



Avaliação de um trecho experimental de pavimentação urbana em concreto asfáltico à quente com resíduos de construção e demolição de obras (RCD) como camada de revestimento

Manoel Lindolfo Queiroz Neto¹, Enio Fernandes Amorim², Fagner Alexandre Nunes de França³, Milany Karcia Santos Medeiros⁴

¹Mestre em Engenharia Civil (UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte) / Engenheiro Civil Autônomo - queirozneto91@gmail.com

²Doutor em Geotecnia (UnB - Universidade de Brasília) / Professor Efetivo do IFRN (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte) - enio.amorim@ifrn.edu.br

³Doutor em Geotecnia (EESC - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo) / Professor Efetivo da UFRN (Universidade Federal do Rio Grande do Norte) - fagneranfranca@gmail.com

⁴Engenheira Civil (UFERSA - Universidade Federal Rural do Semi-Árido - Campus Angicos - RN) / Engenheira Civil Autônoma - milanymedeiros@gmail.com

Cite como
American Psychological Association (APA)

Queiroz Neto, M. L., Amorim, E. F., França, F. A. N., & Medeiros, M. K. S. (2020). Avaliação de um trecho experimental de pavimentação urbana em concreto asfáltico à quente com resíduos de construção e demolição de obras (RCD) como camada de revestimento. *Rev. Gest. Ambient. e Sust. - GeAS*, 9(1), 1-18, e16108. <https://doi.org/10.5585/geas.v9i1.16108>.

Resumo

Objetivo do estudo: Apresentar uma proposta de aplicação de resíduos de construção e demolição de obras na fabricação de revestimento asfáltico, como uma alternativa para o aproveitamento desses materiais.

Metodologia/abordagem: Utilizou-se o empregado de ensaios de caracterização física, química e mineralógica e dosagem pelo método Marshall. Em seguida, realizaram-se as análises de um trecho experimental com o uso de traço de mercado, adaptado para a inclusão do RCD. Nesse traço, foi utilizado agregado reciclado contendo brita 1 e areia em substituição ao mesmo agregado do tipo natural na camada de revestimento.

Originalidade/relevância: Em escala mundial, espera-se que a indústria de materiais de construção cresça duas vezes e meia entre 2010 e 2050 (UNEP, 2002). No Brasil, a expectativa é que o setor da construção dobre de tamanho até o ano de 2022 (Cebeds, 2009), conduzindo a um aumento da geração de resíduos. Nota-se que é crucial tomar medidas que visem à gestão de resíduos sólidos por meio de mudanças culturais e tecnológicas, objetivando atender às necessidades de uma sociedade cada vez mais esclarecida e exigente em relação à preservação do meio ambiente. Um dos setores de engenharia que pode promover o uso de agregados reciclados (AR) que requerem menos investimento é o dos pavimentos urbanos e rodoviários (Rezende et al., 2016).

Principais resultados: A partir do programa experimental proposto, observou-se que os agregados oriundos de RCD desempenharam um bom potencial de sua utilização em revestimentos asfálticos à quente, baseado nas análises dos corpos de prova sob os parâmetros volumétricos, pela dosagem Marshall e do trecho experimental no qual, por meio de análises de tráfegos, bem como das condições de rolamento, o pavimento asfáltico obteve resultados bastante satisfatórios.

Contribuições teóricas/metodológicas: Durante o período analisado, foi constatada pouca diferença funcional entre os revestimentos asfálticos contendo e não contendo agregado reciclado. Dessa





maneira, o uso bem dosado de um material, que estava sujeito à poluição ambiental, num pavimento com baixa carga de tráfego, torna-se viável do ponto de vista da sustentabilidade, haja vista diminuir o consumo de agregado natural em proveito do reciclado.

Conclusão: Quanto ao agregado reciclado brita 1 concluiu-se que este apresentou bons resultados para uso em pavimentação asfáltica no qual destaca-se algumas boas propriedades obtidas, Abrasão Los Angeles (35%), índice de forma (0,87) se enquadrando no que é estabelecido pelas normas (ABNT) vigentes. No que diz respeito ao trecho experimental percebeu-se que, embora tenha havido pequeno destacamento de placas cerâmicas presentes em sua superfície, este sutil ocorrido não comprometeu o revestimento asfáltico e após 5 meses de análises funcionais o pavimento asfáltico continua desempenhando de forma muito satisfatória bom rolamento aos veículos que por ele trafegam.

Palavras-chave: RCD. Agregado reciclado. Pavimentação. Sustentabilidade.

Evaluation of an experimental hot asphalt concrete urban paving section using construction and works demolition waste (CDW) as a coating layer

Abstract

Objective of the study: To present a proposal for the application of construction and works demolition waste (CDW) in the manufacturing of asphalt coating as an alternative for the use of these materials.

Methodology/approach: Physical, chemical and mineralogical characterization tests and dosage assessments by the Marshall method were applied. An experimental pavement stretch was then analyzed using a market feature adapted for CDW inclusion. Recycled aggregate (RA) containing gravel 1 and sand was then used to replace the same natural type of aggregate in an asphaltic coating layer.

Originality/Relevance: On a worldwide scale, the building materials industry is expected to increase two and a half-fold between 2010 and 2050 (UNEP, 2002). In Brazil, estimates indicate that the construction sector will double in size by 2022 (Cebeds, 2009), leading to increased waste generation. It is, thus, crucial to take measures aimed at solid waste management through cultural and technological changes, aiming to meet the needs of a society increasingly elucidated and demanding in regard to environmental preservation. One of the engineering sectors that can promote the use of RA, which requires less investments, is that of urban and road pavements (Rezende et al., 2016).

Main results: The proposed experimental program indicates that CDW aggregates exhibit adequate potential for use in hot asphalt coatings, based on volumetric parameters, Marshall dosage tests and experimental stretch assessments, in which traffic analyses and bearing conditions indicated quite satisfactory asphalt pavement results.

Theoretical/methodological contributions: During the analyzed period, only slight functional differences were observed between RA and non-RA containing asphalt coatings. Thus, the well-dosed use of a material that may result in environmental pollution on a low traffic-load pavement becomes viable from a sustainability point of view, due to reduced consumption of natural aggregates in the face of the benefits of recycled material.

Conclusions: The gravel 1 RA was adequate for asphalt pavement use, exhibiting some interesting properties, i.e. Los Angeles abrasion (35%) and shape index (0.87), in accordance to current Brazilian ABNT standards. Regarding the experimental stretch, although a small detachment of ceramic surface portions was observed, this subtle occurrence did not compromise the asphalt coating and, after 5 months of functional analyses, the asphalt pavement continues to perform very satisfactorily regarding vehicle bearing.

