

ABORDAGENS DE ECONOMIA CIRCULAR NA INFRAESTRUTURA VIÁRIA URBANA: ESTUDOS DE CASO NA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO

NEHEMIAS ANASTÁCIO SANTOS DA SILVA - nehemias.silva@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB

ROSANE APARECIDA GOMES BATTISTELLE- rosane.battistelle@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB

ÁREA: *9. ENGENHARIA DA SUSTENTABILIDADE*
SUBÁREA: *9.1 – GESTÃO AMBIENTAL*

RESUMO: *ESTE ESTUDO INVESTIGA A ECONOMIA CIRCULAR NA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NOS PAVIMENTOS DE VIAS CURTAS, MÉDIAS E LONGAS EM MACEIÓ, ESPECIALMENTE EM ÁREAS AFETADAS PELOS AFUNDAMENTOS DE SOLO CAUSADOS PELA BRASKEM. OS RESULTADOS MOSTRAM QUE SUBSTITUIR MATERIAIS CONVENCIONAIS POR RCD NÃO APENAS REDUZ SIGNIFICATIVAMENTE OS CUSTOS, COMO TAMBÉM NA AQUISIÇÃO E TRANSPORTE DE BRITA GRADUADA E BRITAA CORRIDA, MAS TAMBÉM AJUDA A MITIGAR OS IMPACTOS AMBIENTAIS AO REDUZIR A DEMANDA POR AGREGADOS NATURAIS. OS RESULTADOS OBTIDOS DEMONSTRAM QUE A SUBSTITUIÇÃO DE MATERIAIS CONVENCIONAIS POR RECICLADOS RESULTA EM UMA REDUÇÃO DE CUSTOS TOTAIS DE R$ 157.230,00, REFLETINDO UM CUSTO-BENEFÍCIO GLOBAL DE 49,9%. ESSES VALORES DESTACAM A VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DE MATERIAIS RECICLADOS EM PROJETOS DE PAVIMENTAÇÃO, ALÉM DE PROMOVEREM PRÁTICAS MAIS SUSTENTÁVEIS E AMBIENTALMENTE*

PALAVRAS-CHAVES: *INFRAESTRUTURA VIÁRIA URBANA; RESIDUOS DA CONSTRUÇÃO; ECONOMIA CIRCULAR; SUSTENTABILIDADE.*

1. INTRODUÇÃO

A infraestrutura urbana desempenha um papel crucial na qualidade de vida e no desenvolvimento das cidades, impactando diretamente os habitantes e o crescimento econômico regional. Em locais como Maceió, Alagoas, há uma variedade de desafios significativos a serem enfrentados, principalmente devido à complexa interação entre desenvolvimento urbano e problemas geotécnicos, como os afundamentos de solo induzidos pela atividade industrial. Esses eventos não só aumentam a vulnerabilidade ambiental e social da cidade, mas também exigem soluções inovadoras e sustentáveis na gestão de resíduos e infraestrutura.

A utilização de resíduos da construção e demolição (RCD) como matéria-prima para camadas de pavimentação surge como uma alternativa promissora e econômica. Integrar RCD na pavimentação urbana não apenas resolve questões locais de gestão de resíduos e estabilidade geotécnica, mas também representa um passo crucial para um desenvolvimento urbano mais sustentável e resiliente, conforme destacado por Aslam (2019). Além de mitigar os impactos ambientais da extração de materiais virgens, o uso de RCD promove a economia circular ao reintegrar resíduos na cadeia produtiva, alinhando-se com princípios globais de sustentabilidade e economia verde (COELHO, 2013).

Segundo Akhtar (2018) a economia circular pode ser definido como um modelo que busca transformar a maneira como crescemos economicamente, focando em benefícios que abrangem toda a sociedade. Diferente da economia linear tradicional, onde extraímos, fabricamos e descartamos, a economia circular propõe um sistema mais sustentável e regenerativo. Nesse modelo, os produtos, materiais e recursos são usados pelo máximo de tempo possível, aproveitando ao máximo seu valor. Quando esses itens atingem o fim de sua vida útil, eles são reciclados, reparados ou reprocessados para dar origem a novos produtos, evitando desperdícios e promovendo a sustentabilidade.

A escolha de Maceió como foco desta pesquisa se deve à singularidade de seus desafios geológicos e à grande quantidade de RCD gerada. A cidade, situada em uma área de instabilidade geológica, tem visto um aumento nas demolições de edifícios afetados pelo afundamento do solo, o que cria uma oportunidade para a reciclagem e reutilização desses materiais (Brasil e Rosa, 2018). A implementação de pavimentos urbanos com RCD não só pode resolver problemas ambientais ligados ao descarte inadequado, mas também oferecer uma solução economicamente viável e sustentável para a infraestrutura urbana.

