

Resíduos de construção e demolição: uma revisão dos usos e aplicabilidades em estradas e rodovias (2015 – 2020)

Construction and demolition waste: a review of uses and applicability on roads and highways (2015 – 2020)

Residuos de construcción y demolición: revisión de usos y aplicabilidad en carreteras y autopistas (2015 - 2020)

Recebido: 24/07/2021 | Revisado: 30/07/2021 | Aceito: 06/08/2021 | Publicado: 10/08/2021

Estela Violin de Melo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7743-7855>
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Brasil
E-mail: estela.violin@unesp.br

Mario Mollo Neto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8341-4190>
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Brasil
E-mail: mario.mollo@unesp.br

Cristiane Hengler Corrêa Bernardo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9957-7437>
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Brasil
E-mail: cristiane.bernardo@unesp.br

Roberto Bernardo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3140-9138>
Faculdade da Alta Paulista, Brasil
E-mail: roberto.bernardo@fadap.br

Resumo

A compreensão sobre o estado da arte em relação a aplicação de resíduos de construção e demolição (RCD) objetiva verificar o conhecimento já produzido sobre o assunto. A temática tem ganhado importância dada sua grande representatividade entre os resíduos sólidos urbanos (RSU), contribuindo para poluição do meio ambiente, ao passo que se aproximam de 50% da constituição de todo RSU em grandes cidades brasileiras e também podem chegar a este valor em cidades de todo o mundo. Desse modo, é indispensável conhecer os diversos métodos existentes de utilização dos RCD a fim de beneficiar o meio ambiente, bem como a economia e a sociedade - os três pilares do desenvolvimento sustentável. Para tanto, foi desenvolvida uma revisão sistemática de literatura (RSL) em duas bases de dados, *Web of Science* e *Science Direct*. Delimitou como período de publicação e tipos de documentos, os artigos publicados entre os anos de 2015 e 2020. Como resultado, obteve-se cinco diferentes tipos de assuntos abordando o RCD, iniciando com um panorama geral dos Resíduos de Construção e Demolição até as possibilidades de reuso para os variados tipos de RCD produzidos nas cidades mundiais.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição; Desenvolvimento sustentável; Base e sub-base de estradas.

Abstract

The understanding of the state of the art in relation to the application of construction and demolition waste (CDW) is intended to deepen the knowledge on the subject, which has gained importance given its great representation among urban solid waste (USW), contributing to environmental pollution, while approaching 50% of the constitution of all MSW in large Brazilian cities and can also reach this value in world cities. Thus, it is essential to know the various existing methods of using CDW in order to benefit the environment, as well as the economy and society, which are the three pillars of sustainable development. Thus, a systematic literature review (SLR) was developed in two databases, *Web of Science* and *Science Direct*, where articles were extracted between the years 2015 and 2020, with key words listed according to the theme. Resulting in 5 different types of subjects addressing CDW, starting with an overview of Construction and Demolition Waste to reuse possibilities for the various types of CDW produced in cities worldwide.

Keywords: Construction and demolition waste; Sustainable development; Road base and sub-base.

Resumen

El conocimiento del estado del arte en relación a la aplicación de residuos de construcción y demolición (RCD) tiene como objetivo profundizar el conocimiento sobre el tema, que ha cobrado importancia dada su gran representación entre los residuos sólidos urbanos (RSU), contribuyendo para la y luego acercándose al 50% de la constitución de

todos los RSU en las grandes ciudades brasileñas y también se capaz de alcanzar este valor en las ciudades del mundo. Por eso, es fundamental conocer los distintos métodos existentes de utilización de los RCD para beneficiar al medio ambiente, así como a la economía y la sociedad, que son los tres pilares del desarrollo sostenible. Así, se desarrolló una revisión sistemática de la literatura (RSL) en dos bases de datos, Web of Science y Science Direct, donde se extrajeron artículos entre los años 2015 y 2020, con palabras clave enumeradas según la temática. Teniendo como resultado 5 tipos diferentes de temas que están relacionados a los RCD, comenzando con una descripción general de los desechos de construcción y demolición para reutilizar las posibilidades de los vairo tipos de RCD producidos em las ciudades de todo el mundo.

Palabras clave: Residuos de construcción y demolición; Desarrollo sustentable; Base y subbase de carreteras.

1. Introdução

A indústria da construção civil é destaque na composição do Produto Interno Bruto brasileiro (PIB), constituindo um complexo setor que sofre rapidamente as oscilações econômicas, devido a abrangência do setor, e também por atingir diretamente a empregabilidade de outros setores. No entanto, é responsável pela geração de grande parcela dos Resíduos Sólidos Urbanos, do consumo de energia e de matéria-prima para produção de seus insumos para a Indústria da Construção Civil (Souza et al., 2015; Del Rey et al., 2016). Em países desenvolvidos, o Resíduo de Construção e Demolição (RCD) é responsável por aproximadamente 40% do gasto energético, em que os RCD estão relacionados a degradação do meio ambiente desde sua produção, transporte, consumo, desmanche e posterior descarte (Del Rey et al., 2016).

A construção civil no Brasil é responsável por um alto índice de geração de resíduos sólidos urbanos, sendo ela, responsável por mais de 50% do resíduo sólido de importantes cidades do estado de São Paulo (Pinto & González, 2005) e de acordo com Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Sinduscon, 2012), em sua maioria é proveniente de demolições, pequenas obras e reformas. Ao observar a má gestão dos RCD na maioria das cidades brasileiras, vê-se a necessidade inquestionável em dar um destino certo para esses rejeitos, de modo a beneficiar a sociedade e o meio ambiente, com medidas eficazes que coloquem fim a este problema, mesmo que complexo.

Esse grande volume é muitas vezes descartado em aterros ou em lixões clandestinos, em grande parte localizados em zonas rurais. O descarte incorreto gera muitos males ao meio ambiente e à sociedade, poluindo camadas de solos, vias públicas, ou mesmo, favorecendo esses espaços como abrigo e sobrevivência de animais peçonhentos e vetores, colocando em risco a saúde pública (Karpinsk et al., 2009).