Keywords: RCD. Recycled aggregate. Paving. Sustainability.



Evaluación de un tramo experimental de pavimentación urbana en hormigón asfáltico caliente con residuos de construcción y demolición de obras (RCD) como capa de revestimiento

Resumen

Objetivo del estudio: Presentar una propuesta para la aplicación de residuos de construcción y demolición en la fabricación de revestimiento asfáltico, como alternativa para el aprovechamiento de estos materiales.

Metodología/enfoque: Se utilizaron las pruebas de caracterización física, química y mineralógica y dosificación por el método Marshall. Posteriormente se analizó un apartado experimental utilizando una función de mercado adaptada para la inclusión del RCD. En esta función se utilizó agregado reciclado que contiene grava 1 y arena reemplazando el mismo agregado de tipo natural en la capa de revestimiento.

Originalidad/relevancia: A escala mundial, se espera que la industria de materiales de construcción crezca dos veces y media entre 2010 y 2050 (UNEP, 2002). En Brasil, se espera que el sector de la construcción duplique su tamaño para 2022 (Cebeds, 2009), lo que conducirá a un aumento en la generación de residuos. Se advierte que es fundamental tomar medidas encaminadas a la gestión de residuos sólidos a través de cambios culturales y tecnológicos, con el objetivo de satisfacer las necesidades de una sociedad cada vez más instruida y exigente en relación a la preservación del medio ambiente. Uno de los sectores de ingeniería que puede promover el uso de agregados reciclados (RA) que requieren menos inversión son los pavimentos urbanos y de carreteras (Rezende et al., 2016).

Resultados principales: A partir del programa experimental propuesto, se observó que los agregados de RCD tenían un buen potencial para su uso en recubrimientos de asfalto caliente basados en el análisis de cuerpos de prueba bajo los parámetros volumétricos, por la dosificación del método de Marshall y el tramo experimental en que a través del análisis del tráfico y las condiciones de rodadura, el pavimento asfáltico obtuvo resultados bastante satisfactorios.

Contribuciones teóricas/metodológicas: Durante el período analizado, se encontró poca diferencia funcional entre los recubrimientos de asfalto que contienen y no contienen agregado reciclado. Por lo tanto, el uso bien dosificado de un material, sujeto a la contaminación ambiental, sobre un pavimento con baja carga de tráfico se vuelve viable desde un punto de vista de sostenibilidad, ya que reduce el consumo de agregado natural en beneficio del material reciclado.

Conclusión: En cuanto al agregado reciclado de grava 1, se concluyó que presentó buenos resultados para su uso en el pavimento asfáltico en el que destacamos algunas buenas propiedades obtenidas, Abrasión Los Ángeles (35%), índice de forma (0.87) que se ajusta al que se establece según los estándares actuales (ABNT). Con respecto a la sección experimental, se notó que, si bien hubo un pequeño desprendimiento de placas cerámicas presentes en su superficie, esta sutil ocurrencia no comprometió el revestimiento asfáltico y después de 5 meses de análisis funcional, el pavimento asfáltico continúa funcionando de manera muy satisfactoria con buena rodadura para los vehículos que lo atraviesan.

Palabras clave: RCD. Agregado reciclado. Pavimentación. Sustentabilidad.

Introdução

De acordo com a Federação das Indústrias do Estado de São Paulo - FIESP (2017), a construção civil é um dos principais componentes da economia brasileira e sua cadeia produtiva reúne um conjunto de atividades que somam mais de 12 milhões de pessoas, do qual cerca de 13% representa a força de trabalho no país. As atividades desenvolvidas na construção civil solicitam uma boa quantidade de materiais inertes, como brita e areia, que



geralmente são extraídos de sedimentos aluviais. A extração da areia, por exemplo, altera o perfil dos rios e seu equilíbrio, além de modificar sua estrutura hidrogeológica, acarretando problemas ambientais (Cabral et al., 2009).

Arelado a isso, em escala mundial, espera-se que a indústria de materiais de construção cresça duas vezes e meia entre 2010 e 2050 (UNEP, 2002). No Brasil, a expectativa é que o setor da construção dobre de tamanho até o ano de 2022 (Cebeds, 2009), conduzindo a um aumento da geração de resíduos. Nota-se que é crucial tomar medidas que visem à gestão de resíduos sólidos por meio de mudanças culturais e tecnológicas, objetivando atender às necessidades de uma sociedade cada vez mais esclarecida e exigente em relação à preservação do meio ambiente. Em nível mundial, 60% das matérias-primas extraídas da litosfera são utilizadas no setor da construção civil (Bribián, Capilla & Usón, 2011). Essa porcentagem constata que o uso de recursos naturais finitos é extenso e há necessidade de dispor de métodos que sejam capazes de reciclá-los quando dispostos no meio ambiente após o uso. Aos materiais que já foram utilizados na construção civil e depois descartados dá-se o nome de Resíduo de Construção e Demolição (RCD) ou Resíduo de Construção Civil (RCC).

A diferença entre os grandes tipos de obra da construção civil faz com que o resíduo seja de grande variabilidade. Silva e Fernandes (2012) afirmam que o RCD corresponde a 60% do montante de resíduos sólidos urbanos. Por outro lado, Cabral et al. (2009) estabelecem uma porcentagem de 50% de RCD.

Um dos setores de engenharia que pode promover o uso de agregados reciclados (AR) que requerem menos investimento é o dos pavimentos urbanos e rodoviários (Rezende et al., 2016). De fato, a aplicação de RCD como material de sub-base, base e revestimento rodoviário se configura num método eficiente para mitigar seus efeitos sobre o meio ambiente e, conseqüentemente, consumir mais resíduo de demolição, a fim de evitar sua disposição em aterros sanitários. Contudo, as propriedades físicas e a composição dos agregados reciclados de construção e demolição variam de acordo com sua localização. Essa variação implicará na qualidade do material residual, a qual certamente influenciará nas propriedades mecânicas.

Chen, Lin e Wu (2011) investigaram o potencial da utilização de pó extraído do beneficiamento de agregado reciclado em misturas asfálticas. Por meio de ensaios laboratoriais, a fim de averiguar o comportamento da mistura em meio à resistência à tração, fluência dinâmica, sensibilidade à água, fadiga, além de ensaios de caracterização como o DRX, FRX e MEV, foram comparadas a uma mistura convencional que usou pedra calcária como agregado. Composto principalmente por quartzo e calcita, o pó de agregado reciclado contido na mistura asfáltica proporcionou melhores propriedades quanto à sensibilidade à



água e fadiga, muito embora tenha havido redução de desempenho a baixas temperaturas. Sua aplicação foi recomendada especialmente em regiões quentes.

