

ESTUDO DA RESISTÊNCIA DO SOLO COMPACTADO CONTENDO AGREGADOS PROVENIENTES DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL NA CIDADE DE SINOP-MT

THIAGO MANTOVANI TONIAL¹
MARCOS XAVIER BEZERRA²

RESUMO: O expressivo aumento de obras na construção civil, traz como consequência, maior produção de resíduos da construção civil e demolição - RCD, que são responsáveis por inúmeros problemas ambientais, principalmente, devido à falta de políticas públicas para direcionar sua gestão e destinação correta. Em alguns casos, esse tipo de resíduo tem destinação em obras que envolvam o solo, como a pavimentação e misturas de solos para obras de edificação, sendo aproveitado dentro do próprio ambiente do qual foi gerado. O presente estudo realizado no laboratório de geotecnia, do Centro Universitário UNIFASIPE, na cidade de Sinop-MT, com amostras de solo contendo proporções variadas de RCD para ensaios de compactação e índice de suporte Califórnia, busca analisar o possível aumento de resistência do solo quando misturados RCD's, aliando a sustentabilidade nessa solução proposta. Os referidos ensaios mostraram que as amostras de solo úmido contendo 25% de RCD tiveram maior grau de compactação dentre as demais e, que para um solo encharcado, essa compactação tornou-se melhor ao utilizar 50% de RCD. Além disso, as amostras de solo com 50% de RCD obtiveram valores de resistência à penetração consideráveis para uso em obras, desde que, atendam critérios de projeto definidos pelo profissional de geotecnia, após a análise de resultados. Logo, é possível afirmar que o objetivo proposto é validado através do estudo, possibilitando o uso de RCD, para melhorar a resistência em solos a serem utilizados na construção civil, sendo indicado maiores estudos aplicados em campo, para reforçar os resultados obtidos em laboratório.

Palavras-chave: Resistência de Solos. Resíduos Sólidos. Sustentabilidade.

STUDY OF THE STRENGTH OF COMPACTED SOIL CONTAINING AGGREGATES FROM SOLID WASTE FROM CIVIL CONSTRUCTION IN THE CITY OF SINOP-MT

ABSTRACT: The most expressive increase in civil construction works, as a consequence, greater production of construction and demolition waste - RCD, which are responsible for yet another major environmental problem, mainly due to the lack of public policies for the correct direction. In cases, this type of soil destination is destined for works involving the soil, such as paving and mixtures for building works, being used within the very environment from which it

¹ Acadêmico de Graduação, Curso de Engenharia Civil, UNIFASIPE Centro Universitário, R. Carine, 11, Res. Florença, Sinop - MT. CEP: 78550-000. Endereço eletrônico: marcosxbezerra@outlook.com

² Professor de Engenharia Civil, Curso de Engenharia Civil, UNIFASIPE Centro Universitário, R. Carine, 11, Res. Florença, Sinop - MT. CEP: 78550-000. Endereço eletrônico: thiago_tonial@hotmail.com

was generated. The present study carried out in the geotechnical laboratory, UNIFASIPE, city in the support of Sinop-MT, with a sample of soil experiments ranging from RCD to compaction tests and California resistance index, seeks to analyze the increase in soil resistance when mixed RCD's , combining sustainability in this proposed solution. Those containing all trials should be considered to be over 25% compacted RCD soil that has had a degree of individual choice of RCD as being overused soil and thus one of them is better contained when using RCD. In addition, as a soil sample with 50% RCD, they obtained considerable penetration resistance values for use in works, since I attended after a project defined by the geotechnical professional, the analysis of results. Therefore, it is affirmed that the proposed objective is validated by the study, allowing the possible use of RCD, to improve the resistance in soils to be used in civil construction, being indicated larger applied in the field, reinforced for studies of results obtained in the laboratory.

Keywords: Soil Resistance. Solid Waste. Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Nota-se observado um aumento no descarte de resíduos sólidos da construção civil (RSCC's), abrangendo materiais como tijolos cerâmicos, concreto em geral, metais, madeiras, vidros, tubulações e etc., geralmente de forma descontrolada e em ambientes inadequados para tal, como por exemplo, terrenos baldios, beira de estradas, áreas de proteção e preservação permanente, córregos e drenagens, entre outros. O grande volume descartado resulta em gastos exacerbados por parte dos órgãos públicos, como as prefeituras, que devem incluir em seus orçamentos um valor considerável de recursos direcionados para os serviços de coleta, tratamento e disposição final, os quais, devem ser especificados no plano de governo (PGRCC), (KARPINSK, 2009).

A construção civil encontra-se em constante crescimento e, com ela, a produção de RCC's, os quais em sua maioria, não tem destinação específica e proveitosa no próprio campo da engenharia. Por outro lado, tem-se também, a grande utilização do solo, seja para construções habitacionais ou de infraestrutura, em que se faz necessário procedimento de compactação. Pensando no aumento da resistência desse solo e, na destinação de RCC's, verifica-se a necessidade de um estudo, que vise analisar a adequação do solo onde se aplica esse tipo de agregado, atingirá o aumento de resistência, após sua compactação.

Um dos métodos de reciclagem dos RCC's, em grandes centros urbanos, é sua utilização em pavimentação e em misturas com a terra, onde é aplicado em base, pavimentos e sub-bases, melhorando assim o solo, para a futura obra. Já no município de Sinop-MT esse material é pouco utilizado, pois, a empresa que atua em todo processo de coleta e reciclagem dos RCD's, transformando-os em agregados, encontra-se em processo de mudança e adaptação de local adequado, no sentido de aumentar sua demanda para coleta e destinação correta.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Definição dos resíduos sólidos da construção civil

A resolução do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 307/MMA/2002, define como sendo resíduos da construção civil (RCC), aqueles resultantes de construções, reformas, reparos e demolições de obras da construção civil, além, dos que envolvem a preparação e escavação de terrenos, os quais, podem ser tijolos, blocos cerâmicos, concreto, solos, rochas, metais, tintas, madeiras, forros, argamassa, telhas, pavimento, gesso, vidros, plásticos, entre todos os demais, que são provenientes do descarte em obras civis e conhecidos como entulhos de obras.

