de coleta seletiva de materiais recicláveis.

A última pesquisa realizada em 2021, pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), indicou que no ano de 2020 foram coletados aproximadamente 47 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição. E a coleta *per capita* correspondente a 221,19 kg/ habitante/ ano. Foi realizada ainda, uma comparação entre a coleta de resíduos de construção e demolição entre os anos de 2010 e 2019, e foi constatado que houve um aumento de 33, 4% na quantidade de resíduos coletados nos últimos 9 anos (Figura 3).

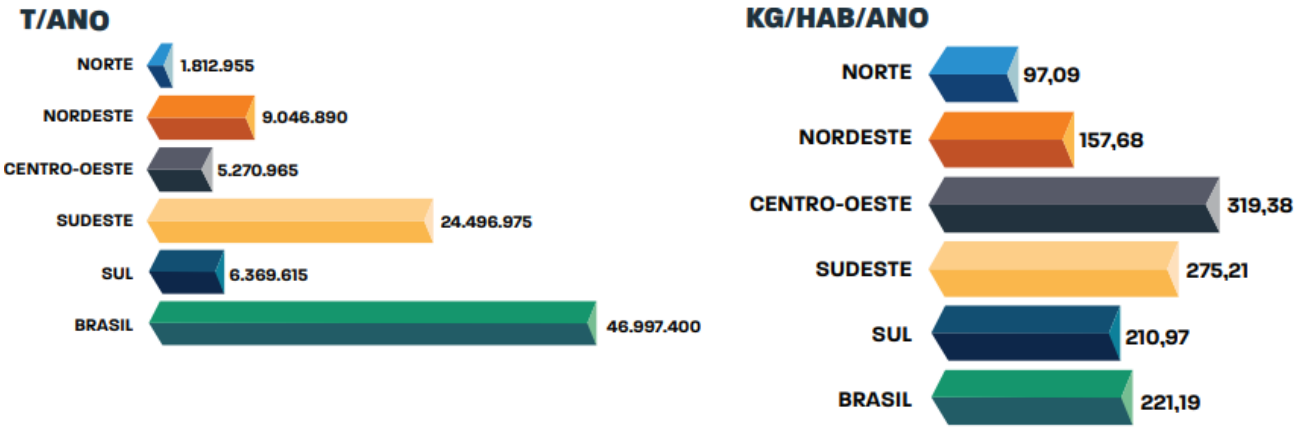
Figura 3 - Comparação da coleta de resíduos de construção e demolição (RCDs) nos municípios do Brasil.



Fonte: Abrelpe (2020).

No panorama do ano de 2020 da ABRELPE, ainda foram apresentados dados sobre a coleta total de resíduos de construção e demolição (RCDs) pelos municípios nas cinco regiões do Brasil, para o ano de 2020, conforme Figura 4. E é possível observar que a maior quantidade de coleta de resíduos ocorre na região Sudeste, enquanto a região Norte apresenta a menor quantidade. Na região Centro-Oeste ocorre a segunda menor coleta total de resíduos, é a que apresenta maior quantidade de coleta *per capita*.

Figura 4 - Coleta de resíduos de construção e demolição pelos municípios nas regiões.



Fonte: Abrelpe (2021).

3.2 Compósitos

Materiais compósitos podem ser definidos como a união de dois ou mais materiais com objetivo de se obter propriedades superiores aos dos materiais individuais utilizados. São

constituídos por uma matriz e por uma carga, sendo que a carga pode ter função de enchimento quanto de reforço. Quando utilizada como enchimento possui a função de melhorar propriedades no que diz respeito ao isolamento térmico, à condutividade, dentre outras; e quando utilizadas como reforço o objetivo principal mais almejado, é melhorar as propriedades mecânicas do material (TESSARO *et al.,* 2015; SRINIVAS; NAIDU; RAJU BAHUBALENDRUNI, 2017).

Baixa resistência ao impacto e à deformação por alongamento são características dos materiais compostos a base de matriz cimentícia (FONSECA *et al.,* 2016). Sendo assim, estudos têm sido realizados para o desenvolvimento de materiais compósitos com fibras e/ou partículas a partir dos materiais cimentícios, com objetivo de reforçar sua microestrutura, garantindo melhora na resistência à flexão, à tração e ao impacto, além de controlar o modo de falha e a fissuração por meio de ductilidade em seu estágio pós-fissurado (COUTTS, 2005; DE ARRUDA FILHO, 2012; HOSSEINPOURPIA *et al.,* 2012).

As propriedades dos materiais compósitos dependem do tipo de matriz, da interação entre a fibra e a matriz, e também das propriedades físicas e geométricas HOSSEINPOURPIA *et al.,* 2012). As fibras que são utilizadas em compósitos podem ser sintéticas ou naturais, sendo que as fibras sintéticas embora apresentem como vantagem maior vida útil e alta resistência, possuem como desvantagem o custo elevado e baixa reciclagem. Desta forma, nos últimos anos, as fibras naturais, principalmente vegetais, estão sendo utilizadas como carga e/ou reforço, como uma alternativa às fibras sintéticas (NAIDU; JAGADEESH; BAHUBALENDRUNI, 2017).

3.3 Blocos de concreto

Segundo Buttler (2007), os blocos de concreto foram originados nos Estados Unidos no fim do século XIX. No ano de 1905, o governo norte americano introduziu o bloco de concreto para a construção de depósitos, armazéns, hospitais, e quarteis nas obras das Filipinas e Canal do Panamá. No Brasil, os blocos de concreto de vedação foram introduzidos em meados de 1940, no Rio de Janeiro, para a construção de 2400 casas de um conjunto habitacional do Realengo. Enquanto que os blocos com função estrutural começaram a ser empregados no fim da década de 1960 com o surgimento de regulamentos que normatizavam especificamente segurança e dimensão dos elementos estruturais (OLIVEIRA *et al.,* 2016).

A primeira construção utilizando blocos de concreto estrutural no Brasil teve início no ano de 1966, em São Paulo em no conjunto habitacional Central Park Lapa (Figura 5), o qual

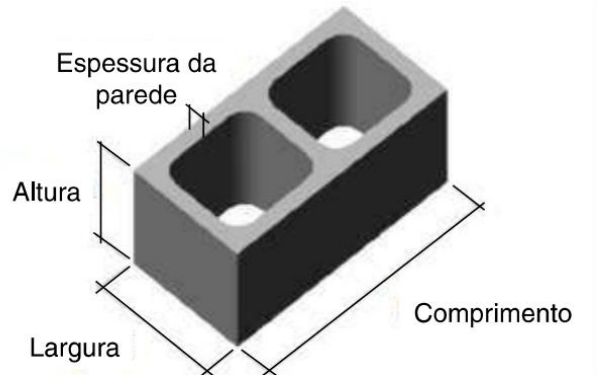
recebeu quatro pavimentos e posteriormente, no ano de 1972 foram construídos mais quatros edifícios com o mesmo sistema construtivo de 12 pavimentos (MOHAMAD, 2015).

Figura 5 - Conjunto habitacional Central Park Lapa.

Fonte: Google imagens

Os blocos de concreto simples são definidos como componentes para execução de alvenaria com ou sem função estrutural. Possuem área líquida igual ou inferior a 75% da área bruta e são vazados nas faces inferior e superior conforme mostrado na Figura 6. Podem ser produzidos por equipamentos manuais, hidráulicos ou pneumáticos e são compostos por um material homogêneo produzidos com cimento Portland, agregados graúdo e miúdo e água, além disso, são moldados por meio de prensagem e vibração (NBR 6136, ABNT, 2016). Ainda segundo a norma, a máxima dimensão característica dos agregados deve ser menor que a metade da menor espessura parede do bloco. Podem ser utilizar aditivos, desde que os requisitos físico-mecânicos descritos na norma sejam atendidos.

Figura 6 - Bloco vazado de concreto simples.



Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2016)

De acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2016), os blocos devem ser produzidos e curados por métodos que assegurem a homogeneidade e compactação, além disso, devem possuir arestas vivas e não podem apresentar trincas. São classificados em três classes, A, B e C, conforme a Tabela 1, que se diferenciam segundo suas dimensões de largura, espessura mínima de suas paredes e conforme a aplicação.

Segundo NBR 6136 (ABNT, 2016) as classes A e B, são para blocos de concreto utilizados abaixo do nível do solo. Enquanto que o bloco Classe C, pode apresentar ou não a função estrutural, sendo que os blocos com 90 mm de largura podem ser utilizados em construções de até um pavimento. Enquanto que os de 115 mm de largura, pode ser empregado em construções de até no máximo 2 pavimentos. Já o bloco Classe C estrutural, com larguras de 140 e 190 mm, pode ser empregado em construções de até cinco pavimentos e os blocos de 65 mm de largura só podem ser utilizados para alvenaria sem função estrutural.

Tabela 1 - Designação por classe, largura dos blocos e espessura mínima das parede**s.**

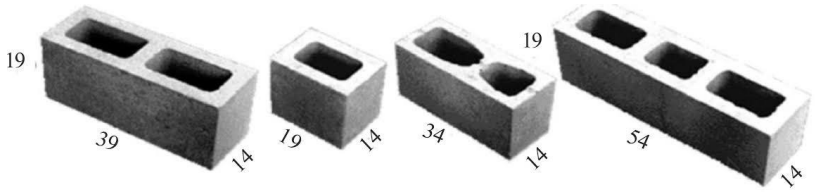
Classe	**Largura nominal mm**	**Paredes longitudinais mm**	**Paredes transversais**	
			Paredes mm	**Espessura Equivalente mm/m**
A	190	32	25	188
	140	25	25	188
B	190	32	25	188
	140	25	25	188
C	190	18	18	135
	140	18	18	135
	115	18	18	135
	90	18	18	135
	65	15	15	113

Fonte: adaptado NBR 6136 (ABNT, 2016).

O conjunto de componentes de alvenaria que comunicam entre si e com outros elementos construtivos, é denominado família a qual é constituída por blocos distintos da mesma linha com a mesma largura. Dentro da família encontram-se o elemento predominante

que determina o comprimento de uma linha e é utilizado para os ensaios de qualidade e os elementos complementares que são empregados para facilitar a utilização do elemento principal (Figura 7). São as canaletas, meio blocos, bloco 34, bloco 54, compensadores, entre outros. No Brasil, a linha mais utilizada é a 15x40, na qual os blocos possuem largura de 14 cm, altura de 19 cm e comprimento de 39 cm (FERNANDES, 2015).

Figura 7 - Dimensões dos principais blocos comercializados



Fonte: Google imagens

A NBR 6136 (ABNT, 2016), prescreve os requisitos físico-mecânicos que os blocos necessitam atender em relação aos limites de resistência, absorção de água e retração linear por secagem, conforme é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Requisitos para resistência à compressão, absorção e retração de blocos de concreto.

Classificação	**Classe**	**Resistência característica à compressão axial[a] (MPa)**	**Absorção (%)**				**Retração [d] (%)**
			Agregado normal [b]		Agregado leve [c]		
			Individual	Média	Individual	Média	
Com função estrutural	A	fbk≥ 8,0	≤ 9,0	≤ 8,0			
Com ou sem função estrutural	B	4,0 ≤fbk< 8,0	≤ 10,0	≤ 9,0	≤ 16,0	≤ 13,0	≤ 0,065
	C	fbk≥ 3,0	≤ 11,0	≤ 10,0			

[a] Resistência característica à compressão axial obtida aos 28 dias.

[b] Blocos fabricados com agregado normal (ver definição na ABNT NBR 9935).

[c] Blocos fabricados com agregados leves (ver definição na ABNT NBR 9935).

[d] Ensaio facultativo.

Legenda: fbk = Resistência característica à compressão do bloco.

Fonte: adaptado NBR 6136 (ABNT, 2016)

3.4 Resíduos utilizados como agregados em blocos de concreto

Conforme relatado na literatura, já existem pesquisadores interessados em produzir blocos de concreto a partir de resíduos gerados pelo setor da construção civil. Na pesquisa de Ren *et al.,* (2020) foram investigadas as propriedades de blocos de concreto de escória ativada por álcali adicionados com pó de concreto reciclados (RCFs) para substituir os agregados miúdos e pós de concreto reciclado (RCPs) como ligante. Como resultado observou-se que a incorporação de RCFs e RCPs pode diminuir a absorção de água e a densidade aparente dos blocos de concreto. Porém, a quantidade excessiva de RCFs apresentou um impacto oposto nessas propriedades, uma vez que a resistência à compressão dos blocos de concreto diminui quando 75% de areia é substituída por RCFs, Foi observado também, que a substituição de 25% de escória por RCPs pode melhorar a resistência à compressão dos blocos de concreto de escória ativada por álcali em 13%. Sendo assim, eles concluíram que dos blocos de concreto de escória ativada por álcali apresentam propriedades físicas e mecânicas satisfatórias exigidas para blocos de concreto não estrutural. Além, disso é viável utilizar RCFs e RCPs como substitutos parciais da areia e do ligante em blocos de concreto.

Luo et al. (2022), investigaram as propriedades de blocos de concreto produzidos com solo escavado e agregados de concreto reciclado. E observaram que o aumento do teor de cimento ou da quantidade de resíduos de concreto reciclado melhora as propriedades físicas e mecânicas dos blocos de concreto. Concluíram que a incorporação de resíduos de concreto reciclado tem impacto na redução do aquecimento global e no consumo de energia na produção de blocos de concreto, além disso, garante maior conservação dos recursos terrestres.

Zucca et al. (2018), investigaram a utilização de resíduos de construção como agregado graúdo visando reciclar as sobras da construção civil e confeccionar blocos para alvenaria de vedação. Os resultados obtidos mostraram que a reutilização de resíduos como agregado graúdo em substituição total ao agregado natural, no traço intermediário de 1:4:6 foi a solução encontrada mais viável para aplicação não estrutural de vedação. E que a utilização de resíduos de construção civil, é recomendada em construções rurais, por ser uma solução viável e de baixo custo.

Scheifer e Callejas (2021) analisaram a viabilidade de utilização de agregados miúdos reciclados para a confecção de blocos para sistemas de vedação. Onde a areia foi substituída progressivamente por areia reciclada de resíduos de construção civil em teores de 25, 50 e 100%. Além disso, buscaram identificar o traço que acrescentasse a maior quantidade de resíduos na mistura, garantindo o desempenho dentro dos limites estabelecidos pelas normas. O traço de melhor desempenho foi o de 50% de incorporação de resíduos, que apresentou um

teor de absorção de água de 14,30% e resistência média a compressão de 4,13 MPa. Diante disto, eles concluíram que os agregados miúdos de resíduos de construção civil são viáveis tecnicamente para produção de blocos de concreto e sua utilização colabora com a sustentabilidade urbana.

Souza et al. (2021), avaliaram a viabilidade de aproveitamento de resíduos de bagaço de cana-de-açúcar e casca de café, substituindo parcialmente as pedras britadas na produção de blocos de concreto. Os reforços com os resíduos agrícolas foram adicionados na mistura nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10%. A incorporação dos resíduos agrícolas como reforço melhorou as propriedades dos blocos, além disso, o bagaço de cana-de-açúcar mostrou maior potencial para utilização do que a casca de café. E concluíram que, a formulação com 5% de bagaço de cana garantiu os melhores resultados com os maiores valores de resistência à compressão, menores valores de absorção de água, e na avaliação das propriedades térmicas se mostrou um dos melhores tratamentos.

Lima e Iwakiri (2014) avaliaram o potencial de utilização do resíduo de toras de pinus provenientes de desdobro como substituição ao agregado miúdo para a produção de blocos para alvenaria estrutural. As substituições do agregado miúdo foram testadas em teores de 0, 20, 40, 60, 80 e 100% de resíduo de pinus e com adição de 4,5% de CaCl2.2H2O e resíduo de *Pinus spp*. pré-tratado com extração em água fria. Eles observaram que a utilização de CaCl2.2H2O como aditivo acelerador de pega garantiu ganhos de resistências significativos dos blocos com resíduos de *Pinus spp*., e o pré-tratamento com extração em água fria garantiu aumentos significativos de resistência à compressão blocos, em comparação aos blocos confeccionados com resíduos sem tratamento. E concluíram que com substituições de até 50% do agregado miúdo pelo resíduo de *Pinus spp.* levam a resultados satisfatórios que estão dentro dos limites estabelecidos pela norma brasileira, pois apresentaram características físicas e mecânicas que possibilitam sua utilização em alvenarias estruturais, para edificação de até seis pavimentos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A preocupação com a utilização consciente dos recursos naturais não renováveis tem sido atualmente, objetivo de muitas pesquisas, e no caso do setor da construção civil a substituição total ou parcial da areia é uma forma de reduzir parte dos impactos ambientais causados pelo setor. Além do mais, outro grande problema nas obras atualmente, é a quantidade de descarte de madeiras que foram utilizadas em formas e escoras nas obras, e que posteriormente viram entulho ou então são queimadas de maneira inadequada.

Com a finalidade de diminuir os impactos ambientais causados pelo setor da construção civil e garantir uma destinação adequada para os resíduos gerados nos canteiros de obras uma possível solução é a substituição dos agregados naturais utilizados na produção de blocos de concreto por agregados de materiais reciclados na própria obra.

