



**ISABELLA YOLI OLIVEIRA MURTA
NATÁLIA RIBEIRO SILVA**

**AGREGADO RECICLADO PROVENIENTE DO RESÍDUO
DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NA PAVIMENTAÇÃO**

LAVRAS - MG

2021

**ISABELLA YOLI OLIVEIRA MURTA
NATÁLIA RIBEIRO SILVA**

**AGREGADO RECICLADO PROVENIENTE DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO NA PAVIMENTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada
à Universidade Federal de Lavras, como
parte das exigências do curso de Engenharia
Civil, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Keoma Defáveri Do Carmo e Silva
ORIENTADOR

LAVRAS - MG

2021

**ISABELLA YOLI OLIVEIRA MURTA
NATÁLIA RIBEIRO SILVA**

**AGREGADO RECICLADO PROVENIENTE DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO NA PAVIMENTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada
à Universidade Federal de Lavras, como
parte das exigências do curso de Engenharia
Civil, para obtenção do título de Bacharel.



Prof. Dr. Keoma Defáveri Do Carmo e Silva
ORIENTADOR

LAVRAS - MG

2021

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus que nos deu a oportunidade, força de vontade e coragem para superar todos os desafios.

Aos nossos pais por sempre terem torcido por nós, por todo apoio, dedicação e paciência contribuindo para que pudéssemos ter um caminho mais fácil e prazeroso durante esses anos.

Aos nossos irmãos por todo companheirismo e apoio em todos os momentos durante toda a graduação.

Aos nossos amigos de faculdade e da vida que sempre estiveram presentes em todos os momentos, torcendo por nosso sucesso, nos dando apoio, por toda amizade, amor e carinho, proporcionando momentos de risadas, descontração e alegria durante os anos complexos da engenharia.

Ao nosso orientador e professor Dr. Keoma Defáveri por toda dedicação, paciência e apoio na orientação desse TCC e na aprendizagem em sala de aula oferecendo conselhos e incentivo para a construção do nosso futuro profissional.

Um agradecimento especial a nossa parceria e amizade, por todo companheirismo, risadas, momentos bons compartilhados que tornou possível não apenas a finalização deste trabalho, como a conclusão da graduação.

RESUMO

No Brasil a quantidade de resíduo de construção e demolição (RCD) gerado vem aumentando exponencialmente, criando a necessidade de estudos e análises comportamentais do agregado reciclado gerado a partir do RCD. Uma das alternativas para diminuir os impactos ambientais, sociais e econômicos da geração desse resíduo é a utilização do agregado reciclado proveniente do RCD em obras de pavimentação. O objetivo desse trabalho é elaborar uma revisão da literatura sobre o uso do RCD na pavimentação, visando seu emprego em camadas de base, sub-base, reforço do subleito, revestimento flexível e rígido. Para isso, foram utilizados artigos científicos, trabalhos acadêmicos e capítulos de livros de diferentes autores afim de apresentar os resultados obtidos acerca da viabilidade do uso do agregado reciclado proveniente do RCD em pavimentação, comparando com as normas vigentes. Foram analisadas características como teor de absorção de água, módulo de resiliência, resistência a compressão e tração, índice suporte Califórnia e características físicas do agregado reciclado. Conclui-se a partir dos diversos trabalhos apresentados que a utilização do agregado reciclado proveniente do RCD possui potencial para substituição dos agregados convencionais, podendo ser utilizado em camadas de base, sub-base, reforço do subleito e revestimento.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduo de Construção e Demolição. Pavimentação. Agregado Reciclado. Camadas de Pavimento.

ABSTRACT

In Brazil, the amount of construction and demolition waste (CDW) generated has been increasing exponentially, creating the need for studies and behavioral analysis of the recycled aggregate generated from CDW. One of the alternatives to reduce the environmental, social and economic impacts of the generation of this waste is the use of recycled aggregate from CDW in paving works. The objective of this work is to elaborate a literature review on the use of CDW in paving, training its use in base layers, sub-base, subgrade reinforcement, flexible and rigid coating. For this, scientific articles, academic papers and book chapters by different authors were used in order to present the results obtained using recycled aggregate from CDW in paving, compared to current standards. Characteristics such as water absorption content, resilience modulus, compressive and tensile strength, California Bearing Ratio and physical characteristics of the recycled aggregate were analyzed. It can be concluded from the various works that the use of recycled aggregate from CDW has the potential to replace conventional aggregates, and can be used in base layers, sub-base, sub-grade reinforcement and pavement coating.

KEYWORDS: Construction and Demolition Waste. Paving. Recycled Aggregate. Pavement layers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Camadas genéricas de um pavimento	14
Figura 2 - Representação pavimento-tipo flexível	14
Figura 3 - Comportamento mecânico de um pavimento flexível	16
Figura 4 - Representação do pavimento-tipo rígido	16
Figura 5 - Comportamento mecânico de um pavimento rígido	17
Figura 6 - Classificação das bases e sub-bases	18
Figura 7 – Delineamento da pesquisa.....	20
Figura 8 - Materiais constituintes do RCD em algumas literaturas	22
Figura 9 - Resistência a tração (RT) para diversos autores	27
Figura 10 - Teor de absorção de água de amostras de agregado reciclado	30
Figura 11 - Resistência a compressão para amostras com 28 dias de cura	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos específicos para agregado reciclado destinado a pavimentação	13
Tabela 2 - Limites de ISC e expansão especificados pela ABNT NBR 15115 (2004)	23
Tabela 3 - Resultados de ISC e expansão para diferentes pesquisas	24
Tabela 4 - Valores de MR encontrados para diferentes tipos de agregado reciclado	25
Tabela 5 - Valores de MR para diversos autores em MPa	28
Tabela 6 - Resistência característica a compressão para diferentes tipos de tráfego	31

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	9
1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Objetivos da Pesquisa.....	10
1.2 Estrutura do Trabalho.....	10
CAPÍTULO 2	11
2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	11
2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	11
2.2 AGREGADO RECICLADO.....	12
2.3 PAVIMENTOS.....	13
2.3.1 Pavimentos Flexíveis.....	14
2.3.2 Pavimentos Rígidos.....	16
2.3.3 Pavimentos Semirrígidos.....	17
2.4 MATERIAIS UTILIZADOS EM CAMADAS DE BASE, SUB-BASE E REFORÇO DO SUBLEITO.....	17
CAPÍTULO 3	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
CAPÍTULO 4	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	21
4.1 AGREGADOS RECICLADOS EM CAMADAS DE BASE, SUB-BASE E REFORÇO DO SUBLEITO.....	21
4.1.1 Materiais constituintes do RCD.....	21
4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	23
4.2.1 Índice de Suporte Califórnia.....	23
4.2.2 Módulo de Resiliência.....	25
4.3 AGREGADOS RECICLADOS EM REVESTIMENTO FLEXÍVEL.....	26
4.3.1 Resistência a Tração.....	27
4.3.2 Módulo de Resiliência.....	28
4.4 AGREGADOS RECICLADOS EM REVESTIMENTO RÍGIDO.....	29
4.4.1 Teor de Absorção de Água.....	29
4.4.2 Resistência a compressão.....	30
CAPÍTULO 5	33
5. CONCLUSÃO.....	33
REFERÊNCIAS.....	35

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é reconhecida como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento de qualquer país, no entanto, é uma grande geradora de impactos ambientais devido ao intenso consumo de matéria prima, modificação da paisagem e à grande geração de resíduos (DELONGUI et al., 2010).

A indústria da construção civil, em função das características particulares do seu processo produtivo, constitui-se como uma grande geradora de resíduos denominados resíduos de construção e demolição (RCD). O RCD é popularmente conhecido como entulho e é gerado durante a construção, reformas e demolição de edifícios, estradas e pontes, sendo composto por materiais volumosos e pesados, como concreto, cerâmicos, madeira, plásticos, metais e vidros, entre outros (JIMENÉZ, 2011).

Mundialmente, a geração de RCD chega a um valor entre 2 e 3 bilhões de toneladas por ano (PINTO, 1999). Segundo dados do IBGE, em 2002, a população brasileira era de aproximadamente 170 milhões de pessoas, desse modo, teríamos um montante de resíduos, por estimativa, de aproximadamente 68,5 milhões de toneladas por ano de geração de RCD no Brasil (ANGULO, et al.,2002).

A intensa geração de RCD na construção civil traz uma preocupação quanto à quantidade gerada e a destinação apropriada (SANTOS, 2019). Dentre as diversas utilizações encontradas para reaproveitamento do RCD, a aplicabilidade do seu reuso para geração de agregado em obras de pavimentação asfáltica é uma das alternativas mais simples e eficazes (VIEIRA & DAL MOLIN, 2004).

No Brasil, o modal rodoviário é o mais utilizado para movimentação de mercadorias e transporte de passageiros. Atualmente, de acordo com a pesquisa da Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2019), somente 213.453 km das rodovias federais são pavimentadas, correspondendo a 12,4% da extensão total das estradas brasileiras. Esses dados representam que, embora o modal rodoviário seja importante para o país, existem relativamente poucos trechos pavimentados. Deste modo, é necessário que ocorram investimentos em pavimentação de rodovias, como também em manutenções das mesmas. (BARRETO, 2020).

As primeiras experiências de uso do RCD em pavimentação no Brasil, iniciaram em meados da década de 1980. Desde então, várias pesquisas sobre o tema vêm sendo

desenvolvidas, uma vez que a utilização do RCD como agregado para a construção de pavimentos pode ser uma alternativa interessante aos materiais convencionalmente utilizados, para promover um aumento da oferta de vias pavimentadas tanto em grandes centros urbanos como em cidades de médio porte brasileiras (MOTTA, 2005).

