

Concretos sustentáveis à luz da ciência, tecnologia e sociedade: impacto mecânico, econômico e ambiental da incorporação de resíduos sólidos fresados de pavimento asfáltico em concreto de cimento Portland.

RESUMO

Gemmelle Oliveira Santos
Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Ceará -
IFCE, Fortaleza, Ceará, Brasil
gemmelle@gmail.com

Michael Lima Silva
Instituto Brasileiro de Geografia e
Estatística - UE/CE, Fortaleza,
Ceará, Brasil
contatomichaells@gmail.com

Sandro Moreira Braga
Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Ceará -
IFCE, Fortaleza, Ceará, Brasil
sandro.braga47@aluno.ifce.edu.br

Considerando os desafios contemporâneos que envolvem a interface entre ciência, tecnologia e sociedade (CTS), este estudo avaliou a viabilidade técnica, econômica e ambiental da incorporação de resíduos fresados de pavimento asfáltico (*Reclaimed Asphalt Pavement* – RAP) em concretos de cimento Portland (CCP) utilizados na infraestrutura viária. Foram elaboradas treze dosagens com diferentes teores de RAP, substituindo parcial ou totalmente os agregados miúdos, graúdo ou ambos. Ensaios laboratoriais avaliaram propriedades como trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade. Apesar das reduções progressivas nos parâmetros mecânicos com o aumento do teor de RAP, a maioria das misturas atendeu aos requisitos normativos, especialmente as dosagens com 25% de substituição (M25 e G25), que não apresentaram diferenças estatísticas significativas em relação ao traço de referência. Estimativas demonstraram reduções de até 32,4% nos custos de produção e 3,94% nas emissões de CO₂ por m³ de concreto. A implantação de 200 metros de meio-fio pré-moldado com RAP em um trecho da BR-020/CE comprovou a funcionalidade e a durabilidade da solução após 88 dias de operação. O reaproveitamento do RAP como agregado alternativo está em consonância com os princípios da economia circular e da ecoinovação, contribuindo para os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS 9, 11, 12 e 13). O estudo se insere na perspectiva CTS ao evidenciar o potencial das inovações tecnológicas em responder a problemas ambientais concretos e em promover soluções sustentáveis, economicamente viáveis e socialmente relevantes na construção civil.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos de pavimentação. Reciclagem. Concreto. Economia Circular.

INTRODUÇÃO

A construção civil desempenha um papel estratégico no cenário socioeconômico de um país, não apenas por sua expressiva participação no Produto Interno Bruto (PIB), mas também por ser um dos setores que mais geram empregos (Cucos; Turcan, 2025). Além de fomentar a cadeia produtiva de materiais e serviços, esse setor é fundamental para a promoção do desenvolvimento urbano, a melhoria da infraestrutura e a valorização de áreas urbanas. Seu impacto vai além do aspecto econômico, refletindo-se também em questões sociais, como a habitação e a qualidade de vida da população (González et al., 2024; Rostamnezhad; Thaheem, 2022).

Contudo, apesar de sua importância, a indústria da construção civil é uma das maiores consumidoras de recursos naturais, sendo responsável por aproximadamente 50% do consumo global desses recursos, 40% do uso de energia mundial e pela geração de cerca de 50% de todos os resíduos sólidos (Visintin; Xie; Bennett, 2020). Além disso, a produção de concreto (um dos principais produtos dessa indústria) pode contribuir para 4 a 8% das emissões globais de dióxido de carbono – CO₂ (Brito; Kurda, 2021). O concreto de cimento Portland é um dos materiais mais consumidos do mundo, sendo responsável por emissões significativas de CO₂ — para cada tonelada de clínquer produzido, cerca de uma tonelada de CO₂ é lançada na atmosfera. Além disso, a produção de concreto com matérias-primas convencionais, como areia, brita e cimento, exerce grande pressão sobre o meio ambiente. (DIAS; SILVA; PAGGIALI, 2017).

Diante desses significativos impactos ambientais, vêm surgindo diversas soluções sustentáveis aplicadas ao concreto. O concreto reciclado, por exemplo, busca reaproveitar os resíduos provenientes da construção e demolição (RCD), especialmente por meio da substituição de agregados naturais por agregados reciclados em novas formulações, enquanto o concreto ecológico tem como foco principal a redução da pegada ambiental, incorporando materiais de baixo impacto e estratégias que visam à diminuição das emissões de carbono ao longo de seu ciclo de vida (Dacić et. al, 2025). Por isso, a busca por concretos mais sustentáveis tem sido objeto de diversos estudos, com foco na substituição de componentes convencionais por resíduos industriais, urbanos ou da construção civil (LEITE; FIGUEIRÊDO; LIMA, 2013; ALVES, 2017; MAIA; JUNIOR; SALES, 2022).

Essa estratégia se alinha aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente ao ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ao ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ao ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ao ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) (ONU, 2015).

Nos países desenvolvidos, a gestão de resíduos é uma preocupação central. Na União Europeia, a legislação voltada à redução dos resíduos de construção e demolição (RCD) baseia-se no ciclo de vida dos produtos. Nos Estados Unidos, os altos custos de disposição incentivam a reutilização e reciclagem como alternativas mais viáveis. Hong Kong adota leis rigorosas, altas taxas para destinação final e possui uma população conscientizada, o que tem reduzido significativamente o volume de RCD em aterros — embora ainda faltem instalações de reciclagem. O Reino Unido, um dos maiores geradores de RCD na Europa, também lidera em reaproveitamento, assim como a Dinamarca (GEUS; MOURA; GARCAS, 2019).

Assim, tecnologias de reciclagem na construção civil são essenciais para a sustentabilidade, pois elas valorizam os resíduos ao viabilizar sua reutilização inovadora (Suebsuk et al., 2025). A cadeia produtiva do setor da Construção Civil deve, portanto, adotar práticas de economia circular que objetivem reduzir o consumo de recursos naturais e de matérias-primas, além de criar um ciclo inteligente para a reutilização dos resíduos gerados em suas operações, evitando o seu descarte inapropriado e outras práticas insustentáveis (Paschoalin Filho et al., 2019). A transição para a economia circular é crucial para reduzir os impactos ambientais do setor, mas enfrenta barreiras como a baixa compreensão do tema e a complexidade das cadeias de valor. Destacam-se obstáculos políticos e tecnológicos, que exigem governança eficaz, com medidas regulatórias, fiscais e um sistema integrado de gestão de resíduos e informações. Para viabilizar essa transição, é essencial a atuação conjunta do governo e dos *stakeholders*, por meio de parcerias público-privadas e comunicação estratégica (Munaro; Tavares, 2022).

O setor da infraestrutura rodoviária, em particular, exerce grande pressão sobre os recursos naturais. Os pavimentos asfálticos são estruturas duráveis, porém, ao longo do tempo, sofrem deterioração funcional e estrutural devido à ação contínua do tráfego e às intempéries (BERNUCCI et al., 2022). Quando não há manutenção preventiva adequada, a degradação tende a se acentuar, exigindo intervenções corretivas onerosas e tecnicamente complexas (BALBO, 2007; DNIT, 2005). A fresagem é uma técnica consolidada na manutenção de pavimentos, ao permitir a remoção de camadas asfálticas, mas gera grandes volumes de resíduos, cerca de 420 toneladas a cada 1000 metros fresados com 5 cm de espessura (Bonfim, 2011).