Souza et al. (2012) avaliaram o uso do RCD como agregado reciclado para confecção de misturas asfálticas do tipo Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ), para uso em camadas de revestimento rodoviário. Comparando corpos de prova composto de agregado de resíduo e outro com agregado natural de calcário convencional, constataram que o primeiro apresentou maior resistência à tração por compressão diametral e menor rigidez quando comparado ao segundo. De forma geral, o agregado reciclado de RCD atendeu às especificações das normas para a utilização de agregado em misturas asfálticas, sendo considerada a possibilidade de uso para vias de baixo a médio volume de tráfego.

Lourenço e Cavalcante (2015) analisaram a viabilidade técnica do RCD em substituição ao agregado convencional usado em misturas asfálticas usinadas à quente, visando aplicar em camadas de rolamento de rodovias. Por meio da dosagem Marshall, foi encontrado o teor ótimo de ligante asfáltico CAP 50/70. Ensaio como fluência e dosagem Marshall, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e desgaste cântabro também foram realizados. Dentre alguns resultados, constatou-se que a estabilidade Marshall resultou em 1.468,7 kgf e desgaste cântabro igual a 2%. Logo, concluíram que o uso de agregados reciclados em camadas de revestimento para rolamento tem potencial.

Fernandes, Júnior e Ferreira (2018) utilizaram material residual extraído de rochas ornamentais (mármore) como agregado em misturas asfálticas. Foram comparados dois tipos de mistura, uma com agregado convencional e outra com 2% de agregado residual com diâmetro semelhante ao pó de pedra. Ensaio de caracterização dos agregados e do CAP 50/70, resistência à tração e módulo de resiliência dos corpos de prova foram realizados. Observou-se que os corpos de prova com resíduo de marmoraria apresentaram maior resistência à tração (11,69%) e módulo de resiliência (7,89%) quando comparados aos corpos de prova com agregado convencional, embora o teor de ligante ideal tenha aumentado devido ao fato de o resíduo ser menos denso e dispor de maior porosidade.

Consubstanciado nesses aspectos, este trabalho apresenta uma proposta de aplicação de resíduos de construção e demolição de obras como agregados reciclados na fabricação de revestimento asfáltico, como uma alternativa para o aproveitamento desses materiais, sendo o setor da pavimentação responsável por 18,37% do consumo de rocha britada no país (DNPM, 2009).



Características dos materiais utilizados

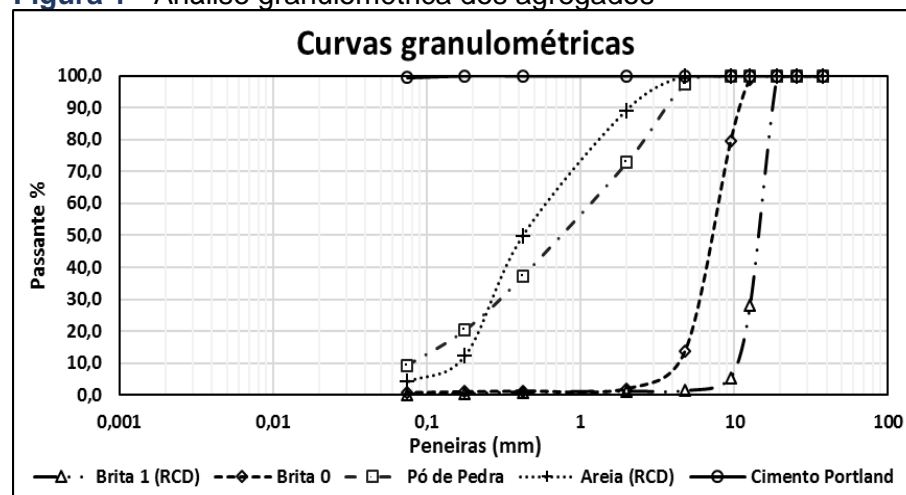
As atividades de pesquisas científicas que serão elencadas neste tópico foram realizadas em quatro etapas principais: caracterização dos agregados naturais e reciclados; caracterização do ligante asfáltico; dosagem pelo método Marshall; e execução de um trecho experimental de maneira a se ter uma análise prática do estudo.

Na obtenção dos agregados, a parceria foi firmada com uma empresa que recicla, a qual disponibilizou todo o agregado reciclado para a realização da pesquisa, sendo eles a brita 1 e a areia que foram depositadas na usina da empresa fornecedora do ligante.

Por sua vez, essa empresa auxiliou na doação do ligante asfáltico (CAP 50/70) e, no final da pesquisa laboratorial, realizou um trecho experimental em uma via urbana da cidade de Natal-RN, Brasil.

O laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) proporcionou a execução dos ensaios de Difração de Raios X (DRX) e Fluorescência de Raios X. Os detalhes pertinentes à caracterização física dos materiais envolvidos encontram-se na Figura 1 e na Tabela 1. Destaca-se que os valores pertinentes à caracterização física dos materiais envolvidos encontram-se dentro dos limites estabelecidos pelas especificações brasileiras, por meio das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Figura 1 - Análise granulométrica dos agregados



Fonte: Elaboração própria.