O principal objetivo deste estudo é realizar uma análise dos custos associados à implementação de camadas de pavimentação utilizando RCD em diferentes tipos de vias em Maceió. Além dos custos diretos, serão avaliados os benefícios ambientais e sociais. Pretende-se comparar esses custos com os de materiais convencionais, analisar os benefícios econômicos diretos e indiretos e examinar os impactos ambientais positivos decorrentes da adoção dessas práticas. A incorporação de RCD não só oferece uma solução para a destinação adequada desses materiais, reduzindo a pressão sobre os aterros sanitários, mas também pode mitigar os impactos ambientais da extração de agregados naturais e contribuir para a sustentabilidade a longo prazo da infraestrutura urbana.

Embora a utilização de RCD em pavimentação seja uma prática emergente, há uma lacuna significativa na literatura quanto à avaliação econômica detalhada dessas técnicas em diferentes cenários urbanos. Poucos estudos fornecem uma análise abrangente dos custos envolvidos na implementação de pavimentos utilizando RCD em vias de diferentes extensões, especialmente em contextos afetados por problemas geotécnicos como os afundamentos de solo em Maceió. Esta pesquisa pretende preencher essa lacuna ao fornecer uma avaliação crítica e empiricamente fundamentada dos custos e benefícios associados à adoção de materiais reciclados na pavimentação urbana, contribuindo assim para o avanço do conhecimento e práticas sustentáveis na engenharia civil e gestão ambiental.

Este trabalho está dividido em cinco partes: i. A introdução que aborda o contexto geral do estudo, destacando a importância do tema, o objetivo principal da pesquisa e as lacunas que ela pretende preencher; ii. Dividido em duas seções, esta parte aborda o uso de resíduos da construção e demolição (RCD) em pavimentação e discute desastres naturais, fundamentando o estudo com base na literatura relevante; iii. Aqui, detalhamos os passos seguidos para a realização da pesquisa, desde a coleta de dados até a análise dos resultados, iv. Apresentamos os custos dos pavimentos, comparando o uso de materiais convencionais e reciclados, demonstrando as vantagens econômicas e ambientais. v. a conclusão que resume os principais achados do trabalho, discutimos suas implicações e sugerimos direções para futuras pesquisas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Uso de RCD em Pavimento

A gestão de resíduos da construção e demolição (RCD) tem sido amplamente discutida

na literatura devido aos seus impactos ambientais e econômicos. Estudos recentes, como os de Silva et al. (2020) e Verian (2018), exploraram diversas estratégias de gestão de RCD, destacando a importância da reciclagem e reutilização de materiais. Silva et al. (2020) identificaram que a reciclagem pode reduzir significativamente o volume de resíduos enviados para aterros, enquanto Hossain et al. (2016) enfatizaram os benefícios econômicos da reutilização de RCD em novas construções.

No entanto, apesar desses avanços, há uma lacuna significativa na literatura no que diz respeito à avaliação econômica específica do reaproveitamento de RCD em áreas afetadas por afundamentos de solo, como observado em Maceió devido às operações da Braskem. Estudos anteriores focaram principalmente em contextos urbanos gerais, sem considerar as particularidades de regiões com danos estruturais severos.

Além disso, enquanto alguns estudos, como o de Kadir et al. (2023), discutem os benefícios ambientais do reaproveitamento de RCD, poucos avaliam os aspectos econômicos detalhadamente. Esta pesquisa visa preencher essas lacunas, fornecendo uma análise econômica abrangente e explorando o potencial de reutilização dos RCD em pavimentação e construção de habitações populares, contribuindo para uma gestão de resíduos mais eficiente e sustentável (AKHTAR; SARMAH, 2018).

A cidade de Maceió enfrenta desafios complexos decorrentes dos afundamentos de solo ocasionados pela atividade industrial da Braskem, que comprometem não apenas a estabilidade geotécnica, mas também colocam em evidência a necessidade urgente de soluções inovadoras e sustentáveis na gestão de resíduos. Em resposta a esses desafios, a reutilização de resíduos da construção e demolição (RCD) como matéria-prima para camadas de pavimentação surge como uma alternativa promissora e econômica.