Todas essas dificuldades são inerentes a maioria dos países em desenvolvimento que não possuem uma política de reciclagem e destinação dos resíduos sólidos eficiente, fator que muitas vezes é agravado pelo aumento diário da população (Esfahani et al., 2020) e esses países em sua maioria estão preocupados com questões quantitativas ao invés de qualitativas, prejudicando o meio ambiente e toda população envolvida.

Alguns países são destaque na recuperação e reutilização dos RCD, enquanto outros, possuem grande produção e baixo reaproveitamento, como é o caso de China, sendo a maior produtora de RCD, com produção anual de 2,360 milhões de toneladas e recuperação de apenas 5% do total, enquanto Reino Unido e Estados Unidos, recuperam mais que 70% dos seus resíduos de construção e demolição (Ruiz et al. 2020).

As Estradas de Baixo Volume de Tráfego (EBVT), são, em sua maioria, construídas nas zonas rurais, e são vias de grande importância para economias locais, principalmente nos países em desenvolvimento (Sant'Ana, 2009).

Essas vias são responsáveis no transporte e saída de matéria-prima, produtos agrícolas e minerais, assim como o acesso das comunidades as às entidades, escoamento de mercadorias e de pessoas (Britto & Dawson, 2004).

Vale destacar que o Brasil é um país agrícola, onde parte significativa do Produto Interno Bruto (PIB) é representado pelo setor agrícola e, nesse ponto fica evidente a necessária preocupação e manutenção das EBVT.

Assim, é importante determinar técnicas e materiais alternativos para a manutenção destas EBVT de forma a reutilizar os RCD para redução de custos.

Visto a falta de importância que é dada aos RCD em muitos países e a existência da possibilidade de reuso, que garante benefício ao meio ambiente e a economia, fica comprovada a urgência em se implantar o reaproveitamento de resíduos de construção e demolição em escala global. Mas a incógnita que fica é, porque muitos países ainda estão aquém dessa prática responsável? A ideia é que esta RSL possa contribuir com as entidades de classe e a população, de modo a conhecer melhor as oportunidades para que ocorra um beneficiamento coletivo com o desenvolvimento sustentável, a partir da utilização de resíduos de construção e demolição.

Então, buscou-se como objetivo desta pesquisa, o aprofundamento do estudo sobre o assunto e a RSL foi elaborada a fim de conhecer o estado da arte sobre os Resíduos de Construção e Demolição, assim como verificar métodos viáveis de aplicação de RCD em cidade em desenvolvimento, de modo que todo processo de reaproveitamento seja possível de ser aplicado na maioria das cidades mundiais.

O enfoque dado as vias e rodovias parte da utilização básica dos RCD, o qual geralmente são usados de modo paliativo em aterros e estradas rurais no Brasil, onde em grande parte do processo de implantação não possui qualidade e métodos adequados, ocasionado um desperdício de tempo e mão de obra.

2. Metodologia

O método escolhido para a pesquisa, considera as recomendações de Pereira et al. (2018), baseado na busca de artigos científicos e outros documentos encontrados nas bases nacionais e internacionais de artigos científicos.

A técnica considera as recomendações de Ludke e Andre (2013), que apontam o observador, e destacam que o pesquisador deve aprender a saber separar os detalhes relevantes dos triviais e a fazer registros descritivos, aprendendo, a forma de criar anotações organizadas e utilizar métodos mais coesos para validar as observações.

Desta forma, seguindo estas considerações da pesquisa de Köche (2011), Lüdkee e Andre (2013) e Pereira et al. (2018) foi adotada a revisão bibliográfica como base metodológica para a realização deste estudo.

As bases de dados escolhidas para as buscas foram a *Science Direct* e *Web Of Science*, bases anteriormente estudadas e que poderiam fornecer os artigos de interesse dessa pesquisa. Foram realizadas várias tentativas antes de encontrar a *String* de Busca que pudesse ser usada para a pesquisa.

A primeira tentativa foi realizada em 31 de março de 2020, em que os resultados foram considerados insatisfatórios, pela baixa quantidade de documentos selecionados. Em um segundo momento, na data de 02 de abril de 2020, alguns termos e conjunções foram modificadas a fim de obter um resultado mais preciso entre as bases de dados. Porém, foi somente após a terceira modificação no uso das palavras-chave para a montagem do *String* de Busca é que se chegou a um resultado satisfatório.

O primeiro filtro realizado nas bases de dados foi restringir o período para os últimos cinco anos de publicações, e desse modo, obter os materiais mais recentes sobre o tema.

O filtro 2, foi utilizado para restringir a apenas publicações de artigos científicos.

O filtro 3, foi usado para as leituras do título e resumo dos artigos que permitiram separar os artigos de interesse da pesquisa, em que os artigos deviam apresentar métodos de análise e/ou utilização de RCD em estradas e rodovias.

O Filtro 4, com a leitura completa dos artigos, é que realmente foi possível selecionar com mais precisão os artigos que melhor se enquadravam dentro dos objetivos dessa pesquisa. Nessa fase, foi observada duplicidade de artigos nas duas bases. De um total de 40 artigos selecionados no Filtro 3, apenas 35 artigos foram utilizados para a elaboração de resultados e discussões da pesquisa.

Assim, o resultado final das buscas realizadas no dia 09 de abril de 2020 e seus respectivos filtros no Quadro 1:

Quadro 1 - Resultados das buscas nas bases de dados no dia 09 de abril de 2020.

| Base de dados | Science Direct | Web of Science |
|---|---|---|
| Data de Coleta | 09/04/2020 | 09/04/2020 |
| Busca Booleana (título, resumo e palavras chaves) | (("demolition waste" OR "construction waste" OR "construction and demolition waste" OR "CDW" OR "C&D") AND ("rural road" OR "road construction" OR "courses" OR "backfill")) | (("demolition waste" OR "construction waste" OR "construction and demolition waste" OR "CDW" OR "C&D") AND ("rural road" OR "road construction" OR "courses" OR "backfill")) |
| Resultado: | 156 | 135 |
| Filtro 1 | Entre 2015 e 2020 | Entre 2015 e 2020 |
| Resultado filtro 1 | 57 | 74 |
| Filtro 2 | Review articles (5) Research articles (45) | Article (60) Review(2) |
| Resultado filtro 2 | 50 | 62 |
| Filtro 3 | Leitura do título e resumo | Leitura do título e resumo |
| Resultado Filtro 3 | 18 | 22 |

Fonte: Autores.