Tabela 1 - Características dos materiais utilizados na pesquisa

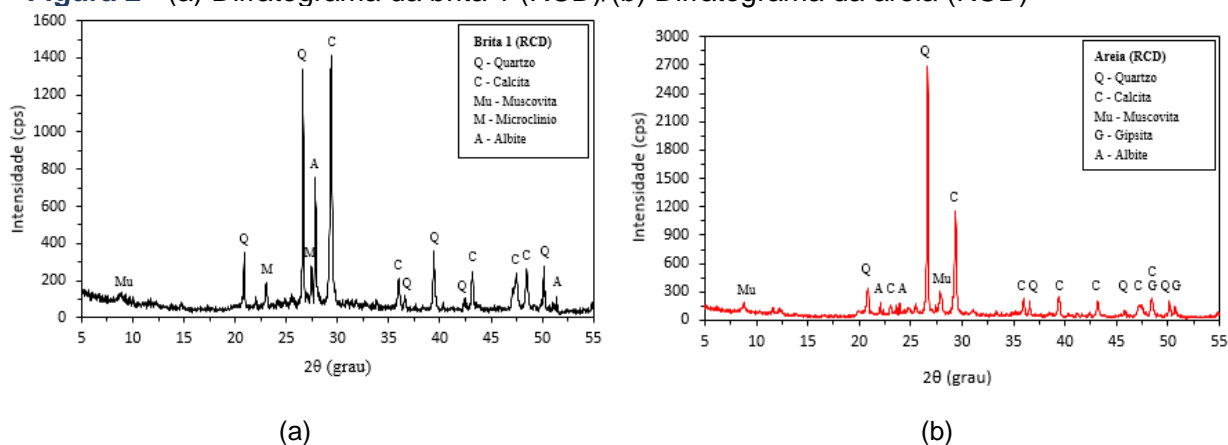
Caracterização dos Agregados			
Parâmetros	Brita 1 (RCD)	Brita 0	Areia (RCD)
Massa específica	2,19 g/cm ³	2,56 g/cm ³	2,54 g/cm ³
MF	7,85	5,73	3,82
DMC	19 mm	9,50 mm	4,75 mm
Índice de forma	0,87	-	-
Abrasão Los Angeles	35%	-	-
Parâmetros	Pó de pedra	Cimento	
Massa específica	2,63 g/cm ³	2,86 g/cm ³	
MF	3,92	-	
DMC	2,36 mm	-	
Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo			
Parâmetros	Resultados		
Viscosidade Saybolt-Furol	135 °C	150 °C	177 °C
	250,5 SSF	131,0 SSF	42,4 SSF
Penetração	53 - CAP 50/70		
Massa específica	1,013 g/cm ³		
Ponto de Fulgor	Interrompido a 235 °C		
Ponto de Amolecimento	44,5 °C		

Nota: DMC - Dimensão Máxima Característica; MF - Módulo de Finura.

Fonte: Elaboração própria.

A análise de Difração de Raios X (DRX) foi utilizada para caracterizar a estrutura cristalográfica dos materiais residuais brita 1 e areia. Pode-se observar, na Figura 2 (a) e (b), que a composição mineralógica é complexa devido à grande variabilidade cristalina e amorfa de seus componentes (concreto, argamassa e cerâmica). Os principais componentes da brita 1 e areia, sendo ambos RCD, são o quartzo [SiO₂], calcita [CaCO₃], gipsita [Ca (SO₄) (H₂O)₂], muscovita [K Al₂ (Si₃ Al) O₁₀ (OH)₂], microclínio [K Al Si₃ O₈] e albite [Na (Al Si₃ O₈)].

Figura 2 - (a) Difratograma da brita 1 (RCD)/(b) Difratograma da areia (RCD)



Fonte: Elaboração própria.



A Tabela 2 apresenta a composição química por FRX dos agregados reciclados, identificando os óxidos em porcentagem. Os resultados apontaram a presença em comum de alguns óxidos com teores semelhantes. Então, tanto para a brita 1 (RCD) quanto para a areia reciclada, o maior teor encontrado foi o óxido de cálcio (CaO), seguido do dióxido de silício (SiO₂), óxido de ferro (Fe₂O₃), óxido de alumínio (Al₂O₃), obtendo resultado semelhante ao de Martínez et al. (2016), no qual mais de 70% dos óxidos de RCD correspondem ao óxido de cálcio, dióxido de silício e óxido de alumínio.

Tabela 2 - Composição química dos agregados reciclados

Caracterização Química por FRX			
Brita 1 (RCD)		Areia (RCD)	
Óxidos	%	Óxidos	%
CaO	49,30	CaO	37,94
SiO ₂	24,86	SiO ₂	26,55
Fe ₂ O ₃	9,65	Fe ₂ O ₃	12,42
Al ₂ O ₃	8,25	Al ₂ O ₃	11,26
SO ₃	2,89	SO ₃	3,49
ZrO ₂	1,05	ZrO ₂	2,98
K ₂ O	1,34	K ₂ O	1,67
Outros	2,66	Outros	3,69

Fonte: Elaboração própria.

Os óxidos de cálcio e de silício CaO e SiO₂ que compõem esses materiais residuais atribuem-se, provavelmente, à presença de compostos cimentícios hidratados (argamassas, concretos). Os óxidos de ferro e de alumínio, além do óxido de cálcio, podem ser provenientes do material cerâmico (Martínez et al., 2016).

Programa experimental

A fim de investigar a incorporação de materiais residuais em concretos asfálticos como substituta da brita 1 e areia natural, analisaram-se os parâmetros volumétricos, estabilidade Marshall e o trecho experimental, regidos pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). As composições dos traços utilizados nesta pesquisa são apresentadas na Tabela 3. Optou-se em deixar pelo menos 53%, 49,3% e 53% dos materiais representados pelos agregados graúdos nos seguintes traços: traço laboratorial com a incorporação do resíduo, traço do trecho experimental com a incorporação do resíduo e traço do trecho experimental sem a incorporação do resíduo – convencional, respectivamente, visto que, em uma mistura betuminosa como o concreto betuminoso usinado à quente - CBUQ, a capacidade de suporte é fornecida com maior efetividade pelo agregado graúdo. Atrelado a isso, optou-se por fixar a quantidade de cimento em 2% no traço laboratorial com a incorporação do resíduo, para que não houvesse problemas com o



preenchimento excessivo de vazios que poderia acarretar uma não liberação de tensão, tornando-o mais rígido. As porcentagens de agregado miúdo variaram do total dos constituintes minerais em virtude do melhor enquadramento granulométrico nos limites da curva C da norma 031/2006 do DNIT (2006) e da maior proximidade das curvas ideais.

Tabela 3 - Composição dos traços de CBUQ

Traço laboratorial com a incorporação do resíduo	
Materiais	Traço
Brita 1	13%
Brita 0	40%
Pó de pedra	25%
Areia	20%
Cimento	2%
Total	100%

Traço do trecho experimental com a incorporação do resíduo	
Materiais	Traço
Brita 1	13,5%
Brita 0	35,8%
Pó de pedra	24,8%
Areia	19,9%
CAP	5,4%
Total	100%

Traço do trecho experimental sem a incorporação do resíduo - convencional	
Materiais	Traço
Brita 1	12,5%
Brita 0	40,5%
Pó de pedra	26,0%
Areia	22,0%
CAP	5,0%
Total	100%

Fonte: Elaboração própria.

O trecho experimental possui 46 m de comprimento e 2,80 m de largura e foi executado com e sem agregados reciclados, visando avaliar seu desgaste superficial e, conseqüentemente, sua funcionalidade no decorrer do tempo (Figura 3), que está submetida às intempéries naturais, tais como chuva, insolação, tráfegos por diferentes tipos de veículo e com diferentes frequências de carregamento.