Dessa forma, esta pesquisa procura compreender o efeito da substituição do agregado miúdo por resíduo de construção e demolição nas propriedades de blocos de concreto, e identificar a melhor porcentagem de substituição usando o resíduo de construção e demolição. Além disso, espera-se avaliar uma possibilidade de destinação de maneira ecologicamente correta dos resíduos da construção civil das madeiras de Pinus e Eucalipto, e avaliar se a adição desses resíduos exerce influência nas propriedades finais dos blocos. Espera-se ainda que também seja possível avaliar a viabilidade de produção industrial do novo material.

REFERÊNCIAS

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2019. São Paulo: ABRELPE, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021. São Paulo: ABRELPE, 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>.

ALMERON, M. M.; FERREIRA, S. D.; MAREZE, P. H.; GODINHO, M. **Mechanical and acoustic performance of mortar with partial replacement by biochar from civil construction wood waste at advanced ages.** Construction and Building Materials, v. 428, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6136: bloco vazado de concreto simples para alvenaria — requisitos. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9935: agregados — terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: resíduos sólidos — classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ATTRI, G. K.; GUPTA, R. C.; SHRIVASTAVA, S. **Sustainable precast concrete blocks incorporating recycled concrete aggregate, stone crusher, and silica dust.** Journal of Cleaner Production, v. 362, 2022.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, 2002.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2010.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood.** New York: John Wiley, 1963.

BUTTLER, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural.** São Carlos. 2007. 535 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CAVALCANTI, W. M.; ALVES, E. J. **Aplicação de resíduos da construção civil como aglomerado de compósitos de madeira péletes/briquete: um estudo bibliográfico e documental.** In 1º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 1., 2018, Gramado. Anais […]. Gramado, 2018.

CHU, S.H; POON, C. S; LAM, C.S; LI, L. **Effect of natural and recycled aggregate packing on properties of concrete blocks.** Construction and Building Materials, Volume 278, (2021), 122247, ISSN 0950-0 Construction and Building Materials, v. 278, 2021.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 431. Brasília, 2011.

CONTRERAS, M. ET AL. **Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study).** Construction and Building Materials, v. 123, p. 594–600, 2016.

COUTTS, R. S. P. **A review of Australian research into natural fibre cement composites.** Cement and Concrete Composites, v. 27, p. 518–526, 2005.

DE ARRUDA FILHO, N. T. et al. **Resistência mecânica de compósitos cimentícios leves utilizando resíduos industriais e fibras de sisal.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, n. 8, 2012.

DE CARVALHO, PAP; MOREIRA, LGSL; BARBOSA, BB. **Reaproveitamento de resíduos sólidos para confecção de blocos de concreto.** Revista Teccen, v. 12, n. 2, p. 102–108, 2019.

DENG, M; ZHANG, W; LI, N. **In-plane cyclic loading tests of concrete hollow block masonry walls retrofitted with high ductile fiber-reinforced concrete.** Construction and Building Materials, v. 238, 2020.

DEVI, V. S. et al., **Utilization of recycled aggregate of construction and demolition waste as a sustainable material.** Materials Today: Proceedings, 2021.

DIAS. L. I. R. **Use of construction and demolition waste (RCD) in the manufacture of concrete blocks without and with the addition of graphene oxide.** Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 1, p. 5972–5989, 2021.

DING, Z.; GUIZHEN Y, G.; VIVIAN W.Y.; HUANG, T. **A system dynamics-based environmental performance simulation of construction waste reduction management in China.** Waste Management, v. 51, p. 130–141, 2016.

ELGIZAWY, S. M. ET AL. A**pproaching Sustainability of Construction and Demolition Waste Using Zero Waste Concept.** Low Carbon Economy, v. 7, n. 1, 2016.

FERNANDES, I. D**. Blocos e Pavers Produção e Controle de Qualidade**. 6. ed. Ribeirão Preto: Autor, 2015.

FONSECA, C. S. et al. **Micro/nanofibrilas celulósicas de eucalyptus em fibrocimentos extrudados.** Cerne, v. 22, n. 1, p. 59–68, 2016.

HOSSEINPOURPIA, R. et al. **Production of Waste Bio-Fiber Cement-Based Composites Reinforced With Nano-SiO2 Particles as a Substitute For Asbestos Cement Composites.** Construction and Building Materials, v. 31, p. 105–111, 2012.

IBÁÑEZ-FORÉS, V. et al. **Influence of implementing selective collection on municipal waste management systems in developing countries: A Brazilian case study.** Resources, Conservation & Recycling, v. 134, p. 100–111, 2018.

JAHAN, I.; ZHANG, G.; BHUIYAN, M.; NAVARATNAM, S. **Circular Economy of Construction and Demolition Wood Waste - A Theoretical Framework Approach.** Sustainability, v. 14, p. 10478, 2022.

KUORIBO, E.; SHOKRY, H., MAHMOUD, H. **Attaining material circularity in recycled construction waste to produce sustainable concrete blocks for residential building applications.** Journal of Building Engineering, v. 96, 2024.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S. **Utilização de resíduos de madeira de Pinus spp. como substituição ao agregado miúdo na produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural.** Ciência Florestal, v. 24, p. 223–235, 2014.

LU, Z; TAN, Q; LIN, J; WANG, D. **Properties investigation of recycled aggregates and concrete modified by accelerated carbonation through increased temperature.** Construction and Building Materials, v. 341, 2022.

LUO, W; LIU, S; HU, Y; HU, D; KOW, KW; PANG, C; LI, B. **Sustainable reuse of excavated soil and recycled concrete aggregate in manufacturing concrete blocks.** Construction and Building Materials, v. 342, 2022.

MENDES, L. **Análise do desempenho de novos materiais geotécnicos para aproveitamento em reforço de solos.** 2015. Dissertação (Mestrado) – Rio de Janeiro, 2015.

MENG, Y; LING, T. C; MO, K H. **Recycling of wastes for value-added applications in concrete blocks: An overview.** Resources, Conservation and Recycling, v. 138, p. 298–312, 2018.

MOHAMAD, G. et al. **Desenvolvimento de uma nova concepção geométrica para blocos de concretos não modulares para alvenaria estrutural.** Ambiente Construído, v. 15, n. 2, p. 127–152, 2015.

MYMRIN, V. A. et al**. Construction material from construction and demolition debris and lime production wastes**. Construction and Building Materials, v. 79, p. 207–213, 2015.

NAIDU, A. L.; JAGADEESH, V.; BAHUBALENDRUNI, M. R. **A review on chemical and physical properties of natural fiber reinforced composites.** Journal of Advanced Research in Engineering and Technology, v. 8, n. 1, p. 56–68, 2017.

NEDELJKOVIĆ, M.; VISSER, J.; ŠAVIJA, B.; VALCKE, S.; SCHLANGEN, E. **Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review.** Journal of Building Engineering, v. 38, 2021.

OLIVEIRA, D. J. T. M. **Uso de blocos de concreto na construção civil.** Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 3, n. 2, p. 103–118, 2016.

RASHAD, A. M; SADEK D. M; HASSAN, H. A. **An investigation on blast-furnace stag as fine aggregate in alkali-activated slag mortars subjected to elevated temperatures.** Journal of Cleaner Production, v. 112, p. 1086–1096, 2016.

REN, P; LI, B; YU, J. G; LING, T. C. **Utilization of recycled concrete fines and powders to produce alkali-activated slag concrete blocks.** Journal of Cleaner Production, v. 267, 2020.

SALGADO, F. A.; SILVA, F. A. **Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review.** Journal of Building Engineering, v. 52, 2022.

SARAVANA, V. et al. **Sustainable Consideration by Characterization of Concrete through Partial Replacement of Fine Aggregate Using Granite Powder and Iron Powder.** Journal of Green Engineering, v. 9, n. 4, p. 514–525, 2019.

SCHEIFER, D.M., CALLEJAS, I.J.A. **Physical and mechanical characterization of concrete blocks with the incorporation of sand aggregate from construction waste.** Revista Matéria, v. 26, n. 4, 2021.

SOUZA, A. B; FERREIRA, H. S; VILELA, A. P; VIANA, Q; MENDES, J. F; MENDES, R. F. **Study on the feasibility of using agricultural waste in the production of concrete blocks.** Journal of Building Engineering, v. 42, 2021

SRINIVAS, K.; NAIDU, A. L.; RAJU BAHUBALENDRUNI, M. V. A. **A Review on Chemical and Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites.** International Journal of Performability Engineering, v. 13, n. 2, 2017.

TESSARO, A. B. et al. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de eucalipto puras tratadas com tetraetilortossilicato (TEOS 98%).** Ambiente Construído, v. 15, n. 3, p. 47–55, 2015.

VAN DAMME, H. **Concrete material science: Past, present, and future innovations.** Cement and Concrete Research, v. 112, p. 5–24, 2018.

ZUCCA, R. et al. **Uso de resíduos de construção como agregado graúdo destinado à confecção de blocos para alvenaria de vedação**. Enciclopédia Biosfera, v. 15, n. 27, 2018.

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

*Elaborado de acordo com o periódico Construction and Building Materials

APLICAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS NA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO

Hellen Mara Alves Chaves Rodrigues[a] José Benedito Guimarães Júnior[a], Maria Alice Martins.[b]
[a] *Department of Forest Sciences, Federal University of Lavras - UFLA, Perimetral Av., POB 3037, Lavras, MG, Brazil*
[b]*Nanotechnology National Laboratory for Agriculture (LNNA), Embrapa Instrumentation, São Carlos, SP 13560-970, Brazil*

RESUMO

A construção civil é responsável por grande parte dos resíduos que são gerados no Brasil e no mundo, além de consumir uma quantidade expressiva de recursos naturais. Contudo, o desenvolvimento de novos materiais pode levar este setor a absorver grande parte dos materiais gerados em suas obras, reaproveitando-os de diferentes maneiras. Diante do exposto, objetivou-se avaliar a viabilidade da confecção de blocos de concreto utilizando resíduos de construção e demolição (RCDs) como agregado miúdo, bem como a inserção de 2,5% de partículas de madeira (Eucalipto e Pinus). Foram produzidos blocos com substituições de 0%, 20%, 40% e 50% da areia por RCDs, com ou sem adição das partículas de madeira. Os blocos foram curados por 28 dias e submetidos a ensaios de propriedades físicas, mecânicas e térmicas, além de análise de microestrutura. Observou-se que o aumento do teor de RCDs e a inserção de partículas de madeira resultaram em redução da densidade, aumento da porosidade e absorção de água. A resistência à compressão melhorou com 20% de RCDs sem adição de madeira, e os tratamentos, exceto com 50% de RCD, atenderam às normas vigentes.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição, alvenaria, partículas naturais.

ABSTRACT

The construction industry is responsible for a large part of the waste generated in Brazil and worldwide, as well as consuming a significant amount of natural resources. However, the development of new materials could lead this sector to absorb a large part of the materials generated in its works, reusing them in different ways. In view of the above, the aim was to assess the feasibility of making concrete blocks using construction and demolition waste (CDW) as a crumb aggregate, as well as adding 2.5% wood particles (Eucalyptus and Pinus). Blocks were produced with 0%, 20%, 40% and 50% substitution of sand by CDW, with or without the addition of wood particles. The blocks were cured for 28 days and subjected to physical, mechanical and thermal property tests, as well as microstructure analysis. It was observed that increasing the CDW content and adding wood particles resulted in a reduction in density, an increase in porosity and water absorption. Compressive strength improved with 20% CDW without the addition of wood, and the treatments, except for 50% CDW, met current standards.

Keywords: Construction and demolition waste, masonry, natural particles.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um setor que possui grande importância para a economia de diversos países e é também responsável por um significativo impacto ao meio ambiente, pois contribui diretamente com o esgotamento dos recursos naturais não renováveis (SALGADO e SILVA, 2022). Com o rápido crescimento da indústria da construção e consequentemente, a excessiva exploração de recursos naturais intensificou a escassez de materiais, como areia e agregados (CHU *et al.*, 2021). Sendo que a demanda global anual de agregados graúdos ultrapassa 20 bilhões de toneladas e deve dobrar a quantidade nos próximos 20 a 30 anos (REN et al., 2020). Além disso, a principal fonte de demanda energética é a fabricação de materiais de construção, especialmente aço e cimento (HU *et al.*, 2025).

Os blocos de concreto então entre os principais materiais utilizados pela indústria da construção civil, em função da sua facilidade de instalação, leveza e tamanho preciso (DENG et al., 2020). Em relação à sua produção, sua principal característica é a capacidade de serem moldados em diferentes formas, espessuras, densidades e resistências para diferentes aplicações de engenharia civil. Entretanto, para obtenção dos materiais constituintes dos blocos, é necessário um alto consumo de energia, utilização de recursos naturais não renováveis, e emissão de grande quantidade de CO2 (RASHAD *et al.*, 2016).

Além disto, a rápida renovação urbana, a construção de novos edifícios, a manutenção de estruturas existentes e a demolição, tem gerado uma grande quantidade de resíduos de construção e demolição (RCDs). Esses resíduos incluem diversos materiais, como telhas, concreto, cerâmicas, vidro, madeira (pinus e eucalipto que são as mais utilizadas), misturas betuminosas, metais e até solo (SALGADO e SILVA, 2022). Segundo o Panorama ABRELPE (2021), em 2020 foram produzidos nos municípios brasileiros cerca 47 milhões de toneladas de RCDs, o equivalente a aproximadamente 221,2 kg por habitante / ano.

Dentre todos os resíduos que são produzidos pela construção civil, de acordo com Jahan *et al.* (2022), os resíduos de madeira estão classificados como o segundo tipo mais importante e são responsáveis por pelo menos 20-30% do total de resíduos gerados. Somente no ano de 2020, os resíduos de madeira gerados nos Estados Unidos representaram 55,75 milhões de toneladas, enquanto que 22,72 milhões de toneladas foram geradas em Hong Kong e 4,5 milhões de toneladas produzidas no Reino Unido (JAHAN *et al.* 2022). Esses dados relatam que são geradas grandes quantidades de resíduo de madeira, e também de diferentes variedades, em função dos diferentes tipos de sistemas construtivos que são adotados em cada país, da disponibilidade de materiais e devido a questões culturais (REN *et al.* 2020).

Diante deste cenário, existe uma necessidade de melhorar o valor de reutilização dos materiais residuais os RCDs, de forma a reduzir o grande número de subprodutos produzidos que são aterrados ou queimados e causam contaminação ambiental grave (MENG et al., 2018). Uma alternativa para utilização dos RCDs é o reaproveitamento destes materiais na produção de blocos de concreto substituindo parcialmente o ligante e agregado. Pois, além de auxiliar para resolver os problemas ambientais causados pelos RCDs, alivia a pressão da demanda de materiais naturais não renováveis no mercado, contribuindo para o desenvolvimento sustentável do setor (LU et al., 2022).

Assim, a utilização de resíduos de construção de demolição (agregados finos e madeira) em blocos de concreto pode ser promissora, visando reduzir a extração novas matérias-primas do meio ambiente, garantindo uma destinação final para estes resíduos, e incentivando a prática da reciclagem com vantagens econômicas e ambientais, no mercado da construção civil.

Diante do exposto, este estudo visa contribuir para o desenvolvimento de blocos de concreto ambientalmente mais sustentáveis, analisando o impacto da incorporação de RCDs e partículas de madeira sobre suas propriedades técnicas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Materiais Utilizados

Foram utilizados resíduos de construção e demolição (RCDs), partículas de madeira de pinus e eucalipto residual de obras, cimento Portland CP V e areia natural. A água utilizada foi potável, conforme a NBR 15900. Os resíduos das madeiras utilizadas nesse estudo foram doados por uma empresa localizada na cidade de Nepomuceno- MG. São resíduos provenientes da construção civil constituídos de tábuas de pinus que foram utilizadas para formas e madeira roliça de eucalipto que foram utilizadas como escoras em obras (Figura 1).

Fig. 1**. Resíduos das madeiras de pinus e eucalipto (a) Madeira residual no canteiro de obras. (b) Madeiras residuais processadas. (c) Madeiras residuais moídas (serragem).**

Os resíduos de construção e demolição (RCDs) foram cedidos pela empresa de reciclagem de resíduos de construção civil Ecovia, situada na cidade de Varginha-MG. Foram utilizados resíduos de classe A, segundo a Resolução nº307/02 (CONAMA), os quais foram selecionados e separados de outros materiais.

2.2 Processamento dos resíduos de construção e demolição e dos resíduos de madeira

Os resíduos de construção e demolição (Figura 2), foram submetidos à triagem para remoção de materiais indesejados, seguidos de britagem primária e peneiramento segundo a ABNT NBR 7211 (2005). Os resíduos de madeira foram reduzidos a partículas menores por meio de trituração e, em seguida, peneirados, seguindo a norma ABNT n° 4, de forma a garantir uma granulometria com partículas menores que 4,8 mm, conforme metodologia indicada por Lima e Iwakiri, (2014).

Fig. 2 Resíduos de construção e demolição.

2.3 - Caracterização dos materiais

2.3.1 Caracterização dos resíduos lignocelulósicos

A caracterização estrutural e determinação do índice de cristalinidade dos resíduos das madeiras foram realizados por difração de raios X em difratômetro Shimadzu 6000 com radiação de CuKα (λ = 1,54 Å), o ensaio foi realizado à temperatura ambiente, com ângulo de 2θ entre 5° e 40° (1°/min). O índice de cristalinidade foi obtido dividindo-se a área somada dos picos cristalinos pela área total.