Diante disso, cresce o esforço global para reduzir a geração de resíduos sólidos e reaproveitar materiais. Com a alta demanda por agregados na produção de concreto, a viabilidade de incorporar resíduos reciclados vem sendo amplamente estudada. Agências rodoviárias enfrentam desafios com o descarte de grandes volumes de pavimento deteriorado, impulsionando o interesse por técnicas de reciclagem, especialmente na Europa e em outras regiões (Papakonstantinou, 2018). O uso dos resíduos fresados como agregados reciclados para concreto é uma alternativa promissora, mas uma caracterização completa é necessária para garantir o desempenho e a durabilidade do concreto (Masi et al., 2022).

Diante do aumento progressivo da geração de resíduos da construção e demolição, cresce a necessidade de integrar estratégias sustentáveis à infraestrutura viária. A destinação inadequada do fresado representa um desafio ambiental e logístico, exigindo abordagens inovadoras para sua reinserção nos ciclos produtivos. No Ceará, as obras do DNIT geraram cerca de 646,5 mil toneladas de fresado em dez anos, grande parte ainda estocada, o que acarreta custos e passivos ambientais. A gestão eficiente desses resíduos é cada vez mais necessária.

Embora a reciclagem do RAP traga benefícios econômicos e ambientais, grande parte do material segue sem uso, reforçando a urgência por estratégias inovadoras de reaproveitamento (Hossiney et al., 2020). Segundo Masi et al. (2022), a incorporação de RAP como agregado reciclado no concreto pode reduzir impactos econômicos e ambientais. Entre os benefícios estão a menor extração de recursos naturais, economia de energia na extração e transporte, e a redução das emissões de CO₂. Além disso, o uso de RAP ajuda a minimizar problemas logísticos e ambientais relacionados ao descarte de resíduos, diminuindo o volume destinado a aterros. Nesse sentido, este estudo tem como objetivo avaliar a

viabilidade técnica e ambiental da utilização do fresado asfáltico como agregado reciclado na produção de meio-fio pré-moldado em concreto. Busca-se analisar o desempenho físico e mecânico de diferentes composições contendo fresado, considerando sua aplicação prática em trechos experimentais de infraestrutura rodoviária.

A hipótese que orienta esta pesquisa é que a substituição parcial de agregados naturais por fresado não compromete a qualidade do concreto, ao mesmo tempo em que promove ganhos ambientais e econômicos. Justifica-se a realização deste estudo diante da necessidade urgente de soluções sustentáveis para o reaproveitamento de resíduos gerados em obras de pavimentação, especialmente no contexto brasileiro, onde ainda há grande subutilização desse material. Assim, a proposta contribui para o avanço de práticas alinhadas à economia circular e à inovação tecnológica no setor da construção civil.

METODOLOGIA

Matérias-primas

Na confecção do concreto de referência, a brita ½" foi utilizada como agregado graúdo e a areia natural foi utilizada como agregado fino. No concreto ecológico, o agregado reciclado (RAP) foi utilizado como substituto tanto do agregado fino como do agregado grosso, em diferentes proporções. A caracterização desses materiais está descrita na Tabela 1 e Figura 1. O RAP utilizado na pesquisa foi coletado no depósito do DNIT, proveniente de diversas obras de conservação rodoviária, sendo considerado RAP não classificado (Figura 2a).

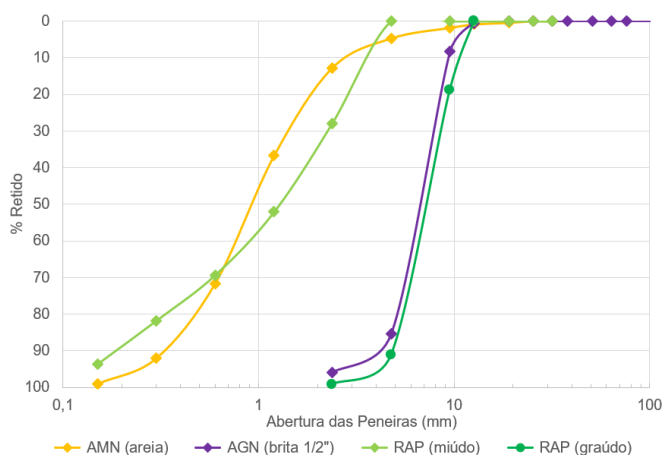
O RAP da pesquisa foi fracionado em granulometrias diferentes (fina e grossa) para um melhor controle tecnológico (Figura 2b), conforme recomendado (COSTA, 2022). O RAP fino foi o passante na peneira nº4 (4,75mm) para substituir a areia. O RAP grosso foi o passante na peneira de 1/2 polegada (12,5mm) e retido na peneira nº4 para substituir a brita. Como não foi feita a lavagem do fresado, o material também pode ser considerado um *dirty rap*. Assim, o RAP foi tratado como *black rock*.

Tabela 1: Caracterização Física dos materiais utilizados nas misturas de concreto

Testes	Areia	Brita	RAP fino	RAP grosso
Módulo de finura – NBR 7211 (2022)	3,20	5,70	3,25	6,06
Dimensão máx. (mm) – NBR 7211 (2022)	4,76	12,50	4,76	12,50
Massa unitária compactada (g/cm³) – NBR 16972 (2021)	1,62	1,52	1,51	1,42
Massa unitária solta (g/cm³) – NBR 16972 (2021)	1,58	1,44	1,43	1,37
Massa específica máxima (g/cm³) – ASTM D 2041 (2011)	2,64	2,59	2,47	2,55
Material pulverulento (%) – NBR 16973 (2021)	1,17	0,36	3,72	0,07
Absorção (%) – NBR 16916 (2021), NBR 16917 (2021)	1,01	0,91	1,68	1,00
Perda de massa Los Angeles (%) – NBR 16974 (2022)	-	26,72	-	17,42
Teor de betume (%) – NBR 16208 (2013)	-	-	5,92	3,31

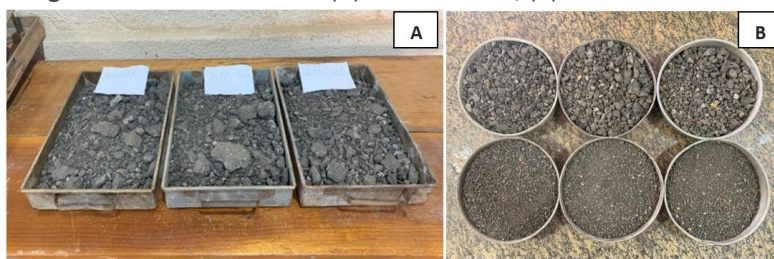
Fonte: Autores (2025).