Figura 3 - (a) Comportamento visual dos trechos experimentais com e sem reciclados/(b) Comportamento funcional do trecho experimental com reciclados



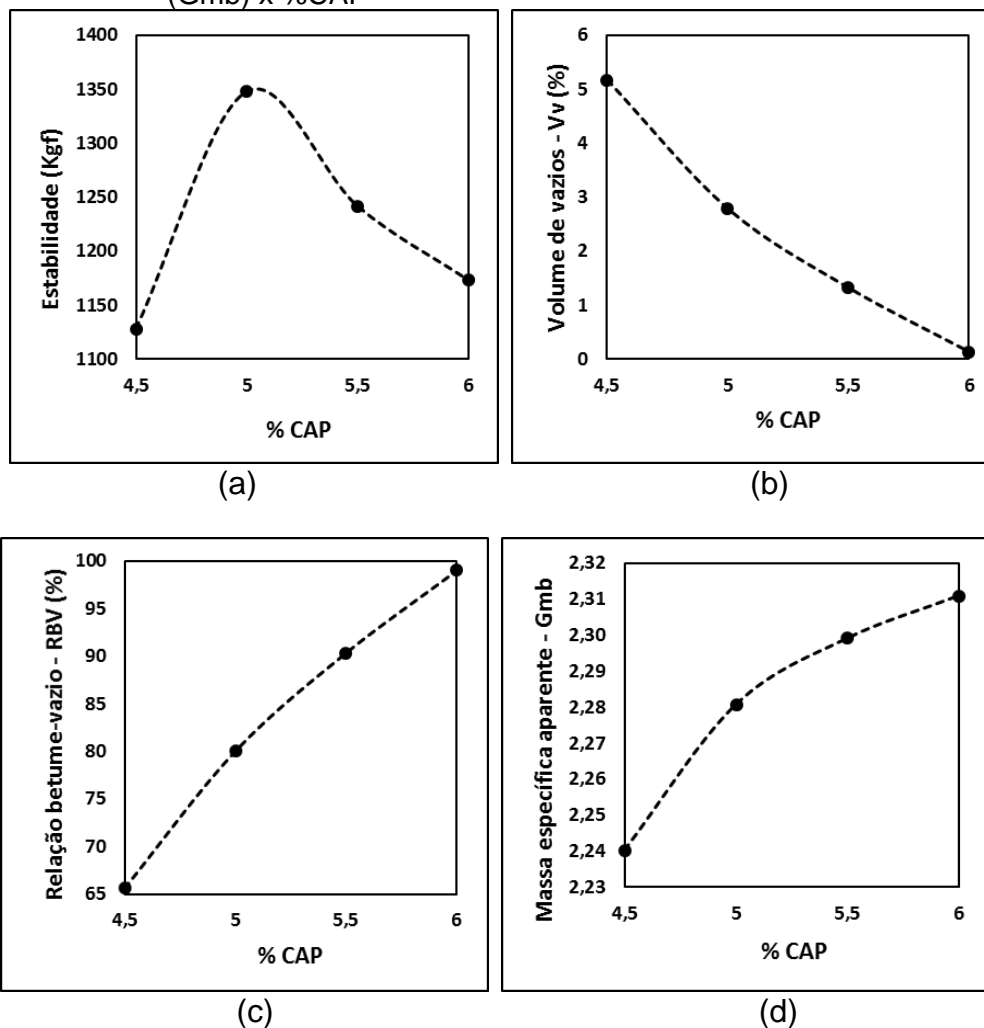
Fonte: Elaboração própria.



Resultados e discussões

A Figura 4 apresenta uma síntese gráfica dos resultados.

Figura 4 - (a) Estabilidade Marshall x %CAP/(b) Volume de vazios x %CAP/(c) Relação betume-vazio (RBV) x %CAP/(d) Massa específica aparente (Gmb) x %CAP



Fonte: Elaboração própria.

Examinando o gráfico da estabilidade *versus* % CAP na Figura 4 (a), observa-se que os corpos de prova que obtiveram maior estabilidade foram os que continham 5,0% de ligante. Motter (2013) se deparou com uma maior estabilidade, entre 1.200 e 1.310 kgf, quando aplicado 6% do material betuminoso. Percebe-se, pelo comportamento do gráfico, que existe uma contínua diminuição de estabilidade quando o teor de CAP ultrapassa os 5,0%, ao mesmo tempo que um teor ligeiramente maior (5,05%) proporciona uma maior estabilidade (1.350 kgf). A estabilidade correspondente a 5,0% de CAP equivale a 1.348 kgf. Essa alta estabilidade pode estar relacionada a um atrito entre os agregados de RCD.





Todavia, atende aos requisitos da norma DNIT 031/2006 – ES, que estabelece para a camada de rolamento de pavimentos asfálticos estabilidade mínima de 500 kgf.

Lourenço e Cavalcante (2015), utilizando também agregados reciclados em revestimento asfáltico, obtiveram resultados de estabilidade igual a 1.468,7 kgf. Sinisterra (2014) também encontrou resultados semelhantes que ultrapassaram os 1.400 kgf. Ambos reforçam os resultados deste trabalho.

Costa filho (2017), utilizando-se de misturas asfálticas contendo materiais residuais, constatou que teores entre 5,0% e 5,5% atendem aos requisitos mínimos de estabilidade, logrando valores acima de 500 kgf. Dessa maneira, o pavimento se torna mais resistente às ações externas como altas temperaturas, cargas elevadas.

Um parâmetro importante a ser averiguado numa mistura betuminosa é o volume de vazios, visto que alguns comportamentos aos quais o pavimento asfáltico estará submetido quando solicitado poderão ser elucidados por meio da aferição da porcentagem. A Figura 4 (b) ilustra o gráfico correspondente à mistura betuminosa realizada com agregados reciclados. Nela pode-se notar que, à medida que se aumenta o teor de CAP na mistura asfáltica, há uma crescente redução do volume de vazios, acontecimento ocorrido também com Lourenço e Cavalcante (2015). Isso ocorre, provavelmente, porque o produto betuminoso preenche os vazios existentes dos agregados residuais.