De acordo com o Portal Resíduos Sólidos (2021), os RCC's, em geral, são considerados de baixa periculosidade, porém, o volume gerado resulta em impacto ambiental, uma vez que, a disposição irregular gera problemas relacionados a danos ambientais, à saúde pública e à parte estética de qualquer local. Nessa situação os municípios encontram dificuldades para implantar e gerir um sistema de limpeza pública específica, para esse tipo de resíduos.

A referida resolução do CONAMA prioriza a não geração desses resíduos sólidos, mas caso isso ocorra, afirma que estes devem ser reduzidos, reutilizáveis quando possam ser aproveitados, sem que haja transformação; reciclados quando houver o aproveitamento, a partir da sua transformação, ou caso haja destinação final adequada, deverá ser contemplada em plano específico de gestão e destinação correta desses resíduos, pelos pequenos e grandes geradores, cujo plano deve ser elaborado pelos municípios.

2.2 Tipos de destinação dos RCC's

Segundo a Resolução nº 307 do CONAMA, os resíduos sólidos da construção civil (RCC's) são divididos em classes e, cada uma deve ter uma destinação adequada.

Classe A: abrange os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, sendo aqueles provenientes de obras de infraestrutura, inclusive os solos, os resíduos de componentes cerâmicos e os resíduos gerados pelo processo de fabricação ou demolição de peças de concreto.

Classe B: abrange os resíduos que são recicláveis para outras destinações, como plásticos, papel, metais, madeiras, vidros, entre outros.

Classe C: corresponde aos resíduos provenientes do gesso, material que ainda não conta com tecnologias viáveis de serem aplicadas.

Classe D: consideram-se parte desse grupo as tintas, os solventes, as instalações industriais, dentre outros materiais, que são totalmente prejudiciais à saúde.

A tabela abaixo relaciona a classe de material com o correspondente tipo de destinação final.

Tabela 1 – Destinação final de RCC

TIPO DE RCC	DESTINAÇÃO IDEAL
CLASSE A	Reutilização ou a reciclagem para a forma de agregados. Disposição em áreas de aterro apropriada a resíduos da construção civil permitindo que sejam utilizados ou reciclados posteriormente.
CLASSE B	Reutilização ou reciclagem. Disposição em áreas de armazenagem temporária.
CLASSE C	Processo de armazenagem, transporte e destino final de acordo com normativas específicas.

CLASSE D | Processo de armazenagem, transporte, reuso e destino final de acordo com normativas específicas.

Fonte: adaptada da resolução 307 – CONAMA

Em seu artigo 10, a resolução nº 307 do CONAMA, ressalta que apenas os RCC's pertencentes a Classe A podem ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados.

2.3 Destinação final dos RCC's no Brasil

As empresas de construção civil, que envolvem tanto grandes geradores quanto pequenos, têm obrigação de elaborar os seus Planos de Gestão e Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil – PGRCC, dentro do que foi estabelecido pelo município a que pertencem e, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, devem apresentá-los ao poder público, para que possam ser analisados, o que em algumas cidades, é requisito para emissão de alvará de construção e aprovação de projetos.

Na sequência apresentar-se-ão alguns exemplos de casos de medidas adotadas por cidades ou regiões, para a destinação final dos RCC's.

Em estudo realizado, Sganderla et al. (2020), concluiu que menos de 50% dos municípios da região de Celeiro no Estado do Rio Grande do Sul, que foi objeto da pesquisa, possuem serviço de coleta de RCC e, que 56% deles possuem fiscalização na gestão de geração dos RCC's, verificando pontos ilegais para o descarte. Os municípios contam com pontos de entregas voluntárias (PEV's), sendo que, alguns disponibilizam áreas licenciadas para a destinação de RCC, entretanto, nenhum deles possui usina de triagem do material. Apenas 23% dos municípios exigem das empresas de construção civil, a apresentação do PGRCC e cerca de 66% afirmam conhecer as normativas e legislações pertinentes.

Kuhn et al. (2017), informam que grande parte dos resíduos descartados pertence à classe A, aumentando o índice de reaproveitamento desses resíduos, por isso, se torna importante a implantação de usina de RCC's, contribuindo assim para a sustentabilidade, geração de emprego, renda e diminuição do impacto ambiental causado por esse tipo de resíduo.

O estudo feito por Da Mota (2019), na cidade de Palmas, no Estado de Tocantins, mostra que dentre os canteiros de obras de médio e alto padrão, pertencentes a 3 empresas visitadas, nenhuma cumpre totalmente as diretrizes impostas pela Resolução CONAMA 307.

No contexto geral, observou-se que há empresa sem política ambiental própria, na qual, não possuem gestão de resíduos, ou acondicionamento inadequado, em que a reutilização ocorre apenas para madeiras no uso de fôrmas e, algumas ainda são descartadas, o aço é vendido para sucata, falta de segregação de materiais e os canteiros são desorganizados. A disposição final dos resíduos é terceirizada à empresa específica de recolhimento de entulhos, os quais são levados para usina de processamento de RCC, sendo transformado em agregados, de acordo com a finalidade desejada. A usina de processamento recebeu das empresas cadastradas cerca de 1167m³ a 1680m³ mensais durante o ano de 2019.

A usina recebe o material que chega em *container*, seguindo para triagem e segregação e, posteriormente, para a separação, onde, os materiais reutilizáveis passam por reciclagem e são dispostos em locais apropriados, retornando para os canteiros de obras em formato de agregados miúdos e graúdos, de acordo com sua granulometria. Assim, o processamento segue o plano estabelecido. O material que volta ao canteiro tem um registro documentado, tornando possível o seu rastreamento e, os materiais não reutilizáveis são armazenados em aterro por camadas compactadas.