3. Resultados e Discussão

Nessa sessão, são apresentados os resultados dos 35 os artigos selecionados na revisão sistemática de literatura, que abordaram sobre o reaproveitamento de resíduos de construção e demolição em estradas e rodovias.

Os temas mais encontrados em todo levantamento foram elencados em cinco frentes, que serão abordados no decorrer do artigo, são elas:

Substituição de Agregados Naturais por RCD em leitos e subleitos de estradas e rodovias; Avaliação de agregados de concreto reciclado (RCA) em misturas asfálticas; RCD em aplicações com grelhas geossintéticas; Processo de lixiviação dos RCD; Economia Circular para os RCD e Avaliação do Ciclo de Vida.

Assim como, tópicos futuros para utilização de resíduos recicláveis, que ainda precisam de mais aprofundamento e de maior levantamento de dados, para comprovar sua eficácia, conforme descrito nos artigos lidos.

3.1 Panorama sobre o reaproveitamento do RCD no mundo

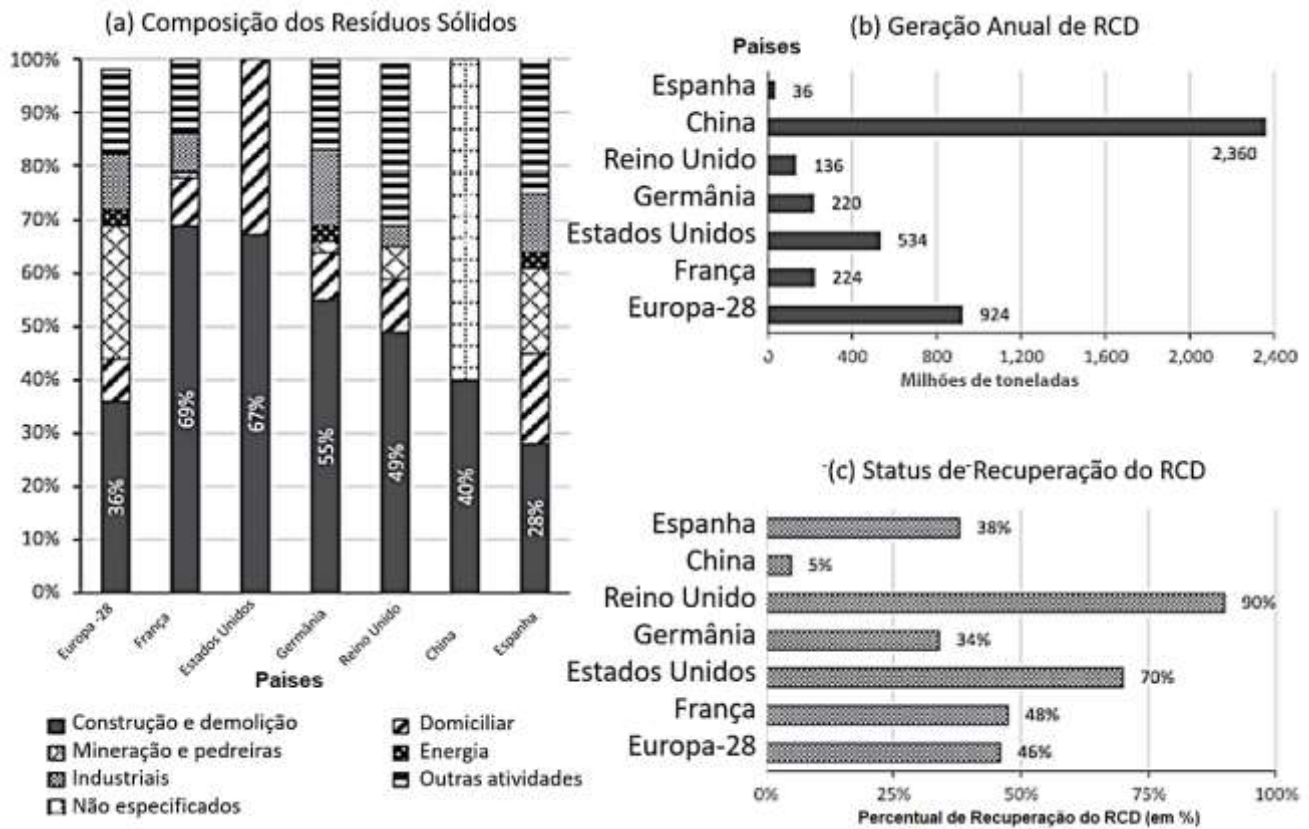
Em países mais desenvolvidos, é possível observar um grande avanço na reutilização e reciclagem, como é o caso do Reino Unido e Estados Unidos, que recuperam respectivamente 90% e 70% dos seus resíduos de construção e demolição (Ruiz et al., 2020).

Prática comum em países europeus, que fazem uso de sobras de materiais e resíduos de industriais da construção para construção de estradas, seja na superfície ou em camadas estruturais. (Vegas et al., 2008).

Essa preocupação muitas vezes está atrelada a geração demasiada de resíduos, como no caso dos países membros da União Europeia (UE) onde a quantidade de resíduos produzidos varia entre 25% e 30% de todos os resíduos gerados na UE (Poulikakos et al., 2017), vale lembrar que muitas vezes, cada país possui sua própria legislação em relação ao reaproveitamento de seus RCD.

Enquanto alguns países são destaques na recuperação e reutilização dos RCD, outros, mesmo com grande produção, ocorre um baixo reaproveitamento (Figura 1), como é o caso já citado anteriormente da China, sendo a maior produtora de RCD, com recuperação de apenas 5% do total.

Figura 1 - Comparação entre produção e recuperação de Resíduos de Construção e Demolição em alguns países.



Fonte: Adaptado de Ruiz et al. (2020).