De acordo com a norma DNIT 031/2006 – ES, a taxa percentual de vazios para camada de rolamento deve ficar entre 3% e 5%, na qual, nesta pesquisa, estabeleceu-se uma média que resultou em 4%. Nos teores de 5,5% e 6,0% houve uma boa redução do volume de vazios, sendo prejudicial ao revestimento asfáltico pelo fato de não haver espaço suficiente para se deformar e aliviar as tensões quando solicitado. Em outras palavras, o pavimento asfáltico se comportará como rígido, podendo gerar fissuras e, conseqüentemente, diminuir sua durabilidade. Costa Filho (2017), em uma de suas misturas asfálticas, encontrou resultado semelhante e o creditou a uma maior presença de material com graduação miúda na composição, fazendo com que houvesse maior preenchimento dos vazios. Por outro lado, o teor de 4,5% de CAP apresentou volume de vazios acima do que preconiza aquela norma. Nessa situação, a mistura betuminosa contém muitos vazios, podendo vir a possibilitar deformações plásticas e ficar suscetível à percolação de água. Contudo, Motter (2013), que analisou as propriedades de concretos betuminosos usinados à quente, com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto, atestou que apenas com teor de ligante superior a 5,5% se pode atender à norma DNIT 031/2006 – ES.

A Figura 4 (c) ilustra a relação RBV x CAP da mistura asfáltica nos diferentes teores propostos pela pesquisa. Observa-se que há um aumento contínuo dessa relação quando se aumenta o teor de CAP, como também encontrado por Costa filho (2017). Esse resultado diretamente proporcional pode estar ligado a uma compactação pouco eficiente ou ao



simples fato do aumento de teor de ligante. Partindo daquela hipótese, uma boa quantidade de vazios foi estabelecida e foram preenchidos com betume, uma vez que na mistura existiam tanto agregados reciclados quanto naturais e angulares como a brita 0. Esse indício pode ser mais bem observado na mistura asfáltica com teor de 6,0%.

De outro modo, valores baixos de RBV podem ocasionar, em pavimentos suscetíveis, a desagregação de materiais e infiltrações, causando prejuízo à durabilidade. Com base nisso, observa-se na Figura 4 (c) que o teor de 4,5% apresentou RBV de aproximadamente 66%. Esse percentual está abaixo do mínimo exigido pela norma DNIT 031/2006 – ES, a qual estabelece para a camada de rolamento um RBV mínimo de 75%. Fato semelhante acontece com os teores de 5,5% e 6,0%, que ultrapassam o limite superior de 82%. Portanto, o teor de CAP que atende à relação betume-vazios é o de 5% com RBV igual a 80,5%. Motter (2013) precisou de um teor de CAP de 6% para se enquadrar dentro dos limites estabelecidos pela norma citada no parágrafo anterior. Lourenço e Cavalcante (2015) apenas alcançou um RBV de 75,2% e 77,2% empregando um teor de CAP de 8,5% e 9,0%, respectivamente.

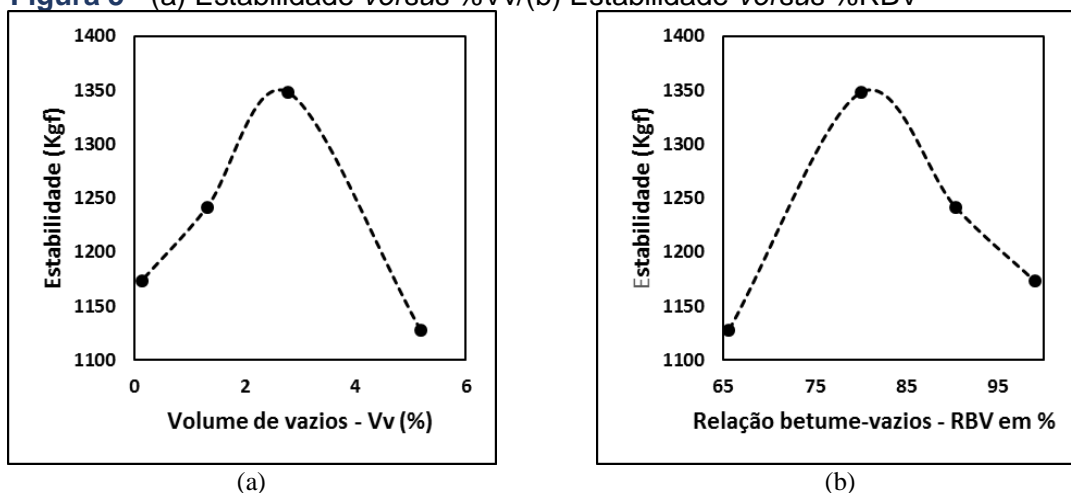
No que diz respeito à massa específica aparente, constata-se, inicialmente, que ela está ligada diretamente ao volume de vazios, uma vez que são inversamente proporcionais. A Figura 4 (d) ilustra a mistura betuminosa nos diferentes teores, na qual o teor de 4,5% de CAP que tinha exibido o maior Vv (%) perante os demais apresentou menor Gmb, além do teor de 6,0% de CAP ter apresentado menor Vv (%) e maior Gmb. Resultados semelhantes aos encontrados neste trabalho foram detectados por Costa Filho (2017) e Motter (2013). De fato, era de se esperar que, com o aumento do teor de CAP, houvesse aumento da massa específica aparente, posto que o ligante betuminoso preenche os vazios entre os agregados, aumentando a massa específica. Diante desses gráficos, foi possível calcular o teor ótimo de ligante, fazendo-se uma média aritmética entre os teores correspondentes à máxima estabilidade, máxima densidade aparente, média dos limites das especificações do volume de vazios e relação betume/vazios. Dessa forma, o teor ótimo de CAP resultou em 5,15%.

Ainda no tocante aos parâmetros volumétricos, analisou-se qual seria a influência da estabilidade *versus* a porcentagem de volume de vazios, a relação betume/vazios e a fluência. A seguir, a Figura 5 ilustra detalhes dos resultados obtidos.