Figura 1: Curvas granulométricas dos agregados utilizados



Fonte: Autores (2024)

Figura 2: Amostras de RAP: (A) fresado bruto, (B) fresado beneficiado



Fonte: Autores (2024)

Formulação das misturas de concreto

De acordo com a norma DNIT 020/2023-ES (DNIT, 2023), o concreto para dispositivos de drenagem deve apresentar resistência característica à compressão mínima de 20 MPa. Assim, definiu-se o traço de referência (REF), sem resíduos, com classe de resistência C20 (grupo I, $f_{ck} = 20$ MPa) e consistência S50 (abatimento entre 50 e 100 mm), conforme NBR 8953 (ABNT, 2015). Para avaliar o efeito da adição de RAP nas propriedades físicas e mecânicas do concreto com cimento Portland (CCP), foram adotadas diversas dosagens experimentais. A metodologia seguiu o conceito de dosagem racional e experimental da ABCP/ACI, fundamentado no método do American Concrete Institute – ACI (2019) e em estudos anteriores (COSTA et al., 2018; SILVA, 2023).

O experimento envolveu três tipos de concretos: com RAP miúdo (substituindo areia), RAP gráudo (substituindo brita) e ambos os tipos (substituindo areia e brita simultaneamente), com teores de substituição de 25, 50, 75 e 100%. Foram produzidas 13 dosagens (Tabela 2), incluindo o traço de referência e modificados. As misturas foram dosadas em massa, com ensaios mecânicos realizados aos 28 dias para validação. Foram processadas aproximadamente 2,89 toneladas de insumos na fase laboratorial da pesquisa (excluído trecho experimental). Ao todo, foram moldados 247 corpos de prova, sendo 208 cilíndricos CP (100mmx200mm) para os ensaios de resistência à compressão axial e 39 prismáticos (150x150x500mm) para os ensaios de resistência à tração na flexão.

Tabela 2: Dosagem dos materiais utilizados na confecção dos concretos

Dosagem	Cimento Kg/m ³	Areia Kg/m ³	Brita Kg/m ³	RAPM Kg/m ³	RAPG Kg/m ³	Água Kg/m ³	Teor de Argamassa
REF	367	842,1	911,8	-	-	210,8	57%
M25	367	631,6	911,8	210,5	-	210,8	57%
M50	367	421,1	911,8	421,1	-	210,8	57%
M75	367	210,5	911,8	631,6	-	210,8	57%
M100	367	-	911,8	842,1	-	210,8	57%
G25	367	842,1	683,9	-	228,0	210,8	57%
G50	367	842,1	455,9	-	455,9	210,8	57%
G75	367	842,1	228,0	-	683,9	210,8	57%
G100	367	842,1	-	-	911,8	210,8	57%
MG25	367	631,6	683,9	210,5	228,0	210,8	57%
MG50	367	421,1	455,9	421,1	455,9	210,8	57%
MG75	367	210,5	228,0	631,6	683,9	210,8	57%
MG100	367	-	-	842,1	911,8	210,8	57%

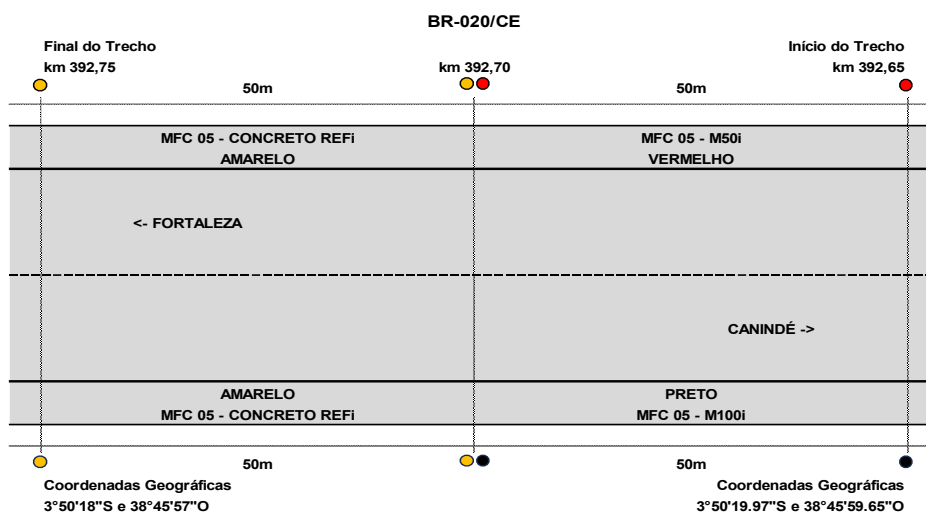
Legenda: REF (referência), M (miúdo), G (grauído), MG (miúdo e grauído), RAPM (fresado fino), RAPG (fresado grauído). Fonte: Autores (2025).

Testes realizados

No estado fresco, a consistência do concreto foi avaliada pelo ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020). Os ensaios de resistência à compressão seguiram a NBR 5739 (ABNT, 2018), utilizando prensa com capacidade de 100 tf. A resistência à tração na flexão foi determinada conforme a NBR 12142 (ABNT, 2010), com três corpos de prova prismáticos por dosagem (totalizando 39), moldados e adensados segundo a NBR 5738 (ABNT, 2015). O módulo de elasticidade foi obtido conforme a NBR 8522-1 (ABNT, 2021), com quatro corpos de prova cilíndricos por dosagem (total de 52), submetidos a ensaio em prensa servo-hidráulica EMIC SSH300 (200 tf, resolução de 0,1 kN), equipada com dois extensômetros Trd11.

As deformações foram registradas e processadas no software TESC, versão 3.04. Por fim, foi implantado em verdadeira grandeza um trecho na BR-020/CE de 200m de comprimento com os dispositivos de drenagem (meio-fio pré-moldado do tipo MFC 05) contendo o RAP. A BR-020 é uma rodovia federal radial, ou seja, liga a cidade de Brasília à cidade de Fortaleza, Ceará. Os dispositivos de drenagem foram implantados entre os quilômetros km 392,75 e km 392,65 (Figura 3).

Figura 3: Croqui representativo do trecho experimental implantado



Fonte: Autores (2024)

Os dispositivos de drenagem foram confeccionados em março de 2024 e sua implantação às margens da rodovia se deu em abril de 2024. Esse trecho experimental ficou em operação durante 4 meses, sendo monitorado os registros de chuva no período e verificado as condições estruturais dos dispositivos de drenagem quando submetidos às intempéries.