O processo de recuperação de RCD geralmente ocorre a partir de algumas etapas (Figura 2), e incluem basicamente a remoção de impurezas, separação, trituração e triagem, sendo que em algumas etapas, é possível utilizar mão de obra humana, como nas etapas de separação e triagem.

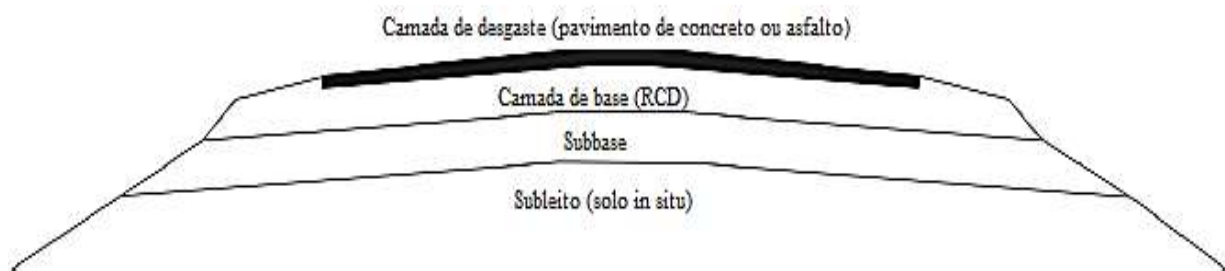
Figura 2 - Processo de recuperação de RCD.



Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2020b).

Pode ser visto que o processo de reciclagem não é algo tão simples, necessita de técnica e maquinário para sua adequada operação, com isso, o modo mais praticado e barato de utilização do RCD, é a aplicação em base e sub-base de estradas (Figura 3), visto a necessidade de um menor desempenho para o uso em camadas inferiores das estradas e rodovias, que são eficientes quando bem compactados (Zhang & Tan, 2020a).

Figura 3 – Esquema representativo das camadas de uma estrada pavimentada.



Fonte: Adaptado de Sanger et al. (2020).

3.2 Processo de lixiviação dos RCD

Um primeiro ponto que deve ser analisado para utilização dos RCD é a chance de existirem resíduos químicos nos mesmos, podendo contaminar o solo, a vegetação próxima e até mesmo os lençóis freáticos (Lidelöw et al., 2017). Por isso, vários autores realizaram estudos, tanto em campo quanto em laboratório, para aferir o grau de contaminação que pode ocorrer no meio ambiente e assim verificar a possibilidade de utilização do RCD de modo seguro em bases e sub-bases de estradas. Para essa análise quantitativa, os autores pesquisados utilizaram diferentes métodos de análises de lixiviação, tais como:

lixiviação com reator em lote, lixiviação de coluna, Método de Teste para Água e Sedimentos (ASTM D2709-16) e Lixiviação de Material Sólido, e desse modo obter resultados da lixiviação dos RCD aplicados em bases e sub-bases de estradas (Sanger et al., 2020).

Lidelöw et al. (2017, p.695) afirmam que para utilização de escória de cobre e concreto reciclado “a lixiviação dos elementos de interesse (Cr, Mo, Ni, Zn,) atingiu as concentrações máximas durante o segundo e quartos anos e diminuiu durante o período de observação, para níveis abaixo dos valores recomendados suecos”. Pode-se dizer que, leva um período entre dois à quatro anos, para que o material seja livre de contaminantes, dependendo a origem desse resíduo, mas que nesse caso, com um período de descanso, foi passível de destinação adequada. Porém, não deve ser ignorado o fato de a brita, um material natural comumente utilizado em vias e estradas, não é totalmente isento de contaminantes (Lidelöw et al., 2017).

De acordo com Puthussery et al. (2017), ao realizarem estudos em campo, afirmam que podem ser observadas significativas discrepâncias, entre medições de campo e de laboratório do pH do lixiviado do agregado de concreto reciclado (RCA), de modo que as medições laboratoriais, necessitem de melhorias e aprofundamentos, devido os resultados não serem iguais da pesquisa em campo, que demonstram a possibilidade de uso do RCA lixiviado, pois de acordo com Sanger et al. (2020), decorrido 2 anos, o material lixiviado tende a se aproximar do pH neutro.

Em suma, os estudos relatados salientaram, que mesmo com a presença de contaminantes nos RCD, a maioria dos casos estudados obtiveram níveis aceitáveis e propostas plausíveis para utilização dos mesmos como base e sub-base de estradas e rodovias.

3.3 Substituição de Agregados Naturais por RCD em leitos e subleitos de estradas e rodovias

Existe a classificação das vias, em Baixo Volume de Tráfego (EBVT) ou em Alto Volume de Tráfego, mas essa classificação depende de cada região e de cada país em que ela se encontra. As EBVT, em grande maioria, estão nas zonas rurais, são vias que tem grande valor para economias locais, principalmente no que tange aos países em desenvolvimento, em que suas EBVT são representadas por aproximadamente 95% de todas as vias (Sant’Ana, 2009), e elas possuem um tráfego médio anual inferior a 500 veículos.

Devido ao benefício decorrido do reaproveitamento do RCD para os recursos naturais, é indispensável a utilização dos solos de RCD em aplicações geotécnicas, como os resíduos de classe ‘A’, aqueles inertes, que podem ser usados em reforço de leito e subleito de estradas de baixo tráfego (Del Rey et al., 2016).

No entanto vale lembrar que existem barreiras para sua utilização, onde a principal delas se refere a distância entre processamento do RCD e o futuro local de utilização, que pode gerar altos custos de transporte, consumindo mais combustível pelos caminhões deslocarem os materiais, assim, anulando o superávit econômico obtido pela reciclagem. Portanto a distância percorrida pelo caminhão, não deve ultrapassar 20 km da usina de beneficiamento do RCD (Sanger et al., 2020).