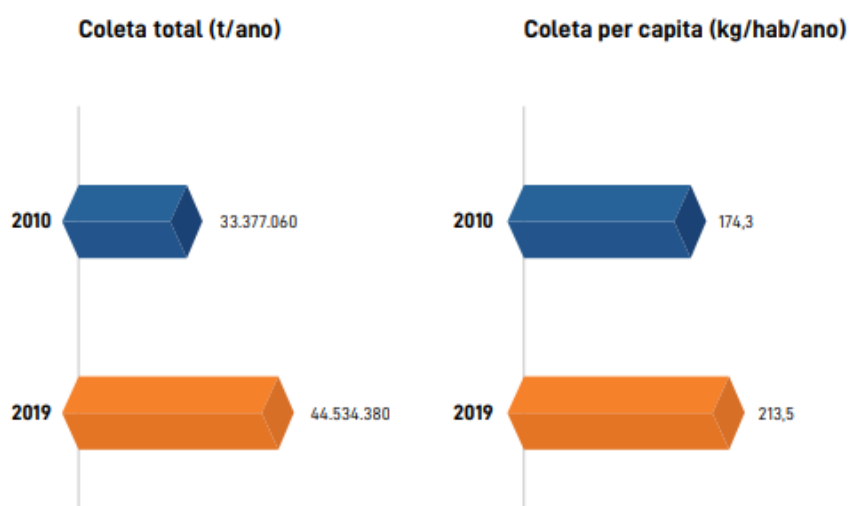
De acordo com a Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente - SP (2020), o Estado de São Paulo adota o SIGOR online, que é um sistema estadual de gerenciamento online, de resíduos sólidos, que contém o módulo de resíduos da Construção civil, sendo

disponibilizado aos geradores, aos transportadores e às áreas de destinação final de RCC, as prefeituras e à CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), criadora do sistema. Com o sistema é possível consultar as legislações específicas, a elaboração de planos de gerenciamento de resíduos (PGR), a aprovação pela prefeitura ou CETESB, a extração de relatórios de gerenciamento e, a emissão e gerenciamento do Controle de Transportes de Resíduos (CTR), o qual registra todo o processo de saída, desde a obra até destinação ambiental adequada e, como resultado, os agregados reciclados são utilizados em grande volume, na produção de artefatos e em pavimentação de estradas.

Somente empresas cadastradas, legalizadas e licenciadas podem utilizar o sistema que está sendo implantado nos municípios de forma gradual e, até 2020 estava presente em Santos, São José do Rio Preto, Catanduva, Sertãozinho e Bertioga, bem como, municípios da Baixada Santista, os quais, já exigiam das empresas que, para obras acima de 400m², o Habite-se só poderia ser emitido se ficasse comprovado que haveria destinação adequada dos resíduos da construção.

Com relação ao cenário nacional, dados da ABRELPE (2020), mostram que os resíduos de construção e demolição (RCD), coletados pelos municípios cadastrados, tiveram um aumento significativo, conforme mostra a figura abaixo:

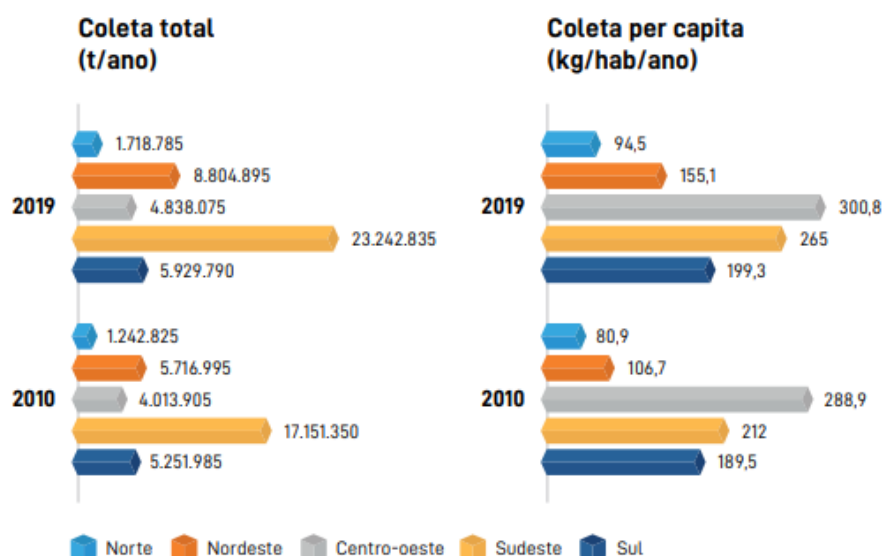
Figura 1: Dados de coleta total e coleta per/capita de RCD no ano de 2019.



Fonte: Panorama Abrelpe 2020.

Já com relação à coleta realizada pelos municípios cadastrados, o quantitativo resultante em regiões, segue:

Figura 2: Dados de coleta de RCD por região no ano de 2019.



Fonte: Panorama Abrelpe 2020.

Os dados demonstram que houve aumento na coleta de RCC de aproximadamente 15% a 31%, entre os anos de 2010 a 2019, por região do País, correspondendo à média de 1,66% a 3,44% de aumento por ano.

2.4 RCC's em substituição do uso de agregados sólidos

A NBR 15115/2004, define o agregado reciclado como sendo material granular resultante do processo de britagem ou beneficiamento mecânico de RCC's, do tipo Classe A.

Alguns estudos vêm sendo realizados, no sentido de propor a viabilidade de substituição de agregados convencionais, os quais, são recursos naturais que estão se tornando escassos com passar dos anos e com aumento das áreas urbanas. Diante disso, alguns exemplos de reutilização de RCC's, como substitutos dos agregados dentro da própria construção civil são relacionados abaixo.

A pesquisa realizada por Bernardon et al. (2020), analisa a reutilização de RCC's como substitutos da areia convencional, utilizada na fabricação de argamassas para assentamento e demonstra que, durante os seis meses de coleta, as propriedades físicas e químicas do agregado proveniente do RCC e da argamassa produzida estiveram inalteradas. Os agregados de RCC tem granulometria mais graduada que a areia natural, possuem massa unitária menor, exigem maior consumo de água de amassamento, refletindo em alteração no comportamento da argamassa produzida, a qual atinge menor resistência, devido a menor densidade e maior quantidade de vazios. Entretanto, o Bernardon afirma que, mesmo diante dos resultados obtidos, as características das argamassas com agregado reciclado se mantiveram dentro dos limites normativos, podendo-se dizer que é uma alternativa viável.

Para uso de agregados provenientes de RCC em pavimentação, a NBR 15115/2004, normaliza o uso em camadas de reforço de subleito, sub-base e base, desde que, sejam executadas de maneira correta e, com materiais que passem pelo teste de análise granulométrica disposto na NBR 7181, resultando em coeficiente de uniformidade (C_u) ≥ 10 , quantidade passante na peneira de malha n.40 entre 10% a 40%, ensaio da NBR 9895 para Índice de Suporte

Califórnia (CBR). Diante dos resultados, caso esses agregados não atendam aos requisitos citados pode ser feito a estabilização de granulometria com cal hidratada e cimento, porém, realizado novamente o ensaio de resistência à compressão simples.