1.1 Objetivos da Pesquisa

Este trabalho tem como objetivo avaliar através de pesquisas bibliográficas a viabilidade da utilização de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em camadas de pavimentos. Para isso, foi analisada a composição do agregado reciclado e características mecânicas, sendo elas: Índice Suporte Califórnia, Módulo de Resiliência, Teor de Absorção de água, Resistência a Tração e Resistência a Compressão, apresentando quais os resultados obtidos quando o agregado reciclado é utilizado em camadas de base, sub-base, reforço do subleito e revestimento.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho de conclusão de curso consiste em um artigo de revisão bibliográfica sobre o uso de RCD para aplicação na pavimentação. O trabalho será composto por capítulos, onde no Capítulo 1 foi apresentada uma breve introdução sobre a aplicação do RCD, volume gerado anualmente e impactos ambientais.

No Capítulo 2 será abordado o referencial bibliográfico apresentando a definição e classificação do RCD segundo a ABNT NBR 15112 (2004), além do conceito de agregado reciclado, expondo o conceito de pavimentação e uma breve introdução sobre as características das três categorias de pavimentos: pavimentos rígidos e flexíveis e semirrígidos. Posteriormente serão apresentados alguns materiais que podem ser utilizados em camadas de base, sub-base e reforço do subleito. No Capítulo 3 será apresentado os materiais e métodos detalhando como foi realizada a pesquisa e o que foi utilizado no trabalho para seu desenvolvimento.

No Capítulo 4 será abordado os resultados e discussões acerca da utilização do agregado reciclado nas camadas de base, sub-base e reforço do subleito apresentando alguns dos ensaios de caracterização mecânica utilizados para avaliar a viabilidade do uso do RCD na pavimentação, assim como a utilização do agregado reciclado em revestimentos rígidos e flexíveis comparando os resultados encontrados com as normas vigentes.

No Capítulo 5 serão realizadas as considerações finais e conclusão, apresentando a efetividade da utilização do agregado reciclado de RCD em diversas camadas do pavimento.

CAPÍTULO 2

2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Resíduos de construção e demolição (RCD) são aqueles gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras da construção civil e os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis (ALMEIDA, 2017).

O RCD é encontrado na forma sólida e possui características físicas variáveis que dependem do processo pelo qual foi gerado. O RCD pode ser encontrado tanto em dimensões e geometrias já conhecidas dos materiais de construção como a da areia e da brita, quanto em formatos e dimensões irregulares: pedaços de madeira, argamassas, concretos, plásticos e metais (ZORDAN, 1997).

A aplicação do RCD varia de acordo com a necessidade, procedência e classificação dos materiais. Sua maior utilização é como agregado para concreto, estradas, aterros, contenção e base de solos (CORREA et al., 2009).

No ano de 2002 o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos a serem tomados em relação à caracterização, geração, transporte e destinação do RCD, criou a resolução nº 307/2002 devido à elevada geração de RCD. De acordo com a resolução nº 307/2002 (CONAMA, 2002) os resíduos são classificados em 4 classes, tais classes também são consideradas pela ABNT NBR 15112 (2004):

Classe A - são resíduos que podem ser utilizados como agregados ou recicláveis, como por exemplo, resíduos de construção, demolição, reparos de pavimentação e também solos de terraplanagem e resíduos com componentes cerâmicos, argamassa e concreto;

Classe B - são resíduos que podem ser reciclados para outra finalidade, como por exemplo, plásticos, papelão, metais, vidros, entre outros;

Classe C - são resíduos que ainda não possuem método de reciclagem, por falta de tecnologias ou motivos econômicos, como por exemplo o gesso;

Classe D - são resíduos que são perigosos no processo de construção por conter substâncias prejudiciais à saúde, como por exemplo, tintas, óleos, ou telhas e outros objetos que contenham amianto ou outros materiais nocivos à saúde.

De acordo com a ABNT NBR 15112 (2004), para a classe A os resíduos deverão ser reciclados, reutilizados ou depositados em aterros de materiais de construção civil. As áreas de transbordo e triagem de resíduos da construção civil e resíduos volumosos (ATT) são locais específicos para triagem, armazenagem temporária, transformação e entrega do resíduo de construção e demolição ao destino adequado ao meio ambiente e a saúde pública (ABNT NBR 15112, 2004). As ATT devem possuir controle sobre os antecedentes, quantidade e capacidade dos resíduos de construção e demolição que são recebidos. A classificação do RCD deve determinar qual processo de reciclagem será efetuado e posteriormente o local que o resíduo de construção poderá ser reutilizado (ABNT NBR 15112, 2004).

2.2 AGREGADO RECICLADO

O agregado reciclado é o material derivado do processo de reciclagem do RCD. Após esse processo, o agregado perde a denominação de entulho e pode voltar a ser utilizado no mesmo processo que o gerou, ou seja, em obras de construção civil (CARNEIRO et al.,2001).

As características físicas do agregado reciclado são muito diferentes dos agregados naturais. Por exemplo, sua porosidade é alta, o que resulta em altas porcentagens de absorção de água (ZORDAN, 2003). Apesar disso, na sua composição existem partículas de cimento e cal que estão disponíveis para novas reações e podem trazer características que aumentem significativamente o potencial de sua utilização (PINTO, 1999).

O agregado reciclado pode ser dividido em dois grupos, segundo a classificação da ABNT NBR 15115 (2004): os agregados reciclados de concreto (ARC) são aqueles obtidos do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, sendo sua fração gráuda de, no mínimo, 90% em massa de material cimentício e rochoso. Os agregados reciclados mistos (ARM) são também obtidos do beneficiamento de resíduo de classe A, mas são compostos na sua fração gráuda de menos de 90% em massa dos fragmentos à base de cimento e rochas.

Para a obtenção de um material que apresente boa trabalhabilidade e permita a realização de ensaios de laboratório para utilização em obras de pavimentação, é fundamental a composição das misturas nas faixas granulométricas definidas pela ABNT NBR 15115 (2004). Os requisitos específicos que o agregado reciclado deve apresentar dependendo do tipo de emprego na execução de camadas de pavimentos estão ilustrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Requisitos específicos para agregado reciclado destinado a pavimentação.

Propriedades	CBR (%)	Expansibilidade (%)	Energia de Compactação
Material para execução de reforço do subleito	≥ 12	$\leq 1,0$	Normal
Material para execução de revestimento primário e sub-base	≥ 20	$\leq 1,0$	Intermediária
Material para execução de base de pavimento	≥ 60	$\leq 0,5$	Intermediária ou Modificada

Fonte: NBR 15115, ABNT 2004 (Adaptado)

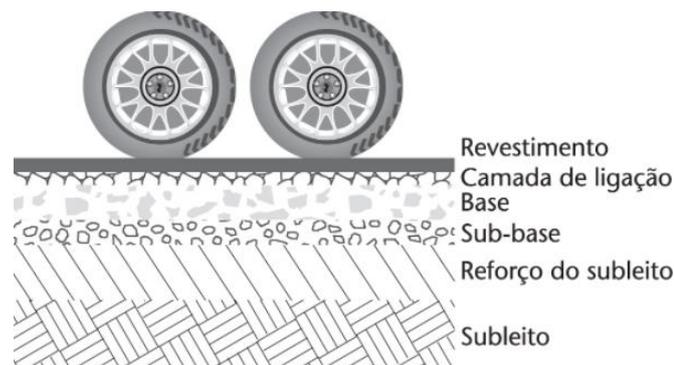
2.3 PAVIMENTOS

Pavimentos são estruturas construídas sobre terraplenagem, com objetivo de resistir e distribuir os esforços verticais advindos do tráfego, além de garantir conforto e segurança ao utilizador. Essa estrutura possui diversas camadas de espessuras finitas que se encontram assentadas sobre o subleito, o qual é o terreno de fundação do pavimento (SENÇO, 1997).

As camadas encontradas na estrutura do pavimento têm o objetivo de proporcionar ao tráfego condições adequadas para transitar de forma segura e confortável em qualquer condição climática. O pavimento pode possuir camadas de revestimento, base, sub base, e reforço do subleito, porém somente as camadas de base e subleito são obrigatórias (BALBO, 2007).

O tráfego e o ambiente aplicam cargas sobre o pavimento que geram um determinado estado de tensões em toda a estrutura, sendo que o comportamento da estrutura depende do comportamento mecânico e interação das camadas existentes. As cargas são transmitidas ao subleito com intensidade menor, ocasionando uma menor deformação ou ruptura da fundação da estrutura do pavimento (BALBO, 2007). Na Figura 1 encontra-se uma representação genérica de todas as camadas que a estrutura pode possuir.

Figura 1 - Camadas genéricas de um pavimento.



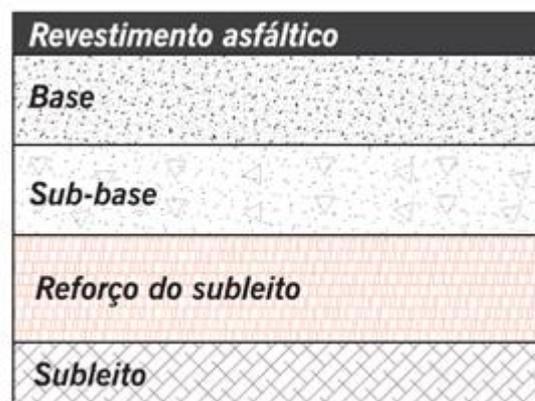
Fonte: BALBO (2007).

Segundo o manual do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2006), os pavimentos classificam-se normalmente em três tipos, flexíveis, rígidos e semirrígidos, diferenciando-se pela forma com que as cargas são distribuídas sob o subleito e os materiais empregados na sua composição (DNIT, 2006).

2.3.1 Pavimentos Flexíveis

A estrutura de um pavimento flexível com revestimento superficial asfáltico é composta por base, sub-base e reforço do subleito, sendo esses elementos constituídos por materiais granulares, solos ou misturas de solos. Esses materiais devem apresentar algumas características como, boa resistência, pouca deformidade e possuir permeabilidade que apresente compatibilidade com sua função na estrutura (BERNUCCI et al., 2008). A Figura 2 apresenta um esquema de um pavimento flexível e suas camadas.