Outra característica que deve ser destacada, em relação a utilização de RCD em camadas de base e sub-base, é a necessidade de avaliação das propriedades físicas, assim como citado anteriormente, em que são comumente realizados alguns testes, tais como: Compressão Uniaxial (Uniaxial Compression - UCS), a rigidez (compactação), a Taxa de Rolamento Califórnia (California Bearing Rate - CBR), Limites de Attenberg, Gradação, Abrasão de Los Angeles (Los Angeles Abrasion - LAA), que de acordo com os levantamentos realizados a partir da revisão bibliográfica sistemática, são normas atendidas na maioria casos, equiparando os RCD aos agregados naturais, mas que devem ser levados em consideração a origem e composição desses resíduos (Sangiorgi et al., 2015; Zhang & Tan, 2020a ; Esfahani et al., 2020; Youyun Li et al., 2017; Moghadam et al., 2018; Mehrjardi et al., 2020; Tavira et al., 2018a).

Vale lembrar que, para os RCD estarem adequados ao uso, necessitam ser separados de materiais que diminuem seu potencial, permanecendo apenas aqueles adequados a reciclagem e reutilização, em que os mais comuns são, tijolo, concreto e

cerâmica, que devem ter um tamanho que permita a passagem por uma peneira de 25mm de diâmetro para compor as estradas em diferentes camadas, sendo 25% no curso base e 45% na sub-base (Esfahani et al., 2020).

Para que algumas vias tenham uma resposta satisfatória aos níveis de exigências a resistência e a estabilidade do uso do RCD ou RA ligado, muitas vezes é preciso fazer a estabilização do resíduo com a adição de cimento, quando se tratar de uma via pavimentada, método comumente realizado, mas que existe a possibilidade medidas mais sustentáveis para resolver essa questão.

Com o intuito de que, ao utilizar RCD para que não haja a necessidade do uso de cimento portland para estabilização da mistura, considerando a pegada do carbono (Moghadam et al., 2018). Tem-se a alternativa do uso da Cal viva (CaO) e Cal Hidratada (Ca(OH)₂), pois este é um dos modos mais antigos e convencionais de estabilizar os componentes de pavimentação, dada sua eficiência na estabilização do leito, melhora na rigidez, na resistência a absorção e índice plástico (Moghadam et al., 2018).

3.4 Avaliação de agregados de concreto reciclado (RCA) em misturas asfálticas

Os agregados reciclados apresentaram propriedades físicas e mecânicas semelhantes às obtidas para os agregados naturais (brita), é observando que, geralmente o concreto e a alvenaria são os materiais de maior composição nos RCD (Quadro 2), eles são estudados em larga escala para reutilização em vias, substituindo os agregados naturais. (Puthussery et al., 2017; Saberian et al., 2019; Arisha et al., 2020; Mohammadinia et al., 2015; Jitsangiam et al., 2020; Tahmoorian & Samali, 2018).

Quadro 2 – Composição dos resíduos gerados em um local de demolição.

| Tipo | Composição (% por peso) |
|---|--------------------------------|
| Concreto e Alvenaria | 31,3 |
| Solo | 21,6 |
| Tijolos | 20,1 |
| Azulejos | 15,6 |
| Pisos e Mosaico | 10,4 |
| Madeira | 0,50 |
| Placa de Gesso | 0,40 |
| Aço | 0,10 |
| Diversos (folhas de plástico, peças de vidro, tubos, canos velhos enferrujados) | <0,10 |
| Total | 100 |

Fonte: Puthussery et al. (2017).

A produção do concreto, material mais abundante na formação do RCD, é responsável em devolver uma grande quantidade de CO₂ ao planeta, algo que chama atenção, pois também é confirmado que a produção de RCD é alta na maioria dos países, e se somada com o gasto de matéria prima e o gasto energético para sua produção, o prejuízo econômico e ambiental é muito maior que o estimado.

Saberian et al. (2019) em seu artigo experimental, analisam o comportamento da utilização do RCA juntamente com borracha grossa e também com borracha fina, na porcentagem RCA - 50% borracha fina ou RCA- 50% borracha grossa, e também o uso de apenas RCA para base e sub-base de estradas. O qual chega ao nível aceitável devido seu comportamento perante as regras de deformação permanente, porém não sendo aceitável o uso de borracha sem o acompanhamento de RCA na

mistura, que desencadearia a deformação em terceiro estágio, ou seja, experimentalmente a deformação permanente da amostra, levando a um colapso incremental.

Já nos estudos de Arisha et al. (2020), foi utilizado RCA juntamente com Alvenaria de Argila Reciclada, para analisar a construção de estradas no Egito a partir de materiais granulares não ligados. No estudo, o RCA obteve um melhor desempenho no pavimento em termos de sulcos e trincas por fadiga quando em comparação com o agregado virgem comumente utilizado no Egito, além do mais, a resistência ao cisalhamento não foi afetada pela presença de Alvenaria de Argila Reciclada e todas amostras atenderam o mínimo exigido de módulo de resiliência, que varia entre 150MPa e 300MPa.

Jitsangiam et al. (2020, p.08) apresentaram o estudo de uso de dois tipos de RCA. Uma amostra RCA de alto grau, de origem da demolição de superestruturas, como pontes e edifícios, e o outro tipo de RCA, de origem de bases de estradas, que conta com a presença de 5% de tijolo e entulho limpo. Para essa análise, foi identificado que “os resultados do teste para o RCA de bases de estradas, sugerem que a mistura de materiais não ativos, como tijolos e entulho limpo no RCA, pode reduzir os efeitos negativos subsequentes da autocimentação”, uma vez que os dois tipos de RCA, cumprem quase de modo idêntico as normas de gradação, demonstrando a aplicabilidade durante toda vida útil em estradas, de modo mais eficaz que a utilização de RCA de alto grau, o qual os autores sugerem maiores investigações laboratoriais.

3.5 Economia Circular para os RCD e Avaliação do Ciclo de Vida

De acordo com Ruiz et al. (2020, p. 06) a economia circular tem sido aplicada aos resíduos de construção e demolição, com intuito de sua efetiva reutilização, o correto descarte, separação efetiva dos RCD e sua reciclagem, assim estruturando as fases do ciclo de vida: “pré-construção; construção e renovação de edifícios; coleta e distribuição; fim da vida útil; material de recuperação e produção”.