Com relação ao uso de agregados reciclados em obras de pavimentação, a pesquisa realizada por Lombardi et al. (2020), faz referência ao uso de RCC, em base e sub-base de pavimento flexível e de calçada, em substituição ao uso de brita, tendo como conclusão de que há viabilidade técnica e econômica na proposta, haja vista, que os RCC's resistem às solicitações impostas a essas camadas e, o custo de execução de obra diminui com a substituição da brita.

Para o uso de agregados reciclados na produção de concreto, o estudo realizado por Simões et al. (2020), demonstra que o uso de RCC em concreto, como substituição ao agregado brita torna-se viável, no limite de proporção de 20%, com 80% de brita convencional, para que a resistência à compressão não fique inferior ao limite estabelecido em normas, uma vez que, a mistura proporcionou aumento dos valores de f_{ck} (resistência característica à compressão do concreto) e $f_{ct,m}$ (resistência média à tração do concreto), determinados em projeto.

2.5 Processo de compactação do solo para obras civis

Gomes e Júnior (2019), definem que a compactação corresponde a um processo mecânico, com vistas a diminuir o volume e o índice de vazios do solo, devido à expulsão de ar e aumentar o peso de volume seco, por meio da aplicação de cargas, de forma repetida e rápida sobre ele. Com isso, aumenta-se o grau de saturação e da área de contato entre as partículas do solo, aumentando a resistência e a impermeabilidade, por estar mais denso, diminuindo a sua deformação.

Segundo De Sousa e Coelho (2020), a resistência que o solo recebe com o processo de compactação, depende de sua energia, a qual envolve a pressão, a vibração ou impacto, a ótima umidade e o tipo de solo, além do tipo de compactação, ser leve ou pesada, de acordo com o número de batidas que uma amostra recebe, a partir da altura em que o pilão cai sobre o solo. Antes do processo, o solo deve ser analisado e classificado, para que se conheça suas propriedades e tipologia, por meio de testes, com amostras em laboratório, seguindo a NBR 6457, que regula o método de ensaio de compactação e de caracterização das amostras de solo. Além da NBR 7181 que se refere à análise granulométrica do solo, a NBR 6459 que define o ensaio de determinação do limite de liquidez, e a NBR 7180, que diz respeito ao ensaio de plasticidade do solo. O comportamento dos grãos relaciona-se à composição granulométrica e aos limites de Atterberg, o qual define limites de consistências.

O processo de compactação pode ser manual, quando se utiliza o compactador conhecido como picolé, simples de ser produzido, utilizado para solos coesivos e não coesivos, porém, não garante a uniformidade de serviço devido variação de altura de queda do pilão, sendo mais utilizado em obras de pequeno porte. Já a compactação mecanizada pode ser feita, utilizando-se compactador automático, quando o ensaio é feito em laboratório, ou no caso de ensaio em campo, usando os seguintes equipamentos: cilindros estáticos, cilindros vibradores e equipamentos de percussão.

De acordo com Santos (2008), a compactação em laboratório é realizada por Ensaio Proctor, em que uma amostra de solo dentro de um molde é compactada, obtendo o teor de água e o peso do volume seco. Em cada adição de diferentes quantidades de água na amostra de solo, é necessário repetir todo processo do ensaio, a fim de, determinar a curva de compactação.

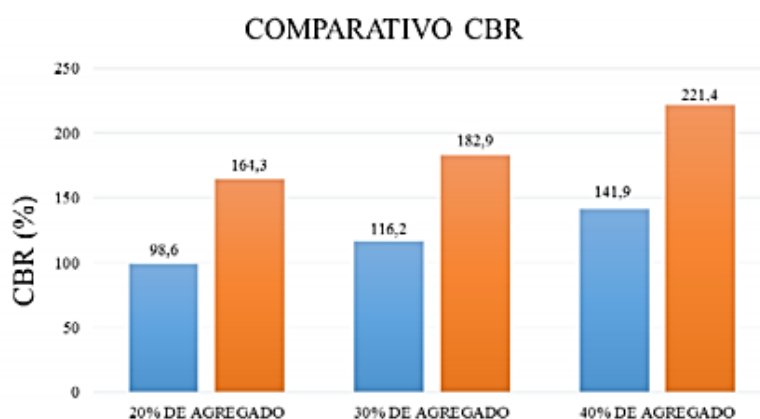
Já no ensaio em campo, segundo De Sousa e Coelho (2020), o solo deve ser espalhado em camadas horizontais de, aproximadamente, 15 a 30 cm de espessura e, por meio de rolos compressores, vibradores e compactadores, faz-se a compactação, havendo ou não, a necessidade de irrigação do local.

2.6 Influência do uso de agregados sólidos na resistência do solo

O estudo promovido por Malysz (2004), demonstra que a compactação aumentou a resistência ao cisalhamento de brita graduada, com maior granulometria e estabilizou os módulos de elasticidade, em decorrência do aumento do grau de compactação. A resistência de pico depende da tensão de confinamento dos agregados e, a resistência de cisalhamento depende do grau de compactação e da granulometria utilizada.

De acordo com Ayres et al. (2018), a pesquisa foi realizada tanto com amostras de solo *in natura* com composição de brita e com amostras compostas por seixo, tendo as mesmas proporções que as britas. Os resultados demonstraram que as misturas de brita alcançaram 60% de valores de CBR, que mede a resistência à penetração do solo, maiores que as misturas de seixos, além disso, as britas caracterizam-se agregados de alta resistência ao desgaste, estando acima dos limites normativos. Os valores de CBR estão elencados no gráfico abaixo:

Figura 3: Comparativo de valores de CBR em amostras de solo com brita (laranjado) e amostras de solo com seixos (azul).



Fonte: Ayres et al. (2018)

Com relação a solos moles, Felix (2012), apresentou um estudo em que o procedimento usado para ganho de resistências em solos coesivos, são as colunas de brita, permitindo que o solo receba diversos tipos de obras, desde as mais simples às mais complexas. O dimensionamento dessas colunas vincula-se ao seu diâmetro, o qual pode estar entre 60 e 100cm, ao tipo de malha, quadrada ou triangular e a resistência do solo que se encontra envolta.