Figura 2 - Representação pavimento-tipo flexível.



Fonte: BERNUCCI et al. (2006).

O revestimento é a camada que resiste a maior parte das ações do tráfego, transmitindo os esforços para as camadas inferiores e impermeabilizando o pavimento (GRANICH, 2010). A base é a camada localizada imediatamente abaixo do revestimento do pavimento, sendo considerada a camada mais importante da estrutura do pavimento, responsável pelo suporte estrutural, dissipando as cargas oriundas do tráfego para as próximas camadas. Caso a camada base não atenda às diretrizes previstas nas Normas Técnicas e não apresente boa execução, e consequente boa qualidade, é provável que aconteçam danos estruturais ao pavimento (SENÇO, 2007).

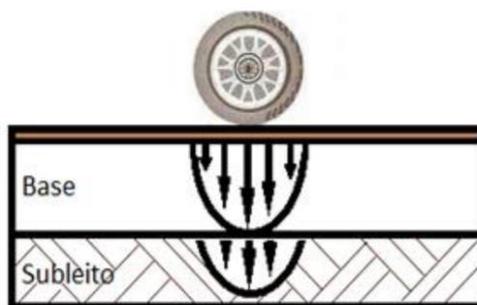
Sub-base é uma camada complementar à base quando não for viável, economicamente ou tecnicamente, construir a base sobre a regularização ou reforço do subleito. Conforme a regra geral, o material constituinte da sub-base deverá apresentar qualidade superior à do material de reforço e, por sua vez, o material da base deve apresentar características técnicas melhores que o material da sub-base (BALBO, 2007).

Conforme DNIT (2010), a camada de reforço do subleito é destinada a minimizar a espessura da camada de sub-base quando, porventura, a camada de subleito possuir baixa capacidade de suporte. Devido à sua nomenclatura, SENÇO (2007) comenta que esta camada é, às vezes, associada à fundação do pavimento. No entanto, reitera que esta camada é parte constituinte do pavimento, sendo um complemento à camada de sub-base, como forma de distribuir e resistir aos esforços decorrentes do tráfego.

No pavimento flexível ocorre a absorção e dissipação de esforços nas camadas, possibilitando, portanto, encontrar tensões verticais em camadas inferiores, sendo comum utilizar material asfáltico em sua camada de revestimento, possibilitando valores de resistência variados de acordo com sua espessura (ROSSI, 2017).

Os pavimentos flexíveis geram um campo de tensões concentrados logo abaixo do ponto em que a carga foi aplicada em razão da rigidez do revestimento, comparado às demais camadas, não sendo tão elevada como em pavimentos rígidos. As deformações até certo ponto, não levam ao seu rompimento. São dimensionados normalmente a tração na flexão e compressão (BALBO, 2007). A Figura 3 abaixo, ilustra o comportamento mecânico do pavimento flexível.

Figura 3 – Comportamento mecânico de um pavimento flexível.

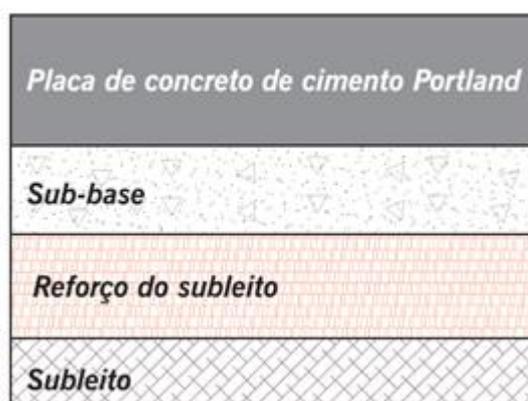


Fonte: BALBO (2007).

2.3.2 Pavimentos Rígidos

O pavimento rígido é aquele em que seu revestimento possui rigidez alta quando comparado às camadas abaixo dele, ou seja, devido a sua elevada rigidez o revestimento suporta e absorve a maior parte às tensões aplicadas a ele através do tráfego e meio ambiente (DNIT, 2006). Seu revestimento é geralmente composto por materiais com resistências elevadas, como o cimento Portland, garantindo que o pavimento resista a deformações acentuadas, ou seja, com tráfego intenso e pesado (RODRIGUES, 2011). A Figura 4 apresenta a divisão da estrutura do pavimento rígido.

Figura 4 - Representação do pavimento-tipo rígido.

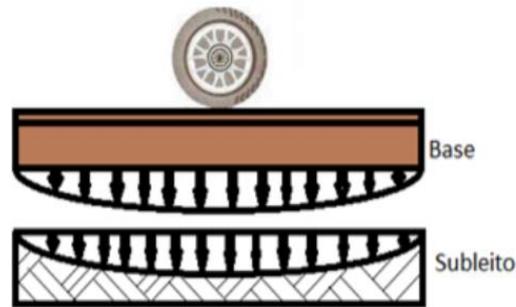


Fonte: BERNUCCI et al. (2006).

Pavimentos rígidos possuem baixa resistência à flexão e não suportam grandes deformações, ocasionando rompimento da estrutura. Devido a rigidez do material utilizado a distribuição de cargas ocasionadas pelo tráfego ocorre de forma ampla nas camadas superiores quando comparados aos pavimentos flexíveis, nesse caso o subleito recebe uma proporção

menor de carga. Sua transmissão de esforços para camadas inferiores está diretamente ligada à rigidez de seu revestimento (SENÇO, 1997). Por esse motivo, diferenças pequenas de capacidade de carga do subleito influenciam pouco na resistência estrutural do pavimento (YODER E WITCZAK, 1975). A Figura 5 ilustra o comportamento mecânico do pavimento rígido.

Figura 5 – Comportamento mecânico de um pavimento rígido.



Fonte: BALBO (2007).

2.3.3 Pavimentos Semirrígidos

São compostos por material aglutinante com características cimentícias que possuem camadas estabilizadas quimicamente (SILVA, 2020). Os pavimentos semirrígidos caracterizam-se por uma base cimentada, como por exemplo, por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica, possuindo uma maior deformabilidade que o rígido e menor que o flexível. Suas camadas são: Revestimento asfáltico, base cimentada, sub-base granular, reforço do subleito e subleito (DER-PR, 2008).

2.4 MATERIAIS UTILIZADOS EM CAMADAS DE BASE, SUB-BASE E REFORÇO DO SUBLEITO

Os pavimentos flexíveis com revestimento superficial asfáltico possuem uma estrutura composta por base, sub-base e reforço do subleito, que apresentam em sua composição normalmente materiais granulares, solos ou misturas de solos. O material a ser utilizado deve apresentar pouca deformação, boa resistência e permeabilidade compatível com a sua função. Dependendo do volume de tráfego, da capacidade de suporte do subleito, espessura ou rigidez das camadas, uma ou mais camadas podem ser retiradas (BERNUCCI et al., 2008).

Os materiais granulares são os mais difundidos para utilização na pavimentação por possuir características como baixa coesão, e não resistir a esforços de tração, trabalhando normalmente na compressão. Já os solos, são materiais coesivos e resistem a esforços de compressão e também a tração, devido a coesão das partículas finas que o compõem. Dentro os materiais citados, os mais empregados são: brita graduada simples, macadame hidráulico, macadame seco, solo natural, solo agregado e solo melhorado com cimento ou cal, entre outros (BERNUCCI et al., 2008).

Os materiais utilizados em camadas de base e sub-base podem ser divididos em duas classes: granulares, como a brita graduada e a brita corrida, e os estabilizados, como os solos cimento, solo cal, entre outros (DNIT, 2006). A Figura 6 apresenta a divisão desses materiais.

Figura 6 – Classificação das bases e sub-bases



Fonte: DNIT (2006).

Os agregados reciclados podem ser utilizados em camadas de base, sub-base e reforço do subleito em vias de baixo tráfego desde que atendam suas especificações, conforme a NBR 15115 (ABNT, 2004). Segundo Barreto (2020), a maioria das pesquisas relacionadas ao uso do RCD em obras de pavimentação avalia o seu uso em todas as camadas do pavimento, incluindo em camadas de base que requerem materiais com propriedades mecânicas superiores. O uso do RCD como material em camadas de pavimento de rodovias submetidas a um baixo volume de tráfego é uma das alternativas mais benéficas. No entanto, esses resíduos também podem ser utilizados em rodovias de médio e alto volume de tráfego, dependendo de suas propriedades e da análise do seu comportamento mecânico.

Os materiais provenientes do RCD dependendo da sua origem apresentam características que dificultam sua valorização. No caso do RCD com origem em pavimentos

rodoviários são vários os materiais suscetíveis de reciclagem. As camadas de pavimentos constituídas por solos selecionados, materiais granulares ou materiais estabilizados com cimento por exemplo, são suscetíveis de reciclagem, sendo o tipo de reutilização muito dependente das características que os materiais a reciclar apresentarem. Assim, dentre os vários tipos de RCD disponíveis, devem ser escolhidos os que permitam obter materiais e camadas construídas com as características desejadas (FERNANDES et al., 2013).

Existem materiais que não são provenientes de pavimentos rodoviários, os quais podem também ser utilizados na construção de pavimentos. Os RCD provenientes da demolição e reabilitação de edifícios que têm maior potencial para aplicação em pavimentos rodoviários são constituídos por concreto, argamassa, rocha e material cerâmico. Uma característica específica dos RCD não provenientes de pavimentos é a sua qualidade. Os materiais provenientes de misturas betuminosas, por exemplo, já foram eventualmente sujeitos a um processo prévio de seleção que possibilitou a sua aplicação em misturas betuminosas. Já em resíduos provenientes de outras origens, por haver maior possibilidade de conterem materiais indesejáveis, existe uma maior necessidade de conhecer e caracterizar todos os seus constituintes, de modo a evitar a utilização de materiais com características físicas, mecânicas e químicas totalmente diferentes e, portanto, com maior potencial de insucesso (FERNANDES et al., 2013).