A estabilidade térmica foi avaliada por termogravimetria (TG/DTG). Os ensaios foram realizados em equipamento SDT 650 da TA Instruments. As condições dos ensaios foram: temperatura de 700 °C, com razão de aquecimento de 10 °C min-1, massa da amostra entre 11 e 12mg, em atmosfera inerte com nitrogênio e em atmosfera oxidativa com ar sintético.

Os ensaios de caracterização das partículas das madeiras de pinus e eucalipto por espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foram feitos visando caracterizar os grupos químicos presentes nas amostras. Os espectros foram obtidos a partir das amostras secas colocadas diretamente em um acessório tipo ATR Horizontal, acoplado em um equipamento Vertez 70 Bruker Optics, os ensaios foram feitos com 32 varreduras e resolução de 4 cm-1.

Foi determinada a densidade básica das partículas de pinus e eucalipto, segundo uma adaptação da metodologia da norma NBR 11941 (ABNT, 2003). Os cavacos foram imersos em água até ficarem saturados. Posteriormente, foi obtido o volume saturado, e os cavacos foram mantidos em estufa à temperatura de 105ºC, por 48 horas, para o cálculo da massa seca. A densidade básica foi avaliada dividindo a massa seca pelo volume saturado dos cavacos.

2.3.2 Caracterização dos RCDs

Os ensaios de caracterização dos RCDs foram realizados, no Laboratório da UEPAM no Departamento de Engenharia de Biomateriais da UFLA. Foram realizados os ensaios de caracterização granulométrica seguindo as especificações da NBR 7211 (ABNT,2009), densidade aparente conforme NBR NM 52 e 53 (ABNT.2003) e absorção de água de acordo com a NBR 12118 (ABNT, 2011).

A análise da morfologia do RCD e da sua composição qualitativa foi realizada por meio do sistema de microscopia eletrônica de varredura (MEV), acoplado ao sistema de dispersão de energia (EDS), sendo o microscópio da marca JEOL, modelo JSM-6510, com EDS da Thermo Scientific, modelo 6742A-SN. Para as análises, as amostras foram depositadas em porta amostras de alumínio usando fita de carbono, e recobertas com carbono no equipamento Sputter Coater SCD050, marca LEICA.

2.4 Produção dos blocos

Foram produzidos blocos de vedação de classe C sem função estrutural para utilização em elementos acima do nível do solo, com dimensões de 14x19x39 cm (Figura 3), cuja resistência característica à compressão deve ser igual ou maior que 3 MPa, conforme NBR 6136 (ABNT, 2016). Para cada tipo de tratamento foram produzidos em média de 15 a 20 blocos por batelada.

Fig. 3 Dimensões dos blocos de concreto.

Foram utilizados percentuais de 0%, 20%, 40% e 50% para substituição parcial da componente areia pelo resíduo de construção de demolição com e sem a adição de 2,5% de resíduo de Pinus e Eucalipto para substituir o pó de brita. Além disso, foi utilizado, com base

em informações cedidas por empresas do setor e conforme metodologia de Lima e Iwakiri, (2014), um tratamento controle com uma formulação inicial de 8,2% de cimento CPV-ARI, 45,9% de areia, 45,9% de pó de pedra e 8,8% de água. Nas Tabelas 1 e 2 estão descritos todos os tratamentos e as formulações que foram utilizados na produção dos blocos.

Tabela 1 - Formulação dos blocos com resíduo de construção e demolição (RCD)

RCD (%)	**RCD (kg)**	**Areia (kg)**	**Cimento (kg)**	**Pó de brita (kg)**	**Água (L)**
0%	0	114,75	20,5	114,75	14,7
20%	22,95	91,8	20,5	114,75	14,7
40%	45,9	68,85	20,5	114,75	14,7
50%	57,37	57,37	20,5	114,75	14,7

Tabela 2 - Formulação dos blocos com resíduo de construção e demolição (RCD) e resíduo de madeira de eucalipto e ou pinus.

Resíduo Eucalipto ou Pinus (%)	**RCD (%)**	**Cimento (kg)**	**Areia (kg)**	**Pó de brita (kg)**	**RCD (kg)**	**Resíduo de eucalipto (kg)**	**Água (L)**
2,5%	**0%**	20,5	114,75	111,89	0,0	2,86	14,7
2,5%	**20%**	20,5	91,8	111,89	22,95	2,86	14,7
2,5%	**40%**	20,5	68,85	111,89	45,90	2,86	14,7
2,5%	**50%**	20,5	57,37	111,89	57,37	2,86	14,7

Os blocos foram produzidos na empresa Bloco Forte localizada no município de Ijaci-MG, e posteriormente foram mantidos em temperatura ambiente por 28 dias para a realização completa da cura.

2.5 Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos blocos

Os ensaios para a determinação das propriedades físicas e mecânica dos blocos ocorreram 28 dias após a fabricação, após o processo de cura. Na Tabela 3 são apresentados os

ensaios e as normas que foram utilizados para avaliar estas propriedades. Foram utilizados 3 corpos de provas de cada tratamento para os ensaios físicos de densidade aparente, absorção de água e porosidade e 6 de cada tratamento para o ensaio mecânico de compressão.

Tabela 3 - Ensaios físicos e mecânico para caracterização dos blocos

Ensaios	Normas
Absorção de água	NBR 12118 (ABNT, 2013)
Densidade aparente	NBR 12118 (ABNT, 2013)
Resistência à compressão	NBR 12118 (ABNT, 2013)
Porosidade	NBR 9778 (ABNT, 2009)

2.6 Determinação das propriedades térmicas

Os ensaios para a determinação das propriedades térmicas foram realizados no Laboratório da Unidade Experimental de Painéis de madeira (UEPAM) da UFLA. O ensaio para a determinação de transmissão térmica dos blocos foi realizado conforme as configurações e procedimentos descritos por Terra et al., (2023), no qual, os blocos foram individualmente expostos em uma câmara isolada termicamente.

Os corpos de provas foram ensaiados isoladamente em um conjunto de câmaras sobrepostas, compostas por três partes, sendo uma câmara inferior, na qual foi instalada uma lâmpada incandescente de 100 W operando como fonte de calor a uma temperatura de aproximadamente 60 ºC, uma câmara intermediária e uma câmara superior. O bloco foi disposto horizontalmente, encaixado na câmara intermediária, de maneira que não houvesse perda de calor, posteriormente foi sobreposto pela câmara superior. Em cada uma das câmaras existe um termopar, responsável por monitorar a temperatura em posições específicas do ambiente, além de um terceiro termopar que monitora a temperatura externa às câmaras.

O calor emitido pela lâmpada chega por radiação até o bloco na câmara intermediária, onde a temperatura é registrada por um dos termopares, posteriormente, o calor passa pela amostra na câmara superior, chega ao outro termopar, que realiza a leitura. O corpo de prova foi aquecido e monitorado até a estabilização da temperatura e foram coletados os valores nas duas faces do bloco. As informações obtidas pelo ensaio foram utilizadas para a determinação da condutividade térmica e resistência térmica, descritas nas equações abaixo (1)e (2);

$$\boldsymbol{\lambda} = \frac{\boldsymbol{Radia}\text{ção}\boldsymbol{.e}}{\Delta T} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{RT} = \frac{\boldsymbol{e}}{\boldsymbol{\lambda}} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{TT} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{RT}} \quad (3)$$

Em que:

λ – Condutividade térmica [W/m°C];

Radiação – Radiação por medida de área [W/m²];

e – Espessura do corpo de prova [m];

ΔT – Variação de temperatura observada [°C];

RT – Resistência térmica do bloco (m² °C/W);

TT – transmitância térmica (W/m².°C).

2.7 Morfologia

A análise da morfologia dos blocos foi realizada através de imagens dos corpos de provas com auxílio do microscópio estereoscópio SMZ 1500 (Nikon), com zoom de 0,75 x, para uma melhor ilustração. Os corpos de provas foram retirados da face lateral dos blocos e foram cortados nas dimensões de 10 x 5 x 2 cm (C x L x A).

2.8 Análise estatística

Para análise dos dados foi utilizado a avaliação efeito dos fatores (percentual de RCDs, tipo de material) e sua interação foi realizada por anova, seguido do teste de comparações múltiplas de Duncan. As suposições necessárias à aplicação dos testes (homogeneidade de variância, normalidade e independência dos resíduos do modelo) foram verificadas e satisfeitas. O nível de significância adotado foi de 5% e o software utilizado nas análises foi o R, versão 4.2.3.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização dos materiais lignocelulósicos

3.1.1 DRX

Os difratogramas de DRX e os valores para o cálculo do índice de cristalinidade (I.C.) do resíduo das madeiras de eucalipto e pinus, estão apresentados na Figura 4 onde 4 (a) e 4 (b), são os resultados para eucalipto e pinus, respectivamente.

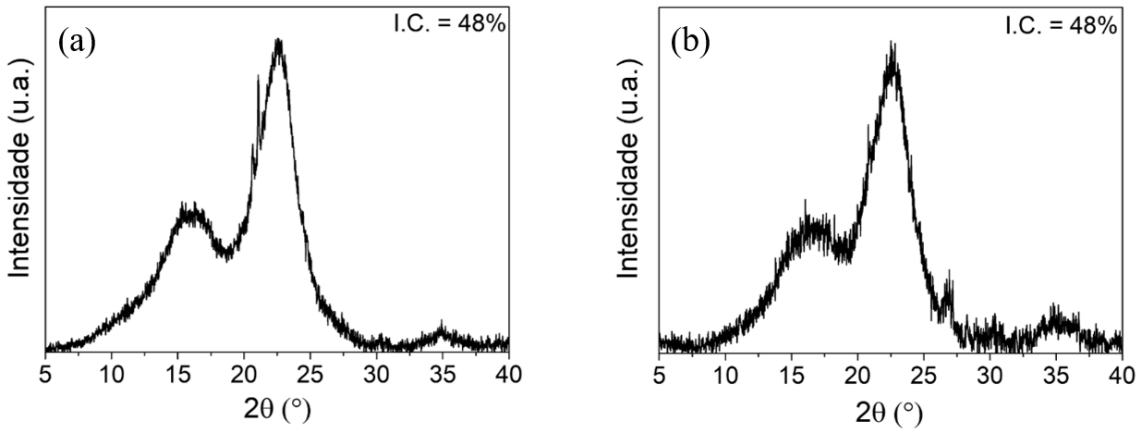


Fig. 4 Curvas de difração de raios X (DRX) e Índice de cristalinidade (I.C.) para as partículas, (a) Partículas de eucalipto; (b) Partículas de pinus.

As partículas, tanto de eucalipto quanto de pinus, apresentaram um I.C. de 48% pelo método da soma das áreas, o que indica um grau intermediário de organização cristalina. Pelas curvas de DRX foi possível identificar os picos característicos dos planos cristalográficos da celulose tipo I. Além disso, os principais picos que correspondem aos ângulos de Bragg (2θ) foram observados em 16,1° (101), 22,6° (002) e 34,6° (040), para ambas as partículas analisadas. Os valores do índice de cristalinidade obtidos nesta pesquisa, 48%, foram próximos aos de partículas de eucalipto estudadas por dos Santos et al. (2024), que também observaram picos característicos de celulose tipo I.

Segundo Fonseca et al. (2019), a eficácia de um material lignocelulósico para ser utilizado como reforço mecânico está relacionada com a sua cristalinidade. O índice de cristalinidade de 48% calculado neste trabalho mostra que a composição estrutural das partículas tanto de pinus quanto de eucalipto está mais associada aos materiais amorfos presentes, como hemiceluloses, lignina e extrativos (FONSECA et al. 2019).

3.1.2 TG/DTG

Analisando as curvas de TG e a primeira derivada (DTG) para as partículas de eucalipto, Figura 5 observa-se que a temperatura de início de degradação (Tonset) em atmosfera oxidativa foi de aproximadamente 270 ºC e para atmosfera inerte foi de aproximadamente 260 ºC. Já a temperatura final do processo, para atmosfera oxidativa foi de aproximadamente 500 ºC, onde todo o material já havia sido degradado, enquanto que para a atmosfera inerte foi de aproximadamente 390 ºC.

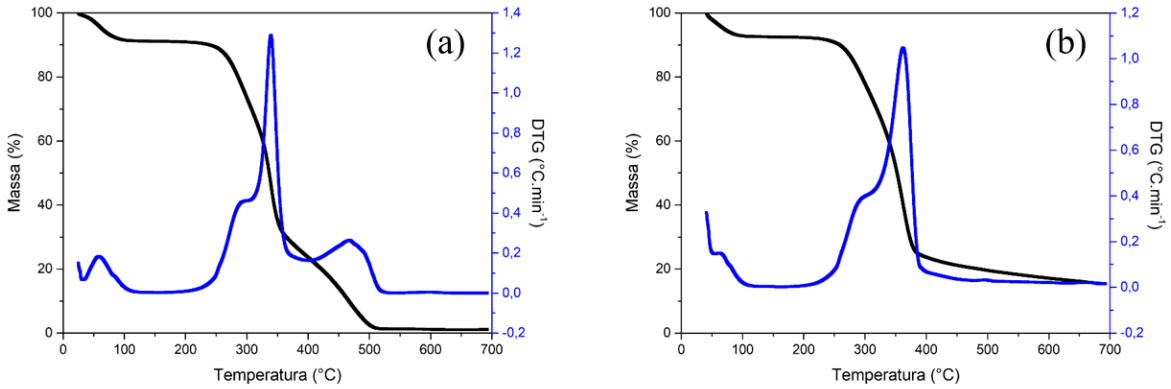


Fig. 5 Curvas de TG e DTG para as partículas de eucalipto em atmosfera oxidativa com ar sintético (a), e em atmosfera inerte com nitrogênio (b).

No caso de partículas de eucalipto, Silva et al. (2019), relata que na primeira região até 100 ºC, é onde ocorre a evaporação da água e a perda de alguns componentes mais voláteis. A segunda região (entre 200 e 325ºC) representa a degradação das hemiceluloses e simultaneamente à de algumas frações de lignina e celuloses, enquanto que, a terceira região (entre 325 e 380°C) representa a degradação da celulose. Já a lignina é lentamente degradada por uma ampla faixa de temperatura, variando de 150 a 900 °C (SILVA et al. 2019).

Segundo Silva et al. (2023), pode-se justificar as diferenças observadas nas temperaturas entre as atmosferas pela proteção do material lignocelulósico em atmosfera inerte, sendo que em atmosfera oxidativa uma série de reações de oxidação podem ocorrer reduzindo o início dos processos de degradação do material.

A Figura 6 apresenta as curvas de TG e a primeira de derivada (DTG) para as partículas de pinus, e observou-se que semelhante às partículas de eucalipto, a temperatura de início de degradação em atmosfera oxidativa foi de aproximadamente 270 ºC e para atmosfera inerte foi de aproximadamente 280 ºC (Figura 6a). Já a temperatura final do processo, para atmosfera oxidativa foi de aproximadamente 480 ºC, onde todo o material já havia sido degradado, enquanto que para a atmosfera inerte foi de aproximadamente 370 ºC (Figura 6 b). Shulz et al.

(2021), ao avaliar a madeira de pinus por termogravimetria obtiveram picos semelhantes em seu tratamento controle, sendo o pico máximo de degradação em torno de 380 °C.

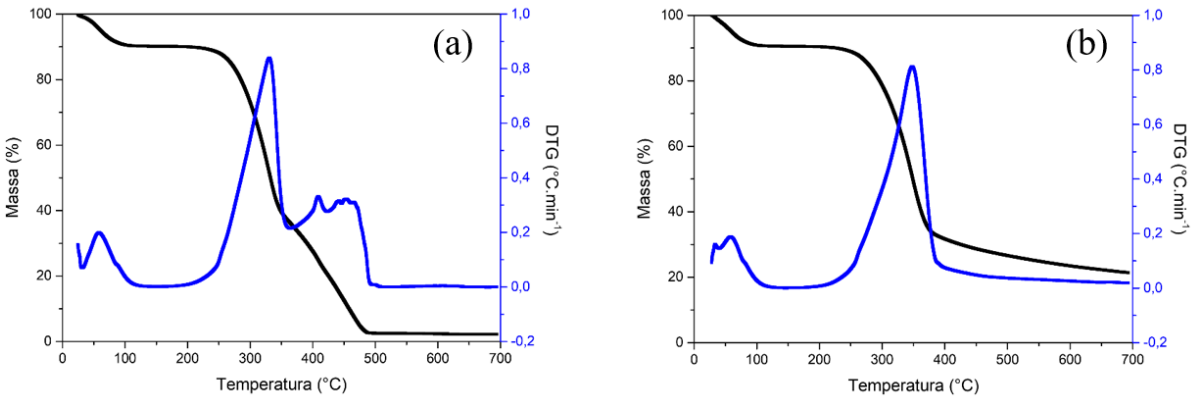


Fig. 6 Curvas de TG e DTG para as partículas de pinus em atmosfera oxidativa com ar sintético (a), e em atmosfera inerte com nitrogênio (b).