Estimativas de ganhos econômicos e ambientais

Foi realizada uma estimativa dos benefícios financeiros e ambientais advindos do uso de RAP na produção de diferentes classes de concreto sustentáveis. Segundo Shi et al. (2017), essa prática reduz custos, impactos do armazenamento e o consumo de agregados virgens, contribuindo para a sustentabilidade. A análise econômica considerou o Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO/DNIT – jan/2024, Ceará), a Composição de Preço Unitário (CPU) para concreto 20 MPa e os insumos utilizados na pesquisa. O custo do beneficiamento do RAP foi estimado com base no SINAPI, desconsiderando transporte, que foi avaliado conforme contratos da BR-020/CE. A análise ambiental baseou-se em inventários de emissão de CO₂ da literatura, considerando a substituição da areia natural por RAP e a pegada de carbono associada ao transporte até o pátio do DNIT.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Propriedades mecânicas dos concretos sustentáveis

Durante as etapas de mistura e moldagem dos corpos de prova, foram realizados ensaios de abatimento do concreto no estado fresco, conhecidos como *Slump Test*. Esses ensaios têm como objetivo avaliar a consistência e a trabalhabilidade do concreto recém-produzido. Os valores obtidos para cada uma das dosagens analisadas encontram-se apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados do teste de abatimento (*Slump Test*) das misturas de concreto

Dosagem	ST ₁ (mm)	ST ₂ (mm)	ST ₃ (mm)	Média	Desvio Padrão
REF	20	25	20	21,7	2,9
M25	20	20	35	25,0	8,7
M50	10	10	20	13,3	5,8
M75	10	10	10	10,0	0,0
M100	10	0	10	6,7	5,8
G25	10	25	10	15,0	8,7
G50	10	25	20	18,3	7,6
G75	10	25	15	16,7	7,6
G100	15	10	25	16,7	7,6
MG25	10	20	10	13,3	5,8
MG50	10	15	10	11,7	2,9
MG75	5	5	10	6,7	2,9
MG100	15	0	5	6,7	7,6

Legenda: ST (*Slump Test*). Fonte: Autores (2025).

Conforme mostram os dados, apenas a dosagem M25 superou a trabalhabilidade do concreto de referência (21,7mm de abatimento). As demais dosagens apresentaram plasticidade menores do que o concreto de referência. Estudos mostram que a inserção de RAP às misturas de concreto diminui a trabalhabilidade do concreto, devido à alta absorção e atrito interno (VAN DEN BERGH, 2017). Os resultados da resistência à compressão dos diferentes concretos confeccionados estão reunidos na Tabela 4. Observou-se o mesmo comportamento geral: o aumento do teor de RAP no CCP diminuiu a resistência à compressão em até 31,3% para a dosagem G (RAP graúdo substituindo a brita), 35,6% para M (RAP miúdo substituindo areia) e 58,6% para a dosagem MG (RAP miúdo e graúdo misturados substituindo areia e brita).

Tabela 4: Resultados do teste de resistência à compressão do concreto aos 28 dias

Dosagem	Média	Desvio Padrão	Teste T de Student			
			t-stat	p-value	t-crit	D. Sig. Est
REF	31,5	1,3	-	-	-	-
M25	31,1	1,2	0,6177	0,550578771	2,22814	Não
M50	27,7	1,5	4,70452	0,000835811	2,22814	Sim
M75	23,8	0,8	12,4517	2,06E-07	2,22814	Sim
M100	20,3	0,6	19,2871	3,05931E-09	2,22814	Sim
G25	30,4	1,5	1,3321	0,212389595	2,22814	Não
G50	27,9	0,5	6,28183	9,12055E-05	2,22814	Sim
G75	24,1	0,7	12,2293	2,44455E-07	2,22814	Sim
G100	21,7	1	14,5039	4,82825E-08	2,22814	Sim
MG25	25,6	1,4	7,42912	2,23837E-05	2,22814	Sim
MG50	21,4	0,7	16,6705	1,26247E-08	2,22814	Sim
MG75	17,5	0,4	24,9356	2,46118E-10	2,22814	Sim
MG100	13,1	0,2	34,1287	1,1038E-11	2,22814	Sim

Fonte: Autores (2025).

O teste T de *Student* para a resistência à compressão do concreto mostrou que as dosagens M25 e G25 não tiveram diferenças estatísticas significativas em relação ao concreto de referência, verificando que tais dosagens são as melhores opções dentre todos os concretos sustentáveis analisados.

Apesar desse comportamento, 84,6% dos resultados foram positivos (acima de 20MPa: referência do DNIT) incluindo o concreto de referência (31,5 MPa), todas as dosagens M (miúdo), todas as dosagens G (gráudo) e duas MG (com 25 e 50% de RAP) aos 28 dias. Estudos mostram que apesar da diminuição geral nas resistências dos concretos por conta da adição de RAP substituindo a brita, valores acima de 20 Mpa foram alcançados (COSTA et al., 2018).

O aumento do teor de RAP influencia negativamente a resistência à compressão do concreto devido à fraca aderência entre o RAP (agregados) e a pasta de cimento, comprometendo as propriedades mecânicas e durabilidade do concreto (BOUSSETA; KHAY; NEJI, 2020, SHATARAT et al., 2019; SAID et al., 2017).

Misturas de concreto contendo RAP em sua composição reduzem em até 42% a resistência a compressão dos compósitos, sendo recomendado adições de até 25% de RAP em substituição aos agregados naturais a fim de não comprometer a qualidade do concreto (VAN DEN BERGH et al., 2017). Assim, a substituição do agregado natural pelo RAP é recomendada para concretos sem a função estrutural (THOMAS; FELLOWS; SORENSEN, 2018).

Com relação ao desempenho dos concretos nos testes de resistência à tração na flexão (RTF) após os 28 dias de cura úmida, os resultados foram compilados na Tabela 5. Observa-se que o concreto de referência alcançou 5,4MPa e 54% das dosagens superaram o parâmetro de aceitabilidade do DNIT para RTF (4,5 MPa). O M25, por exemplo, obteve um ganho discreto (1,4%) acima do resultado da RTF do concreto de referência.

Tabela 5: Resultados do teste de resistência à tração na flexão do concreto aos 28 dias

Dosagem	Média	Desvio Padrão	Teste T de Student			
			t-stat	p-value	t-crit	D. Sig. Est
REF	5,4	0,1	-	-	-	-
M25	5,5	0,4	0,29488	0,78275	2,77645	Não
M50	4,8	0,5	2,63483	0,05789	2,77645	Não
M75	4,6	0,2	6,25	0,00334	2,77645	Sim
M100	4	0,3	7,36382	0,00181	2,77645	Sim
G25	5,4	0,7	0,08058	0,93964	2,77645	Não
G50	5,1	0,4	1,26025	0,27609	2,77645	Não
G75	4,6	0,2	6,9282	0,00228	2,77645	Sim
G100	4,2	0,2	8,75	0,00094	2,77645	Sim
MG25	4,4	0,3	6,12372	0,0036	2,77645	Sim
MG50	4,4	0,2	7,25	0,00192	2,77645	Sim
MG75	3,8	0,2	15,4952	0,0001	2,77645	Sim
MG100	3,6	0,1	20,0321	3,7E-05	2,77645	Sim

Fonte: Autores (2025).

A aplicação do teste T de *Student* nos valores de resistência à tração na flexão revelou que as dosagens M25, M50, G25 e G50 não possuem diferenças estatísticas significativas em relação ao concreto de referência, sendo estas as melhores opções de concreto quando se utiliza o RAP como agregado.

O comportamento geral da RTF repetiu a tendência da resistência à compressão debatida anteriormente, ou seja, o aumento do teor de RAP no concreto diminuiu a RTF em até 21,9% para a dosagem G (RAP gráudo substituindo a brita), 26,3% para M (RAP miúdo no lugar da areia) e 33,3% para a dosagem MG

(RAP miúdo e graúdo misturados substituindo juntos areia e brita). Mesmo reduzidos, obteve-se concretos de boa qualidade possivelmente em decorrência da natureza viscoelástica do revestimento betuminoso (HUANG; SHU; LI, 2005).