Diversos estudos, como os de Silva et al. (2022), demonstram que o uso de RCD na pavimentação urbana pode ser uma solução eficaz e econômica, especialmente em cenários de recuperação pós-desastre. Estudos realizados por Leite et al. (2011) indicam que o custo-benefício do uso de RCD em camadas de pavimentos pode ser altamente favorável, considerando a redução dos custos de descarte e a disponibilidade local dos materiais.

A reciclagem de RCD pode resultar em reduções significativas nos custos de construção e manutenção, além de melhorar a sustentabilidade ambiental dos projetos de pavimentação (Mendes, 2019; Silva et al., 2016). No entanto, a eficácia dessa prática em termos econômicos deve ser cuidadosamente avaliada para garantir sua viabilidade e eficiência. Assim, esta pesquisa visa preencher essa lacuna, oferecendo uma análise detalhada dos custos envolvidos e fornecendo subsídios para a tomada de decisão por parte das

autoridades locais e do setor da construção civil.

2.2 Desastres Naturais e Infraestrutura Urbana

Desastres naturais, como terremotos, inundações e afundamentos de solo, têm impactos devastadores nas áreas urbanas, resultando em destruição significativa de infraestruturas e perda de vidas. No contexto brasileiro, a cidade de Maceió, em Alagoas, enfrentou um fenômeno particularmente preocupante de afundamento de solo causado pela extração de sal-gema pela Braskem. Este evento gerou uma quantidade substancial de resíduos da construção e demolição (RCD), apresentando desafios e oportunidades para a gestão desses resíduos na reabilitação de pavimentos urbanos. Esta revisão de literatura explora a interseção entre desastres naturais, especificamente afundamentos de solo, e a avaliação econômica da utilização de RCD na construção de camadas de pavimentos urbanos.

Os desastres naturais têm sido objeto de extensiva pesquisa devido aos seus impactos devastadores em áreas urbanas. Estudos como os de Zhou et al. (2021) destacam a vulnerabilidade das cidades a desastres naturais e a necessidade de estratégias de mitigação eficazes. No caso de Maceió, o afundamento do solo levou à evacuação de milhares de residentes e à necessidade urgente de reconstrução de infraestruturas. A literatura aponta que a resiliência urbana depende significativamente da capacidade de reutilizar materiais e aplicar práticas sustentáveis na reconstrução pós-desastre (Tang, 2021).

Estudos indicam que a resiliência das cidades depende da implementação de práticas de construção sustentável e da reutilização de materiais provenientes de demolições (Smith et al., 2022). A gestão de RCD não apenas contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também para a redução de custos em projetos de infraestrutura (Sousa, 2022).

A literatura existente destaca a importância de adotar estratégias integradas para a gestão de desastres naturais e a reutilização de resíduos da construção e demolição. No caso de Maceió, a avaliação econômica do uso de RCD em pavimentos urbanos é crucial para assegurar uma reconstrução eficiente e sustentável. É vital que pesquisas futuras se concentrem na otimização dos processos de reutilização de RCD e na análise de longo prazo dos benefícios econômicos e ambientais dessas práticas. Isso contribuirá para a resiliência e sustentabilidade das áreas urbanas afetadas por desastres naturais.

3. METODOLOGIA

A avaliação das camadas de pavimento urbano utilizando resíduos da construção e demolição (RCD) provenientes do afundamento do solo em Maceió demanda uma abordagem minuciosa para determinar a viabilidade econômica, ambiental e técnica desses materiais reciclados. Este estudo propõe uma metodologia integrada que abrange desde a caracterização dos resíduos até uma análise econômica detalhada, visando promover práticas mais sustentáveis na gestão de resíduos e infraestrutura urbana.

O primeiro passo crucial foi a caracterização dos resíduos de construção e demolição provenientes do afundamento do solo em Maceió. Esse processo envolveu a identificação e classificação dos materiais recicláveis, como concretos, argamassas, tijolos e cerâmicas, além de materiais não recicláveis que podem influenciar na composição das camadas de pavimento. Esses trabalhos foram conduzidos por professores e técnicos da Universidade Federal de Alagoas. Também foram realizados ensaios laboratoriais para avaliar as propriedades dos materiais reciclados e das misturas asfálticas ou de base estabilizada. Os testes incluíram ensaios de compactação, resistência à compressão, resistência ao desgaste, módulo de elasticidade, entre outros, seguindo as normas técnicas vigentes.