Em ambas as atmosferas, as curvas de DTG, apresentaram uma perda de massa inicial, Campos (2008), explica que esses resultados são características de degradação das hemiceluloses, seguidas por um segundo estágio onde ocorrem as decomposições térmicas da celulose, uma vez que estas apresentam velocidades de perda de massa superiores à lignina, possibilitando possível atribuir os referidos picos a essas reações.

3.1.3 FTIR

Os espectros de FTIR obtidos para as partículas de eucalipto e pinus, Figuras 7 e 8, respectivamente, mostram as bandas características de materiais lignocelulósicos (bandas em 3300, 2800, 1100 e 500 cm-1) (SILVA et al. 2023). Na banda em torno de 1300 cm-1, nota-se um surgimento de um pico mais acentuado para a madeira de pinus, isso é caracterizado por maior frequência de ocorrência de ligações nos grupos das celuloses. Nesse contexto, variações nas intensidades e posições dos picos dos espectros evidenciam mudanças nos grupamentos funcionais e forças de ligações dos componentes no interior da madeira, fato esse confirmado por Zhang et al. (2015).

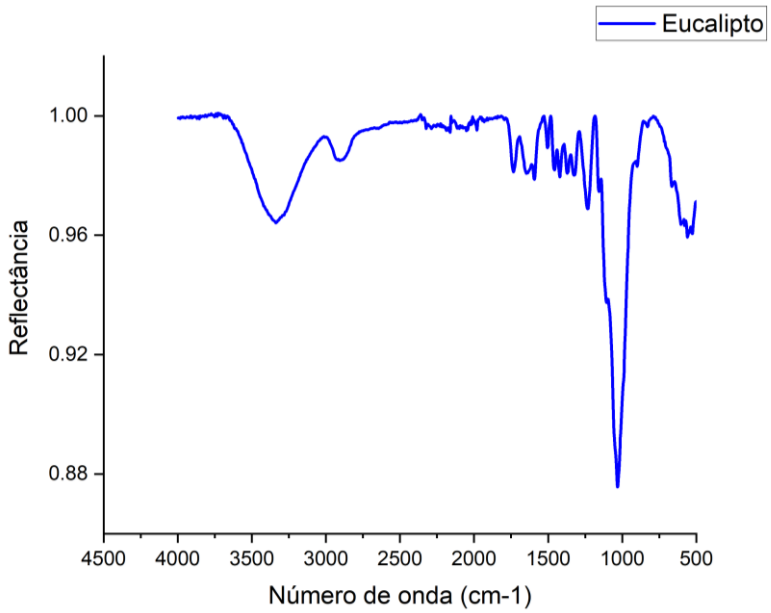


Fig. 7 Espectros obtidos por espectroscopia na Região do Infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) das partículas de eucalipto.

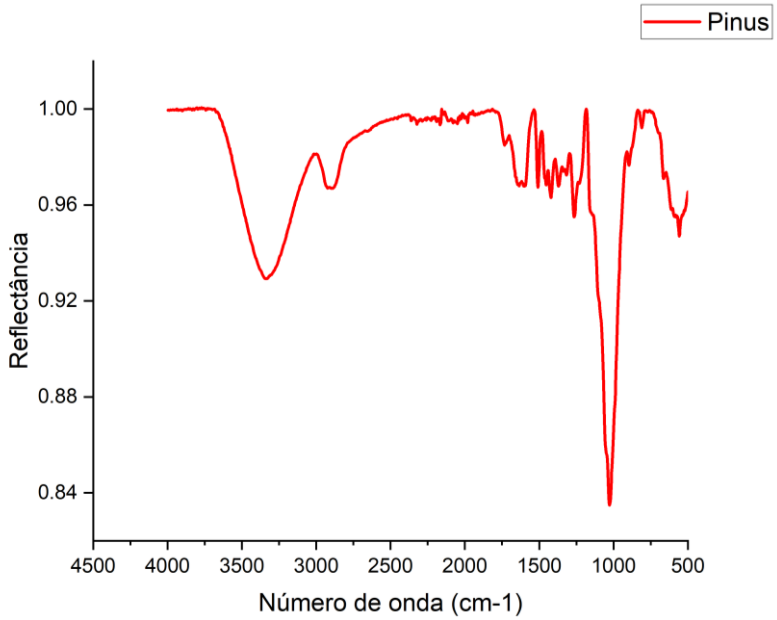


Fig. 8 Espectros obtidos por espectroscopia na Região do Infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) das partículas de pinus.

Herrera et al. (2022), identificou em seus trabalhos que maioria dos picos apresentados nas cargas do modelo de pinus correspondem a números de onda que apontam vibrações de grupos baseados em carboidratos (>56%), correspondendo então a grupos relacionados à lignina (25%) e por fim aqueles que podem ser vistos tanto em carboidratos quanto em compostos aromáticos (18%). Observaram ainda que, as bandas relacionadas a carboidratos

apresentaram intensidades diferentes dependendo da seção da madeira, mas em geral predominaram nos espectros que discriminam a madeira externa; especificamente as bandas em 1030 cm^{-1}, 1100 cm^{-1}, 1240 $cm^{-1,}$ 1380 cm^{-1}, e 1440 cm^{-1}.

3.1.3 Densidade

As partículas das madeiras de eucalipto apresentaram densidade de 0,580 g/cm³, enquanto que as partículas das madeiras de pinus obtiveram densidade de 0,468 g/cm³. Os valores de densidade básica encontrados para madeira de pinus e eucalipto são semelhantes aos valores encontrados em literatura para a densidade básica média destas espécies JUNIOR et al. (2021), VIVIAN et al. (2015), OLIVEIRA et al. (2005), FERNANDES et al. (2025).

3.2 Caracterização dos RCDs

Os ensaios de caracterização dos RCDs foram realizados, no Laboratório da UEPAM no Departamento de Engenharia de Biomateriais da UFLA e na Embrapa Instrumentação.

3.2.1 Análise granulométrica

A Figura 9 apresenta as porcentagens dos materiais residuais de construção e demolição que ficaram retidos nas peneiras de 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15mm e no fundo, segundo a classificação para agregado miúdo da NBR 7211 (ABNT, 2009). Pode se observar que a maior porcentagem retida do resíduo de construção civil, foi na peneira de 1,18mm.

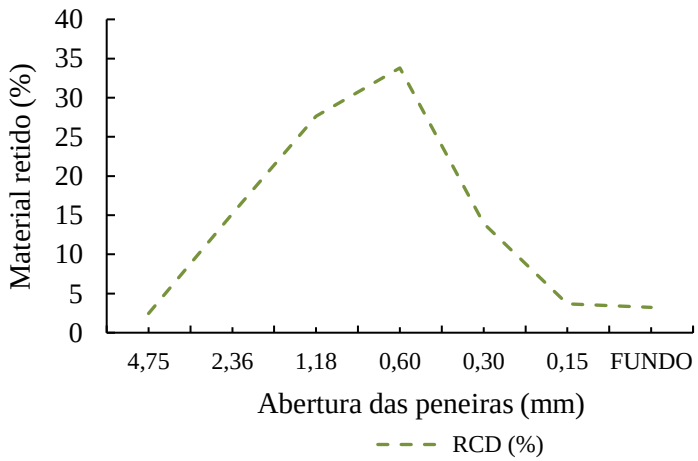


Fig. 9 Análise granulométrica dos resíduos de construção e demolição.

.

Um material é classificado como agregado miúdo, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009). Se o mesmo passar pela peneira de 4,75 mm, desse modo, os agregados de material residual de construção e demolição analisados neste trabalho, se encontram nesta classificação. O resíduo de construção e demolição apresentou dimensão máxima característica de 4,75 mm. Na Figura 10, está representada a composição granulométrica dos RCD, através do qual, é possível determinar o módulo de finura. Os RCDs avaliados apresentaram módulo de finura de 3,98.

Analisando-se as curvas granulométricas das Figuras 9 e 10, verifica-se que o resíduo de construção e demolição utilizado nesta pesquisa, apresenta granulometrias entre as zonas utilizáveis, o que viabilizam a sua utilização como agregado miúdo dispostas na NBR 7211 (ABNT, 2019).

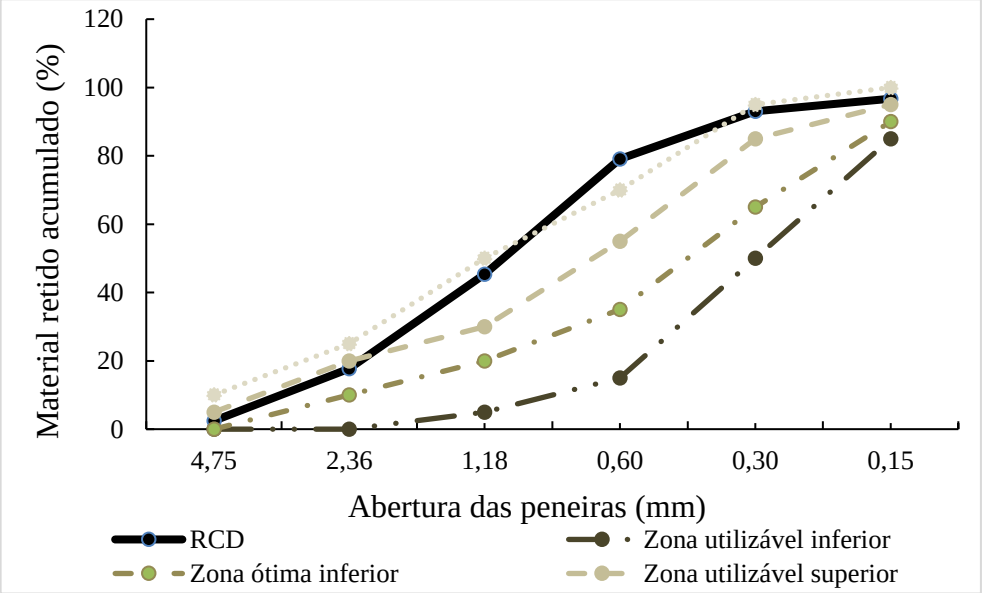


Fig. 10 Composição granulométrica dos resíduos de construção e demolição.

3.2.2 Densidade aparente e absorção de água dos RCDs

A Tabela 4 apresenta os resultados para densidade aparente expressa em g/cm³ e porcentagem de absorção de água dos resíduos de construção e demolição (RCDs) coletados na cidade de Varginha MG.

Tabela 4 – Densidade aparente e absorção de água dos resíduos de construção e demolição.

RCDs	Média	Desvio padrão
Densidade aparente (g/cm³)	2,582 g/cm³	0,04
Absorção de água (%)	2,14 %	0,26

Os valores obtidos de densidade aparente dos RCDs, deste trabalho são bem próximos aos encontrados por Barros e Fucale (2016). De acordo estudos recentes, as massas específicas e unitárias dos agregados de RCDs, são em média 5 a 10% mais baixos em comparação aos valores dos agregados naturais, podendo ainda variar de acordo com a granulometria e origem do material (DE SOUZA et al., 2022).

3.2.3 Análise elementar dos RCDs – MEV-EDS

As Figuras 11 e 12 apresentam os principais elementos químicos que compõem o RCD utilizado neste estudo.

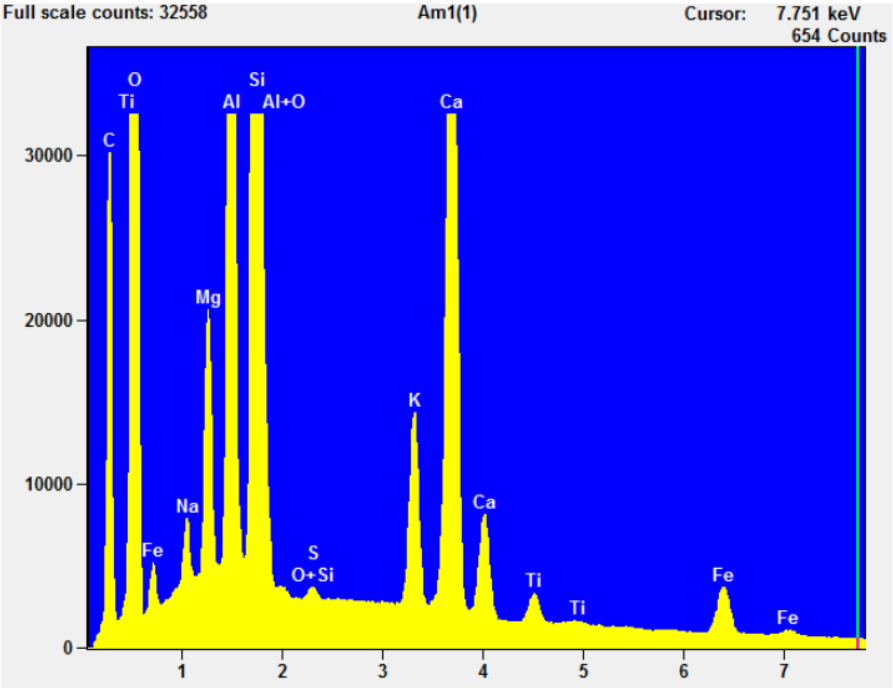


Fig. 11 Composição química dos resíduos de construção e demolição.

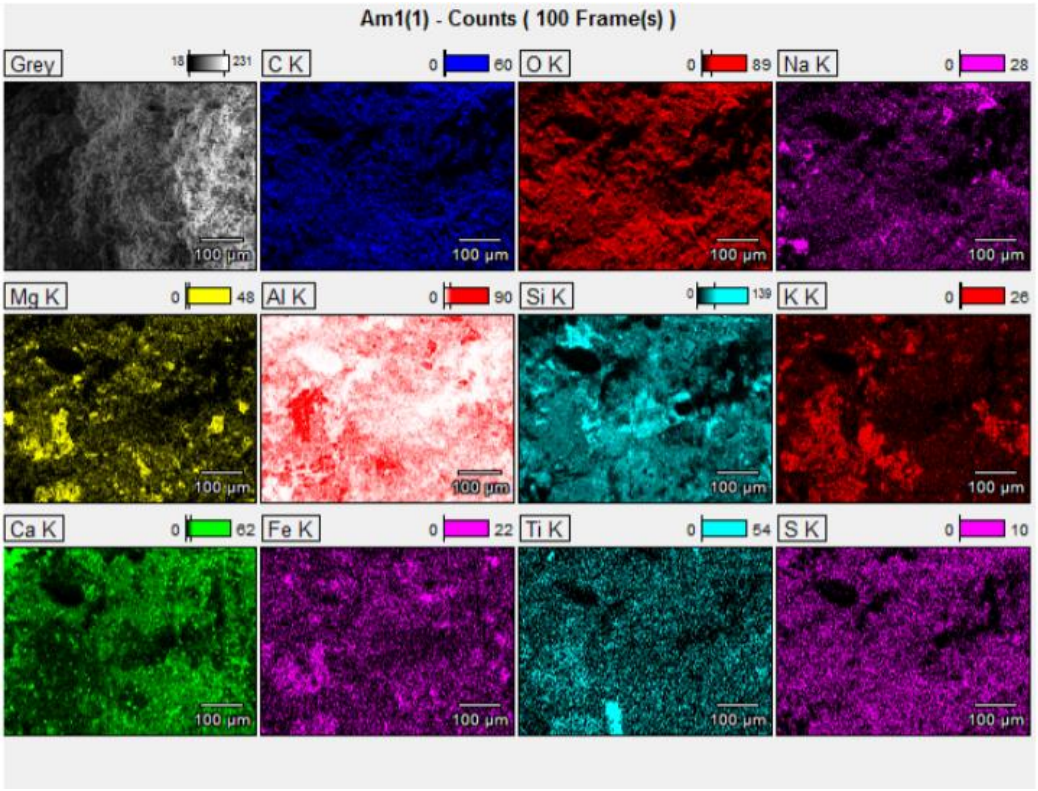


Fig. 12 Principais elementos químicos obtidos na amostra de RCD.

Podemos observar a presença em maiores proporções de alguns elementos como cálcio (Ca), titânio (Ti), alumínio (Al), silício (Si) e carbono (C). Além disso, também foram encontrados em menores proporções ferro (Fe), magnésio (Mg), sódio (Na), enxofre (S) e potássio (K). Assim como neste estudo, Lasso et al. (2014), confirmaram que o elemento que mais se destacou foi a sílica (Si), representando uma composição de 80%. Eles explicam que este resultado é coerente com o histórico desse resíduo que é oriundo de concretos e argamassas que em suas composições levam, porções de brita, areia, cimento e no caso de argamassas adicionam-se também o cal.

Nos estudos de Ulsen et al. (2010), foram analisadas as composições químicas de amostras de agregados de RCDs e o principal elemento encontrado por eles também foi a sílica, com teores entre 48 e 84% o que confirma a associação com os agregados naturais do concreto e da argamassa que estão presentes nos RCDs. As proporções de alumínio encontradas estão relacionadas à presença de cerâmica vermelha do solo e secundariamente, à presença de feldspatos e do cimento (ULSEN et al. 2010). A quantidade expressiva de cálcio obtida, é proveniente do calcário presente no cimento Portland e também da cal utilizada nas argamassas (LASSO et al. 2014).

A Figuras 13 (a-c) mostram exemplos representativos do RCD utilizado neste trabalho, com aumentos de 100, 500 e 1000x.