É necessária a atenção em todas as fases do ciclo de vida dos edifícios, para que haja uma reciclagem mais eficiente e completa, porém, como afirmam Ruiz et al. (2020), na maioria das vezes o foco só é dado em algumas dessas etapas, enquanto outras são deixadas de lado, demonstrando que a economia circular aplicada aos RCD ainda deverá ser objeto de muitos estudos para o alcance efetivo. Nesse sentido, o autor busca identificar uma metodologia adequada para analisar a cadeia de suprimentos dinâmica, para facilitar o reuso de entulhos de construção.

Para Gan & Cheng (2015), devido ao inadequado compartilhamento de informações e coordenação entre as empresas, algumas vezes a reutilização dos entulhos entre os canteiros de obras pode não ser econômico e eficiente, chamando muita atenção para estudos futuros, como apontado também por Borghi et al. (2018), que estudaram a avaliação do ciclo de vida na região da Lombardia, tendo como enfoque a diferenciação entre usinas de reciclagem estacionárias e usinas móveis, chegando à conclusão que as usinas estacionárias, movidas por eletricidade, tem menor impacto ambiental por seu funcionamento ser a partir da energia limpa, enquanto comparadas as usinas móveis, que são movidas a partir do diesel, que geram mais impacto ao meio ambiente.

Mas outros aspectos também devem ser levados em consideração para que se melhore o aproveitamento do RCD. Tomando como exemplo a melhor aplicação de impostos sobre insumos novos na área da construção, essa alternativa, pode fazer com que os resíduos tenham um mercado mais competitivo, assim como a melhoria da qualidade dos RCD a partir de práticas mais rigorosas de demolição, coleta seletiva e triagem adequada (Borghi et al., 2018; Galán et al., 2019; Silva et al., 2019). Mas, a maior interferência para se obter uma maior rentabilidade no reaproveitamento do RCD, pode ser atribuído ao transporte e consumo de diesel, que deve ser gerenciado por meio de locais estratégicos para instalação das usinas, diminuindo o percurso entre RCD demolido, RCD reciclado e RCD reutilizado (Borghi et al., 2018; Hasan et al., 2020; Rosado et al., 2017).

3.6 RCD em aplicações com grelhas geossintéticas

A utilização de resíduos de construção e demolição reciclado (RCD-R), juntamente com grelhas geossintéticas, que são utilizadas para contenção de solos, é uma aplicabilidade diferenciada que foi encontrada a partir da leitura dos artigos, visto não ser uma prática comum para complementar o uso de RCD em as vias e rodovias. Os autores estudaram as propriedades de cisalhamento em mantas geossintéticas utilizadas para o preenchimento de RCD, garantindo que essa manta, por possuir uma maior resistência de sustentação, permite o uso de um material de enchimento de mais baixa qualidade, comprovando sua estabilidade a partir de testes de cisalhamento direto (Vieira & Pereira, 2015; Vieira & Pereira, 2016; Mehrjardi et al., 2020)

Nesse mesmo sentido, Fleury et al. (2019) estudaram os efeitos causados nas geogrelhas durante sua instalação *in loco*, confirmando a relação de degradação existente da geogrelha com a compressão que é realizada durante a aplicação do produto em sítio. Portanto, chamando atenção ao fato de que, o modo como ela é instalada interfere em sua vida útil.

3.7 Diferentes aplicabilidades de resíduos de construção e demolição reciclado: tópicos futuros de investigação

Uma interessante pesquisa experimental, no uso de diferentes Resíduos de Triagem e Agregados Mistos, foi realizada por Tavira et al. (2018b), em que os resíduos que não atenderam aos requisitos físico-químicos para uso em rodovias, são utilizados com uma nova finalidade, que é a aplicação em camadas estruturais de ciclovias, o qual os requisitos de qualidade do RCD podem ser inferiores aos utilizados em rodovias e estradas, assim, tornando-se uma ótima opção para aplicação em ciclovias.

E com uma gama mais abrangente de diferentes materiais recicláveis para uso em rodovias, o artigo de Poulikakos et al. (2017) faz uma revisão sobre propostas conhecidas, como o concreto e o pavimento asfáltico recuperado, e também informa possibilidades de usos para materiais menos convencionais: vidro, plásticos, PET, Resíduo Sólido de Incineração Municipal (MSWI), escória de aço, têxteis e madeira.

Por fim, vale destacar o artigo de Silva et al., (2019), traz aplicações reais que foram bem-sucedidas em diversas finalidades para os resíduos de construção e demolição, mais especificamente, com uso do agregado reciclado (Quadro 3). Os autores dividem em quatro categorias: camadas não ligadas, camadas ligadas com betume, pavimentos rígidos e construções:

Quadro 3 – Diversidade de aplicações de Agregado Reciclado.

| | |
|--------------------------------|---|
| CAMADAS NÃO LIGADAS | Estruturas de suporte de carga da autoestrada de Lahti, Finlândia |
| | Camadas de sub-base no Aeroporto Internacional de Lisboa, Portugal. |
| | Reintegração de vala utilitária, Cingapura |
| | Quebra-mar com entulho, Holanda |
| | Newport, Estrada de Ligação, Reino Unido |
| | Percurso básico de 140 m de uma estrada de teste, Cingapura |
| | Sub-base de seção de teste de 200 m na rodovia C-25, Espanha |
| | Channel Tunnel Rail Link, Reino Unido |
| | Estradas de baixo volume para áreas rurais, Xangai, China. |
| CAMADAS LIGADAS COM BETUME | Projeto piloto de recapeamento A316, Reino Unido |
| | Reciclagem fria in situ de camadas ligadas e não ligadas da estrada principal A9, Reino Unido |
| | Melhoria da junção 13 A34 Chieveley / M4, Reino Unido |
| | Centro de reciclagem de Okehampton e estrada de acesso, Reino Unido |
| CONSTRUÇÃO DE PAVIMENTO RÍGIDO | Centro de Tecnologia de Pavimentação e Transporte da Universidade de Waterloo, Canadá |
| | Pavimento rígido em St. Louis, Missouri, EUA. |
| | Seção Interestado-10 em Houston, Texas, EUA |
| | Autoestrada de concreto austríaca entre Salzburg-Viena A1, Áustria |
| | Parque de biotecnologia de Dundee, Reino Unido |
| | Ciclovias Rabanales, Córdoba, Espanha |
| APLICAÇÃO EM CONSTRUÇÕES | Parque Hong Kong Wetland, Hong Kong |
| | Elementos decorativos de concreto da Bundesgartenschau |
| | “ Waldspirale ” projeto de construção, Alemanha |

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2019).