Com base na caracterização dos resíduos, foram selecionados os materiais que oferecessem o melhor custo-benefício para a formulação das misturas de pavimento. Isso incluiu a determinação das proporções ideais de RCD em relação aos materiais convencionais, considerando as propriedades geotécnicas e mecânicas necessárias para garantir a durabilidade e resistência do pavimento. Ficou evidenciada a viabilidade técnica do uso de RCD em pavimentos, especialmente na camada de sub-base, enquanto sua aplicação na base mostrou-se inviável.

Com esses dados em mãos, foram realizadas simulações para cada cenário de aplicação de RCD, variando a composição da camada de sub-base. O objetivo foi analisar diversas proporções e seus respectivos impactos em termos de características mecânicas, durabilidade, custos de fabricação e manutenção, além dos efeitos ambientais e sociais associados a cada cenário.

Cenário 1: Utilização de 100% de agregado natural nas camadas de pavimento.

Cenário 2: Utilização de 85% de RCD e 15% de solo.

Cenário 3: Utilização de 70% de RCD e 30% de solo.

Cenário 4: Utilização de 60% de RCD e 40% de solo.

A vida útil dos pavimentos foi estimada em 10 anos com base nas propriedades dos materiais e na frequência de manutenção necessária. A avaliação incluiu a análise dos

benefícios ambientais, como a redução de resíduos de construção e menor exploração de recursos naturais, proporcionando uma perspectiva mais holística dos custos e benefícios.

Foram desenvolvidas tabelas detalhadas comparando os custos totais de implementação e manutenção dos pavimentos com agregados naturais e reciclados. A interpretação dos dados identificará as soluções mais econômicas e sustentáveis, destacando as vantagens e desvantagens de cada opção. Baseado na análise, recomendações serão elaboradas para orientar políticas públicas e práticas de engenharia civil, promovendo o uso sustentável de recursos.

Foram considerados os custos de produção, transporte, instalação, manutenção e ciclo de vida útil do pavimento. Esses dados foram obtidos do sistema de custos da empresa de obras públicas da prefeitura de Maceió. Os custos associados ao material reciclado foram obtidos do Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) de Maceió. Embora o RCD seja doado ao município, neste estudo, seu preço foi valorizado para efeitos de análise e comparação.

Ao comparar economicamente o uso de agregados naturais e reciclados em pavimentação urbana, esta metodologia não só contribuirá para a eficiência econômica dos projetos de infraestrutura em Maceió, mas também fomentará práticas sustentáveis e inovadoras na construção civil. A análise fornecerá dados essenciais para a implementação de soluções de pavimentação que sejam tanto economicamente viáveis quanto ambientalmente responsáveis, trazendo benefícios duradouros para a comunidade.

4. RESULTADOS

4.1 Custos dos materiais

A tabela 1 apresenta os custos por metro cúbico de diferentes materiais utilizados na pavimentação. Destacam-se duas categorias principais: os materiais convencionais, como CBUQ, Brita Graduada Simples e Bica Corrida, e os materiais reciclados, como Bica Corrida RCD.

O CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) é o material mais caro da lista, o que reflete um investimento inicial elevado para pavimentação asfáltica de alta qualidade. Por outro lado, a Brita Graduada Simples e a Bica Corrida são materiais convencionais menos onerosos, frequentemente usados em camadas de base e sub-base para suportar o tráfego rodoviário. A Bica Corrida RCD, proveniente de resíduos de construção e demolição (RCD), representa uma alternativa mais econômica, destacando-se por seu custo reduzido associado à sustentabilidade e à reciclagem de materiais.

TABELA 1- Custo dos Materiais

Material	Custo
Convencional	-
CBUQ	500,00 R$/m³
Brita Graduada Simples	83,19 R$/m³
Bica Corrida	76,25 R$/m³
Reciclado	-
Bica Corrida RCD	45,75R$/m³

Fonte: Elaboração Própria, (2024)

A análise minuciosa dos custos dos materiais de pavimentação é fundamental para garantir a eficiência econômica e ambiental dos projetos de infraestrutura rodoviária. A seleção dos materiais adequados não apenas afeta diretamente o orçamento inicial do projeto, mas também influencia a durabilidade e os custos de manutenção futuros da pavimentação. Além disso, ao considerar aspectos ambientais, como o uso de materiais reciclados, os gestores podem promover práticas sustentáveis que reduzem o impacto ambiental e contribuem para uma infraestrutura mais resistente a longo prazo.