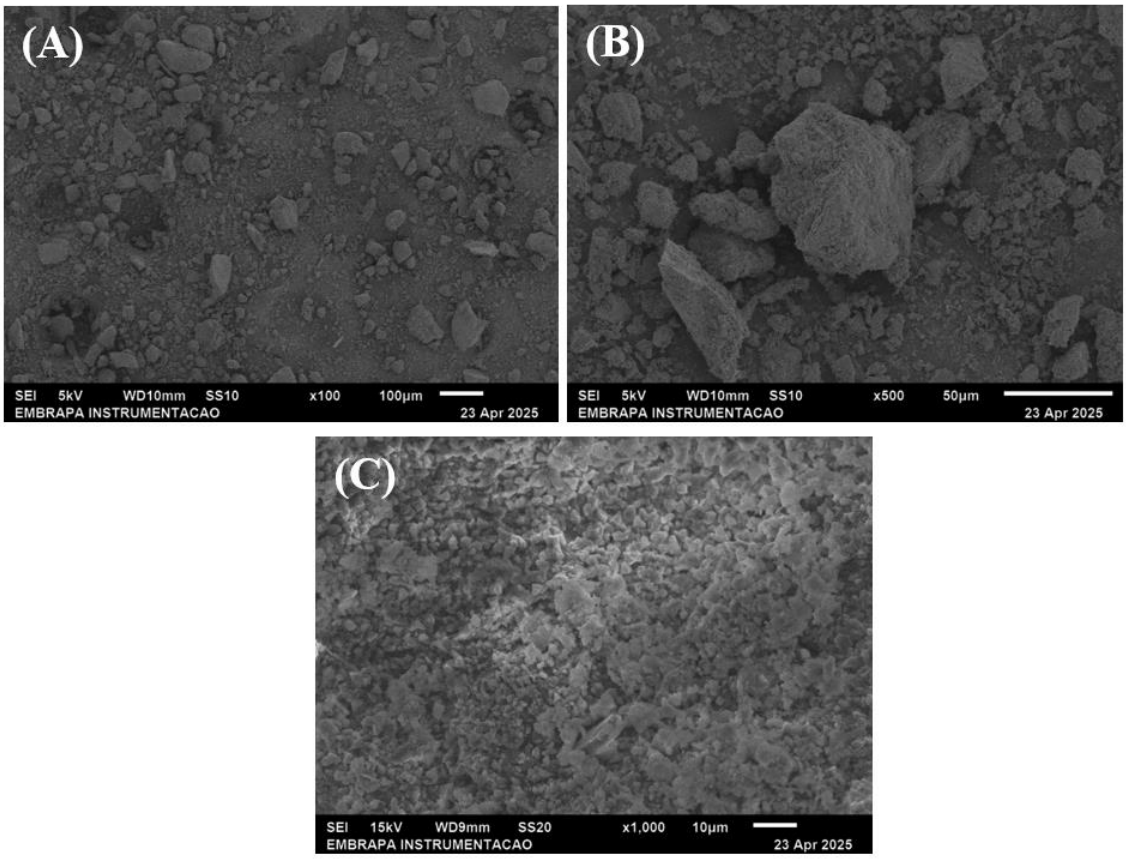


Fig. 13 Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura do RCD. (a) Aumento de 100x. (b) Aumento de 500x. (c) Aumento de 1000x.

Observamos que o material apresenta heterogeneidade de tamanho das partículas, e morfologia irregular com alta rugosidade.

3.3 Propriedades físicas dos blocos

As Figuras 14 e 15 apresentam os resultados de densidade aparente e a média, respectivamente, para os blocos confeccionados com os resíduos de construção e demolição (RCDs), com e sem adição de 2,5% das partículas de eucalipto e pinus.

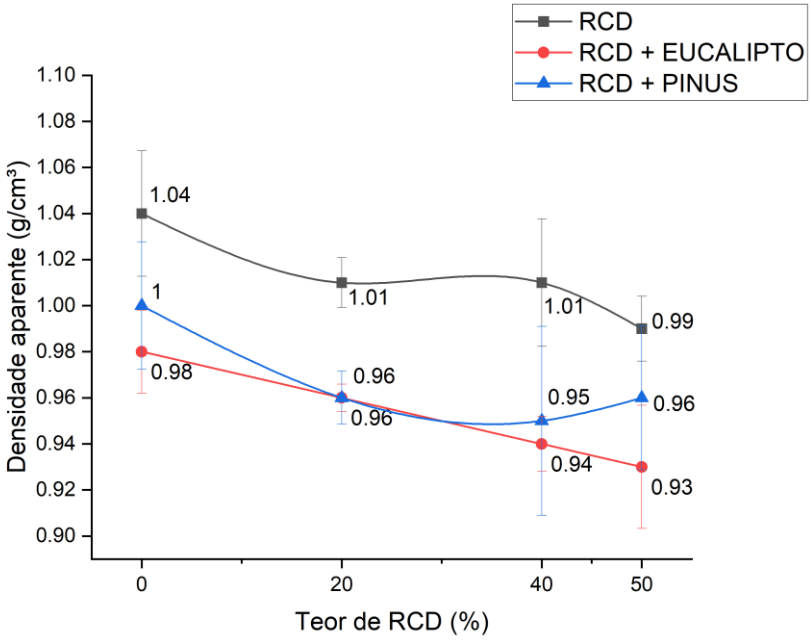


Fig. 14 Densidade aparente dos blocos confeccionados com resíduos de construção e demolição (RCDs), com e sem adição de 2,5% de partículas de eucalipto e pinus.

É possível observar para os três tipos de materiais que à medida que a porcentagem de RCDs aumentou, a densidade aparente dos blocos apresentou uma tendência a diminuir (Figura 14), mas se mantendo dentro do erro para os três tratamentos estudados, em relação ao controle, material sem as partículas de madeira. Além disso, observamos também que para os blocos com adição das partículas de pinus houve uma tendência a aumento na densidade aparente com o aumento de RCD de 20 para 40 e 50%. Enquanto que, para os blocos que receberam as partículas de eucalipto, observamos que há uma tendência diretamente proporcional de diminuição da densidade aparente com o aumento na proporção de adição de RCDs.

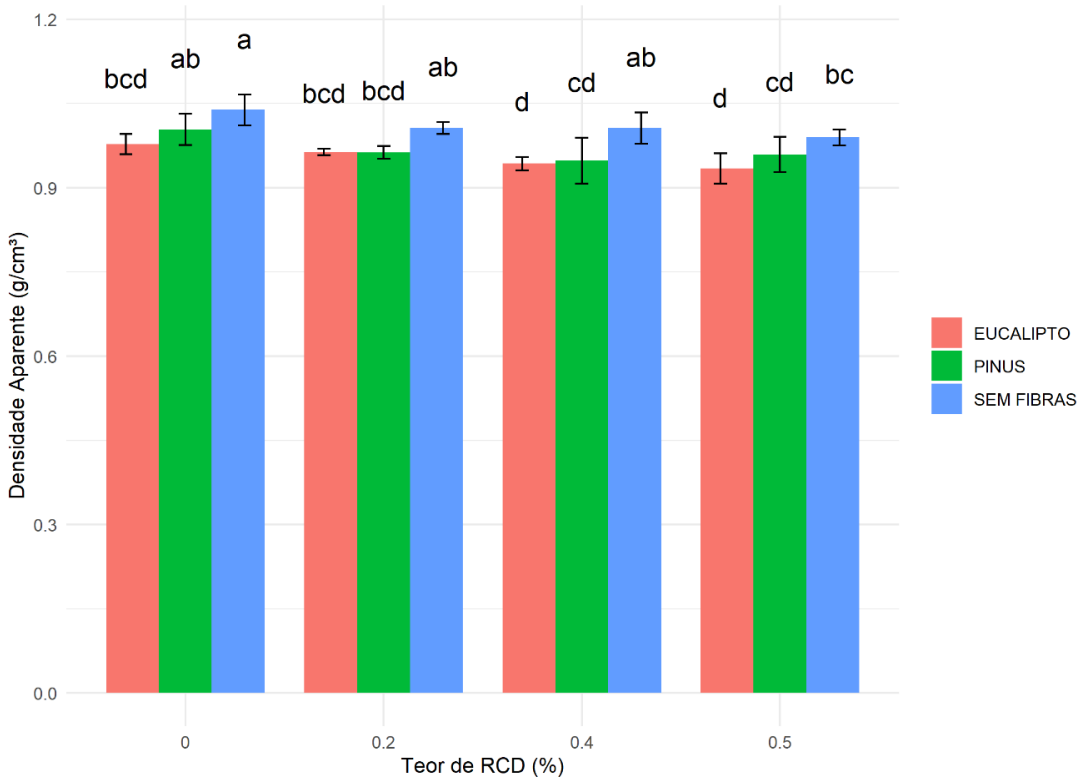


Fig. 15 Média da densidade aparente dos blocos dos 3 tratamentos em função do teor de RCD, em nível de 95% de confiança.

*Nota: Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si.

Na Figura 15, está representada a análise estatística das médias da densidade, pode- se observar que estatisticamente os tratamentos são diferentes. Porém, quando comparado isoladamente os tratamentos que receberam apenas os RCDs sem adição de partículas, observa-se que para os teores de 20, 40 e 50% não há diferença estatística entre eles. Pode-se observar também que para os tratamentos que receberam os RCD e adição de partículas de eucalipto, quando comparado entre eles não há diferenciação estatística para teores de RCDs. Já para os tratamentos que receberam os RCD e adição de partículas de pinus, observa-se que para os teores de 20, 40 e 50% não há diferença estatística entre eles.

Zhao et al. (2020), utilizaram RCDs para a produção de blocos de concreto e também relataram que a densidade aparente blocos diminuiu ligeiramente com um aumento no teor de RCDs, o que pode ser explicado pelo fato do RCD possuir uma menor densidade em comparação com a do agregado natural. Eles explicam ainda que o menor valor de densidade dos RCDs é por causa da presença de pasta de cimento endurecida, que é muito mais porosa do que o agregado natural.

Os resultados de redução na densidade dos blocos com a presença de RCDs e partículas de eucalipto e pinus, são considerados satisfatórios para o setor da construção civil, pois permite a construção de edificios mais leves, facilita a tranferência de material no canteiro de obras e além disso, garante à redução dos esforços exigidos pelas vigas, pilares e fundações.

Os resultados para porosidade aparente estão representados na Figura 16, que apresenta os valores encontrados em relação à adição RCDs e partículas de eucalipto e pinus.

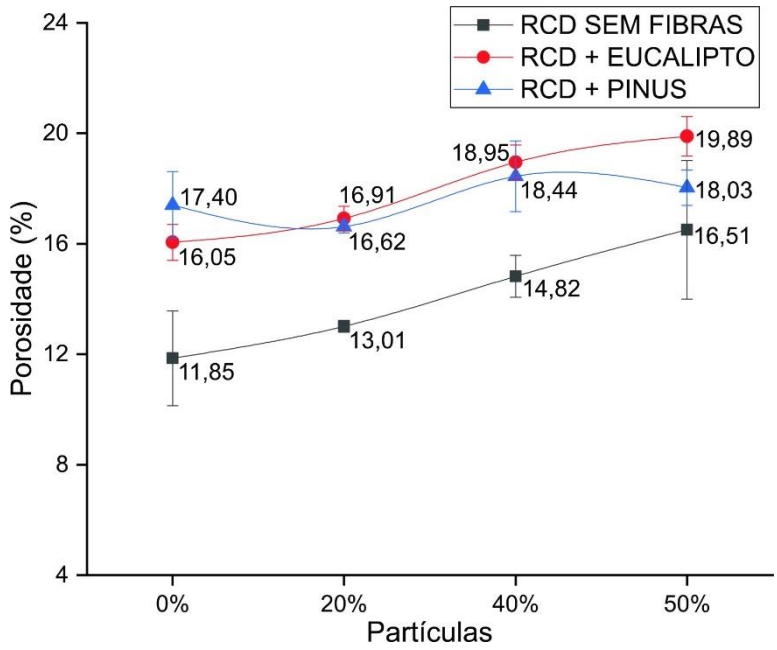


Fig. 16 Porosidade aparente dos blocos confeccionados com resíduos de construção e demolição (RCDs), com e sem adição de 2,5% das partículas de eucalipto e pinus.

Para todos os tratamentos, houve uma tendência diretamente proporcional, de aumento da porcentagem da porosidade aparente à medida que aumentavam as proporções de RCDs nos blocos, exceto para os blocos que receberam os RCDs com a presença das partículas de pinus, nos quais, observou-se uma pequena redução na porosidade no tratamento de 20%, depois um aumento e novamente uma redução com 50%. Lima e Iwakiri (2014), em seus trabalhos, encontraram diferença significativas na porosidade dos blocos entre todas as proporções de agregado miúdo mineral e resíduo de pinus, sendo que a porosidade aumentava à medida que aumentavam os teores de resíduo de pinus. Sendo que, os valores obtidos neste trabalho para porosidade estão menores que os obtidos no trabalho de Lima e Iwakiri (2014),

Na Figura 17, está representada a análise estatística das médias da porosidade, pode- se observar que estatisticamente os tratamentos são diferentes.

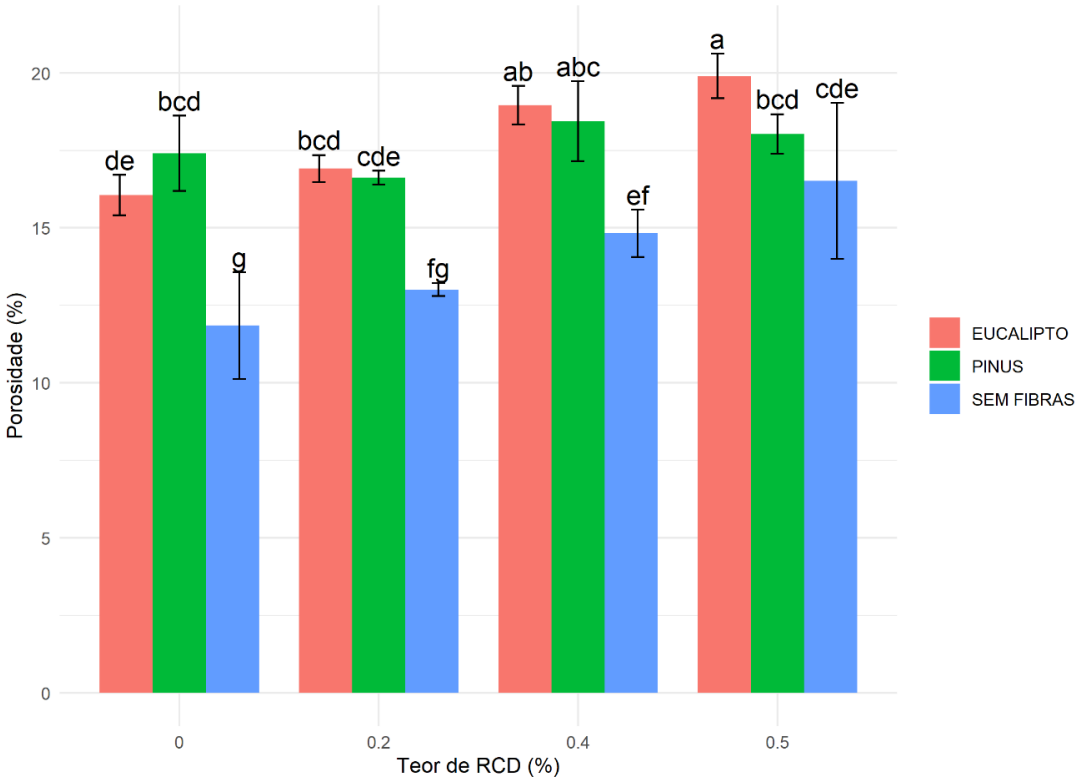


Fig. 17 Média da porosidade dos blocos dos 3 tratamentos em função do teor de RCD, em nível de 95% de confiança.

*Nota: Médias seguidas de mesma letra não diferem na coluna não diferem entre si.

Quando comparado isoladamente os tratamentos que receberam apenas os RCDs sem adição de partículas, observa-se que para os teores de 0 e 20% não há diferença estatística entre eles. Pode-se observar também que para os tratamentos que receberam os RCD e adição de partículas de eucalipto, quando comparado entre eles para os teores de 0 e 20% não há diferença estatística entre eles, assim como, entre os teores de 40 e 50% não existem diferenciação entre eles. Já para os tratamentos que receberam os RCDs e adição de partículas de pinus, observa-se que para todos os teores não há diferença estatística entre eles.

O aumento das porcentagens da porosidade em todos os tratamentos pode ser explicado pelo aparecimento de pequenas trincas nos blocos à medida que se aumentava o percentual de RCDs. No entanto, devido aos maiores valores de porosidade aparente, os blocos de concreto contendo RCDs e partículas de pinus e eucalipto, apresentam menor densidade em comparação ao bloco de referência (0%), e estes resultados são semelhantes ao resultados reportados por outros autores (COURARD et al., 2010; GUO et al., 2018).

A Figura 18 apresenta os valores obtidos para a absorção de água para os blocos produzidos com resíduos de construção e demolição (RCDs), com e sem adição de partículas de eucalipto e pinus.