Portanto, existem diferentes aplicações e métodos avaliativos para se reutilizar os variados tipos de resíduos de construção e demolição de maneira limpa e não prejudicial ao meio ambiente e ao ser humano. Cabe a cada país/estado/cidade analisar, o melhor método de reaproveitamento viável para sua demanda. Dos artigos encontrados e estudados nessa RSL, além de dividir em 5 tipos, também podemos dividi-los em três níveis de relevância. Primeiro, aqueles de maior compatibilidade com o tema pesquisado, que foram citados ao longo do artigo ou se tratando especificamente de uso em vias rurais. Um segundo grupo, formado por artigos que também teve participação significativa na elaboração da RSL, quando seu conteúdo correspondia a assuntos já abordados aqui por outro autor. E por último, um terceiro grupo, que não teve citação no artigo, mas que foram importantes para criar uma base e ampliar os conhecimentos pré-existentes dos integrantes da pesquisa.

4. Conclusão

A presente RSL, contribuiu com a pesquisa, ao mostrar a possibilidade de reuso para os mais variados tipos de RCD produzidos nas cidades em todo o mundo, com diferentes níveis de desenvolvimento e técnicas de reciclagem. A pesquisa também comprovou a aplicabilidade de Resíduos de Construção e Demolição em vias rurais/locais de baixo tráfego, que são de extrema importância para a o transporte de produtos e pessoas, podendo assim contribuir de alguma forma com o agronegócio e o desenvolvimento sustentável.

Além do mais, a pesquisa trouxe novos horizontes sobre os riscos e benefícios do reaproveitamento do RCD, como possíveis contaminantes que estão presentes nos resíduos, assim como proporcionou o aprendizado sobre locais possíveis de utilizar os RCD para preservação do meio ambiente, ou seja, em novas vias de tráfego, edificações ou passeios públicos de pedestres, pois, os estudos relatados salientaram, que mesmo com a presença de contaminantes nos RCD, a maioria dos casos estudados obtiveram níveis aceitáveis e propostas plausíveis para utilização dos mesmos como base e sub-base de estradas e rodovias. Observou-se dos resultados que existem barreiras para a utilização dos RCD, e, a principal delas se refere a distância

entre processamento do RCD e o futuro local de utilização, relacionados diretamente a altos custos de transporte, consumindo mais combustível pelos caminhões deslocarem os materiais, assim, anulando o superávit econômico obtido pela reciclagem. Recomendando que a distância percorrida pelo caminhão, não deve ultrapassar 20 km da usina de beneficiamento do RCD até o local de aplicação.

Concluiu-se que há a importante questão sobre a preocupação para que se melhore o aproveitamento do RCD. Considerando que a melhor aplicação de impostos sobre insumos novos na área da construção, como alternativa, pode fazer com que os resíduos tenham maior competitividade, e a melhoria da qualidade dos RCD a partir de práticas mais rigorosas de demolição, coleta seletiva e triagem adequada.

Uma aplicabilidade diferenciada que foi encontrada a partir da pesquisa, remete ao fato de que, as propriedades de cisalhamento em mantas geossintéticas utilizadas para o preenchimento de RCD, garantindo que essa manta, por possuir uma maior resistência de sustentação, permite o uso de um material de enchimento de mais baixa qualidade, comprovando sua estabilidade a partir de testes de cisalhamento direto, uma importante contribuição.

A pesquisa, complementando o atendimento aos objetivos, traz a luz aplicações reais que foram bem-sucedidas em diversas finalidades para os resíduos de construção e demolição, mais especificamente, com uso do agregado reciclado em quatro categorias sendo: camadas não ligadas, camadas ligadas com betume, pavimentos rígidos e construções. A pesquisa permitiu, ainda, verificar métodos viáveis de aplicação de RCD em cidades em desenvolvimento, de modo que todo processo de reaproveitamento seja possível de ser aplicado na maioria das cidades mundiais e mostrou são usados de modo paliativo em aterros e estradas rurais no Brasil, onde em grande parte do processo de implantação não possui qualidade e métodos adequados, ocasionado um desperdício de tempo e mão de obra.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq Processo nº 313339/2019-8, pelo suporte à pesquisa.

Referências

- Arisha, A. M., Gabr, A. R., El-Badawy, S. M., & Shwally, S. A. (2018). Performance Evaluation of Construction and Demolition Waste Materials for Pavement Construction in Egypt. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 30(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002127)
- Borghi, G., Pantini, S., & Rigamonti, L. (2018). Life cycle assessment of non-hazardous Construction and Demolition Waste (CDW) management in Lombardy Region (Italy). *Journal of Cleaner Production*, 184, 815–825. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.287>
- Britto, L.A.T., & Dawson, A.R. (2007). Método de dimensionamento para pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego., Rio de Janeiro: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET.
- Del Rey, I., Ayuso, J., Galvin, A. P., Jimenez, J. R., & Barbudo, A. (2016). Feasibility of Using Unbound Mixed Recycled Aggregates from CDW over Expansive Clay Subgrade in Unpaved Rural Roads. *Materials*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/ma9110931>
- Fleury, M. P., Santos, E. C. G., da Silva, J. L., & Palmeira, E. M. (2019). Geogrid installation damage caused by recycled construction and demolition waste. *Geosynthetics International*, 26(6), 641–656. <https://doi.org/10.1680/jgein.19.00050>
- Galán, B., Viguri, J. R., Cifrian, E., Dosal, E., & Andres, A. (2019). Influence of input streams on the construction and demolition waste (CDW) recycling performance of basic and advanced treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117523. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.354>
- Gan, V. J. L., & Cheng, J. C. P. (2015). Formulation and analysis of dynamic supply chain of backfill in construction waste management using agent-based modeling. *Advanced Engineering Informatics*, 29(4), 878–888. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.01.004>
- Hasan, U., Whyte, A., & Jassmi, H. A. (2020). Life cycle assessment of roadworks in United Arab Emirates: Recycled construction waste, reclaimed asphalt pavement, warm-mix asphalt and blast furnace slag use against traditional approach. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120531. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120531>
- Jitsangiam, P., Boonserm, K., Phenrat, T., Chummuneerat, S., Chindaprasirt, P., & Nikraz, H. (2015). Recycled Concrete Aggregates in Roadways: Laboratory Examination of Self-Cementing Characteristics. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 27(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001245](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001245)
- Köche, J. C. (2011). Fundamentos de metodologia científica: teoria da ciência e iniciação à pesquisa. Vozes.