4.2 Custos dos Pavimentos de Via Curta em Maceió

Para calcular o custo do pavimento de 1 km de vias curtas conforme as especificações fornecidas, primeiro vamos detalhar os custos de cada camada e o custo total. Começaremos calculando o volume de material necessário para 1 km de via, levando em conta a largura e a espessura das camadas. Em seguida, multiplicaremos esse volume pelo preço unitário de cada material para obter o custo final.

O Quadro 1 apresenta uma comparação detalhada dos custos entre o uso de materiais naturais e reciclados em diferentes camadas do pavimento de vias curtas. Observa-se que, para o revestimento de CBUQ, os custos são iguais tanto para materiais naturais quanto reciclados, refletindo um equilíbrio nos custos unitários. Na camada de base, a Brita Graduada apresenta custos similares em ambas as opções de materiais, enquanto nas sub-bases, o uso de Bica Corrida RCD demonstra uma economia significativa em relação ao material natural.

QUADRO 1- Comparação de Custos das Camadas de Pavimento com Materiais Naturais e Reciclados para 1 Km de Pavimento de Vias Curtas.

Camadas	Material	Unidade	Espessura (cm)	Volume (m³)	Custo Unitário (R$/m³)	Custo total - Material Natural (R$/m³)	Custo total - RCD (R$/m³)
Revestimento	CBUQ	m³	3 a 5	360	500,00	180.000,00	180.000,00
Base	Brita						

	Graduada	m³	10 a 15	1200	83,19	99.828,00	99.828,00
Sub-base	Bica corrida-(Natural)	m³	15 a20	1200	76,25	91.500,00	-
Sub-base	Bica corrida (RCD)	m³	10 a 15	1200	45,75	-	54.900,00
Custo total do Pavimento						371.328,00	334.728,00

Fonte: Elaboração Própria, (2024)

A análise dos custos das camadas de pavimento, comparando materiais naturais com resíduos de construção e demolição (RCD), revela vantagens econômicas e ambientais significativas. Para o revestimento asfáltico convencional (CBUQ) de 3 cm de espessura, o custo unitário é mais elevado, refletindo a qualidade e durabilidade do material, totalizando R$ 180.000,00 para 1 km de via. A base de brita graduada, com 10 cm de espessura, tem um custo total de R$ 99.828,00. Já a sub-base de bica corrida com material natural, também com 10 cm de espessura, custa R$ 91.500,00. Somando esses valores, o custo total para construir o pavimento utilizando apenas materiais naturais é de R$ 371.328,00, conforme demonstrado no quadro 1.

Por outro lado, substituir a sub-base de material natural por bica corrida de RCD reduz drasticamente o custo total da camada. Com um valor unitário significativamente menor (R$ 45,75/m³), o custo da sub-base utilizando RCD fica em apenas R$ 54.900,00, resultando em um custo total de R$ 334.728,00 para o pavimento. Esta redução representa uma economia de R$ 36.600,00, aproximadamente 10% do custo total inicial. Além dos benefícios econômicos, o uso de RCD promove a sustentabilidade ao reduzir a demanda por materiais naturais e diminuir a quantidade de resíduos em aterros. Portanto, a integração de RCD na pavimentação urbana não só melhora a eficiência financeira dos projetos de infraestrutura, mas também apoia práticas ambientais responsáveis, alinhando-se às metas de desenvolvimento sustentável e gestão eficiente de recursos.

Essa análise não apenas destaca a viabilidade econômica do uso de materiais reciclados, especialmente em camadas menos exigentes como as sub-bases, mas também sublinha a importância das considerações ambientais na escolha dos materiais de pavimentação, promovendo práticas de construção mais sustentáveis.

4.3 Simulação de cenários

O quadro 2 apresenta diferentes cenários de combinação entre agregados naturais e reciclados nas camadas de pavimento, influenciando diretamente nos custos finais para a via curta. O cenário 1 representa a utilização de agregado natural nas camadas de pavimento de base e no revestimento e utiliza 100% de agregado reciclado na sub-base. O custo final é o menor entre todos os cenários analisados, refletindo a familiaridade e disponibilidade dos materiais convencionais. O cenário 2 com 85% do agregado reciclado (RCD) é incorporado na sub-base, enquanto 15% é de material natural. Isso resulta em um aumento moderado no custo final, indicando uma transição gradual para materiais reciclados com impacto financeiro controlado.