A execução das colunas compreende algumas etapas, sendo: o preparo do equipamento no ponto de penetração e a presença de uma caçamba elevatória, prosseguindo com o enchimento do vibrador com a brita contida na caçamba, chegando ao orifício de saída, por uso de jato de ar comprimido, em seguida há a penetração do vibrador comprimindo as faces laterais do solo, chegando até a profundidade desejada, passando para a etapa de compactação, na qual, o vibrador sobe, deixando as britas no espaço vazio, em seguida ele desce, fazendo com que a brita se expanda nas laterais, compactando o solo, assim, esse processo é repetido em camadas, até que chegue à superfície.

2.7 Compactação de solos composto por agregados de RCC's

O processo de compactação do solo com RCC segue a mesma maneira do solo com agregados convencionais, sendo regularizado por normas específicas. Porém, é importante

analisar casos de estudos que envolvem os RCC's, como agregado na mistura do solo a ser compactado.

Silva (2019), ao utilizar amostras de solo fraco, tem-se um baixo desempenho, mas ao acrescentar na amostra os agregados reciclados de concreto (ARC), o desempenho melhorou, havendo variação alta no ISC, resultando em solo de maior resistência, com deformação quase nula em amostras com adições de ARC, na proporção maior que 50%. Assim, o solo passa a ser adotado para compor a sub-base ou reforço de subleito de um pavimento, pois, possui características dentro das exigências feitas pelo DNIT e, por conter comportamento não plástico, há um favorecimento na estabilização do solo, devido a essas baixas ou nulas deformações.

Já o estudo realizado por De Araújo (2020), afirma que, quanto maior a energia de compactação aplicada ao processo de Ensaio de Proctor, menor será a umidade ótima e maior a massa aparente seca do agregado, conferindo na mistura solo-RCC, o aumento na resistência ao cisalhamento e, também, à erosão.

Com relação à compactação realizada em aterros sanitários, Osten et al. (2020), menciona que é feita na camada de cobertura, a fim de, controlar a entrada de água e ar para dentro do aterro, bem como, a passagem de gases e, assim, reduzir o odor local. Já o fundo do aterro, também tem uma camada compactada e o tipo de solo utilizado é o argiloso, tornando-se um material impermeabilizante nesse tipo de obra. Os RCC's têm compactação de 90% e, por ter alta permeabilidade, devido sua porosidade, ajudam na redução de bolsões que podem aparecer entre as camadas de resíduos e, seu uso diminui a utilização de áreas de empréstimos, assim, se torna um processo sustentável e com menor custo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Tipo de pesquisa

Para a verificação da resistência do solo contendo resíduos sólidos de demolição da construção civil, no município de Sinop, foram utilizados os métodos e materiais descritos nas normas da NBR 10004 (ABNT,2004a) e NBR 15112 (ABNT,2004b).

As normas NBR 15.115 e NBR 15.116 abordam, ainda, a utilização de resíduos como componentes em camadas de pavimentação e utilização de resíduo, como material para preparo de concreto não estrutural. Tais normas foram referências, também para a realização dos ensaios descritos abaixo.

Foram realizados ensaios para determinação de parâmetros como, dimensão máxima de agregados, teor de umidade das amostras, como também, o ensaio de compactação das massas específicas das amostras de resíduos e índice de suporte Califórnia – ISC ou CBR, seguindo as indicações normativas adequadas.

Será feita a coleta de agregados de RCC's em empresa específica, que mantém estoque e armazenagem do produto, com sede na cidade de Sinop-MT. Os ensaios com amostras de solo contendo RCC's foram realizados no laboratório de pavimentação da UNIFASIPE e compreenderam ensaio de granulometria, teor de umidade e compactação do solo.

Foram preparadas um total de quatro amostras para o ensaio de compactação Proctor e CBR, compostas pelo mesmo tipo de solo, o qual, foi retirado de obras localizadas nas proximidades das instalações do referido laboratório, sendo duas situações relacionadas à umidade desse solo, onde a amostra A1 se refere a solo úmido (30%) e A2 encharcado (50%), o que simula as diversas situações reais em que se encontra o solo em épocas chuvosas. Considera-se a definição de que, um solo úmido tem seus poros ocupados em parte por água e outra parte por ar, enquanto, solos encharcados estão totalmente ocupados por água, sendo visualmente percebidos. Assim, para cada tipo de situação do solo mencionada acima gerou

dois corpos de prova contendo agregados de RCC's, em proporções diferentes, sendo 25% e 50%.

O ensaio de granulometria foi baseado na norma do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem – DNER 83/98, e realizado por meio de peneiramento manual, onde, duas amostras de agregados de RCC's (RCD0 e RCD1), contendo a porção de 2kg cada, foram pesadas e, em seguida, passaram por peneiramento manual em tempo de 1 minuto, sendo utilizado para esse procedimento, as peneiras disponíveis no laboratório de solos, as quais tinham aberturas (mm) em 9,5; 4,75; 2,36; 1,18 e 0,60, posicionadas em ordem decrescente. Em seguida foi feita a pesagem da quantidade retida em cada peneira, para assim, determinar a granulometria de cada amostra.

O ensaio de teor de umidade foi realizado conforme a norma do DNER 196/98, e consistiu na separação de duas amostras (RCD0 e RCD1) de RCC's, com diferentes granulometrias, seguindo com a realização da pesagem das mesmas em 2kg, posteriormente, elas foram encaminhadas para a estufa preaquecida por cerca de 20 minutos, em temperatura de 110° C, pelo tempo de uma hora, sendo Tempo 1 das 18:30 às 19:30, após as amostras foram retiradas e deixadas em temperatura ambiente, para possível pesagem. Esse processo foi repetido no Tempo 2 das 19:50 às 20:50 e no Tempo 3 das 21:10 às 22:10, sendo finalizado o ensaio devido ao fechamento do horário de funcionamento do laboratório. A última pesagem foi referência para determinar o teor de umidade e a comparação de resultados entre as amostras.

O ensaio de compactação por Índice de Degradação, após compactação Proctor, foi realizado conforme a norma DNER 398/99, e compreendeu o preparo de quatro amostras, sendo: A1-25% (solo úmido com proporção de 25% de RCD's); A1-50% (solo úmido com proporção de 50% de RCD's); A2-25% (solo encharcado com proporção de 25% de RCD's) e A2-50% (solo encharcado com proporção de 50% de RCD's), colocadas em recipiente do tipo fôrma circular com diâmetro de 50 cm, sendo realizada, primeiramente, a pesagem da porção do solo e da porção de agregado para corresponder à proporção definida.