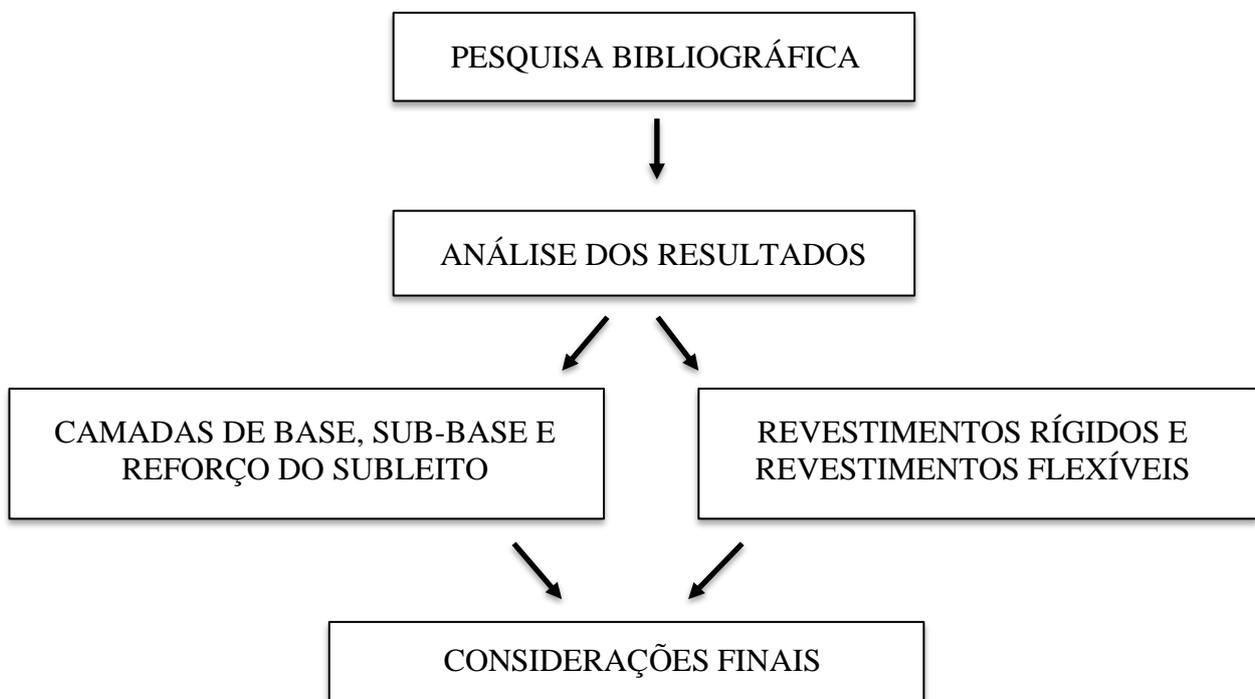
CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A revisão bibliográfica busca explicar e discutir um tema utilizando diversas referências encontradas em livros, revistas e periódicos, buscando conhecer e analisar conteúdos científicos sobre determinado tema (BANDEIRA, 2018).

O trabalho teve como início pesquisas bibliográficas referentes ao assunto, através de artigos, trabalhos de conclusão de curso, capítulos de livros, teses de mestrado e normas técnicas. Em seguida, através dos resultados apresentados pelos autores estudados, foi desenvolvido os resultados e discussões. Por fim, foram feitas as considerações, de acordo com os objetivos da pesquisa. A Figura 7 ilustra o delineamento da pesquisa.

Figura 7 – Delineamento da pesquisa



Fonte: Autores (2021).

Após a pesquisa bibliográfica, foram analisados resultados do uso de agregados reciclados em camadas de base, sub-base, reforço do subleito e revestimento flexível e rígido. Os resultados obtidos foram comparados com as normas regulamentadoras e especificações do DNIT. Por fim, foram feitas as considerações finais obtendo resultados sobre a viabilidade do uso destes resíduos em pavimentação.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AGREGADOS RECICLADOS EM CAMADAS DE BASE, SUB-BASE E REFORÇO DO SUBLEITO

Neste tópico serão apresentadas algumas pesquisas relacionadas a ensaios de adição de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição nas camadas de base, sub-base e reforço do subleito.

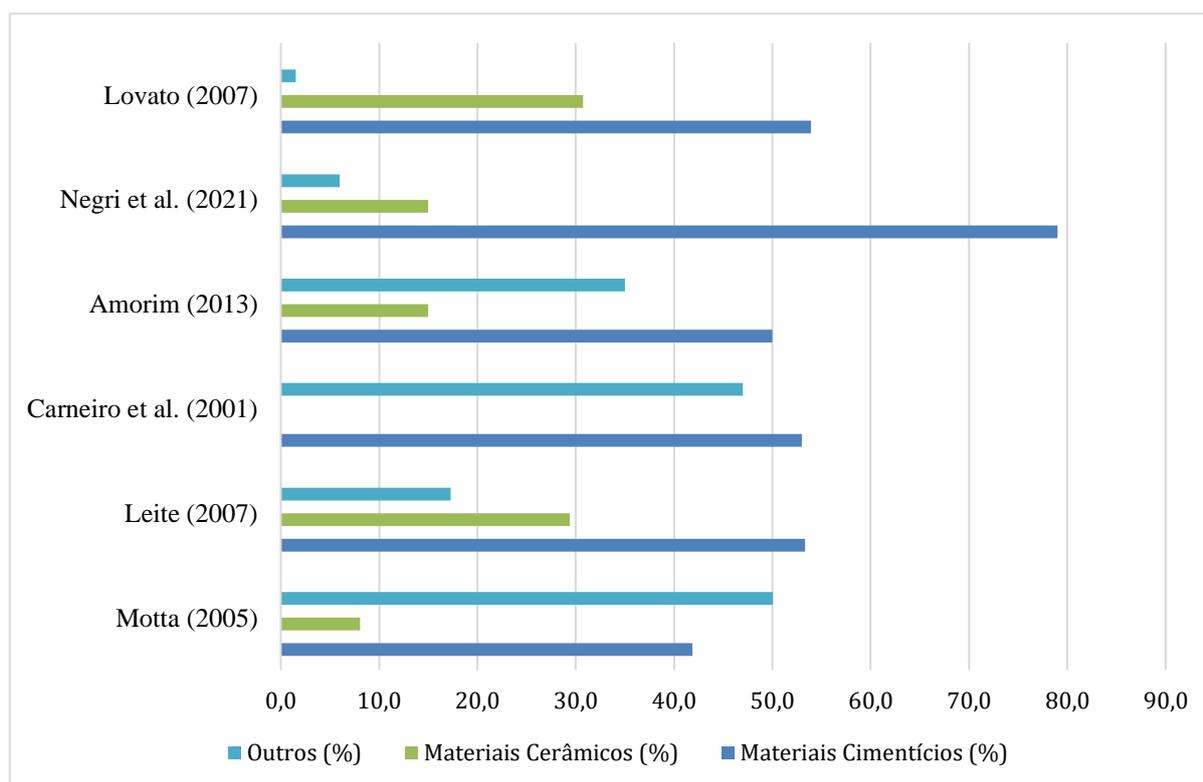
4.1.1 Materiais constituintes do RCD

A composição do RCD varia de um local para outro, sendo essa variação dependente das características específicas de cada região, da cultura, como técnicas construtivas e matérias primas disponíveis (BATISTA et al., 2018). Segundo Grubba (2009), no Brasil a maior parte desses resíduos é composto por materiais inertes e recicláveis, como restos de argamassas, concretos, agregados pétreos e materiais cerâmicos.

Para utilização dos agregados reciclados provenientes do RCD em obras de pavimentação é essencial conhecer as características do material, pois mudanças em sua composição (percentual de concreto e/ou de cerâmica) impactam fortemente em características e propriedades do material (ORIOLI et al., 2018).

Na Figura 8 estão apresentados alguns resultados que avaliam a composição do agregado reciclado. É possível classifica-lo de acordo com sua composição em ARM ou ARC seguindo os parâmetros estabelecidos pela da ABNT NBR 15115 (2004). Os agregados reciclados apresentados, possuem classificação ARM, sendo a maior porcentagem dos RCD estudados pelos autores compostos por materiais cimentícios (concreto/argamassa), com valores entre 41,87% e 79% da massa total.

Figura 8 – Materiais constituintes do RCD em algumas literaturas.



Fonte: Autores.

A partir de análises é possível observar que os autores encontraram valores próximos de porcentagem em massa de materiais cimentícios nas amostras de RCD estudadas, em torno de 50%, em contrapartida houve uma variação de 48,78% na porcentagem de materiais cerâmicos encontrados nessas amostras (LEITE, 2007, CARNEIRO et al., 2011, AMORIM, 2013 e LOVATO, 2007).

Motta (2005) e Negri et al. (2021) a partir de suas análises encontraram valores diferentes dos outros autores, sendo o menor valor encontrado por Motta (2005) de 41,87% e Negri et al. (2021) de 79%. Ainda sobre esses dois estudos, a variação na porcentagem de materiais cerâmicos foi 53,86% de uma pesquisa para outra. A diferença entre os valores encontrados é alta devido ao material ser coletado em diferentes locais e diferentes circunstâncias, resultando em uma maior variação na sua composição.

Segundo a ABNT NBR 15115 (2004), é necessário um valor menor que 90% de material cimentício e rochoso em sua composição para que o agregado reciclado seja classificado como ARM, e maior que 90% para que possua classificação de ARC. No caso dos agregados

reciclados apresentados todos os autores obtiveram amostras teor menor que 90% de cimento e material rochoso, portanto pode ser classificado como ARM.

Levantamentos teóricos de diversos trabalhos mostram que a composição do agregado reciclado influencia diretamente nas propriedades mecânicas e físicas, mas em sua grande maioria, os trabalhos não analisam de forma comparativa. Esta generalização dificulta o comparativo com pesquisas anteriores de forma a construir um conhecimento mais aprofundado sobre quais os benefícios de se utilizar o ARM ou o ARC na pavimentação (KRUGER, 2021).