- Li, Y., Zhou, H., Su, L., Hou, H., & Dang, L. (2017). Investigation into the Application of Construction and Demolition Waste in Urban Roads. *Advances In Materials Science And Engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9510212>
- Lidelöw, S., Mácsik, J., Carabante, I., & Kumpiene, J. (2017). Leaching behaviour of copper slag, construction and demolition waste and crushed rock used in a full-scale road construction. *Journal of Environmental Management*, 204, 695–703. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.032>
- Lüdke, M., & Andre, M. E. D. A. (2013). *Pesquisas em educação: uma abordagem Qualitativa*. E.P.U.
- Mehrdardi, G. T., Azizi, A., Haji-Azizi, A., & Asdollahfardi, G. (2020). Evaluating and improving the construction and demolition waste technical properties to use in road construction. *Transportation Geotechnics*, 23, 100349. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100349>
- Moghadam, A. S., & Hadiani, N. (2018). Stabilizing the Excavation Materials to be used in Fill Layers. *Civil Engineering Journal-Tehran*, 4(5), 1165–1177. <https://doi.org/10.28991/cej-0309165>
- Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Sanjayan, J., Disfani, M. M., Bo, M. W., & Darmawan, S. (2015). Laboratory Evaluation of the Use of Cement-Treated Construction and Demolition Materials in Pavement Base and Subbase Applications. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 27(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001148](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001148)
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). Metodologia da pesquisa científica. UFSM.
- Pinto, T. P., & González, J. L. R. (2005.) Manejo e gestão dos resíduos de construção. CAIXA.
- Poulikakos, L. D., Papadaskalopoulou, C., Hofko, B., Gschösser, F., Falchetto, A. C., Bueno, M., Arraigada, M., Sousa, J., Ruiz, R., Petit, C., Loizidou, M., & Partl, M. N. (2017). Harvesting the unexplored potential of European waste materials for road construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 32–44. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.008>
- Puthussery, J. V., Kumar, R., & Garg, A. (2017). Evaluation of recycled concrete aggregates for their suitability in construction activities: An experimental study. *Waste Management*, 60, 270–276. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.008>
- Rosado, L. P., Vitale, P., Penteado, C. S. G., & Arena, U. (2017). Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 151, 634–642. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.068>
- Ruiz, L. A. L., Ramon, X. R., & Domingo, S. G. (2020) The circular economy in the construction and demolition waste sector – A review and an integrative model approach. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119-238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119238>
- Saberian, M., Li, J., Nguyen, B., & Wang, G. (2018). Permanent deformation behaviour of pavement base and subbase containing recycle concrete aggregate, coarse and fine crumb rubber. *Construction And Building Materials*, 178, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.107>
- Sanger, M., Natarajan, B. M., Wang, B., Edil, T., & Ginder-Vogel, M. (2020). Recycled concrete aggregate in base course applications: Review of field and laboratory investigations of leachate pH. *Journal of Hazardous Materials*, 385, 121562. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121562>
- Sangiorgi, C., Lantieri, C., & Dondi, G. (2015). Construction and demolition waste recycling: An application for road construction. *International Journal Of Pavement Engineering*, 16(6), 530–537. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.943134>
- Sant'ana, W. Canales. (2009). Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o Estado do Maranhão. 2009. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. <https://doi:10.11606/T.3.2009.tde-11082009-120234>
- Silva, R. V., Brito, J. de, & Dhir, R. K. (2019). Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117629. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117629>
- SindusCon-SP. Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo. (2012). Resíduos da Construção Civil e o Estado de São Paulo. São Paulo: CETESB.
- Souza, B.A., Oliveira, C. A. C., Santana, J. C. O., Viana Neto, L. A. C., & Santos, D.G. (2015). Análise dos indicadores PIB nacional e PIB da indústria da construção civil. *Revista de Desenvolvimento Econômico*, Salvador, 17(31), 140-150. <http://dx.doi.org/10.21452/rde.v17i31.3480>.
- Tahmoorian, F., & Samali, B. (2018). Laboratory investigations on the utilization of RCA in asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(6), 627–638. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2018.05.002>
- Tavira, J., Jiménez, J. R., Ayuso, J., Sierra, M. J., & Ledesma, E. F. (2018a). Functional and structural parameters of a paved road section constructed with mixed recycled aggregates from non-selected construction and demolition waste with excavation soil. *Construction and Building Materials*, 164, 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.195>
- Tavira, J., Ramon Jimenez, J., Ayuso, J., Lopez-Uceda, A., & Ledesma, E. F. (2018b). Recycling screening waste and recycled mixed aggregates from construction and demolition waste in paved bike lanes. *Journal Of Cleaner Production*, 190, 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.128>
- Vieira, C. S., & Pereira, P. M. (2016). Interface shear properties of geosynthetics and construction and demolition waste from large-scale direct shear tests. *Geosynthetics International*, 23(1), 62–70. <https://doi.org/10.1680/jgein.15.00030>
- Vieira, C. S., & Pereira, P. M. (2015). Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review. *Resources Conservation And Recycling*, 103, 192–204. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.023>
- Zhang, Y., & Tan, W. (2020a). Demolition waste recycling in China: New evidence from a demolition project for highway development. *Waste Management & Research*, 38(6), 696–702. <https://doi.org/10.1177/0734242X20904440>
- Zhang, J. Ding, L. Li, F., & Peng, J. (2020b). Recycled aggregates from construction and demolition wastes as alternative filling materials for highway subgrades in China. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120-223. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120223>