Cada mistura do solo, nas amostras de A1 tiveram o acréscimo de 30% e 50% de umidade respectivamente, 250ml de água e nas amostras de A2, 400ml de água, para simular a condição tanto do solo úmido quanto do encharcado.

Após a realização da mistura solo e agregado no recipiente descrito, foram montados e ajustados os corpos de prova para cada amostra do estudo, sendo em moldes específicos para ensaio Proctor, com diâmetro de 15cm e altura 17,5cm.

No corpo de prova, cada mistura foi colocada em 5 camadas, recebendo 26 golpes cada, através de soquete metálico, que caia de uma altura aproximada de 46 cm, em processo manual. Foi feito o arrasamento da borda superior do corpo de prova em cada amostra, realizou-se a pesagem de cada um para a determinação do resultado do índice de compactação.

Por fim, realizou-se o ensaio de CBR ou ISC (Índice de Suporte Califórnia), conforme a NBR 9895/2016, sendo inserido dentro dos moldes de cada corpo de prova, discos metálicos na superfície superior, em seguida cada corpo de prova foi levado para a prensa CBR digital, realizados os ajustes necessários, iniciando-se o ensaio de penetração com velocidade de 1,27mm/min, registrou-se os valores de carga atuante na superfície da amostra nos intervalos de tempo determinados em norma (0,5; 1; 1,5; 2; 4; 6; 8; 10min), os quais, foram utilizados para determinar a pressão atuante (MPa).

Os resultados da resistência obtida com o ensaio de CBR em cada amostra, foram registrados para a comparação de valores e a definição das amostras que atingiram resultados satisfatórios.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios realizados em laboratório tiveram seus valores registrados e são apresentados na sequência. Para o ensaio de granulometria, tem-se a tabela 2 e 3.

Tabela 2: Ensaio de granulometria

Amostra	Massa da amostra (kg)	Peneiras (mm)				
		9,5	4,75	2,36	1,18	0,6
		Massa retida (kg)				
RCD 0	2,000	0,190	1,740	0,045	0,005	0
RCD 1	2,000	1,890	0,095	0	0	0

Fonte: Própria, 2022.

Ao realizar o somatório das massas retidas nas respectivas peneiras, é possível definir a porcentagem de perda ao ser comparada com a massa inicial de cada amostra, conforme apresenta a tabela 3.

Tabela 3: Perda total de massa dos agregados.

Agregado	Massa da amostra (kg)	Total de massa retida (kg)	Total de perda (kg)	Porcentagem de perda (%)
RCD 0	2,000	1,980	0,020	1
RCD 1	2,000	1,985	0,015	0,75

Fonte: Própria, 2022.

Através dos resultados obtidos, percebe-se uma considerável perda, estando em ambas as amostras, porcentagem acima de 0,5%, o que justifica a presença de maior quantidade de pó de pedra e resíduos provenientes do desgaste desses materiais. Assim, com base nesses dados, os ensaios para essas amostras deveriam ser repetidos, segundo a norma de referência para esse tipo de análise.

As tabelas 4 e 5 apresentam o cálculo da porcentagem retida acumulada para amostra de RCD 0 e RCD 1, sendo utilizada para a definição do diâmetro máximo característico do agregado.

Tabela 4: Porcentagem retida acumulada para amostra RCD 0.

Peneira (mm)	Massa retida (g)	Porcentagem retida	Porcentagem retida acumulada
9,5	0,190	9,6%	9,6%
4,75	1,740	87,88%	97,48%
2,36	0,045	2,27%	99,75%
1,18	0,005	0,25%	100%
0,6	0		
Total	1,980	100%	-

Fonte: Própria, 2022.

Tabela 5: Porcentagem retida acumulada para amostra RCD 1.

<i>Peneira (mm)</i>	<i>Massa retida (g)</i>	<i>Porcentagem retida</i>	<i>Porcentagem retida acumulada</i>
9,5	1,890	95,21%	95,21%
4,75	0,095	4,79%	100%
2,36	0	0	
1,18	0	0	
0,6	0	0	
<i>Total</i>	1,985	100%	-

Fonte: Própria, 2022.

De acordo com a norma específica para o presente ensaio, a dimensão máxima característica de cada agregado corresponde à abertura da peneira, em que ficar retida acumulada, uma porcentagem de agregado igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. Assim, nenhuma das amostras pode ter sua dimensão máxima definida, já que esse valor resultante foi acima de 5%, tendo em vista, as aberturas de peneiras disponíveis no laboratório.

Seguindo com o ensaio de teor de umidade por secagem em estufa, tem-se os seguintes resultados para cada uma das duas amostras descritas.

Tabela 6: Massa do agregado após cada intervalo de secagem.

<i>Agregado</i>	<i>Massa inicial da amostra (kg)</i>	<i>Massa da amostra – tempo 1</i>	<i>Massa da amostra – tempo 2</i>	<i>Massa da amostra – tempo 3</i>	<i>Porcentagem entre pesagens</i>
<i>RCD 0</i>	2,0	1,990	1,985	1,980	0,16%
<i>RCD 1</i>	2,0	1,990	1,980	1,980	0%

Fonte: Própria, 2022.

De acordo com a norma referente ao estudo de teor de umidade, a massa final só é definida quando houver diferença de até 0,1% entre duas pesagens sucessivas. Assim, na amostra de RCD 0, a diferença entre as duas últimas secagens foi de 0,16% e na amostra de RCD 1, não houve essa diferença. Devido ao horário de fechamento do laboratório, onde foi realizado o ensaio, não foi possível prosseguir com os intervalos de secagem para a amostra RCD 0.

Ainda com relação ao presente ensaio, tem-se que o valor em porcentagem referente ao teor de umidade é calculado por meio da diferença entre a massa inicial da amostra (g), e a massa final da amostra seca (g), dividida pelo próprio valor da massa final e multiplicando esse resultado por 100.

Como a amostra de RCD 0 ultrapassa o valor limite estabelecido pela norma que é de até 0,1% referente à diferença de massa entre os intervalos sucessivos de secagem, não é possível verificar o seu teor de umidade. Caso a norma seja desprezada, seu valor de teor de umidade seria igual ao da amostra de RCD 1.