Importante relatar que as taxas máximas de redução da RTF foram menores que as taxas de redução da resistência à compressão, concordando com os dados de outros estudos (RUIZ, 2017, SHI; MUKHOPADHYAY; LIU, 2017, SAID; KHAY; LOULIZI, 2018). Esta foi uma descoberta importante no comportamento da RTF, pois tem relevância para aplicação em pavimentos de concreto cimentício.

Sobre o módulo de elasticidade (ME) considerou-se inicialmente um $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2024) Equação 1.

$$E_{ci} = \alpha_E \times 5600 \times f_{ck}^{0,5} \quad (1)$$

Diante do concreto de referência (f_{ck} de 20MPa e α_E de 1,0 para granito) calculou-se ME de 25,04GPa, ou seja, diferente apenas 2,19% da média encontrada nos testes de módulo de elasticidade. Considerou-se ainda uma variação admissível para o E_{ci} de 20% para mais ou menos do ME do concreto de referência, atendendo às normativas NBR 8522-1 (ABNT, 2021), ACI (2019) e próximo ao resultado obtido por Ruiz (2017). Os resultados dos testes de ME para todas as misturas, na idade de 28 dias foram reunidos na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados do teste de módulo de elasticidade (GPa)

Dosagem	Média	Desvio Padrão	Teste T de Student			
			t-stat	p-value	t-crit	D. Sig. Est
REF	25,6	1,2	-	-	-	-
M25	21,5	1,9	3,71064	0,00996	2,44691	Sim
M50	17,7	0,8	10,9397	3,5E-05	2,44691	Sim
M75	16	0,7	13,7756	9,1E-06	2,44691	Sim
M100	13,4	1,3	14,1973	7,6E-06	2,44691	Sim
G25	23,2	1,5	2,54629	0,04371	2,44691	Sim
G50	18,8	1,8	6,25701	0,00077	2,44691	Sim
G75	17,4	1,3	9,05657	0,0001	2,44691	Sim
G100	13,9	0,6	17,4997	2,2E-06	2,44691	Sim
MG25	20,9	1,5	4,70389	0,00532	2,57058	Sim
MG50	15,5	0,4	13,9928	3,4E-05	2,57058	Sim
MG75	11	0,2	20,5021	5,1E-06	2,57058	Sim
MG100	8,2	0,4	23,8351	2,4E-06	2,57058	Sim

Fonte: Autores (2025).

Análises estatísticas pelo teste t de *Student* indicaram diferenças significativas entre todas as dosagens com RAP e o concreto de referência, demonstrando prejuízos à propriedade do ME. Entre as misturas avaliadas, M25 (21,5 GPa), G25 (23,2 GPa) e MG25 (20,9 GPa) demonstraram valores médios satisfatórios, sendo os mais próximos ao valor registrado para o concreto de referência (25,6 GPa)

O comportamento do ME seguiu a mesma tendência das propriedades mecânicas anteriores, como resistência à compressão e resistência à tração na flexão, com reduções significativas conforme o teor de RAP no concreto. A literatura corrobora para essas observações, atribuindo a redução do ME à maior porosidade dos agregados reciclados (SILVA, 2023). Estudos anteriores identificaram valores de ME de 32,35 e 32,68 GPa para concretos de referência,

contra 25,06 e 25,75 GPa para concretos com RAP. Apesar das perdas, tais misturas demonstraram viabilidade para aplicação em elementos de segurança viária (RUIZ, 2017).

Adicionalmente, concretos com RAP podem apresentar maior ductilidade e resistência à quebra (GUO; HU; DAI, 2018). A diminuição das tensões máximas observada com o aumento do teor de RAP está diretamente relacionada à redução do ME (HOSSINERY; TIA; BERGIN, 2010). Destaca-se que o ME não evolui proporcionalmente à resistência à compressão, possivelmente devido à maior influência da ligação agregado-agregado na rigidez do material (THOMAS; FELLOWS; SORENSEN, 2018). Isso se justifica pelo fato de o comportamento do ME ser governado pelos agregados, e como o RAP possui maior deformabilidade em relação aos agregados naturais, o concreto com RAP tende a ser mais suscetível à deformação (CABRAL, 2007).

Ganhos econômicos e ambientais dos concretos sustentáveis

A Tabela 7 apresenta os dados utilizados na análise de viabilidade econômica, incluindo os custos unitários dos materiais convencionais (areia e brita) e do RAP, bem como os valores associados à produção e transporte. Esses parâmetros permitiram uma comparação entre os traços convencionais e os modificados quanto ao custo por metro cúbico de concreto produzido. Enquanto a Tabela 8 sintetiza os resultados obtidos com a produção dos concretos sustentáveis, destacando a economia financeira alcançada em cada nível de substituição de agregados, além de evidenciar os potenciais benefícios ambientais, como a redução da extração de recursos naturais e a valorização de resíduos da construção.

Tabela 7: Informações utilizadas no cálculo da estimativa de custos dos concretos

Descrição	Unidade	Custo (R\$/Unidade)		DMT (Km)
		SICRO	SINAPI	
Cimento	Kg	0,7074	-	21,20
Areia	m ³	125,4912	-	80,34
Brita	m ³	134,2623	-	24,00
RAP	m ³	-	-	39,59
Peneiramento	m ³	-	31,3000	-
Caminhão basculante 10m ³	t.km	0,7800	-	-
Caminhão carrocera 15t	t.km	0,7300	-	-
Data base	-	Jan/2024		

Legenda: DMT (distância média de transporte entre fornecedor e local de fabricação do concreto).
Fonte: Autores (2025).

Tabela 8: Estimativas dos custos de produção das dosagens estudadas

Dosagem	A+B (R\$)	C (R\$)	D (R\$)	E (R\$)	F (R\$)	Total (R\$)	Redução (R\$)	Δ/REF (R\$)
REF	69,07	411,68	-	15,34	75,52	571,61	-	-
M25	69,07	394,07	4,39	15,34	62,33	545,19	-26,41	-4,62
M50	69,07	376,45	8,79	15,34	49,13	518,78	-52,82	-9,24
M75	69,07	358,84	13,18	15,34	35,94	492,37	-79,24	-13,86
M100	69,07	341,23	17,57	15,34	22,75	465,96	-105,65	-18,48
G25	69,07	391,28	4,76	15,34	71,25	551,69	-19,91	-3,48
G50	69,07	370,87	9,51	15,34	66,98	531,78	-39,83	-6,97
G75	69,07	350,47	14,27	15,34	62,72	511,86	-59,74	-10,45
G100	69,07	330,07	19,03	15,34	58,45	491,95	-79,66	-13,94
MG25	69,07	373,66	9,15	15,34	58,06	525,28	-46,33	-8,10
MG50	69,07	335,65	18,30	15,34	40,60	478,95	-92,65	-16,21
MG75	69,07	297,63	27,45	15,34	23,14	432,63	-138,98	-24,31
MG100	69,07	259,62	36,60	15,34	5,68	386,30	-185,31	-32,42

Nota: A (equipamentos), B (mão de obra), C (material), D (atividade auxiliar - beneficiamento), E (tempo fixo) e F (momento de transporte). Fonte: Autores (2025).