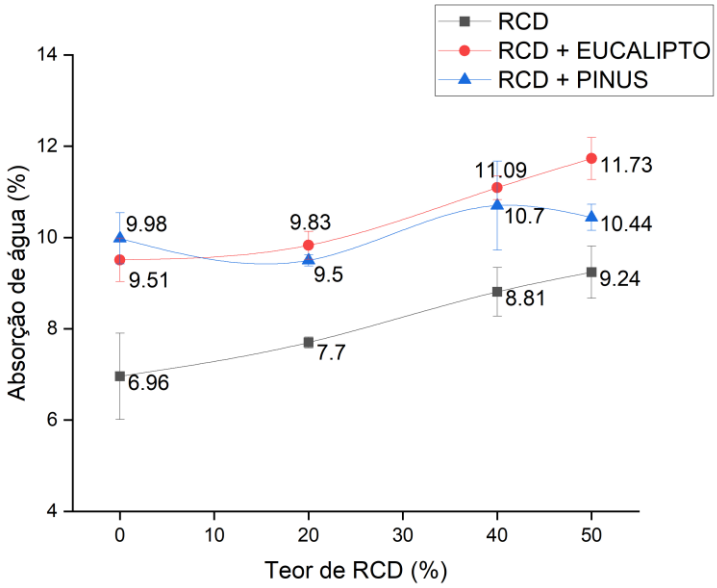


Fig. 18 Absorção de água dos blocos confeccionados com resíduos de construção e demolição (RCDs), com e sem adição de 2,5% de partículas de eucalipto e pinus.

Para os blocos que receberam apenas os resíduos de construção e demolição houve crescimento diretamente proporcional na absorção de água à medida que aumentavam as porcentagens de RCDs, A adição das partículas nos blocos resultou também em um aumento na absorção de água, tanto para eucalipto quanto para o pinus, comparado aos que receberam apenas os RCDs. Considerando o teor de 50% de RCDs, observamos que houve um aumento de 27% na absorção de água para os blocos com as partículas de eucalipto, e de 11% para os blocos com as partículas de pínus em relação aos sem partículas de madeira.

O menor resultado de absorção obtido, 6,96%, foi para o tratamento controle que não recebeu nenhuma porcentagem de RCDs nem de partículas de madeiras, além disso, pode se observar que à medida que as partículas de pinus ou eucalipto foram introduzidas, houve aumento na absorção de água para todas as porcentagens de RCDs estudadas. Considerando o controle, 0% de RCD, observamos um aumento de 37% com a adição de 2,5% de partículas de pinus, e de 43% com a adição de 2,5% de partículas de eucalipto.

Na Figura 19, está representada a análise estatística das médias da absorção de água, pode- se observar que estatisticamente os tratamentos são diferentes.

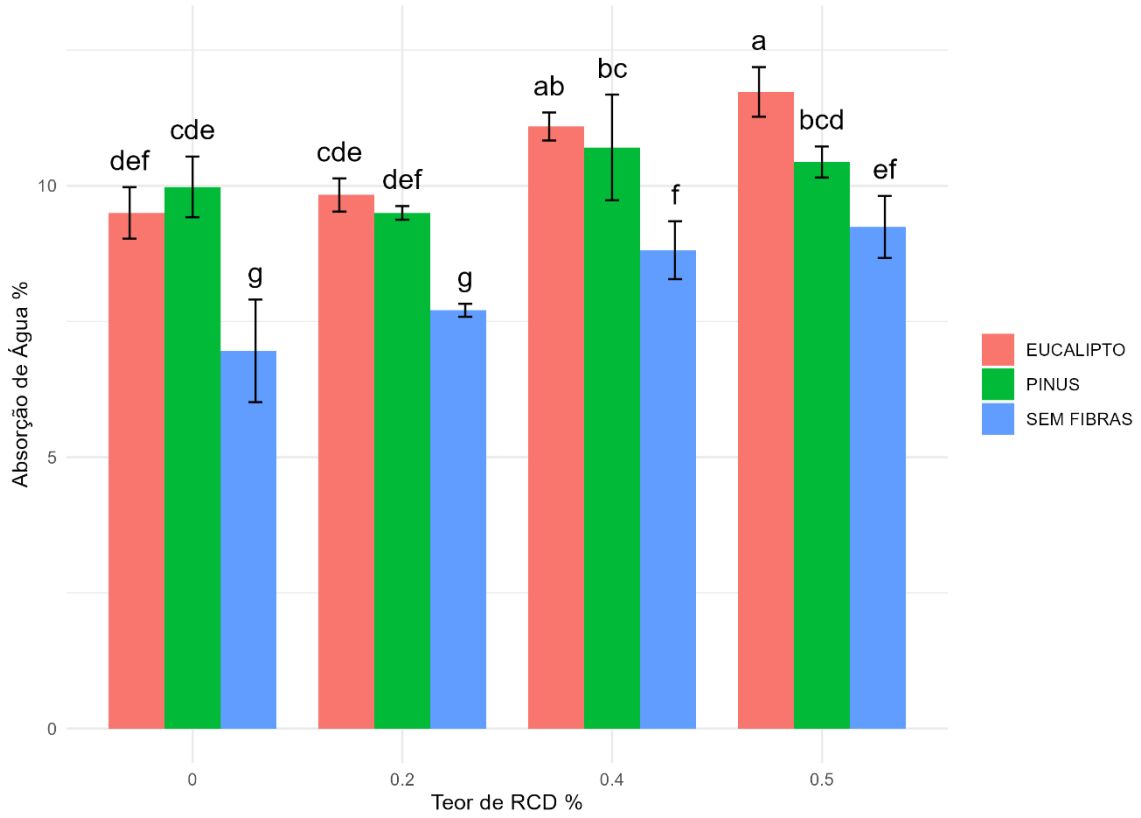


Fig. 19 Média da absorção de água dos blocos dos 3 tratamentos em função do teor de RCD, em nível de 95% de confiança.

Quando comparado isoladamente os tratamentos que receberam apenas os RCDs sem adição de partículas, observa-se que para os teores de 0 e 20% não há diferença estatística entre eles, bem como entre os teores com 40 e 50 %. Pode-se observar semelhante aos blocos que receberam apenas RCDs, os tratamentos que receberam os RCD e adição de partículas de eucalipto, quando comparado entre eles para os teores de 0 e 20% não há diferença estatística entre eles, assim como entre os teores com 40 e 50 %. Já para os tratamentos que receberam os RCDs e adição de partículas de pinus, observa-se que quando comparado entre eles para os teores de 0, 40 e 50% não há diferença estatística entre eles.

Lima e Iwakiri (2014), substituíram o agregado miúdo por resíduo de madeira de pinus e também observaram em seus trabalhos que a absorção de água, aumentou a medida em que foram adicionados maiores teores de madeira de pinus. No nosso trabalho observamos que, a adição das partículas de pinus nos blocos que apresentaram os menores teores de absorções de água em comparação aos blocos que receberam as partículas de eucalipto. O que pode ser explicado pela possibilidade de partícula de pinus preencher alguns poros e consequentemente, garantir menor penetração de água.

Zhao et al. (2020), observaram que a absorção de água de blocos com resíduos de concreto reciclado (RCD) foi significativamente maior em relação aos blocos confeccionados com agregados não reciclados. Eles explicam ainda que o aumento do teor de absorção de água dos blocos foi causado pela maior porosidade dos blocos com RCDs pois, a presença de RCDs forma capilares mais longos como consequência de sua própria porosidade, o que aumenta o estresse capilar. Este aumento na quantidade de poros capilares combinados com à absorção pelos RCDs acaba promovendo uma maior sucção da água, o que também foi relatado por outros pesquisadores (DEBIEB et al.,2010; XIAO et al., 2011).

Todos os blocos confeccionados neste estudo atendem aos requisitos da NBR 6136 (ABNT, 2016), e essa normativa estabelece que a absorção de água em blocos confeccionados com agregados leves, deve ser de no máximo 13%. Desta forma, observando os resultados obtidos neste trabalho, estes indicam que a adição de RCDs e das partículas dos resíduos de eucalipto e pinus nos blocos, não influenciaram negativamente nas suas propriedades físicas, uma vez que atendem a normativa. Além disso, esse desempenho reforça a possibilidade de utilização dos resíduos para este fim.

3.4 Propriedade mecânica dos blocos

A Figura 20 apresenta os valores encontrados para a resistência à compressão dos blocos em relação à porcentagem de resíduos de construção e demolição utilizados, sem adição das partículas dos resíduos de eucalipto e pinus.

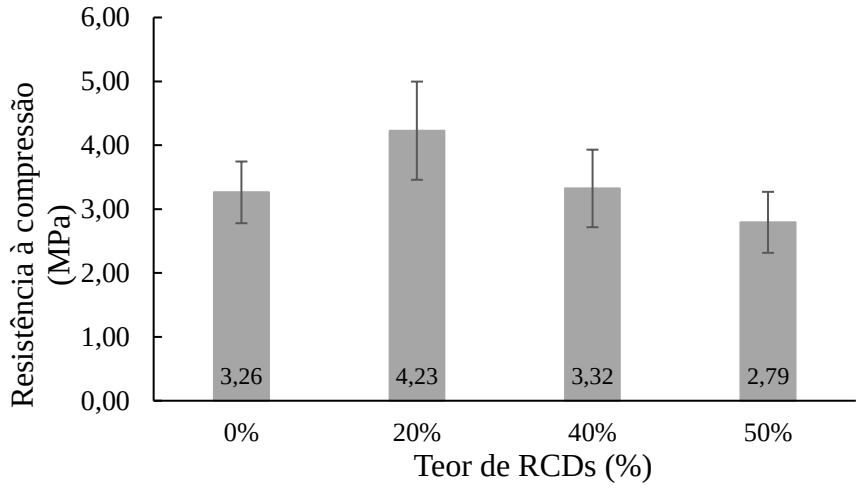


Fig. 20 Resistência à compressão dos blocos confeccionados com resíduos de construção e demolição (RCDs), sem de partículas de madeira.

Pode-se observar na Figura 20, que o tratamento controle com 0% de RCDs apresentou uma resistência à compressão média de 3,26 MPa. A resistência à compressão do bloco confeccionado com 20% de RCDs aumentou 29,75% em comparação com o bloco referência, sendo o melhor desempenho obtido entre os tratamentos analisados. Os blocos que receberam 40% de RCD apresentaram resistência à compressão de 3,32 MPa, observamos que houve um aumento de 1,24% quando comparado aos blocos do tratamento controle (0%). Enquanto que para os blocos que receberam 50% de RCD, houve uma redução de 14,42% na resistência quando comparado aos blocos do tratamento controle (0%).

Zhao et al. (2020), substituindo o agregado virgem por agregados de RCDs encontraram resultados de resistência à compressão inferiores ao tratamento controle. A medida em que aumentaram as proporções de RCD a resistência a compressão diminuiu. Sendo que, houve uma redução de 6% na resistência à compressão dos blocos substituídos com 30% de RCDs e uma redução de 16,5% a na resistência dos blocos produzidos com 100% de RCDs. Essa redução pode ser explicada devido fato que o RCD utilizado apresenta propriedades físicas inferiores quando comparado aos agregados virgens.

Na Figura 21, estão apresentados os resultados da resistência à compressão dos blocos com adição de RCDs, nas proporções de 0%, 20%, 40% e 50%, e adição de 2,5% de particulas de eucalipto em todos os tratamentos.

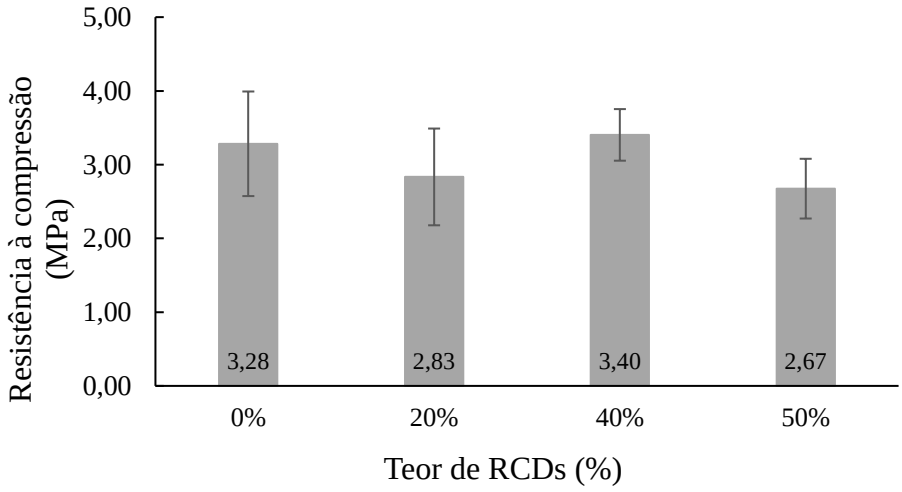


Fig. 21 Resistência à compressão dos blocos confeccionados com resíduos de construção e demolição (RCDs), com adição de 2,5% das partículas de eucalipto.

Nesse caso, podemos observar que o maior valor de resistência encontrado foi 3,4 MPa, para o tratamento com 40% de RCD, superior 3,65% em comparação ao tratamento com 0% de RCD e 2,5% de partículas de eucalipto. E assim como nos blocos que receberam apenas RCD,

Figura 21, o menor desempenho encontrado foi para o blocos com 50% de RCD e partículas de eucalipto, apresentando uma redução da resistência de 18,59% em relação ao ao tratamento com 0% de RCD e 2,5% de partículas de eucalipto. Foi observada também uma redução na resistência de 13,19% no tratamento que recebeu 20% de RCD e partículas de eucalipto.

Bastos et al. (2021), avaliaram a substituição dos agregados virgens por agregados de concreto reciclados e também a substiuição com caulim, semelhante aos valores obtidos em nosso trabalho, eles observaram uma melhora na resistência à compressão com a adição de 5% de caulim e 10% de RCDs. Houve também uma pequena redução para os outros tratamentos a medida em que aumentaram os teores de RCDs e caulim comparados ao tratamento controle, porém em todos os tratamentos a resistência à compressão obervada neste trabalho, estava dentro do valor requerido pela norma brasileira.

Foram avaliadas ainda, a resistência à compressão dos blocos que receberam a adição de RCDs, também nas proporções de 0%, 20%, 40% e 50% e nesse caso, foram adicionadas de 2,5% do resíduo das particulas de madeira de pinus para todos os tratamentos, Figura 22.

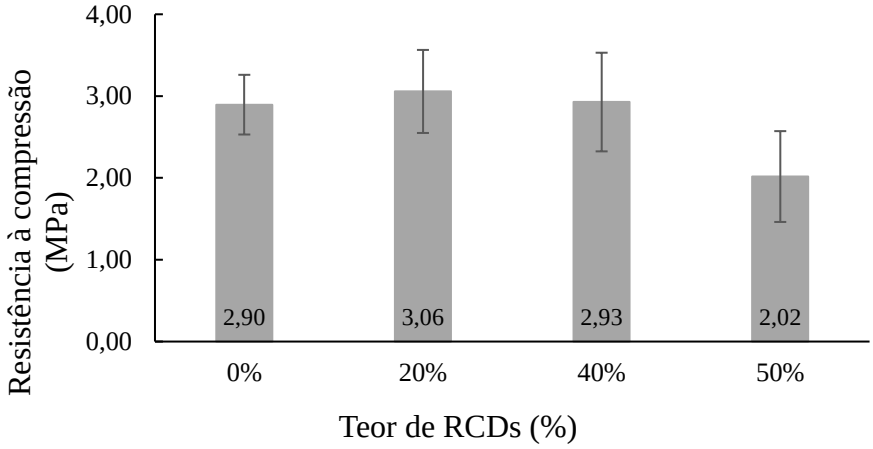


Fig. 22 Resistência à compressão dos blocos confeccionados com resíduos de construção e demolição (RCDs), com adição de 2,5% das partículas de pinus.

O melhor desempenho obtido, foi para o tratamento com 20% de RCD e partículas de pinus, que apresentou uma resistência à compressão média de 3,06 Mpa, garantindo um aumento de 5,51% em comparação ao tratamento com 0% de RCD e 2,5 % de partículas de pinus. Foram observadas reduções de 1,03% e 30,34% das resistências nos tratamentos com 40% e 50% de RCDs e partículas de pinus, respestivamente.

Lima e Iwakiri (2014), substituíram os agregados naturais por partículas de madeira de pinus e também observaram uma redução nas resistências à compressão dos tratamentos proporcionalmente ao aumento dos teores de partículas de pinus nos blocos. A resistências dos

blocos quando adicionaram 100% de partículas de pinus, foi reduzida em 84,48%. Porém, apesar dessas reduções, os valores das resistências à compressão determinadas com substituição de 50% de resíduo de Pinus spp. apresentaram valores acima da mínima para uso em alvenaria estrutural, que, conforme a normalização brasileira.

Na Figura 23, estão presentes a análise estatística das médias da resistência à compressão dos três tratamentos em função do teor de RCD.