Tendo em vista, a formulação acima, tem-se que o teor de umidade para a amostra RCD 1, é de 0,67%.

Na tabela a seguir são apresentados os valores referentes ao ensaio de índice de degradação, após compactação de Proctor, na qual, foram realizados em 4 corpos de provas com solo contendo proporções de 25% e 50% de RCD 0 e RCD 1 misturados.

Tabela 7: Resultados obtidos durante ensaio de compactação Proctor.

Agregado	Massa inicial da mistura (kg)	Massa após compactação (kg)	Índice de compactação (%)
A1 – 25%	4,210	3,320	21,14
A1 - 50%	4,424	4,095	7,44
A2 – 25%	4,359	4,060	6,86
A2 – 50%	4,575	4,135	9,62

Fonte: Própria, 2022.

Os valores registrados indicam que a amostra A1 – 25%, que tem menor umidade e menor proporção de RCD na mistura, obteve o maior índice de compactação e que, as demais amostras apresentaram valores muito próximos entre si, sendo uma possível justificativa de que pode ter havido falhas na energia de compactação, uma vez que, foi realizada manualmente, além de que a presença de água nos vazios amortiza a compactação e, o aumento de vazios presentes na mistura tende a não aumentar a massa específica.

Por fim, a tabela 8 apresenta valores de pressões auferidas durante o ensaio de Índice de Suporte Califórnia – ISC.

Quadro 8: Resultados obtidos durante ensaio de ISC.

Tempo (min)	Penetração (mm)	Amostra A1-25%	Amostra A1-50%	Amostra A2 – 25%	Amostra A2 – 50%
		Carga (Kg)			
0,5	0,63	1225	1241	1022	1416
1	1,27	1130	1286	1047	1453
1,5	1,90	1095	1316	1066	1472
2	2,54	1086	1335	1084	1489
4	5,08	1103	1369	1148	1532
6	7,62	1132	1395	1198	1565
8	10,16	1157	1431	1236	1592
10	12,70	1175	1473	1272	1615

Fonte: Própria, 2022.

A prensa utilizada no ensaio fazia as leituras da força (kg) aplicada na área de superfície do corpo de prova, correspondente a 0,0177m², resultando nos valores de pressões (MPa) necessários para a determinação do ISC.

De acordo com a norma NBR 9895/2016, o ISC é calculado por meio do valor de pressão obtido na penetração de 2,54mm e 5,08mm, dividido pela pressão padrão indicada na respectiva, multiplicado por 100, adotando o maior valor entre eles, conforme a tabela 9.

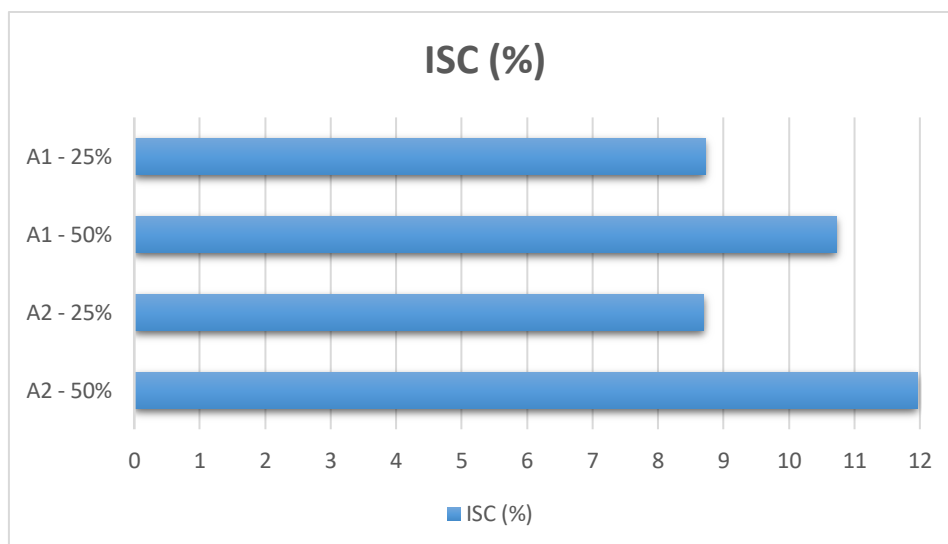
Quadro 9: Dados para o cálculo do ISC.

Penetração (mm)	Pressão (MPa)	A1 – 25%		A1 – 50%		A2 – 25%		A2 – 50%	
		ISC%	ISC %	ISC%	ISC %	ISC %	ISC %		
2,54	6,9	0,602	8,72	0,740	10,72	0,60	8,70	0,825	11,96
5,08	10,35	0,612	5,91	0,758	7,32	0,636	6,14	0,849	8,20

Fonte: Própria, 2022.

O ISC resultante para cada amostra foi de 8,72% para amostra A1 – 25%; 10,72% para amostra A1 – 50%; 8,70% para amostra A2 – 25% e de 11,96% para a amostra A2 – 50%, conforme mostra o gráfico abaixo:

Gráfico 1: Resultado do ensaio de ISC.



Fonte: Própria, 2022.

As amostras de solo A1 e A2 que continham 50% de RCD em sua composição, obtiveram as maiores resistências superficiais, ao serem comparadas com as demais amostras. Isso demonstra que independente do grau de umidade do solo, o ganho de resistência se deu com a maior proporção de uso de agregados de RCD's nas misturas com o solo, sendo viável o uso destes para obras de recuperação e manutenção de estradas não pavimentadas. Porém, não pode ser utilizado para bases em obras de pavimentação, pois, estas devem ter o ISC entre 30% a 80%, de acordo com o tipo de utilização. Geralmente, solos finos apresentam ISC entre 8 a 20%, sendo mais indicado para pisos e pavimentos rígidos um valor de ISC maior que 8%, enquanto para pavimentos flexíveis, ISC maior que 12%.