Figura 5 - (a) Estabilidade versus %Vv/(b) Estabilidade versus %RBV



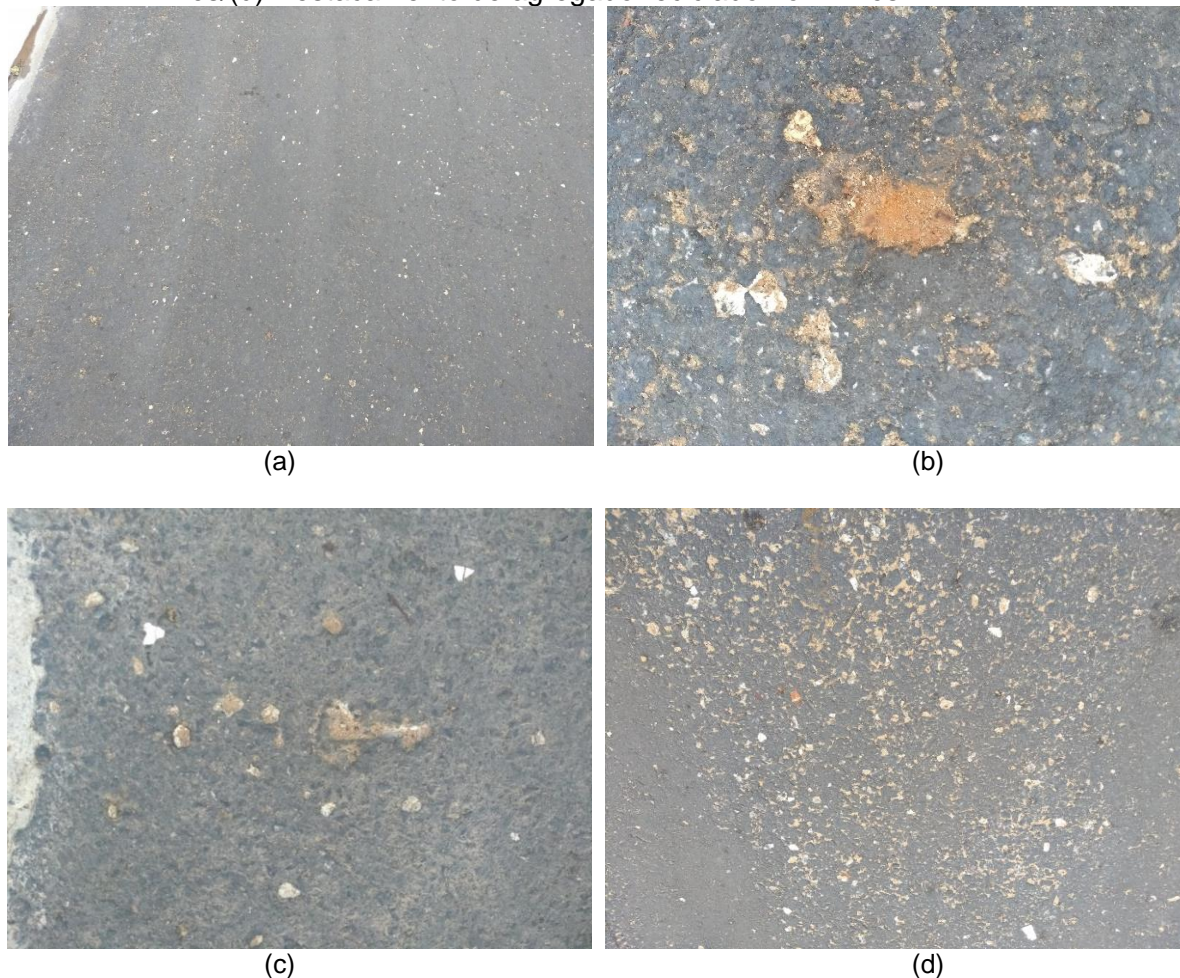
Fonte: Elaboração própria.

A Figura 5 (a) descreve o comportamento da mistura asfáltica relacionando o volume de vazios com a estabilidade. Percebe-se que há aumento da estabilidade com aumento do Vv (%) em até, aproximadamente, 2,6% deste; logo após, ocorre o inverso. Resultado análogo foi descoberto por Costa Filho (2017). Sob outra perspectiva, vale salientar que parte da composição do material usado na mistura asfáltica é oriunda de RCD, que é caracterizado por ser um material heterogêneo composto por diversas fases que podem acarretar resultados imprevisíveis, e a curva mostra que a estabilidade está acima de 500 kgf recomendado por norma já citada anteriormente. Fazendo uma relação entre o RBV e a estabilidade, pode-se visualizar na Figura 5 (b) que houve aumento da estabilidade até um RBV de aproximadamente 82%. Após isso, há perda de estabilidade da mistura asfáltica. Esse resultado condiz com o que preconiza a norma DNIT 031/2006, que estabelece limite superior até 82%. Resultados semelhantes foram encontrados por Costa Filho (2017).

Para se ter uma visão prática, realizou-se um trecho experimental com dosagem semelhante ao de laboratório e outra com agregados naturais. A Figura 6 apresenta uma síntese dos referidos trechos. Os registros fotográficos se deram logo após a concretagem asfáltica e seguiram de forma mensal de modo a observar a estrutura funcional. Dessa maneira, o revestimento asfáltico, logo após sua execução, apresentou a existência de vários pontos na cor branca, caracterizando os agregados reciclados que não tiveram boa adesão ao ligante, por exemplo, o resíduo oriundo de piso cerâmico. Visualmente, foi possível destacar a diferença entre os revestimentos contendo reciclados (Figura 6 (b)) e aqueles apenas com agregados naturais (Figura 6 (a)). O revestimento sem RCD apresenta uma superfície mais escura e uniforme em sua cor; já o revestimento contendo agregados reciclados exibe cor escura repleta de pontos claros.



Figura 6 - (a) Destacamento de agregado reciclado no 1º mês/(b) Destacamento de agregado reciclado no 2º mês/(c) Destacamento de agregado reciclado no 3º mês/(d) Destacamento de agregado reciclado no 4º mês



Fonte: Elaboração própria.

Após um mês da realização da concretagem, testemunharam-se poucas mudanças no que diz respeito ao comportamento funcional e visual de todo o revestimento. Não foram encontradas quaisquer fissuras ou destacamento de agregados reciclados. No segundo mês, constatou-se que houve destacamento de agregados reciclados que se situavam sobre a superfície, principalmente na região onde existe torção no pavimento, provocada pelo giro das rodas dos automóveis na curva. Os agregados extraídos da superfície foram oriundos de materiais cerâmicos e uma pequena parcela de gesso, como os mostrados na Figura 6 (b). Contudo, ressalta-se que esse destacamento ocorreu de forma pontual, não comprometendo a funcionalidade do revestimento e podendo não ser associado especificamente ao uso de agregados reciclados. No terceiro mês após a concretagem asfáltica, observou-se que o destacamento dos agregados residuais superficiais ganhou um leve volume, além de os agregados cerâmicos superficiais apresentarem quebras, dando indícios de um futuro destacamento, como na Figura 6 (c). Muito embora tenha se sucedido a esse aumento, o revestimento continuou a operar satisfatoriamente seu desempenho



funcional. Semelhante ao mês anterior, no quarto mês, notou-se que o crescimento do destacamento de agregados, principalmente oriundos de cerâmica, aumentou, como na Figura 6 (d).

Conclusões

A caracterização física do agregado permitiu observar que o agregado reciclado da brita 1 apresentou menor massa específica aparente, como esperado, quando comparado ao agregado natural brita 0 com $2,56 \text{ g/cm}^3$ e $2,19 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Quanto às massas específicas da areia reciclada, pó de pedra e cimento, obteve-se um valor igual a $2,54 \text{ g/cm}^3$, $2,63 \text{ g/cm}^3$ e $2,86 \text{ g/cm}^3$, próximos aos valores encontrados por Sinisterra (2014).