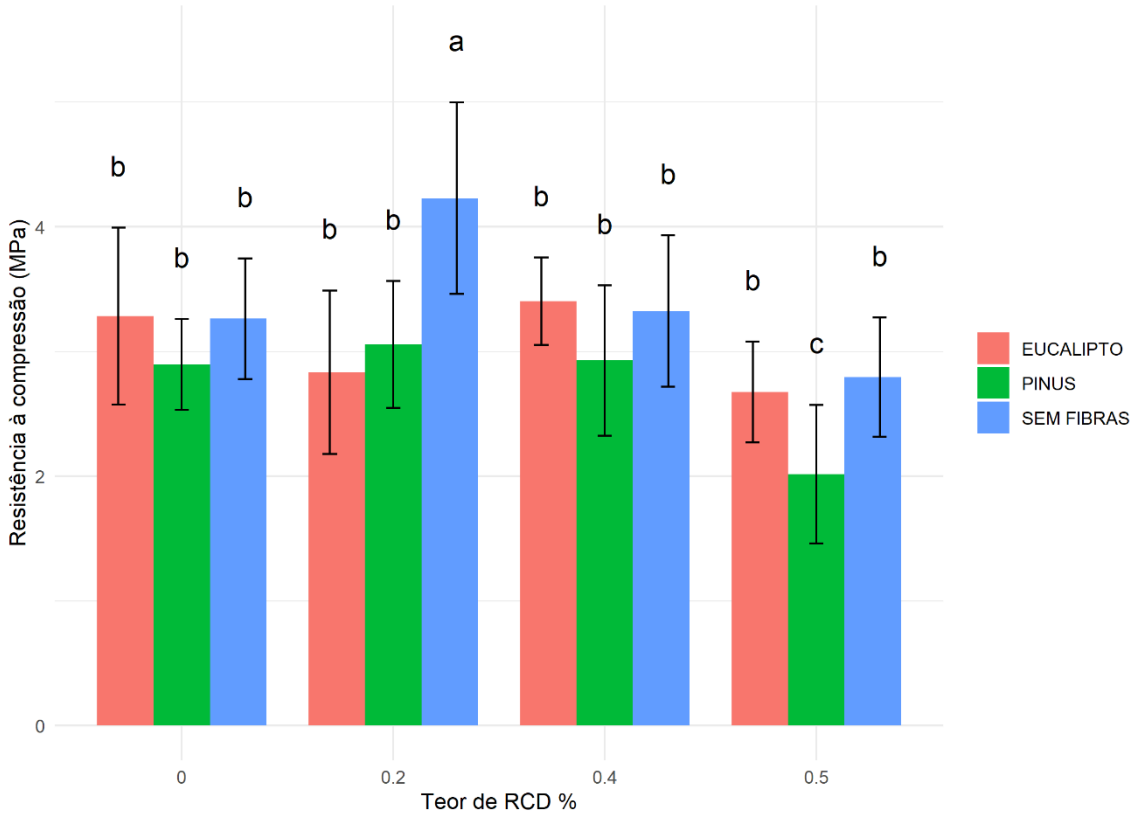


Fig. 23 Médias da resistência à compressão dos blocos dos 3 tratamentos, em função do teor de resíduo de construção e demolição (RCD), em nível de 95% de confiança.

*Nota: Médias seguidas de mesma letra e número não diferem entre si.

Observa-se que houve diferença estatística entre os valores médios dos tratamentos analisados entre os teores de 20 e 50%. Porém, podemos observar que não houve diferença estatística entre os tratamentos com 0%, e 40% de RCDs. A NBR 6136 (ABNT, 2016), estipula que o valor de resistência à compressão mínimo para blocos de vedação, classe C, deve ser maior ou igual a 3,0 MPa. Sendo assim se analisarmos os resultados obtidos para os blocos sem adição das partículas de madeira, Figura 20, observamos que somente os blocos confeccionados com 50% de RCD não atendem à norma. Em relação aos blocos com as partículas de eucalipto,

Figura 21, os materiais com 20 e 50% de RCD são os que não atendem à norma, e para os blocos com as partículas de pinus, Figura 22, somente os blocos com 20% atem à norma brasileira. Estes valores obtidos para resistência a compressão corrobora com os resultados de porosidade aparente, pois quanto maior a porosidade, menor a resistência, uma vez que vazios diminuem a área efetiva de contato entre as partículas do material e deixam o concreto mais suscetível à ruptura sob carga.

3.5 Propriedades térmicas dos blocos

As Tabelas 8, 9 e 10 apresentam a condutividade térmica, resistência térmica e transmitância térmica, respectivamente, obtidas para os blocos com adição de resíduos de construção civil (RCDs) com e sem a adição de 2,5% das particulas de madeira de eucalipto e pinus.

Para os blocos produzidos apenas com RCDs, Tabela 5, o aumento do teor de RCDs aumentou a condutividade térmica. Já para os blocos que foram confeccionados com partículas de eucalipto e pinus, os menores valores de condutividade térmica encontrados foram nos tratamentos com 50% de RCDs. De acordo com Liu et al. (2019) e Ricklefs et al. (2017), os vazios presentes nos blocos confinam o ar, que exibe uma condutividade inferior ao material sólido, garantindo uma redução na condutividade térmica final do bloco.

Quanto maior for a resistência térmica de um material, este proporcionará melhor conforto térmico, sendo assim, no caso dos blocos confeccionados apenas com RCDs, o tratamento controle (0%), foi o que apresentou melhores resultados. Para os blocos que receberam também as particulas de madeira eucalipto (Tabela 6) e pinus (Tabela 7), pode se observar maiores valores de resistência térmica nos tratamentos a 40% e 20% de RCDs, respectivamente.

Tabela 5 - Propriedades térmicas para os blocos com resíduos de construção civil (RCDs) sem adição das particulas de madeira de eucalipto e pinus.

Teor de RDCs	λ (W/m.°C)	RT (m².°C/W)	TT (W/m².°C)
0%	0,1874	0,096	5,336
20%	0,2074	0,087	4,822
40%	0,1916	0,094	5,219
50%	0,2017	0,089	4,959

Legenda: λ – Condutividade térmica; RT – Resistência Térmica; TT – Transmitância térmica.

Tabela 6 - Propriedades térmicas para os blocos com resíduos de construção civil (RCDs) com adição das particulas de madeira de eucalipto.

Teor de RDCs	λ (W/m.°C)	RT (m².°C/W)	TT (W/m².°C)
0%	0,1957	0,092	5,110
20%	0,2098	0,086	4,767
40%	0,1709	0,105	5,850
50%	0,1860	0,097	5,377

Legenda: λ – Condutividade térmica; RT – Resistência Térmica; TT – Transmitância térmica.

Tabela 7 - Propriedades térmicas para os blocos com resíduos de construção civil (RCDs) com adição das particulas de madeira de pinus.

Teor de RDCs	λ (W/m.°C)	RT (m².°C/W)	TT (W/m².°C)
0%	0,1957	0,092	5,110
20%	0,1832	0,098	5,460
40%	0,1860	0,097	5,377
50%	0,1889	0,095	5,295

Legenda: λ – Condutividade térmica; RT – Resistência Térmica; TT – Transmitância térmica.

Com relação à transmitância térmica dos blocos, o ideal é que obtenha menores valores, pois se trata da quantidade de calor que atravessa da face mais quente para a face mais fria, por metro quadrado. Para os blocos produzidos apenas com RCDs, os menores resultados encontrados foram para o tratamento com 20% RCDs, Tabela 9. Enquanto que, para os blocos com as partículas eucalipto e pinus, os menores valores encontrados foram nos tratamentos a 20% e 0% de RCDs, respectivamente. Sendo que o melhor foi o com 20% de RCDs e fibra de eucalipto.

As Figuras 24 e 25 apresentam a análise das médias da condutividade térmica e resistência térmica dos 3 tratamentos realizados, respectivamente, obtidas para os blocos com adição de resíduos de construção civil (RCDs) com e sem a adição de 2,5% das particulas de madeira de eucalipto e pinus.

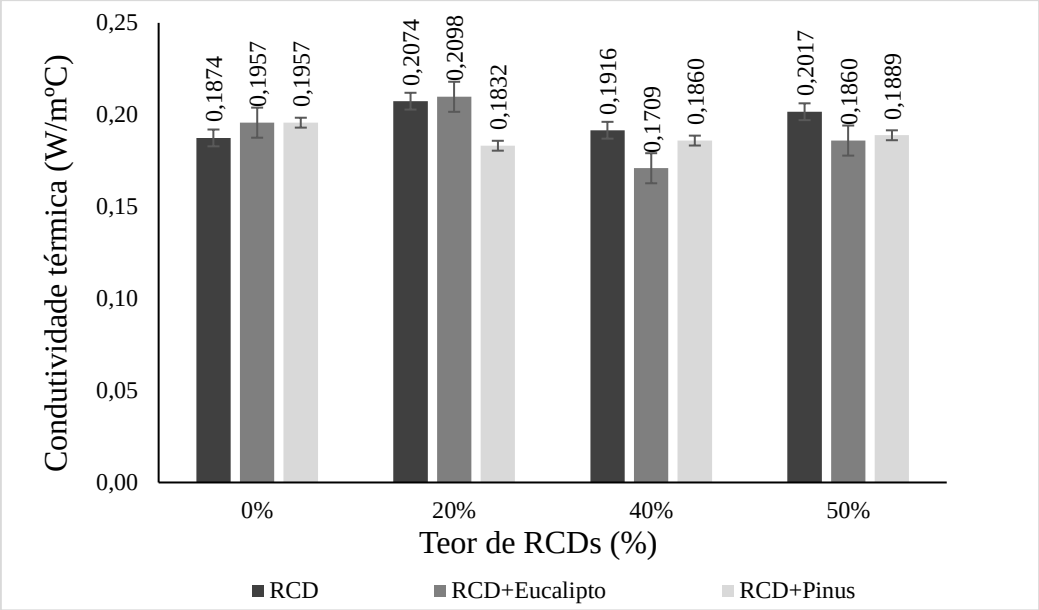


Fig. 24 Médias dos 3 tratamentos para a condutividade térmica dos blocos em função do teor de resíduos de construção e demolição (RCDs).

Conforme, pode-se observar na Figura 24, o aumento das porcentagens de RCDs nos blocos acarretou em uma redução da condutividade térmica, exceto para os tratamentos com 20% de RCDs, onde é possível notar um aumento da condutividade térmica. Lima e Iwakiri (2014) observaram que com a substituição de 50% do agregado virgem por partículas de pinus, a condutividade térmica dos blocos também foi reduzida. Além disso, essa redução na condutividade térmica pode ser explicada pelo fato de os materiais que são produzidos com base em compósitos cimento-madeira, possuem características de isolamento térmico superiores aos materiais de construção (SAVASTANO JUNIOR E AGOPYAN, 1997).

A redução dos valores da condutividade térmica é um resultado positivo para materiais de construção, pois quanto menor a condutividade térmica, menor será a troca de temperatura do ambiente interno e externo, possibilitando um ambiente mais confortável termicamente (SOUZA et al. 2021).

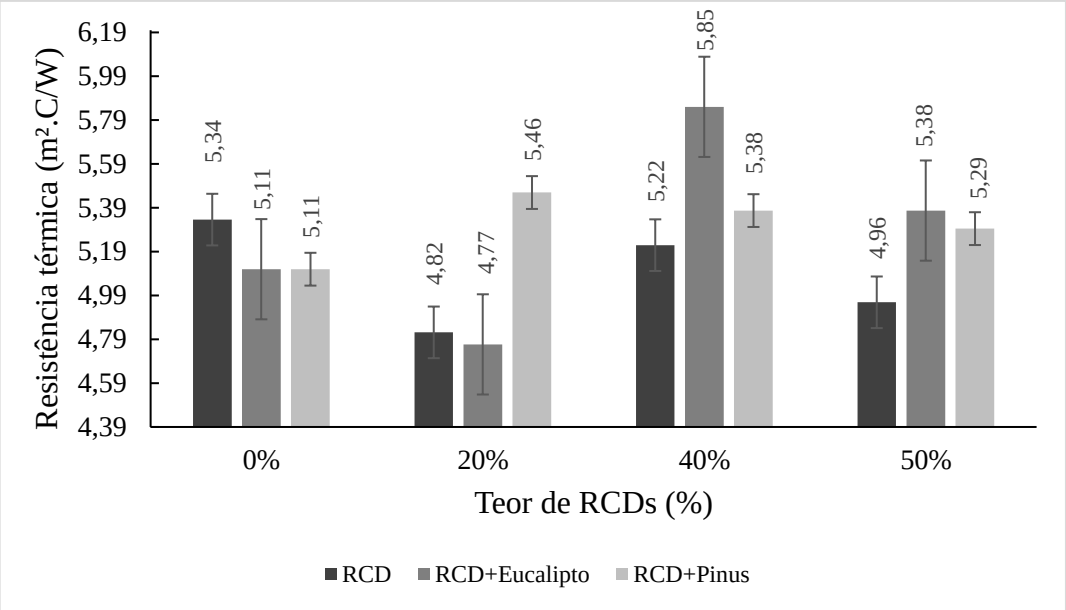


Fig. 25 Médias dos 3 tratamentos para a resistência térmica dos blocos em função do teor de resíduos de construção e demolição (RCDs).

Na Figura 25, estão representadas a análise das médias da resistência térmica, obtidas para os blocos com adição de resíduos de construção civil (RCDs) com e sem a adição de 2,5% das particulas de madeira de eucalipto e pinus. Porém, quanto maior for a resistência térmica de um material, melhor será o conforto térmico que este proporcionará, sendo assim, o tratamento com 40% apresentou os melhores resultados.

3.6 Morfologia

Na Figura 26, estão representadas as imagens obtidas pelo microscópio estereoscópio das superficies dos tratamentos com proporções de 0%, 20%, 40% e 50% de RCD, sem adição das particulas de madeira, após 28 dias de cura.

É possível verificar um aumento dos poros nos blocos nas formulações com maiores porcentagens de resíduo (Figura 26-c e Figura 26-d) o que confirma os resultados encontrados para porosidade e absorção de água, uma vez que, ambos os valores aumentaram com a adição de maiores porcentagens de RCDs.

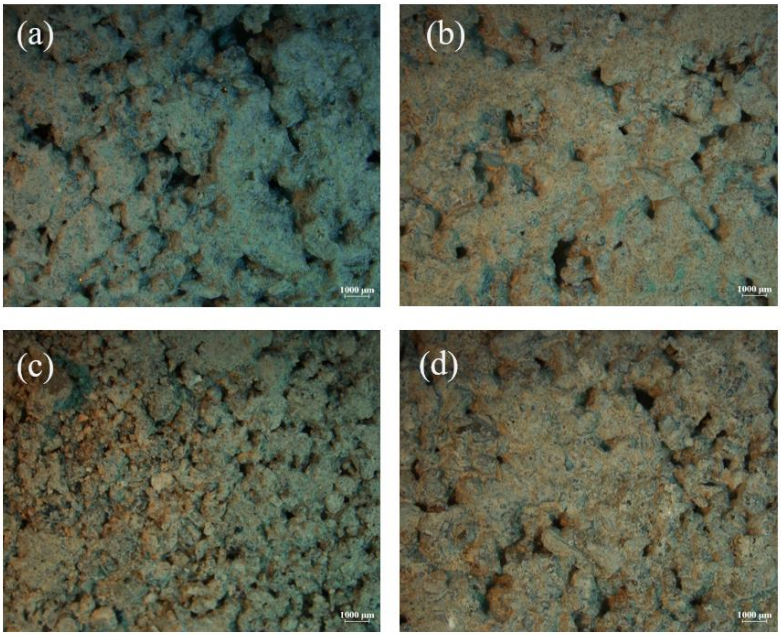


Fig. 26 Imagens da superfície dos blocos com resíduos de construção e demolição (RCDs) sem adição de partículas, obtidas por um microscópio estereoscópio, com aumento de 75 x. (a) 0% RCDs. (b) 20% RCDs. (c) 40% RCDs. (d) 50% RCDs.

Na Figura 27 estão apresentadas as imagens obtidas pelo microscópio estereoscópio dos tratamentos com proporções de 0%, 20%, 40% e 50% de RCD com adição das particulas de madeira de eucalipto.

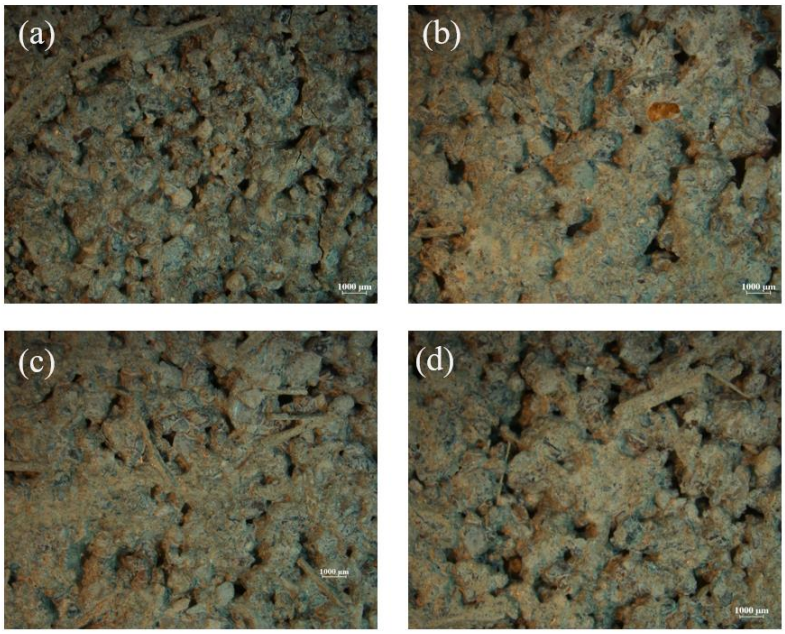


Fig. 27 Imagens da superfície dos blocos com resíduos de construção e demolição (RCDs) com adição das particulas de madeira de eucalipto, obtidas por um microscópio estereoscópio, com aumento de 75 x. (a) 0% RCDs. (b) 20% RCDs. (c) 40% RCDs. (d) 50% RCDs.