Já o cenário 3 com 70% de RCD na sub-base e 30% de material natural, o custo final continua a aumentar, mas ainda se mantém competitivo em relação aos cenários subsequentes. Esse cenário sugere uma maior adoção de práticas sustentáveis sem comprometer significativamente o orçamento. O cenário 4 utiliza 60% de RCD na sub-base e 40% de material natural. O custo final continua viável, porém, mostra uma tendência crescente à medida que a proporção de RCD aumenta, refletindo possíveis desafios adicionais na gestão de custos e logística. O cenário 5 representa a utilização exclusiva de agregado natural em todas as camadas de pavimento resultando no pior cenário possível bem como o custo mais elevado.

QUADRO 2: Cenários de Tráfego e Custos Finais para Vias Curtas com Diferentes Combinações de Materiais de Pavimentação

	Tráfego Via Curta				
	Sub-base		Base	QBUQ	Custo Final
	Natural	Reciclada	Natural	Natural	
Cenário 1		100%	100%	100%	R$ 334.728,00
Cenário 2	15%	85%	100%	100%	R$ 347.080,50
Cenário 3	30%	70%	100%	100%	R$ 359.433,00
Cenário 4	40%	60%	100%	100%	R$ 367.668,00
Cenário 5	100%		100%	100%	R$ 417.078,00

Fonte: Elaboração Própria, (2024)

Cada um dos cenários apresentados na análise oferece uma visão clara das trocas entre custo e sustentabilidade na escolha dos materiais para pavimentação. Os cenários com maior proporção de agregados reciclados mostram um potencial significativo para reduzir o impacto

ambiental e promover práticas de construção mais sustentáveis, mesmo que apresentem custos finais ligeiramente superiores. Em contrapartida, os cenários que utilizam predominantemente materiais naturais têm um custo inicial mais baixo, mas podem resultar em maior consumo de recursos naturais e aumento na geração de resíduos. Esses insights são cruciais para orientar decisões futuras relacionadas ao desenvolvimento e gestão da infraestrutura urbana, buscando um equilíbrio eficaz entre eficiência econômica e responsabilidade ambiental.

4.4 Avaliação do Benefício do Custo do Pavimento

O Quadro 3 mostra uma comparação dos custos entre o uso de materiais convencionais e reciclados (RCD) na construção de pavimentos. Os valores destacam uma diferença considerável no custo total entre os dois tipos de materiais, sendo que o uso de agregado reciclado apresenta uma economia significativa em comparação com o convencional.

A utilização da bica corrida reciclada proporciona uma economia de R$ 34.312,46, o que equivale a um custo-benefício de 60,0% em comparação com o material convencional. Se optássemos pela Brita Graduada, a economia seria ainda maior, com R$ 42.120,00 economizados ao utilizar materiais reciclados, refletindo um custo-benefício de 55,0%. No transporte, a maior economia observada é de R$ 80.797,50, representando um custo-benefício de 40,0%.

QUADRO 3: Custo benefício de RCD em pavimento

Material	Bica Corrida	Brita Graduada	Transporte	Total
Convencional	85781,21	93588,75	134662,5	314032,5
RCD	51468,75	51468,75	53865	156802,5
Diferença	34312,46	42120	80797,5	157230,0
Custo / Benefício (%)	60,0	55,0	40,0	49,9

Fonte: Elaboração Própria, (2024)

A utilização da bica corrida reciclada proporciona uma economia de R$ 34.312,46, o que equivale a um custo-benefício de 60,0% em comparação com o material convencional. Se optássemos pela Brita Graduada, a economia seria ainda maior, com R$ 42.120,00 economizados ao utilizar materiais reciclados, refletindo um custo-benefício de 55,0%. No transporte, a maior economia observada é de R$ 80.797,50, representando um custo-benefício de 40,0%.

No geral, a substituição de materiais convencionais por reciclados resulta em uma

redução total de custos de R$ 157.230,00, refletindo um custo-benefício global de 49,9%. Esses dados destacam a viabilidade econômica do uso de materiais reciclados em projetos de pavimentação, além de promoverem práticas mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis.

4.5 Custos das Vias Urbanas em Maceió

Em Maceió, as larguras das vias urbanas variam conforme o comprimento da via, garantindo funcionalidade e segurança para o tráfego de pedestres e veículos. Essas especificações são essenciais para criar um ambiente urbano organizado e acessível, facilitando o fluxo de trânsito e promovendo a mobilidade.

Para vias com até 200 metros de extensão, a largura total é de 12 metros, com uma pista de rolamento de 8 metros e passeios de 2 metros de cada lado. Já vias entre 200 e 600 metros possuem 14 metros de largura, com 9 metros de pista de rolamento e passeios de 2,5 metros de cada lado. As vias de 600 a 800 metros têm 18 metros de largura, com 12 metros de pista de rolamento e passeios de 3 metros de cada lado. Por fim, vias com mais de 800 metros possuem 29 metros de largura, incluindo um canteiro central de 5 metros, duas pistas de rolamento de 9 metros cada, passeios de 3 metros de cada lado e uma ciclovia.