4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Os ensaios de caracterização mecânica são muito importantes para conhecer as características dos materiais. A partir de ensaios mecânicos é possível estimar parâmetros como o Índice Suporte Califórnia (ISC), Módulo de Resiliência (MR), entre outros. Neste tópico serão apresentados alguns ensaios utilizados para avaliar o comportamento do RCD para aplicação em pavimentação.

4.2.1 Índice de Suporte Califórnia

O Índice Suporte Califórnia (ISC) consiste em um método para avaliar a resistência mecânica do solo à penetração de um cilindro padronizado com relação a penetração em uma brita padrão, ou seja, compara as propriedades mecânicas deste solo a uma brita padrão. Os resultados são apresentados de maneira percentual e o valor de resistência mecânica obtido é fundamental para a construção de pavimentações principalmente em estradas e rodovias (DNIT IPR-719, 2006). Os valores mínimos de ISC e expansão em cada tipo de camada de acordo com a ABNT NBR 15115 (2004) seguem apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Limites de ISC e expansão especificados pela ABNT NBR 15115 (2004).

Tipo de camada	ISC (%)	Expansão (%)	Energia de Compactação
Reforço do subleito	$\geq 12,0$	$\leq 1,0$	Normal ou superior
Sub-base	$\geq 20,0$	$\leq 1,0$	Intermediária
Base	$\geq 60,0$	$\leq 0,5$	Intermediária

Fonte: ABNT NBR 15115, 2004 (Adaptado).

Alguns resultados da literatura acerca da avaliação das propriedades mecânicas de RCD seguem apresentados na Tabela 3. É possível observar que os valores se encontram entre 63% e 128% para agregados reciclados quando utilizada a energia de compactação intermediária, 117% a 172% quando utilizada a energia modificada e para energia normal o valor de ISC está

no intervalo de 32,3% a 83%. O valor de expansão foi de aproximadamente 0% para todas as amostras.

Tabela 3 – Resultados de ISC e expansão para diferentes pesquisas.

Autores	Energia de Compactação	Expansão	ISC (Valores médios)
Motta (2005)	Intermediária	0,00%	76,0% a 128,0%
Leite (2007)	Intermediária	0,00%	73,0%
	Modificada		117,0%
Delongui (2012)	Intermediária	-	105,0%
	Normal		83,0%
Amorim (2013)	Intermediária	0,30%	80,5%
	Modificada	0,20%	85,5%
Grubba (2009)	Intermediária	0,00%	125,0%
	Modificada		172,0%
Hortegal et al. (2009)	Intermediária	0,00%	63,0% (50,0% RCD)
			94,0% (70,0% RCD)
Meireles (2021)	Normal	0,02%	32,3%

Fonte: Autores.

Para energia de compactação intermediária o maior valor obtido de ISC foi na pesquisa de Motta (2005), onde foi obtido um valor de 128%. Considerando o menor valor encontrado na pesquisa de Hortegal et al. (2009) de 63%, obteve-se uma variação de 49,22% quando comparado o maior e menor valor de ISC encontrados. As pesquisas apresentam resultados satisfatórios para todas as aplicações, inclusive para base de pavimentos, que é uma estrutura que demanda mais capacidade de suporte ou resistência mecânica (MOTTA, 2005, LEITE, 2007, DELONGUI, 2012, HORTEGAL et al., 2009, AMORIM, 2013 e GRUBBA, 2009).

Analisando as amostras compactadas com energia modificada foi observada uma variação de 49,7% do maior para o menor valor. Os resultados mostram que as pesquisas de Leite (2007), Amorim (2013) e Grubba (2009), os quais utilizaram energia de compactação modificada em seus experimentos, possuem resultados satisfatórios para aplicação na base, sub-base e reforço do subleito de pavimentos, enquadrando tanto os valores de ISC quanto de expansão nos limites estabelecidos pela ABNT NBR 15115 (2004).

Os resultados obtidos para energia de compactação normal tiveram uma variação de 38,91% do maior para o menor valor. A pesquisa de Meireles et al. (2013) apresentou um ISC de 32,30%, sendo um valor que segundo os limites estabelecidos pela ABNT NBR 15115 (2004) pode ser utilizado somente em camadas de sub-base e reforço do subleito, ao contrário

da pesquisa de Delongui (2012) onde foi encontrado um valor de 83%, podendo ser utilizado tanto na base de pavimentos como nas camadas de sub-base e reforço do subleito.

Os resultados obtidos pelos autores mostram que a utilização do agregado reciclado em camadas de base, sub-base e reforço do subleito é uma alternativa viável, sendo satisfatórios os valores encontrados e atendendo a ABNT NBR 15115 (2004), que estabelece valores mínimos para ISC para uso do agregado reciclado em pavimentação. A partir dos resultados dos ensaios de ISC foi possível observar a influência da energia de compactação nos resultados, aumentando consideravelmente o ISC quando aumentada a energia.

4.2.2 Módulo de Resiliência

Os ensaios de Módulo de Resiliência (MR) têm como objetivo determinar o comportamento elástico de uma estrutura do pavimento. Como na ABNT NBR 15115 (2004) não existe valores que relacionam ao MR de agregados reciclados, os resultados podem ser comparados com os encontrados na pesquisa IP-08 da PMSP (2002), que estima que para camadas de base executada em materiais granulares, os valores devem se enquadrar entre 100 MPa e 500 MPa.

Na Tabela 4 estão apresentados alguns resultados no que se refere a avaliação do Módulo de Resiliência do RCD. É possível observar que os agregados foram analisados de acordo com a energia de compactação empregada e sua composição. Os ARM analisados nas pesquisas obtiveram uma variação de MR de 100 MPa a 2000 MPa, já os ARC obtiveram menor variação, sendo de 200 MPa a 378 MPa.

Tabela 4 – Valores de MR encontrados para diferentes tipos de agregados reciclados.

Autores	Energia de Compactação	Composição do Agregado	MR (MPa)
Motta (2005)	Intermediária	ARM	100 a 2000
Leite (2007)	Intermediária	ARM	270
	Modificada		320
Delongui (2012)	Intermediária	ARM	270
	Modificada		320
Fernandes (2004)	Intermediária	ARM	242
	Modificada		276
Grubba (2009)	Intermediária	ARC	200
	Modificada		200
Bennert et. al (2000)	Normal	ARC	378
Nataatmadja e Tan (2001)	Modificada	ARC	337

Fonte: Autores.

Para os ARM, considerando uma energia de compactação intermediária, os autores Leite (2007), Delongui (2012) e Fernandes (2004) encontraram valores de MR bem próximos, com uma variação de apenas 11,57% do menor para o maior valor. Na pesquisa de Leite (2007) e Fernandes (2004) os ARM também foram compactados utilizando a energia modificada e obtiveram valores de MR maiores quando comparados aos obtidos na energia intermediária, com uma variação de 15,94% do menor valor encontrado para o maior. O MR obtido na pesquisa de Motta (2005), compactado na energia intermediária obteve grande variação, com valores entre 100 MPa e 2000 MPa, sendo essa variação justificada pelo fato de incorporar nas misturas 4% de cimento Portland em alguns corpos-de-prova e 4% de cal nos outros fazendo com que a mistura ficasse mais rígida, aumentando de forma significativa a resistência mecânica. Os valores encontrados para ARM nas pesquisas apresentadas foram satisfatórios, com resultados dentro do mínimo estabelecido pelo IP-08 da PMSP (2002), podendo ser utilizado em pavimentação.

Analisando as pesquisas realizadas por Grubba (2009) e Nataatmadja e Tan (2001) onde foi utilizada energia de compactação modificada para ARC, a variação de MR foi de 68,5%. Os autores Delongui (2012) e Bennert et al. (2000) utilizaram energia de compactação normal, porém o utilizaram respectivamente, ARM e ARC, obtendo resultados próximos, na faixa de 300 MPa.

Os módulos de resiliência com os valores mais elevados foram obtidos para agregados reciclados de concreto (ARC), de acordo com a IP-08 da PMSP (2002) a estimativa deve apresentar-se entre 100 MPa e 500 MPa. Com resultados obtidos nas pesquisas é possível verificar que houve um aumento no valor de módulo de resiliência em função do acréscimo de energia aplicada. Assim, conforme os resultados obtidos nas pesquisas, o agregado reciclado pode ser empregado em camadas de base, sub-base e reforço do subleito.

4.3 AGREGADOS RECICLADOS EM REVESTIMENTO FLEXÍVEL

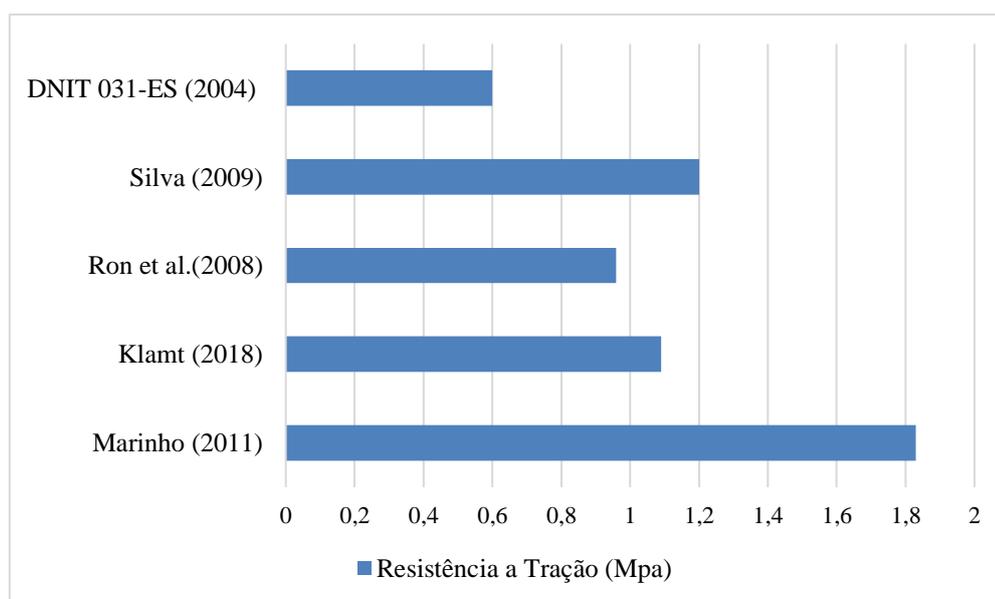
Revestimento ou capa de rolamento, é a camada que recebe de forma direta a ação das cargas efetuadas pelo tráfego, possui também objetivo de efetuar conforto e segurança devido a ser a superfície de rolagem (SENÇO, 1997). O revestimento flexível pode ser do tipo quente, o qual se mistura os agregados e ligantes a altas temperaturas, ou tipo frio, em que se misturam os materiais em temperaturas menores. É composto por materiais ligantes como asfalto e agregados, que em um traço correto resultam em uma camada com resistência ao tráfego e clima (SANTANA, 1993).