5. CONCLUSÃO

Considerando os ensaios realizados em laboratório específico e, posteriormente, a coleta e análise dos dados obtidos, é possível concluir que, quanto ao ensaio de granulometria, o mesmo foi incompleto e deveria ser repetido com a quantidade de peneiras e suas aberturas estabelecidas em norma. Além disso, o ensaio de teor de umidade, também poderia ser refeito para a amostra RCD0, completando o seu tempo de secagem. Por outro lado, o ensaio de índice de degradação após compactação de Proctor, demonstrou que o melhor resultado ocorre para um solo úmido, com apenas 25% de RCD e que, quando se tem um solo encharcado, a compactação se mostrou maior, diante do aumento de 50% de RCD na sua composição. Já o ensaio de índice de suporte Califórnia – ISC, demonstrou que o solo com maior proporção de RCD torna-se mais resistente, porém, somente um profissional geotécnico pode analisar qual seria a melhor destinação dos RCD, para o uso em obras ou estradas, diante dos resultados obtidos nas amostras em estudo. Logo, todas as análises completas mostraram que existe possível viabilidade do uso de agregado proveniente de resíduos da construção e demolição, uma vez que, as amostras de solo contendo proporções de RCD, obtiveram resistência satisfatória, tanto a compactação quanto a penetração, surgindo a ideia de possível estudo desse material, com a aplicação e análise *in-loco*, para reforçar os estudos preliminares realizados dentro do laboratório e, assim, disseminar seu uso para o aumento da resistência de solos utilizados em obras de manutenção de estradas não pavimentadas, bem como, base em terraplenagem para obras de edificações, por exemplo, diminuindo custos e destinando corretamente os agregados de RCD's.

REFERÊNCIAS

ABRELPE-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>> Acesso em: maio de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 2016.

KARPINSKI. L.A., PANDOLFO. A., REINEHER., R. KUREK. J., PANDOLFO. L. M., GUIMARÃES. J. C. B. Gestão diferenciada de resíduos da construção civil – uma abordagem ambiental. Porto Alegre, ediPUCRS, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2009, 163p., ISBN 978-85-7430-843-2.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2004.

BERNARDON, L.; WAECHTER, J. L.; SILVA, R. A.; LERMEN, R. T.; NOVAES, J. F.; **Avaliação da substituição total de areia natural por RCC em argamassa de assentamento**. Revista de arquitetura IMED, v.09, n.02, Passo Fundo, 2020.

BRASIL. **Lei 12.305, de 2 de Agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002.** Alterada pelas Resoluções nº 348, de 2004, nº 431, de 2011 e nº 448, de 2012. Dispõe sobre gestão dos Resíduos da Construção Civil. Brasília, 2002.

AYRES, T. M. C.; DE ARAÚJO, C. B. C.; JÚNIOR, J. M. R. O. **Estudo comparativo entre as misturas solo-seixo e solo-brita para fins de pavimentação.** Revista Tecnologia Fortaleza, V.39, n.01, pg. 18, 2018.

DA MOTA, A. L. C.; **Construção Civil e Sustentabilidade:** análise da destinação final dos Resíduos de Construção Civil na cidade de Palmas-To. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, 60 pág. Centro Universitário Luterano de Palmas, Tocantins, 2019.

DE ARAÚJO, C. L. O. **Estudo geotécnico de solo-RCD para fins de pavimentação.** Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil, 49 pág. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos-RN, 2020.

ESTADO DE SÃO PAULO, Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente; CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Plano de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo.** Disponível em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/home/2020/12/plano-resi%CC%81duos-solidos-2020_final.pdf> Acesso em 05/2021.

FELIX, M. **Melhoramento do solo com colunas de brita.** Revista Técnica. Ed. 187, out.2012.

GOMES, M. E.; JÚNIOR, F. A. S. **Compactação do solo no campo.** Trabalho de Conclusão de Curso em Ciência e Tecnologia, 10 pág. UFERSA, Mossoró-RN, 2019.

SILVA, Matheus Fernandes. **Estudo da adição de resíduos da construção civil (rcc) para estabilização granulométrica de um solo da região do Vale do Araguaia, para fins de pavimentação.** 2019. 67 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Mato Grosso, Campus Universitário do Araguaia, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Barra do Garças, 2019.

KUHN, C.; BRUM, E. M.; BERTICELLI, R.; PANDOLFO, A.; PASQUALI, P. B.; **Análise de viabilidade econômica de uma usina de reciclagem de resíduos da construção civil.** Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v.06, n.02, Florianópolis, 2017.

LOMBARDI, A.P.; ANDRADE, T. S.; ALMEIDA, A. P.; CROVADOR, C. C. **Estudo de modelo para pavimentação utilizando RCC para execução e implantação de infraestrutura na Vila Coronel Cláudio em Ponta Grossa.** Revista Techno Eng, Ed. 21. ed. Ponta Grossa, 2020.

MALYSZ, R. **Comportamento mecânico de britas empregadas em pavimentação.** Tese de mestrado em engenharia, 168 pág. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

OSTEN, S. B. F. V. D.; OSTEN JÚNIOR, E. H. V. D.; MIYASHIRO, C. F.; DUARTE, E. R.; SAUER, A. V.; JÚNIOR, A. A. S. **Aterro sanitário: relevância e técnicas de impermeabilização do solo.** Revista Eletrônica Interdisciplinar, v.13, n.02, pg. 12, Matinhos, 2020.

PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS. **Classificação dos resíduos sólidos da Construção Civil no Brasil**. Disponível em: <https://portalresiduossolidos.com/classificacao-dos-residuos-da-construcao-civil-no-brasil/> . Acesso em maio de 2021.

ALVES, G. M. L.; REVISTA EDUCAÇÃO AMBIENTAL EM AÇÃO. Vol.19, n.74. 2021. **Resíduos sólidos da construção civil: Educação e consciência ambiental na cidade de Cajazeiras-PB**.

Disponível em: <http://revistaea.org/artigo.php?idartigo=2745> . Acesso em maio de 2021.

SGANDERLA, M. S.; BOHRER, R. E. G.; BISOGNIN, R.P.; DA SILVA, D. M.; GUERRA, D.; **Diagnóstico da gestão e gerenciamento dos resíduos da construção civil (RCC) em municípios da Região Celeiro do Rio Grande do Sul**. Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v.09, n.04, Florianópolis, 2020.

SIMÕES, F.E.; GARCIA, F. O.; NETO, R. A. N.; AMADO, S. S.; GAMINO, A. L. **Análise da substituição do agregado graúdo por RCC Classe A na composição do concreto através de ensaios experimentais comparativos de resistência mecânica à tração e à compressão**. Revista eSALENG, v.09, n. 1, Araçatuba-SP, 2020.