O concreto de referência apresentou um custo de R\$ 571,61 por m³, enquanto todas as dosagens com RAP proporcionaram economia proporcional ao teor substituído, variando de R\$ 26,41/m³ (dosagem M25) a R\$ 185,31/m³ (dosagem MG100). Cunha (2022) concluiu que a substituição da brita por agregado reciclado de construção é tecnicamente viável até 50%, resultando em uma redução de 26,21% no custo dos agregados, mesmo com o aumento do consumo de cimento.

Ruiz (2017) registrou economias de R\$ 35,24/m³ em concreto para elementos de segurança viária e de R\$ 31,81/m³ para drenagem ao utilizar RAP. Debbarma et al. (2019) observaram até 46% de redução no custo total por m³ em pavimentos de concreto compactado com rolo (CCR), independentemente da fração de RAP. Nandi e Ransinchung (2021) identificaram reduções de 19,9% e 12,9% com o uso de RAP grosso e fino, respectivamente, na fabricação de blocos. Singh et al. (2018a) relataram economia superior a 40% por m³ com RAP, enquanto em outro estudo semelhante, Singh et al. (2018b) apontaram reduções entre 7% e 34%.

Do ponto de vista ambiental, estimou-se a redução de emissões de CO₂ equivalente, considerando materiais, produção e transporte, com base em dados médios da literatura (Tabela 9) alcançando os resultados mostrados na Tabela 10.

Tabela 9: Emissões de CO₂ para produção de 1 m³ de concreto

Insumos	Unidade	Autores			Média
		A	B	C	
Cimento	CO ₂ .kg/kg	9,44E-01	9,80E-01	9,27E-01	9,50E-01
Areia		2,65E-03	2,60E-03	1,29E-02	6,05E-03
Brita		7,50E-03	7,50E-03	1,63E-02	1,04E-02
RAP miúdo		-	8,00E-04	-	8,00E-04
RAP graúdo		-	8,00E-04	-	8,00E-04
Água		1,96E-04	3,00E-04	-	2,48E-04
PC	CO ₂ .kg/m ³	8,00E-03	7,70E-03	-	7,85E-03
TCG	CO ₂ .kg/kg.km	5,18E-05	5,18E-05	-	5,18E-05
TCB		6,30E-05	6,00E-05	-	6,15E-05

A: Yang et al. (2013), B: Nandi e Ransinchung (2021), C: Cunha (2022)

Fonte: Autores (2025).

Tabela 10: Estimativa das emissões de CO₂equivalente para os concretos estudados

Dosagem	Material	Produção	Transporte	Total	Redução	Δ/REF (%)
(Kg de CO ₂ / m ³)						
REF	363,43	18,04	5,70	387,17	-	-
M25	362,33	18,04	5,17	385,54	1,63	-0,42
M50	361,22	17,73	4,64	383,59	3,57	-0,92
M75	360,12	17,65	4,11	381,88	5,28	-1,36
M100	359,01	17,49	3,59	380,09	7,08	-1,83
G25	361,24	17,97	5,97	385,17	2,00	-0,52
G50	359,04	17,83	6,24	383,11	4,05	-1,05
G75	356,84	17,78	6,51	381,14	6,03	-1,56
G100	354,65	17,67	6,78	379,10	8,07	-2,08
MG25	360,13	17,85	5,44	383,42	3,74	-0,97
MG50	356,83	17,61	5,19	379,62	7,54	-1,95
MG75	353,53	17,40	4,93	375,85	11,31	-2,92
MG100	350,23	17,00	4,67	371,90	15,27	-3,94

Fonte: Autores (2025).

Observa-se que o concreto de referência apresenta potencial de emissão de 387,17 kg de CO₂ por m³, enquanto todas as dosagens contendo RAP indicam reduções proporcionais ao teor substituído, variando de 0,42% ou 1,63 kg de CO₂ por m³ (dosagem M25) até 3,94% ou 15,27 kg de CO₂ por m³ (dosagem MG100). Verificou-se, ainda, que a principal contribuição para as emissões está associada aos materiais, superando significativamente as fases de produção do concreto e transporte, com destaque para o cimento como maior emissor.

Yang et al. (2013), ao estimarem as emissões de CO₂ associadas ao concreto de 40 MPa, atribuíram ao material 352,90 kg de CO₂/m³, à produção 18,7 kg de CO₂/m³ e ao transporte 28,8 kg de CO₂/m³. Nandi e Ransinchung (2021) quantificaram emissões de 382,966 kg de CO₂/m³ em blocos com agregado natural, reduzidas para 375,31 kg de CO₂/m³ com a incorporação de RAP graúdo, observando também decréscimos nas fases de produção e transporte. Concluíram que o uso de RAP em blocos de concreto representa alternativa viável à gestão de resíduos, à conservação de agregados naturais e à promoção de práticas sustentáveis na infraestrutura rodoviária.

O uso de fresado de pavimentos asfálticos (RAP) contribui para a redução da exploração de recursos naturais, das emissões de GEE e da disposição em aterros, além de diminuir custos com insumos e transporte (Suzuki, 2019). O material permite o reaproveitamento do ligante e dos agregados (Ferreira, 2021). Singh et al. (2018b) destacam a redução de custos e da pegada de carbono, enquanto Ruiz (2017) observou reduções de 30,1 kg de CO₂/m³ e 29,0 kg de CO₂/m³ em elementos de segurança viária e drenagem, respectivamente, com o uso de RAP.

Inovação tecnológica e potencial escalonamento

Por fim, é pertinente apresentar considerações sobre o monitoramento dos dispositivos de drenagem constituídos por meios-fios pré-moldados com adição de RAP, instalados no km 392 da BR-020/CE. Ao longo de quatro vistorias técnicas realizadas nos meses de abril, maio, junho e julho de 2024 — totalizando um período de 88 dias de observação — verificou-se que todos os elementos permaneciam em pleno funcionamento e em bom estado de conservação, com

exceção de uma unidade que apresentou danos decorrentes de ato de vandalismo. Informações complementares estão sistematizadas no Quadro 1.