A medida em que se adicionavam os RCDs e a também as partículas de eucalipto, os valores para porosidade foram aumentados, o que pode ser explicado pelo surgimento de trincas nas superficies dos blocos (Figura 27 - a) e um aumento dos vazios para os (Figura 26 - c) blocos com adição de 40% RCDs e 2,5% de partículas de eucalipto.

Na Figura 28, estão apresentadas as imagens obtidas pelo microscópio estereoscópio dos tratamentos com proporções de 0%, 20%, 40% e 50% de RCD com adição das particulas de madeira de pinus.

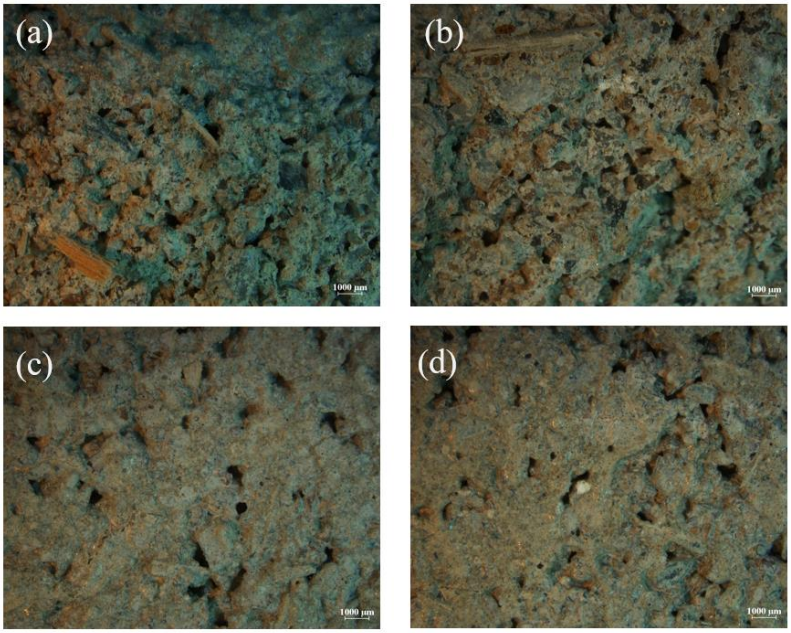


Fig. 28 Imagens da superfície dos blocos com resíduos de construção e demolição (RCDs) com adição das partículas da madeira de pinus, obtida por um microscópio estereoscópio, com aumento de 75 x. (a) 0% RCDs. (b) 20% RCDs. (c) 40% RCDs. (d) 50% RCDs.

É possível observar, o acúmulo de partículas na superfície e o surgimento de vazios, como por exemplo, na Figura (28- c). Além disso, observa-se também que os resultados que foram obtidos para redução da porosidade quanto a absorção de água, estão de acordo com o observado por microcospia para o tratamento com 20% de RCDs, na Figura 28-b, que apresenta um menor número de vazios.

4 CONCLUSÃO

Os resultados indicam que, com o aumento do teor de RCDs incorporado houve redução na densidade dos blocos, sendo que a mesma reduziu ainda mais quando foram inseridas as partículas de eucalipto e pinus, entretanto, houve aumento da porosidade e também da absorção de água dos blocos. A adição dos RCDs e das partículas de madeira reciclada manteve a condutividade térmica e um aumento a resistência térmica, que é benéfico, pois garante melhor conforto térmico com a utilização deste material.

Nos ensaios de compressão dos blocos os resultados mostraram que os melhores para os blocos com apenas RCDs foram para o tratamento com a inserção de 20% de RCD. Já para os blocos que receberam RCDs e partículas de eucalipto o melhor valor encontrado foi para o tratamento com 40%, enquanto para os blocos que receberam RCDs e partículas de pinus o melhor desempenho obtido, foi para o tratamento com 20%. Os tratamentos que receberam os RCDs sem adição de partículas, apenas o tratamento com 50%, não atende os requisitos da normativa, já para os blocos que receberam os RCDs e partículas de eucalipto e pinus, apenas os tratamentos com 0% e 40% (eucalipto) atenderam os requisitos e também o tratamento com 20% de RCDs e partículas de pinus.

Com os resultados deste trabalho, pode se observar que a substituição parcial dos RCDs e a adição de partículas de madeiras reciclada de eucalipto e pinus é promissora. Além disso, os resultados mostraram que a utilização desses resíduos é viável, porém necessita de alguns ajustes nos traços dos blocos de maneira a melhorar as propriedades físicas e mecânicas. E como sugestão para trabalhos futuros, seria a realização de estudos com a variação dos traços, de modo que sejam incorporados maiores teores de partículas, e estudos para o aprimoramento da confecção dos blocos visando conferir melhores resultados às propriedades mecânicas e de porosidade, absorção de água.

REFERÊNCIAS

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021. São Paulo: ABRELPE, 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>.

ALMERON, M. M.; FERREIRA, S.D.; MAREZE, P. H.; GODINHO, M. **Mechanical and acoustic performance of mortar with partial replacement by biochar from civil construction wood waste at advanced ages.** Construction and Building Materials, v. 428, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11941: madeira — determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12118: blocos vazados de concreto simples para alvenaria — métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013. 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13999: papel-cartão, pastas celulósicas e madeira — determinação do resíduo (cinza) após incineração a 525 °C. Rio de Janeiro, 2017. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14853: madeira — determinação do material solúvel em etanol-tolueno, diclorometano e acetona. Rio de Janeiro, 2010. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6136: blocos vazados de concreto simples para alvenaria — requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: agregados para concreto — especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7989: pasta celulósica e madeira — determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2010. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: argamassa e concreto endurecido — determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009. 3 p.

BARROS, E.; FUCALE, S. **O uso de resíduos da construção civil como agregados na produção de concreto.** Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v. 2, n. 1, 2016.

BASTOS, F.; CABRAL, A.; ALCÂNTARA, P.; MAIA, L. **Study case about the production of masonry concrete blocks with CDW and kaolin mining waste.** AIMS Materials Science, v. 8, n. 6, p. 990–1004, 2021.

BORYSIAK, S.; DOCZEKALSKA, B. **X-ray diffraction study of pine wood treated with NaOH.** Fibres & Textiles in Eastern Europe, v. 13, 2005.

BRASIL. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília: CONAMA, 2002.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood.** New York: J. Wiley, 689 p. 1963.

CAMPOS, A. C. M. **Carvão de Eucalyptus: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR.** 2008. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

CHU, S. H.; POON, C. S.; LAM, C. S.; LI, L. **Effect of natural and recycled aggregate packing on properties of concrete blocks.** Construction and Building Materials, v. 278, 2021.

COURARD, L., MICHEL, F., DELHEZ, P. **Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete.** Construction and Building Materials, v. 24, p. 390–395, 2010.

DE SOUZA, C. V., PAULINO, R., & TORALLES, B. **Blocos de concretos de RCD sem função estrutural prensados de forma manual e mecânica.** Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v. 8, n. 1, p. 1–9, 2022.

DEBIEB, F., COURARD, L., KENAI, S., DEGEIMBRE, R. **Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates.** Cement and Concrete Composites, v. 32, p. 421–426, 2010.

DENG, M; ZHANG, W; LI, N. **In-plane cyclic loading tests of concrete hollow block masonry walls retrofitted with high ductile fiber-reinforced concrete.** Construction and Building Materials, v. 238, art. 117758, 2020.

DOS SANTOS, L. B.; MOREIRA, T. A.; DALMASCHIO, C. J.; MACHADO, M. A. **Preparação de biocompósito à base de amido termoplástico reforçado com fibras de eucalipto: avaliação do efeito do tamanho das fibras nas propriedades mecânicas e de sorção.** Química Nova, v. 47, n. 10, p. 1–9, 2024.

FERNANDES, M. A. M., NÖRNBERG, L. V., SANTOS, O. P. DOS, PIMENTEL, N., QUEVEDO, F. F., CARDOSO, G. V., & MOREIRA, M. L**. Qualidade da madeira de híbridos de *Corymbia* para a produção de celulose kraft** Ciência Florestal, v. 35, e87028, 2025.

FIORELLI, J.; GOMIDE, C. A.; LAHR, F. A. R.; DO NASCIMENTO, M. F.; DE LUCCA SARTORI, D.; BALLESTEROS, J. E. M.; BUENO, S. B.; BELINI, U. L. **Physico-chemical and anatomical characterization of residual lignocellulosic fibers.** Cellulose, Dordrecht, v. 21, n. 4, p. 3269-3277, 2014.

FONSECA, A. S. et al. **Principais características das fibras de palmeira amazônica subexploradas para uso como potenciais materiais de reforço.** Waste and Biomass Valorization, v. 10, p. 3125–3142, 2019.

FRENCH, A. D. **“Idealized powder diffraction patterns for cellulose polymorphs”.** Cellulose, v. 21, 2014.

FURTINI, A. C. C., SANTOS, C. A., GARCIA, H. V. S., BRITO, F. M. S., SANTOS, T. P., MENDES, L. M., & GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. **Performance of cross laminated timber panels made of Pinus oocarpa and Coffea arabica waste.** Coffee Science, e161854, 2021.

GARCIA-MARAVER, A.; SALVACHÚA, D.; MARTÍNEZ, M. J.; DIAZ, L. F.; ZAMORANO, M. **Analysis of the relation between the cellulose, hemicellulose and lignin content and the thermal behavior of residual biomass from olive trees.** Waste Management, 33, 2013.

GUO, Z., TU, A., CHEN, C., LEHMAN, D.E. **Mechanical properties, durability, and lifecycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates.** Journal of Cleaner Production, v. 199, p. 136–149, 2018.

HERRERA, R.; HERMOSO, E.; LABIDI, J.; JUAN I.; GOLFIN, F. **Non-destructive determination of core-transition-outer wood of Pinus nigra combining FTIR spectroscopy and prediction models .** Microchemical Journal, v. 179, 2022.

HU, K.; GILLANI, S. T. A.; TAO, X.; TARIQ, J.; CHEN, D. **Eco-friendly construction: Integrating demolition waste into concrete masonry blocks for sustainable development.** Construction and Building Materials, v. 460, art. 139797, 2025.

JAHAN, I.; ZHANG, G.; BHUIYAN, M.; NAVARATNAM, S. **Circular Economy of Construction and Demolition Wood Waste - A Theoretical Framework Approach.** Sustainability, v. 14, art. 10478, 2022.

JÚNIOR P. R.; ACOSTA, A. P.; SCHULZ, H. R.; GALLIO, E.; GATTO, D. A. **Propriedades físicas e químicas da madeira de Pinus elliottii impregnada com sílica.** Scientia Forestalis, v. 49, n. 130, e3478, 2021.

LASSO, P. R. O.; VAZ, C. M. P.; OLIVEIRA, C. R.; BERNARDI, A. C. C. **Caracterização de resíduos de construção e demolição reciclados (rcd-r) para utilização como corretivo da acidez do solo.** Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária, São Carlos, 2014.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S. **Utilização de resíduos de madeira de Pinus spp. como substituição ao agregado miúdo na produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural.** Ciência Florestal, v. 24, p. 223-235, 2014.

LIU, Z. Y. et al. **Thermal conductivity and mechanical properties of a shape-stabilized paraffin/recycled cement paste phase change energy storage composite incorporated into inorganic cementitious materials.** Cement & Concrete Composites, v. 99, p. 165-174, 2019.

LU, Z; TAN, Q; LIN, J; WANG, D. **Properties investigation of recycled aggregates and concrete modified by accelerated carbonation through increased temperature.** Construction and Building Materials, v. 341, 127813, 2022.

MENG, Y; LING, T. C; MO, K H. **Recycling of wastes for value-added applications in concrete blocks: An overview.** Resources, Conservation and Recycling, v. 138, p. 298-312, 2018.

MODES, K. S., LUDWING, R. L., VIVIAN, M. A., & STOLBERG, J**. Wood quality of Pinus patula schltdl & cham for the pulp production.** Revista Árvore, v. 43, n. 2, e430207, 2019.

NARCISO, C.; REIS, A.; MENDES, J.; NOGUEIRA, N.; MENDES, R. **Potential for the use of coconut husk in the production of medium density particleboard.** Waste and Biomass Valorization, v. 12, n. 5, p. 1647-1658, 2021.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; FILHO, M. T. **Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto.** Revista Árvore, v. 29, n. 1, p. 115-127, 2005.

RASHAD, A. M; SADEK D. M; HASSAN, H. A. **An investigation on blast-furnace stag as fine aggregate in alkali-activated slag mortars subjected to elevated temperatures.** Journal of Cleaner Production, v. 112, p. 1086-1096, 2016.

REN, P; LI, B; YU, J. G; LING, T. C. **Utilization of recycled concrete fines and powders to produce alkali-activated slag concrete blocks.** Journal of Cleaner Production, v. 267, 122115, 2020.

RICKLEFS, A. et al. **Thermal conductivity of cementitious composites containing microencapsulated phase change materials.** International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 104, p. 71-82, 2017.

SALGADO, F. A.; SILVA, F. A. **Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review.** Journal of Building Engineering, v. 52, 104452, 2022.

SANTOS, R. C. et al. **Utilização de resíduos da madeira de candeia (Eremanthuserythropappus (DC.) Macleish) na produção de painéis aglomerados com adição de PET.** Ciência Florestal, v. 21, n. 1, p. 149-158, 2011.

SAVASTANO JÚNIOR, H., AGOPYAN, V. **Microestrutura x desempenho dos compósitos reforçados com fibras vegetais.** In: Workshop sobre reciclagem e reutilização de resíduos como material de construção civil, São Paulo, 1996, São Paulo. Anais. São Paulo, Epusp/Antac, p. 153-158,1997.

SCHULZ, R., H.; PEREIRA ACOSTA, A.; TECHERA BARBOSA, K.; GATTO, D. A. **Propriedades químicas, mecânicas, térmicas e ópticas da madeira tratada termicamente de Pinus elliottii plantada no Brasil.** Quebracho, v. 29, n. 2, p. 122-131, 2021.

SILVA, C. M. S. da; VITAL, B. R; CARNEIRO, A. C. O; COSTA, E. V. S; MAGALHÃES, M. A. TRUGILHO, P. F. **Alterações estruturais e composicionais em cavacos de eucalipto submetidos à torrefação a seco.** Industrial Crops and Products, v. 109, p. 598-602, 2017.

SILVA, D. W.; SCATOLINO, M. V.; PEREIRA, T. G. T et al. **Influence of thermal treatment of eucalyptus fibers on the physical-mechanical properties of extruded fiber-cement composites.** Materials Today: Proceedings, 2020.

SILVA, M. J. **Obtenção de nanomateriais de celulose contendo lignina residual a partir da madeira de seringueira e sua aplicação em filmes nanocompósitos com caseína**. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 132 p.

SOUZA, A. B.; FERREIRA, H. S.; VILELA, A. P.; VIANA, Q. S.; MENDES, J. F.; MENDES, R. F. **Study on the feasibility of using agricultural waste in the production of concrete blocks.** Journal of Building Engineering, v. 42, 102491, 2021.

TERRA, I. C. D. C., BATISTA, F. G., SILVA, D. W., SCATOLINO, M. V., ALVES JÚNIOR, F. T., MARTINS, M. A., & MENDES, L. M. **Mining waste and coconut fibers as an eco-friendly reinforcement for the production of concrete blocks.** Environmental Science and Pollution Research, v. 30, n. 22, p. 62641–62652, 2023.

ULSEN, C.; KAHN, H.; ÂNGULO, S. C.; JOHN, V. M. **Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo.** REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 63, n. 2, p. 339–346, abr./jun. 2010.

VIVIAN, M. A.; SEGURA, T. E. S.; BONFATTI JÚNIOR, E. A.; SARTO, C.; SCHMIDT, F.; SILVA JÚNIOR, F. G. da; GABOV, K.; FARDIM, P. **Qualidade das madeiras de Pinus taeda e Pinus sylvestris para a produção de polpa celulósica kraft.** Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 43, n. 105, p. 183–191, mar. 2015.

XIAO, Z., LING, T.C., KOU, S.C., WANG, Q., POON, C.S. **Use of wastes derived from earthquakes for the production of concrete masonry partition wall blocks.** Waste Management, v. 31, p. 1859–1866, 2011.

ZHANG, X., WANG, F., & KEER, L. M. **Influence of surface modification on the microstructure and thermo-mechanical properties of bamboo fibers.** Materials, Basel, 2015.

ZHAO, Z; COURARD, L; GROSLAMBERT, S; JEHIN, T; LÉONARD, A; XIAO, J. **Use of recycled concrete aggregates from precast block for the production of new building blocks: An industrial scale study.** Resources, Conservation and Recycling, v. 157, p. 104786, 2020.