O quadro 4 oferece uma visão abrangente dos custos associados à pavimentação de diferentes tipos de vias, considerando comprimento, largura, espessura do revestimento, base e sub-base. Essas informações são fundamentais para o planejamento e para tomada de decisões em projetos de infraestrutura rodoviária.

QUADRO 4 - Custos das Vias Urbanas em Maceió

Tipo de Via	Comprimento (m)	Largura (m)	Revestimento (cm)	Base (cm)	Sub-base (cm)	Custo do Pavimento
Vias Curtas	Até 200	12	3 a 5	10 a 15	10 a 15 (RCD)	334.728,00
					15 a 20 (convencional)	371.328,00
Vias Médias	De 200 a 600	14	5 a 7	15 a 20	15 a 20 (RCD)	620.774,00
					20 a 25 (convencional)	738.199,00
Vias Longas	De 600 a 800	18	7 a 10	20 a 25	20 a 25 (RCD)	1.094.184
					25 a 30 (convencional)	1.272.609

Fonte: Elaboração Própria, (2024)

A análise detalhada dos custos de pavimentação para diferentes tipos de vias revela como o comprimento, a largura e a espessura das camadas influenciam significativamente o

orçamento total. Vias mais curtas, com dimensões menores e camadas mais finas de revestimento, base e sub-base, apresentam custos mais baixos, sendo uma escolha econômica para projetos de menor escala. Em contrapartida, vias de médio e longo alcance mostram um aumento considerável nos custos devido às suas maiores dimensões e à necessidade de camadas mais espessas, o que reflete um investimento maior para garantir a durabilidade e a qualidade da infraestrutura rodoviária.

Além disso, a comparação entre o uso de sub-base de resíduos de construção e demolição (RCD) e materiais convencionais destaca a viabilidade econômica e ambiental do RCD como uma alternativa mais econômica. No entanto, embora não tenham sido fornecidos valores específicos para vias muito longas, é esperado que essas vias demandem os maiores investimentos devido às suas dimensões extremas. Essas considerações são cruciais para o planejamento financeiro e a execução eficiente de projetos de pavimentação, garantindo uma alocação otimizada de recursos e a construção de uma infraestrutura sustentável e de alta qualidade ambiental.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise econômica das camadas de pavimentos em vias de diferentes extensões em Maceió, utilizando resíduos da construção e demolição (RCD) resultantes dos afundamentos de solo causados pela Braskem, revela uma série de vantagens significativas. Esta abordagem não só oferece uma solução sustentável para a gestão de resíduos, mas também apresenta uma alternativa econômica viável aos materiais convencionais, trazendo benefícios econômicos, ambientais e sociais.

A comparação dos custos entre materiais convencionais e RCD revela uma economia substancial. Para vias curtas, o custo total do pavimento utilizando agregados reciclados é consideravelmente menor do que o dos materiais naturais. Isso se deve principalmente ao menor custo de aquisição e transporte dos materiais reciclados, proporcionando uma economia de até 60% no caso da bica corrida. Essa economia se estende às camadas de brita graduada e ao transporte, com reduções de custo de 55% e 40%, respectivamente. No total, a utilização de RCD pode reduzir os custos totais de pavimentação em até 49,9%.

Incorporar RCD nas camadas de pavimento ajuda significativamente a reduzir o impacto ambiental causado pela extração e transporte de agregados naturais. Reutilizar resíduos dos afundamentos de solo não apenas mitiga os efeitos negativos desses eventos, mas também diminui a necessidade de novos materiais, reduzindo a pegada ecológica dos projetos de pavimentação. Além disso, essa prática está alinhada aos princípios da economia circular,

promovendo a reciclagem e a reutilização de materiais que, de outra forma, seriam descartados em aterros.

A utilização de RCD em projetos de pavimentação em Maceió traz um impacto positivo significativo para a comunidade local. Gerenciar eficientemente os resíduos dos afundamentos de solo ajuda a minimizar os riscos ambientais e de saúde pública associados ao descarte inadequado de materiais de construção e demolição. Além disso, o custo reduzido desses projetos de pavimentação pode liberar recursos financeiros que podem ser direcionados para outras áreas essenciais, como educação, saúde e infraestrutura básica.