Quadro 1: Resumo das vistorias realizadas no trecho experimental implantado

Vistoria 1, 09/04/2024, 10:20h.	
	• Trecho experimental em operação há 1 dia; • Temperatura da pista (40,7°C) • Meio-Fio amarelo (32,6°C) • Meio-Fio vermelho (30,4°C) • Meio-Fio preto (30,9°C) • Chuvas recorrentes (quadra invernos) • O sistema de drenagem estava funcionando perfeitamente com as chuvas.
Vistoria 2, 16/05/2024, 10:50h.	
	• Trecho experimental em operação há 38 dias; • Temperatura da pista (43,6°C) • Meio-Fio amarelo (31,8°C) • Meio-Fio vermelho (31,3°C) • Meio-Fio preto (33,0°C) • Chuvas recorrentes (quadra invernos); • Fissuras evidentes nas juntas do MFC05; • O sistema de drenagem estava funcionando perfeitamente com as chuvas.
Vistoria 3, 25/06/2024, 8:10h.	
	• Trecho experimental em operação há 78 dias; • Temperatura da pista (38,2°C) • Meio-Fio amarelo (24,2°C) • Meio-Fio vermelho (23,1°C) • Meio-Fio preto (23,4°C) • Observado vandalismo no trecho, onde um meio-fio danificado e um marco cônico de concreto de identificação foi levado; • O sistema de drenagem estava funcionando perfeitamente com as chuvas.
Vistoria 4, 05/07/2024, 10:40h.	
	• Trecho experimental em operação há 88 dias; • Temperatura da pista (39,1°C) • Meio-Fio amarelo (27,6°C) • Meio-Fio vermelho (24,2°C) • Meio-Fio preto (25,9°C) • Observada vegetação crescida e sobre o dispositivo de drenagem • O sistema de drenagem estava funcionando perfeitamente com as chuvas;

A pesquisa propõe uma inovação tecnológica na infraestrutura viária ao empregar *dirty RAP* — resíduos de pavimentos asfálticos fresados, não lavados e com vestígios de ligante betuminoso — na produção de elementos pré-moldados de concreto. A caracterização do RAP foi feita por peneiramento em laboratório, separando frações miúdas (passante na peneira nº 4) e graúdas (retidas entre as peneiras nº 4 e ½”), possibilitando sua aplicação controlada como substituto de areia e brita na matriz cimentícia (COSTA, 2022; SILVA, 2023). A aplicação do material em meios-fios MFC-05 demonstrou viabilidade técnica e funcional após 88 dias em condições reais, validando seu uso como matéria-prima alternativa.

O uso do *dirty RAP* sem tratamento prévio reduz etapas industriais, economiza recursos e permite o reaproveitamento de resíduos acumulados por órgãos como o DNIT (SUZUKI, 2019; FERREIRA, 2021). O método apresenta potencial de escalonamento, automatização e replicabilidade em usinas e centrais de concreto, podendo ser adaptado a outros elementos construtivos (RUIZ, 2017; DEBBARMA et al., 2019). Melhorias no desempenho podem ser alcançadas com lavagem do RAP (BRAND; ROESLER, 2017) ou ativação do ligante residual (FERREIRA, 2021; COSTA, 2022; BOUSSETTA, KHAY e NEJI, 2020), contribuindo para a economia circular e sustentabilidade ambiental (SINGH et al., 2018b; NANDI e RANSINCHUNG, 2021).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou que a incorporação de resíduos de fresagem asfáltica (RAP) ao Concreto de Cimento Portland (CCP) é uma alternativa tecnicamente viável, economicamente vantajosa e ambientalmente promissora para aplicações não estruturais na infraestrutura viária. As análises laboratoriais evidenciaram que, embora haja reduções nas propriedades mecânicas — especialmente no módulo de elasticidade — a maioria das misturas com RAP alcançou os requisitos normativos mínimos para resistência à compressão (≥ 20 MPa), à tração na flexão ($\geq 4,5$ MPa) e trabalhabilidade. As dosagens com 25% de substituição, sobretudo com RAP graúdo (G25) e miúdo (M25), apresentaram os melhores desempenhos em termos de resistência e estabilidade, sem diferenças estatísticas significativas em relação ao concreto de referência. Já as formulações com teores superiores apresentaram perdas progressivas de desempenho, ainda que com ganhos expressivos em termos econômicos (redução de até 32,4% no custo por m³) e ambientais (redução de até 3,94% nas emissões de CO₂).

A aplicação em campo, por meio da instalação de 200 metros de meio-fio com RAP na BR-020/CE, reforçou a viabilidade prática da proposta, com manutenção das propriedades funcionais após 88 dias em condições reais. A utilização do *dirty RAP* (sem tratamento prévio) também se mostrou estratégica para a simplificação de processos produtivos, economia de recursos e incentivo à ecoinovação. Neste sentido, o estudo contribui diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), promovendo inovação tecnológica (ODS 9), cidades e comunidades mais sustentáveis (ODS 11), práticas de consumo e produção responsáveis (ODS 12) e ações concretas de mitigação das mudanças climáticas (ODS 13). Conclui-se que o uso de RAP em concretos para dispositivos de drenagem representa uma solução de baixo custo, com menor pegada de carbono e elevado potencial de replicação em escala nacional, desde que respeitados os limites técnicos identificados.

Sustainable Concretes in the Light of Science, Technology, and Society: Mechanical, Economic, and Environmental Impact of Incorporating Milled Solid Waste from Asphalt Pavement into Portland Cement Concrete.

ABSTRACT

In light of contemporary challenges at the intersection of science, technology, and society, this study evaluated the technical, economic, and environmental feasibility of incorporating Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) into Portland Cement Concrete (PCC) used in road infrastructure. Thirteen mixtures were developed with varying RAP contents, partially or fully replacing fine, coarse, or both types of aggregates. Laboratory tests assessed properties such as workability, compressive strength, flexural tensile strength, and modulus of elasticity. Despite progressive reductions in mechanical parameters with increasing RAP content, most mixtures met the required standards, particularly the 25% replacement dosages (M25 and G25), which showed no statistically significant differences compared to the reference mix. Estimates indicated production cost reductions of up to 32.4% and CO₂ emissions reductions of up to 3.94% per cubic meter of concrete. The implementation of 200 meters of precast curbs containing RAP along a section of the BR-020 highway in Ceara (Brazil) confirmed the functionality and durability of the solution after 88 days in service. The reuse of RAP as an alternative aggregate aligns with the principles of circular economy and eco-innovation, contributing to the Sustainable Development Goals (SDGs 9, 11, 12, and 13). Moreover, this study is grounded in the Science, Technology, and Society perspective by demonstrating the potential of technological innovation to address concrete environmental problems and promote sustainable, economically feasible, and socially relevant solutions in the construction sector.

KEYWORDS: Reclaimed Asphalt Pavement. Recycling. Concrete. Circular Economy.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-1**: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16208**: Misturas asfálticas – Determinação do teor de betume pelo Soxhlet, pelo Rotarex e pelo refluxo duplo. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (Slump test). Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917**: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973**: Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16974**: Agregado graúdo – Ensaio de resistência ao impacto e à abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ALVES, R. L. D. M. Concreto produzido com resíduo de pavimento asfáltico. 2017. 18 f. Monografia (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, Michigan, USA, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TEST AND MATERIALS. ASTM D 2041: Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures. West Conshohocken, 2011.

BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2022.

BONFIM, V. Fresagem de pavimentos asfálticos. 3. ed. São Paulo: Exceção Editorial, 2011.

BOUSSETTA, I.; EL EUCH KHAY, S.; NEJI, J. Experimental testing and modelling of roller compacted concrete incorporating RAP waste as aggregates. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 24, n. 11, p. 1729–1743, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1482792>.

BRAND, A. S.; ROESLER, J. R. Bonding in cementitious materials with asphalt-coated particles: Part I - The interfacial transition zone. **Construction and Building Materials**, v. 130, p. 171–181, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.019>.

BRITO, J.; KURDA, R. The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 281, p. 123558, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123558>.