Averiguou-se um desgaste por abrasão Los Angeles igual a 35% no agregado reciclado, semelhante à ordem de grandeza mencionada por Souza et al. (2012) e Motter (2013). Esse resultado se enquadra dentro dos limites de desgaste de norma e atesta que nesse parâmetro que é vinculado à durabilidade o agregado residual se mostra eficaz.

O índice de forma foi outro parâmetro avaliado no agregado reciclado brita 1, no qual o resultado alcançado foi 0,87. Esse valor atende à norma, permitindo seu uso em revestimentos asfálticos. No que se refere às formas das partículas, cogita-se que o agregado reciclado em estudo se aproxima de um formato mais cúbico, uma vez que nenhuma das dimensões prevalece sobre as outras e, dessa maneira, o agregado tende a suportar maior quantidade de carga, conferindo-lhe maior resistência. Caso contrário, ele apresentaria forma tendendo a lamelar e isso poderia contribuir para a fratura do grão quando submetido às cargas e, conseqüentemente, na redução da vida útil do pavimento asfáltico.

A caracterização química e mineralógica (FRX e DRX) dos agregados residuais foi realizada e mostrou resultados semelhantes, tendo como principais componentes o óxido de cálcio (CaO), dióxido de silício (SiO_2), óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de alumínio (Al_2O_3). O CaO e o SiO_2 são, em geral, provenientes das argamassas e concretos. O Fe_2O_3 e o Al_2O_3 são, provavelmente, provenientes do material cerâmico presente na composição (Martínez et al., 2016).

A dosagem asfáltica apresentou porcentagem ótima de ligante de 5,15%. O estudo ainda mostrou que quanto maior a porcentagem de CAP menor o volume de vazios, e isso ocorreu devido a um preenchimento dos espaços vazios pelo ligante asfáltico. Como esperado, quanto maior a porcentagem de CAP também maior a densidade da mistura.

O trecho experimental utilizando agregados reciclados foi executado de modo a obter resultados em escala real. Num intervalo de 5 meses foi verificado o tráfego existente, que



resultou numa média de 25 veículos por hora, bem como os aspectos de funcionalidade. Muito embora o período de análise tenha sido pequeno, pode-se destacar que, visualmente, é notória a diferença entre um pavimento contendo agregados naturais e outro contendo agregados reciclados; este se apresenta superficialmente no revestimento em forma de pintas não totalmente envolvidas pelo ligante. Percebeu-se que, logo nos dois meses iniciais de tráfego, aconteceu um destacamento dos agregados cerâmicos e de uma parcela de gesso presentes em sua superfície. No entanto, esse destacamento não foi comprometedor a ponto de danificar o revestimento. Dessa forma, apesar disso, o pavimento asfáltico continua desempenhando de forma muito satisfatória bom rolamento aos veículos que por ele trafegam.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- Bribián, I. Z.; Capilla, A. V.; & Usón, A. A. (2011). *Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. Building and Environment*, vol. 46, p. 1133 - 1140.
- Cabral, A. E. B.; Schalch, V.; Dal Molin, D. C. C.; Ribeiro, J. L. D.; & Ravindrarajah, R. S. (2009). *Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha. Cerâmica*, vol. 55, p. 448 - 460.
- Cebeds, A. (2009). *Água: fatos e tendências*. Brasília: ANA - Agência Nacional de Águas.
- Chen, M.; Lin, J.; & Wu, S. (2011). *Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. Construction and building materials*, vol. 25, p. 3909 - 3914.
- Costa Filho, F. C. (2017). *Estudo de viabilidade técnica do uso de resíduos oriundos do beneficiamento de Scheelita na composição de concretos asfálticos. 173 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Materiais e Processos Construtivos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Cap. 4.*
- DNIT (2006) - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transporte. DNIT-ES031/06: *Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico*. Rio de Janeiro. 14 p.
- DNPM (2009) - Departamento Nacional de Produção Mineral. *Economia mineral no Brasil*. Coordenação. Antônio Fernando da Silva Rodrigues – Brasília – DF, 764 p.



- Fernandes, M. G. P.; Junior, A. P. W.; & Ferreira, W. L. G. (2018). *Análise do uso de resíduos provenientes da produção de mármore como agregado em misturas asfálticas*. 21ª RPU - Reunião de Pavimentação Urbana (RPU) - São Paulo/SP, pp. 1-12.
- FIESP (2017) - Federação das indústrias do estado de São Paulo. *Cadeia produtiva da construção*. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/infografico-cadeia-da-construcao/>> Acesso em: 15 Out 2017.
- Lourenço, V. M. Q.; & Cavalcante, E. H. (2015). *Dosagem de misturas asfálticas do tipo CAUQ utilizando agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. 44ª Reunião anual de pavimentação (RAPv), ISSN 1807-5568 - Foz do Iguaçu/PR, pp. 1-12.
- Martínez, P. S.; Cortina, M. G.; Martínez, F. F.; & Sánchez, A. R. (2016). *Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication*. Journal of cleaner production, vol 118, p. 162-169.
- Motter, J. S. (2013). *Propriedades de concretos betuminosos usinados a quente com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto*. Dissertação (mestrado em engenharia de construção civil) - Universidade Federal do Paraná, Paraná/PR. 260 p.
- Rezende, L. R.; Marques, M. O.; Oliveira, J. C.; Carvalho, J. C.; Guimarães, R. C.; Resplandes, H. M. S.; & Costa, L. C. S. (2016). *Field Investigation of Mechanic Properties of Recycled CDW for Asphalt Pavement Layers*. J. Mater. Civ. Eng.
- Silva, V. A.; & Fernandes, A. L. T. (2012). *Cenário do gerenciamento dos resíduos da construção e demolição (RCC) em Uberaba-MG*. Sociedade & Natureza, ano 24, n. 2, p. 333-344.
- Sinisterra, F. Q. (2014). *Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas*. Tese (doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília/DF. 168p.
- Souza, M. V. R.; Sinisterra, F. Q.; Farias, M. M.; & Gómez, A. (2012). *Avaliação mecânica de um concreto betuminoso usinado a quente confeccionado com agregado de resíduo de demolição reciclado*. XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) - Porto de Galinhas/PE, pp. 1-9.
- UNEP (2002) - UN Environment Programme. GEO3 - *Global environment outlook 3.0: past, present and future perspectives*. Nairobi: Unep.