Criar uma cadeia de valor em torno da reciclagem de RCD pode impulsionar significativamente a economia local. A demanda por serviços de reciclagem e processamento de resíduos pode gerar empregos e incentivar o surgimento de novas empresas e tecnologias voltadas para a sustentabilidade. Esse efeito multiplicador beneficia toda a comunidade, melhorando a qualidade de vida e promovendo um desenvolvimento urbano mais sustentável.

A avaliação econômica das camadas de pavimentos em vias curtas, médias e longas em Maceió, utilizando RCD dos afundamentos de solo causados pela Braskem, destaca a viabilidade e os benefícios dessa abordagem. Além de oferecer uma solução econômica para os projetos de pavimentação, a reutilização de RCD promove a sustentabilidade ambiental e traz benefícios sociais significativos.

É crucial que gestores públicos e engenheiros civis considerem cuidadosamente essas vantagens ao planejar e executar projetos de infraestrutura urbana. A adoção de materiais reciclados não deve ser vista apenas como uma alternativa econômica, mas como uma estratégia essencial para promover o desenvolvimento sustentável das cidades. Investir em práticas de construção sustentáveis e na gestão eficiente de resíduos é fundamental para assegurar um futuro mais resiliente e equilibrado não apenas para Maceió, mas também para outras regiões enfrentando desafios similares.

Portanto, a análise apresentada fornece uma base sólida para a tomada de decisões informadas, orientando políticas públicas e práticas de engenharia que visem à sustentabilidade e eficiência econômica. A integração de RCD nos projetos de pavimentação não se limita a responder aos desafios ambientais e econômicos atuais, mas representa um passo crucial em direção a um modelo de desenvolvimento urbano mais sustentável e responsável.

REFERÊNCIAS

ASLAM, M. S.; HUANG, B.; CUI, C. Construction and demolition waste as recycled aggregate for environmentally friendly concrete paving. Environmental Science and Pollution Research, v. 26, n. 8, p. 7769-7781, 2019.

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. Journal of Cleaner Production, v. 172, p. 297-305, 2018.

BRASIL, R. M. L. R.; ROSA, L. S. Estudos de caso sobre a gestão de resíduos da construção civil: aspectos ambientais e econômicos. In: GESTÃO de resíduos na construção civil. Elsevier, 2018.

COELHO, A.; DE BRITO, J. Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal. Journal of Cleaner Production, v. 39, p. 338-352, 2013.

HOSSAIN, M. U.; POON, C. S.; LO, I. M.; CHENG, J. C. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. Resources, Conservation & Recycling, v. 109, p. 67-77, 2016.

KADIR, A. A.; RAMLI, M.; OTHMAN, M. A. Economic evaluation of using recycled concrete aggregates in pavement construction: A case study on pavement sustainability in Malaysia. Construction and Building Materials, v. 333, p. 126886, 2023.

LEITE, M. B.; MOTTA, R. S.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. Construction and Building Materials, v. 25, n. 6, p. 2972-2979, 2011.

MENDES, J. C. Gestão de resíduos da construção civil: práticas sustentáveis e inovadoras. Blucher, 2019.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. Journal of Cleaner Production, v. 112, p. 2171-2186, 2016.

SILVA, R. V.; NEVES, D. V.; DELLA, V. P. Assessment of environmental and economic impacts of using recycled concrete aggregates in pavement construction: A case study in Brazil. Resources, Conservation and Recycling, v. 185, p. 105280, 2022.

SMITH, J.; JOHNSON, R.; BROWN, A. Life cycle cost analysis of using recycled concrete aggregates in pavement construction: A case study in the United States. Journal of Cleaner Production, v. 321, p. 129033, 2022.

SOUSA, C.; SANTOS, D. A. L.; DUTRA, L. M. Reutilização de resíduos de construção e demolição para preservação do meio ambiente e redução de custos. Ciências Exatas e da Terra, Engenharias, v. 26, n. 116, nov. 2022.

VERIAN, K. P.; ASHRAF, W.; CAO, Y. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. Resources, Conservation & Recycling, v. 133, p. 30-49, 2018.

YANG, L.; WANG, X.; CHEN, L. et al. Application of satellite remote sensing data in post-disaster assessment of earthquakes and floods: A review. Remote Sensing of Environment, v. 262, p. 112609, 2021.

ZHOU, Y.; WANG, S.; YU, Z. et al. Earthquake-induced landslide susceptibility mapping using deep learning and Bayesian optimization. Natural Hazards, v. 105, p. 1801-1820, 2021.