4.3.1 Resistência a Tração

O ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) é amplamente utilizado para determinar algumas propriedades do material como módulo de elasticidade, tensão na ruptura, entre outros. Seus valores são obtidos devido a uma pressão aplicada sobre o corpo de prova que provoca deformações, valores altos de RT determinam maior resistência na ruptura. Utilizando o método de ensaio adequado às normas, o DNIT 031-ES (2004) determina um valor mínimo de RT de 0,65 MPa para camadas de rolamento.

Estudos acerca de revestimentos flexíveis utilizando agregados reciclados em sua mistura ainda são escassos. Na Figura 9 encontram-se valores de RT para diferentes trabalhos destacando que os valores variam entre 1,83 MPa e 0,96 MPa, variando 42,45% entre o maior e menor valor.

Figura 9 – Resistência à tração (RT) para diversos autores.



Fonte: Autores.

O maior valor de resistência à tração foi de 1,83 MPa por Marinho (2011) este valor foi encontrado para um teor de 50% de agregado reciclado, enquanto o menor valor foi de Ron et al. (2008) 0,96 MPa. Os autores associam que a diferença entre os valores que foi de 42,45% ocorre devido à variação da composição do agregado, consequência do agregado reciclado ser coletado em diferentes locais e possuírem diferentes quantidades de materiais cimentícios.

Observa-se que os valores se encontram acima da norma DNIT 031-ES (2004), que determina valor mínimo de 0,65 MPa, e, portanto, todos os autores satisfazem a condição de

utilização do agregado reciclado para pavimentos flexíveis, comprovando a eficácia da utilização de agregados juntamente ao revestimento.

4.3.2 Módulo de Resiliência

Segundo Bernucci et al. (2006) os valores aceitáveis de MR para revestimentos flexíveis variam entre 2000 e 8000 MPa, considerando que quanto maior o valor a consistência da mistura terá maior dureza. Na Tabela 5 encontram-se diferentes resultados para ensaios de MR. Destaca-se que o maior valor foi encontrado por Silva (2009) de 7333 MPa e o menor valor foi 2931 MPa encontrado por Ron et al., (2008), a variação de valores é de 40,58%, observa-se também que os valores foram encontrados a partir de diferentes misturas e métodos, e a variação entre valores pode ser atribuída a esse fator.

Tabela 5 – Valores de Módulo de Resiliência para diversos autores em MPa.

Autores	Módulo de Resiliência (MPa)	Observações
Ron et al. (2008)	2931	-
Silva (2009)	7223	Mistura com CP 30/45 Faixa B
Paranavithana (2006)	4445	Mistura com ARC 120 golpes
Marinho (2011)	5697	Mistura com 50% ARC

Fonte: Autores.

Para os estudos analisados os menores valores são de Paranavithana (2006) e Ron et al., (2008), e o maior valor é de Silva (2009), a diferença entre os autores se destaca por se tratarem de misturas com concreto betuminoso asfáltico diferentes que resultam em valores de MR variáveis. Para as amostras de Silva (2009) é possível inferir que seu concreto se trata de uma mistura com maior dureza e sua aplicação pode ser em diversas camadas não apenas em revestimento devido ao seu alto valor de MR a mistura seria aprovada como utilização em bases, sub-bases e reforço do subleito.

Todos autores citados possuem valores satisfatórios para utilização como agregado em revestimentos flexíveis, pois seus valores estão entre 2000 e 8000 MPa conforme parâmetro considerado por Bernucci et al. (2006). Comprovando, portanto, que apesar de os valores terem alta variação entre eles todos seriam aptos a serem utilizados como agregados graúdos ou miúdos nas misturas de revestimentos flexíveis.

4.4 AGREGADOS RECICLADOS EM REVESTIMENTO RÍGIDO

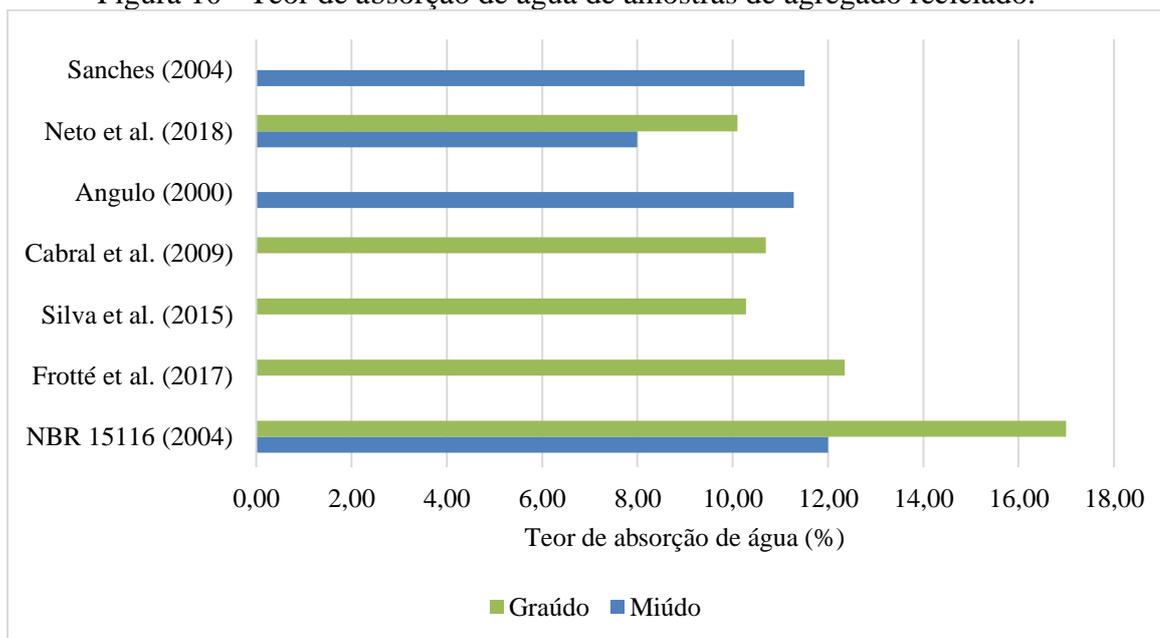
Revestimentos rígidos são revestimentos com maior capacidade de resistência a esforços horizontais e verticais, sua composição é feita através da mistura de agregados, cimento, areia e água, podendo ou não colocar ferragens. Esse tipo de pavimento pode sofrer ruptura quando está sob esforços de tração e flexão (SILVA, 2019). Neste tópico serão apresentados alguns estudos acerca das características físicas e características mecânicas do agregado aplicado no revestimento rígido.

4.4.1 Teor de Absorção de Água

Para melhor performance do RCD é necessário estudar sua porosidade, uma vez que seu teor de absorção de água é maior em comparação ao agregado comercial, ou seja, a porosidade do concreto com agregado reciclado sempre será maior que o agregado comum. Após descoberto tais características é possível analisar a relação água/cimento a ser utilizada na mistura além de valores de resistência à compressão de acordo com a porosidade encontrada (ANGULO et al., 2011).

Diversos autores possuem estudos sobre teor de absorção de água do agregado reciclado, como apresentado na Figura 10. Para agregados graúdos os resultados variam entre 12,35% e 10,10% enquanto para agregados miúdos os valores se alteram entre 11,50% e 8,0%. A ABNT NBR 15116 (2004) define valores para o teor de absorção de água máximo, para Agregados Reciclados Mistos (ARM) graúdos o teor deverá ser 12% enquanto para miúdos valores menores ou iguais a 17%.

Figura 10 - Teor de absorção de água de amostras de agregado reciclado.



Fonte: Autores.

Para agregados miúdos o maior valor obtido foi de 11,50% encontrado por Sanches (2004) observa-se uma diferença de 3,5% entre o maior e menor valor encontrado que foi de 8,0% (Neto et al., 2018). Considerando teor máximo permitido pela ABNT NBR 15116 (2004) de 12% analisa-se que os valores encontrados são satisfatórios para utilização como agregados em revestimentos rígidos.

Analisando as amostras de agregados graúdos observa-se o maior valor encontrado de 12,35% (Frotté et al., 2017), o menor valor encontrado foi de 10,10% do estudo de Neto et al. (2018) e a variação entre os valores é de 2,25%. Os autores associam seus resultados à maior porosidade do agregado reciclado em comparação ao comercial além da variação do material existente em cada amostra. Além disso é possível observar que todos os valores se encontram abaixo do valor de referência máximo de 17% (ABNT NBR 15116, 2004).

4.4.2 Resistência a compressão

Para analisar parâmetros físicos do agregado reciclado é necessário a realização do ensaio de resistência à compressão simples, através desse ensaio é possível determinar o comportamento e capacidade de resistência à compressão em função dos dias de cura da amostra. Os valores de durabilidade e resistência variam de acordo com o traço escolhido para o projeto do pavimento, além disso é fundamental o estudo de algumas propriedades como relação água/cimento, método de cura, aditivos, tipo de cimento utilizado no traço, entre outros

(CURVO, 2014). Na Tabela 6 estão descritos valores máximos de resistência característica à compressão para peças de concreto com 28 dias de cura utilizados em pavimentação de acordo com a ABNT NBR 9781 (2013).

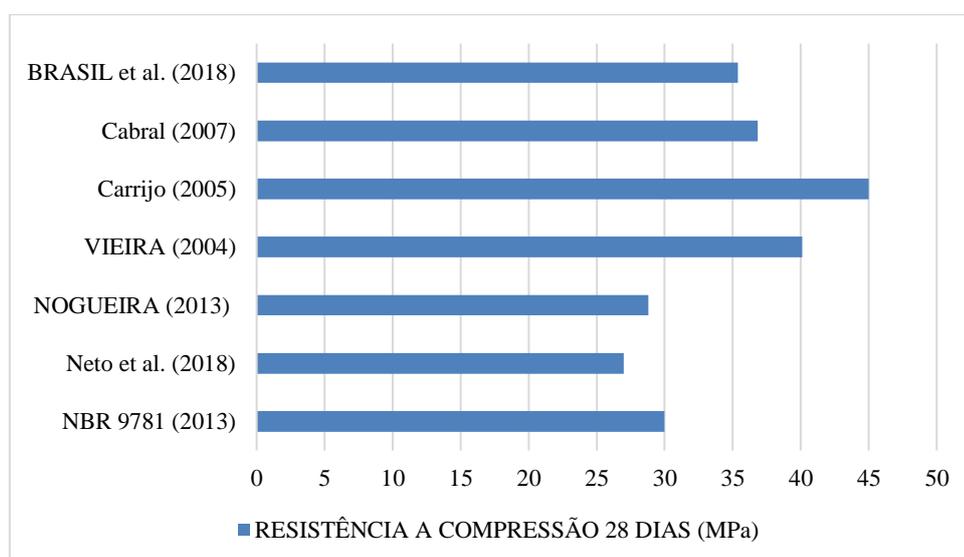
Tabela 6 - Resistência característica à compressão para diferentes tipos de tráfego.

Solicitação	Resistência característica à compressão mínima (MPa)
Veículo leves, comerciais e tráfego de pedestres	35
Veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados	50

Fonte: NBR 9781 ABNT, 2013 (Adaptado).

O ensaio de compressão para amostras com a utilização de agregado reciclado como parte da mistura foi analisado por diversos autores, na Figura 11 encontram-se valores de resistências para amostras com 28 dias de cura. Os valores encontrados variam entre 45,0 MPa e 27,0 MPa, com variação de 60% entre o maior e menor valor.

Figura 11 - Resistência à compressão para amostras com 28 dias de cura.



Fonte: Autores.

Os valores encontrados variaram entre 45 MPa encontrado por Carrizo (2005) e 27 MPa por Neto et al. (2018), com variações de 80% entre elas. Os autores associam esses resultados aos diferentes materiais que estão na composição de seu agregado reciclado além de também utilizarem cimentos diferentes em duas misturas. Ademais é possível observar que os autores Vieira (2004), Carrizo (2005), Cabral (2007) e Brasil et al. (2018) possuem valores adequados

ao mínimo exigido pela norma ABNT NBR 9781 (2013), possibilitando sua utilização para agregado em pavimentos rígidos para veículos leves, comerciais e tráfego de pedestres.

Os autores Neto et al. (2018) e Nogueira (2013) obtiveram resultados abaixo do limite da norma, Nogueira (2013) obteve 28,8 MPa de resistência valor 4% abaixo da ABNT NBR 9781 (2013), o autor relaciona esse valor ao tratamento de lavagem realizado no agregado reciclado, pois devido a porosidade ocorreu grande absorção de água e, portanto, redução da resistência à compressão. Logo, observa-se que a utilização de agregados reciclados em pavimentos rígidos possui resultados satisfatórios desde que seja feito manuseio correto do agregado reciclado antes de acrescentá-lo a mistura.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÃO

O RCD é gerado em obras de construção e demolições diariamente e, devido ao impacto ambiental da sua geração, é necessário criar alternativas para sua reutilização. A partir dos resultados e discussões foi possível concluir que a composição do RCD varia de acordo com o local onde foi estudado, sendo necessário o conhecimento das características da composição do material, pois um maior percentual de materiais cimentícios ou cerâmicos influenciam diretamente nas características mecânicas do material. Todos os estudos apresentados foram obtidos um RCD composto por de materiais cimentícios e materiais cerâmicos em porcentagem menor que 90% de sua composição, portanto classificados como ARM.

Todas as bibliografias estudadas atenderam os requisitos da norma ABNT NBR 15115 (2004) tanto para o índice de suporte Califórnia, quanto para valores de módulo de resiliência, mostrando que o uso dos agregados reciclados provenientes do RCD em camadas de base, sub-base e reforço do subleito obtiveram resultados satisfatórios, se enquadrando dentro dos parâmetros estipulados pelas normas ficando próximos ou até mesmo superiores as misturas com agregados convencionais.

Foi possível observar que o uso de energia modificada de compactação faz com que o material aumente seu desempenho consideravelmente, porém deve-se ter cuidado que com maiores energias de compactação podem ocorrer quebra nos grãos alterando sua granulometria. Como o RCD possui uma grande variação na sua composição deve-se ter cuidado ao utiliza-lo, sendo necessário um estudo prévio de seu comportamento físico e mecânico e principalmente a separação de materiais indesejáveis e dos que possuem baixa resistência que podem afetar no desempenho do pavimento.

Para revestimentos flexíveis é possível analisar os resultados positivos para a utilização de agregado reciclado em sua mistura, as propriedades físicas e mecânicas analisadas pelos autores citados obtiveram valores dentro das normas. Os valores de resistência à tração são maiores que o mínimo imposto por DNIT 031-ES (2004) e os valores de módulo de resiliência ainda possuem valores dentro dos considerados dentro dos valores aceitáveis, comprovando a efetividade da utilização do agregado de concreto na mistura de revestimentos flexíveis.

Em pavimentos rígidos também foi analisada a utilização de agregado reciclado em sua mistura, analisou-se as propriedades mecânicas e físicas de diversos autores com diferentes

ensaios. O teor de absorção de água analisado por diferentes autores se encontra dentro dos valores definidos pela ABNT NBR 15116 (2004) que define os valores máximos para agregados graúdos e agregados miúdos. Para a Resistência à compressão foi analisado os valores encontrados através de diversos estudos e seus resultados foram acima do mínimo definido pela ABNT NBR 9781 (2013) comprovando a efetividade da utilização do agregado reciclado em revestimentos rígidos em vias de veículos leves, comerciais e tráfego de pedestres.

Pode-se concluir então que o agregado reciclado proveniente de resíduos de construção e demolição é uma alternativa interessante para a substituição do agregado natural, pois além de características mecânicas que fundamentam sua utilização, do ponto de vista ecológico e ambiental se torna relevante, uma vez que o material que seria despejado de forma incorreta na natureza, pode ser reaproveitado no próprio setor que os gerou.

REFERÊNCIAS

ABRECON - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. **Manual de aplicação do agregado reciclado: MARE**. 1. ed. BRASIL: ABRECON, 2020. Disponível em: <https://abrecon.org.br/mare/>. Acesso em: 16 jan. 2021.

ÂNGULO, S. C. et al. **Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva do RCD**. Seminário de desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil – IBRACON, São Paulo, 2002. 293-208.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. Dissertação de MSc, USP, São Paulo, SP, Brasil, 2000.

ANGULO, Sérgio C. et al. **Concreto com agregados reciclados**. In: ANGULO, Sérgio C.; FIGUEIREDO, Antônio D. de. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. [S. l.]: IBRACON, 2011. v. 1, cap. 47, p. 1-40.

ARAÚJO, Marcelo Almeida; et. al. **Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto)**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento. Ano 01, Edição 11, Vol. 10, p. 187-196, novembro de 2016. ISSN: 2448-0959.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos. 2007.

BANDEIRA, Roger da Ros. **Utilização de resíduos de construção e demolição em obras de pavimentação: Revisão bibliográfica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI. Ijuí, 2018.

BENNERT, T. J. et al. **Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase applications**. Transportation Research Record. Piscataway: [s/n]. 2000. P. 33-39.

BERNARDES, Alexandre; THOMÉ, Antonio; PRIETTO, Pedro Domingos Marques; ABREU, Águida Gomes. **Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo, RS**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 8, n. 3, p. 65-76, jul./out. 2008.

BERNUCCI, Liedi Bariani; et al. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Programa Asfalto nas Universidades, Petrobras Distribuidora S.A., 2008. 496p.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria; CERATTI, Jorge Augusto; SOARES, Jorge. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2006. 504 p.

BRASIL, Matheus Dutra et al. **Análise da resistência à compressão do concreto com o acréscimo de entulho da construção civil**. X Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas , Rio de Janeiro, p. 1-8, 2018. Disponível em: <http://www.abpe.org.br/trabalhos2018/066.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2021.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. **Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil**. Cerâmica 61. 2015. pag178-189.

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 280 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CABRAL, A. E. B. et al. **Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha**. Cerâmica 55, [S. l.], ano 2009, p. 448-460, 1 jan. 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/DkRynRJfxQDpRK9qpTqfz4S/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 14 out. 2021.

CARNEIRO, A.P.; CASSA, J.C.S.; BRUM, I.A.S. **Reciclagem de Entulho para a Produção de Materiais de Construção. Projeto entulho bom**. EDUFBA; Caixa Econômica Federal. Salvador. 312p. 1ª edição. 2001.

CARNEIRO, A. P.; BURGOS, P. C.; ALBERTE, E.P.V. **Uso do agregado em camadas de base e sub-base de pavimentos**. In: CAIXA ECONÔMICA FEDERAL **Projeto Entulho Bom**. Salvador: EDUFBA, 2001. P. 190-227.

CARRIJO, Priscila Meireles. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 01**, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, 2002.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 307**, de 17 de fevereiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. Brasília, 1986.

CORREA, Marcio Roberto Silva; BUTTLER, Alexandre Marques; RAMALHO, Márcio Antonio. Revista Técnica, nº 152, novembro de 2009.

CURVO, Filipe de Oliveira. **Estudo da viabilidade técnica/econômica da utilização de RCD como agregados aplicados a pavimentos rígidos**. 2014. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro Universitário de Brasília - UNICEUB, 2014. Disponível em: <https://repositorio.uniceub.br/jspui/handle/235/6381>. Acesso em: 3 jun. 2021.

DELONGUI, L., Pinheiro, R. J. B., Pereira, D. S., Piovezan, G. T. A. (2010). Caracterização dos Resíduos da construção civil em Santa Maria (RS) e sua aplicação em pavimentação.

DELONGUI, L. **Caracterização e adequação dos resíduos da construção civil produzidos no município de Santa Maria-RS para aplicação em pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 220. 2012.

DELONGUI, L. **Determinação de parâmetros mecânicos para dimensionamento de pavimentos com resíduos de construção e demolição**. Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia. Porto Alegre, p. 244. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **DNIT 139/2010** – Pavimentação: Sub-base estabilizada granulometricamente – Especificações de Serviço. Espírito Santo, 2010.

Departamento de Estradas e Rodagens – DER. Norma de Pavimentos Flexíveis e Rígidos. 2008.

DIAS, J. F. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas como contribuição para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo.** 2004, 204 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT 031/2004 – ES: pavimentação: concreto asfáltico. Rio de Janeiro, 2004.

DNIT. **Manual de Pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro, 2006.

EVANGELISTA, Patricia Pereira de Abreu; COSTA, Dayana Bastos; ZANTA, Viviana Maria. **Alternativa sustentável para destinação de resíduos de construção classe A: sistemática para reciclagem em canteiro de obras.** Ambiente Construído. Porto Alegre. Vol.10, n.3. 2010. p.23-40.

FERNANDES, C. G. **Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação.** 2004. 109p. Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE_UFRJ). Rio de Janeiro, 2004.

FERNANDES, Gil; CAPITÃO, Silvino; PICADO-SANTOS, Luís. **Utilização de resíduos de construção e demolição em pavimentos rodoviários.** Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2013. 10p.

FILHO, José Moacir de Mendonça; ROCHA, Eider Gomes de Azevedo. **Estudo Comparativo entre Pavimentos Flexível e Rígido na Pavimentação Rodoviária.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 06, Vol. 02, pp. 146-163, Junho de 2018.

FROTA, C. A. da; MENTA, C. de O.; NUNES, F. R. G. **Utilização de entulho reciclado em misturas asfálticas para a região de Manaus-AM.** Reunião de Pavimentação Urbana, Aracaju, 2003. Rio de Janeiro, 2003.

FROTTE, Camila et al. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD.** Revista Materia, Rio de Janeiro, ano 2017, v. 22, n. 2, p. 1-17, 21 set. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170002.0143>. Acesso em: 14 out. 2021.

GENTIL DE AGUIAR, Arielson. **Pavimento sustentável: Análise do uso de agregado reciclado em obras de pavimentação na cidade de Manaus-AM.** Manaus, Uninorte, 2019. 18p.

GRUBBA, D.C.R.P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária.** 139p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2009.

HORTEGAL, M.V.; FERREIRA, T.C.; SANT’ANA, W.C. **Utilização de agregados resíduos sólidos da construção civil para pavimentação em São Luís – MA. Projeto pesquisa em foco.** Universidade Estadual do Maranhão. São Luiz/MA, 2009.

JIMÉNEZ, A. M. G. **Estudo experimental de um resíduo de construção e demolição (RCD) para utilização em pavimentação.** Dissertação de mestrado submetida ao departamento de Engenharia Civil da Universidade e Brasília como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de mestre. Brasília, p. 123. 2011.

KLAMT, Rodrigo André; FONTOURA, Priscilla Rodrigues; BUDNY, Jaelson; SANTOS, Fladimir Fernandes dos. **Estudo da utilização da reciclagem de concreto asfáltico como camada de pavimento.** Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, vol. 7, núm. 3, pp. 539-553, 2018.

KRUGER, Patricia. **Efeito de diferentes teores de resíduo de gesso sobre o ataque interno por sulfato em argamassas incorporando agregados reciclados de concreto (ARC) ou misto (ARC).** Universidade Estadual de Ponta Grossa, Paraná, 2021.

LEITE, F. D. C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base em pavimentos.** Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. São Paulo, p. 185. 2007.

LEITE, F. D. C. et al. **Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements.** Construction and Building Materials, v. 25, n. 6, p. 2972–2979, 13 Janeiro, 2011.

MARQUES NETO, José da Costa. **Gestão dos resíduos de construção e demolição no Brasil.** São Carlos: RiMa, 2005. 162p.

MARQUES OLIVEIRA, Geraldo Luciano de. **Pavimentação TRN 032**. Universidade de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2006.

MOTTA, R. D. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Transportes. São Paulo, p. 134. 2005.

NATAATMADJA, A.; TAN, Y. L. **Resilient response of recycled concrete road aggregates**. Journal of Transportation Engineering. Reston, Virginia, v.127, n.5, p.450-453, 2001. Disponível em: <
<http://ascelibrary.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=JTPEDI0001270000050000450000001&idtype=cvips>>. Acesso em 13 de out. 2021.

NEVES Marinho, Marília; MANOEL Pereira Carneiro, Arnaldo. **Análise do desempenho mecânico de concretos betuminosos usinados a quente com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto**. 2011. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

NBR 15.112: 2004. **Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e Triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Brasília, 2004.

NBR 15.115: 2004. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Brasília, 2004.

NETO, Luís Antônio da Cunha Viana; SALES, Angela Teresa Costa; SALES, Lucila Costa. **Efeitos da variabilidade de agregados de RCD sobre o desempenho mecânico do concreto de cimento Portland**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, ano 2018, v. 23, n. 01, p. 1-11, 27 out. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0294>. Acesso em: 15 out. 2021.

NOGUEIRA, L. G. S. **Utilização de RCD na confecção de um concreto sustentável**. UniCEUB. Brasília, p. 117. 2013.

OLORUNSOGO, F. T.; PADAYACHEE, N. **Performance of recycled aggregate concrete monitores by durability indexes**. Cement and Concrete Research, vol. 32. p. 179-185, 2002.

PARANAVITHANA, Sumeda; MOHAJERANI, Abba. **Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete.** In: Resources, Conservation, and Recycling. n. 48. p. 1-12. Melbourne, Austrália. 2006.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO (PMSP). **Camadas de reforço do subleito, subbase e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil.** São Paulo, 2003.

PINTO, T.P. **Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo 1999.

PETKOVIC, G., Engelsen, J. C., Haoya, A. O., Breedveld, G. (2004). **Environmental impact from the use of recycled materials in road construction: method for decision-making in Norway.** Resources. Conservation and Recycling, 42: pp 249 – 264.

RODRIGUES, José Luís Azevedo. **Concepção de pavimentos rígidos.** Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2010/2011 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 2011

RON, Marta Baragaño; CASAGRANDE, Michéle Dal Toé; DO VALE, Aline Corales; LOPES, Manuela de Mesquita; SOARES, Jorge Barbosa. **Aplicabilidade de Resíduos Reciclados da Construção Civil e Demolição Como Agregados em Misturas Asfálticas.** In: 15ª RPU - Reunião de Pavimentação Urbana. Anais. Trabalho nº 19. Salvador, 2008.

ROSSI, Anna Carolina. **Etapas de uma obra de pavimentação e dimensionamento para uma via na Ilha do Fundão.** Projeto de Graduação - UFRJ/ Escola Politécnica, 2017.

SANCHEZ, M., **Estudio sobre la Utilización de Árido Reciclado para la Fabricación de Hornigón Estructural,** Tese de D.Sc., Universidade Politécnica de Madri, Madri, 2004.

SANTANA, H.. **Manual de pré-misturados a frio.** Rio de Janeiro: IBP, 1993.

SANTOS, Isabela da Rocha. **Medidas para redução dos impactos ambientais gerados pela construção civil.** Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10014319.pdf>. Acesso em 18 jan. 2021.

SANTOS, E. C. G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado.** 2007. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia.) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SENÇO, W. D. **Manual de técnicas de pavimentação.** 2. ed. São Paulo: PINI, v. I, 2007.

SILVA, Kallyne Lobato da. **Estrutura de pavimento asfáltico flexível e semi-rígido implantado em remodelação de dispositivo em Betim-MG.** Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS, Betim, p. 1-25, 12 nov. 2020. Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/handle/prefix/1408>. Acesso em: 1 out. 2021.

SILVA, Alanna Lopes. **Estudo comparativo entre pavimento rígido e pavimento flexível.** 23f. 2019. Artigo apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da UNICESUMAR – Centro Universitário de Maringá, 2019.

SILVA, Vinicius Arcanjo; FERNANDES, André Luís Teixeira. **Cenário do gerenciamento dos resíduos da construção e demolição (RCD) em Uberaba-MG.** Soc. & Nat. Uberlândia. Ano 24 n.2, 333-344, mai/ago. 2012.

SILVA, Cesar Augusto Rodrigues da. **Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas.** Dissertação Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Ouro Preto. 2009.

SILVA, R. B da; ANGULO, S. C.; PILEGGI, R. G.; SILVA, C. O. **Concretos secos produzidos com agregados reciclados de RCD separados por densidade.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 15, n. 4, p. 335-349, out./dez. 2015. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212015000400054>. Acesso em: 14 out. 2021.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. **Viabilidade Técnica da Utilização de Concretos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 4, n. 4, p. 47-63, dez. 2004.

ZORDAN, S.E. **A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto.** Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campinas, Campinas, 1997.