CABRAL, A. E. B. Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD. 2007. 280 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

COSTA, J. O. Alkali-activated binders with reclaimed asphalt aggregates as a potential base layer of pavements. 2022. 178 f. Thesis (Doctorate) - Faculteit Toegepaste Ingenieurswetenschappen, University of Antwerp & CEFET-MG, Antwerp, 2022.

COSTA, V. S. D.; TEIXEIRA, F. R.; RODRIGUES, J. M.; TORRES, A. D. S. Estudo do uso de resíduo da fresagem de pavimentos flexíveis em concretos estruturais. **Paranoá**, v. 11, n. 20, 2018. DOI: <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n20.2018.02>.

CUCOS, S.; TURCAN, R. The role of the construction industry in economic growth and sustainable development. **Journal of Social Sciences**, v. 8, n. 1, p. 25–38, 2025. DOI: [https://doi.org/10.52326/jss.utm.2025.8\(1\).02](https://doi.org/10.52326/jss.utm.2025.8(1).02).

CUNHA, I. B. Análise dos impactos ambientais de concretos com agregado reciclado de resíduos de construção civil. 2022. 141 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica, Rio Grande do Sul, 2022.

DACIĆ, A.; FENYVESI, O.; RASHID, K.; JU, M. Novel design of circular concrete incorporating recycling sustainable constituents. **Journal of Building Engineering**, v. 110, p. 113070, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113070>.

DEBBARMA, S.; RANSINCHUNG, G. D.; SINGH, S. Feasibility of roller compacted concrete pavement containing different fractions of reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 199, p. 508–525, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.047>.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura De Transportes. Manual de restauração de pavimentos asfálticos. 2. ed. Rio de Janeiro: IPR. Publi. 720, 2005, 310 p.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura De Transportes. DNIT 020-ES. Drenagem – Meios-fios e guias – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2023.

DIAS, A. D. M.; SILVA, T. J. V.; POGGIALI, F. S. J. O concreto sustentável brasileiro. **Revista Construindo**, v. 8, p. 84–97, 2017.

FERREIRA, W. L. G. Degree of RAP Binder Activation and its Impact on Recycled Asphalt Mixture Design. 2021. 124 f. Tese (Doutorado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

GEUS, L. M.; MOURA, E. N.; GARCIAS, C. M. Uso do SIG como suporte à definição da localização de pontos de entrega voluntária de resíduos de construção e demolição. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 15, n. 37, p. 23–39, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.3895/rts.v15n37.7703>.

GONZÁLEZ, F.; BAEZA, F.; VALDEBENITO, R.; SÁNCHEZ, B. N.; DIEZ-ROUX, A.; VIVES, A. Improvements in habitability and housing satisfaction after dwelling regeneration in social housing complexes: The RUCAS study. **Social Science & Medicine**, v. 355, p. 117090, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2024.117090>.

GUO, S.; HU, J.; DAI, Q. A critical review on the performance of Portland cement concrete with recycled organic components. **Journal of Cleaner Production**, v. 188, p. 92–112, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.244>.

HOSSINEY, N.; TIA, M.; BERGIN, M. J. Concrete containing RAP for use in concrete pavement. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 3, n. 5, p. 251-258, 2010.

HOSSINEY, N.; SEPURI, H. K.; MOHAN, M. K.; ARJUN, H.R.; GOVINDARAJU, S.; CHYNE, J. Alkali-activated concrete paver blocks made with recycled asphalt pavement (RAP) aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, p. e00322, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00322>.

HUANG, B.; SHU, X.; LI, G. Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 10, p. 2008-2013, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.05.002>.

LEITE, M. B.; FIGUEIRÊDO FILHO, J. G.; LIMA, P. R. L. Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate. **Materials and Structures**, v. 46, n. 10, p. 1765-1778, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-012-0010-4>.

MAIA, P. S. et al. Avaliação técnica de concreto estrutural fabricado com agregado graúdo de resíduos de construção e demolição. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i8.30582>.

MASI, G.; MICHELACCI, A.; MANZI, S.; BIGNOZZI, M. C. Assessment of reclaimed asphalt pavement (RAP) as recycled aggregate for concrete. **Construction and Building Materials**, v. 341, p. 127745, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127745>.

MUNARO, M. R.; TAVARES, S. F. A economia circular na construção civil: principais barreiras e oportunidades para a transição do setor. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 18, n. 53, p. 54-71, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.3895/rts.v18n53.15726>.

NANDI, S.; RANSINCHUNG, G. D. R. N. Performance evaluation and sustainability assessment of precast concrete paver blocks containing coarse and fine RAP fractions: A comprehensive comparative study. **Construction and Building Materials**, v. 300, 20 set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124042>.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. New York, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 5 ago. 2025.

PASCHOALIN FILHO, J. A.; CONTI, D. M.; FRASSON, S. Usinas de reciclagem de entulho: importância na construção civil e dificuldades enfrentadas segundo agentes envolvidos. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 15, n. 38, p. 37-57, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.3895/rts.v15n38.7941>.

PAPAKONSTANTINO, C. G. Resonant column testing on Portland cement concrete containing recycled asphalt pavement (RAP) aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 419-428, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.256>.

ROSTAMNEZHAD, M.; THAHEEM, M. J. Social Sustainability in Construction Projects—A Systematic Review of Assessment Indicators and Taxonomy. **Sustainability**, v. 14, n. 9, p. 5279, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14095279>.

RUIZ, A. N. Concreto com fresado asfáltico aplicado em dispositivos de proteção e drenagem de obras viárias. 2017. 191 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.

SAID, S. E. E. B.; KHAY, S. E. E.; ACHOUR, T.; LOULIZI, A. Modelling of the adhesion between reclaimed asphalt pavement aggregates and hydrated cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 839-846, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.078>.

SAID, S. E. E. B.; KHAY, S. E. E.; LOULIZI, A. Experimental Investigation of PCC Incorporating RAP. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 12, n. 8, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0227-x>.

SHATARAT, N. et al. Investigation of axial compressive behavior of reinforced concrete columns using Recycled Coarse Aggregate and Recycled Asphalt Pavement aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 217, p. 384-393, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.085>.

SHI, X.; MUKHOPADHYAY, A.; LIU, K. W. Mix design formulation and evaluation of Portland cement concrete paving mixtures containing reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 756-768, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.174>.

SILVA, J. L. O. Análise de propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes dosagens de agregados reciclados de concreto. 2023. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

SINGH, S. et al. Utilization of reclaimed asphalt pavement aggregates containing waste from Sugarcane Mill for production of concrete mixes. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 42-52, 2018a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.179>.

SINGH, S. et al. Laboratory investigation of RAP aggregates for dry lean concrete mixes. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 808-816, 2018b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.131>.

SUEBSUK, J.; YANGSUKKASEM, N.; KAMPALA, A.; SOMNA, R.; SOMNA, K.; UTTAMA, K.; TRIHATTASAP, T.; CHINDAPRASIRT, P. Performance of sustainable cement mortar and concrete containing recycled asphalt pavement (RAP) under tropical temperature. **Case Studies in Construction Materials**, v. 23, p. e05056, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05056>.

SUZUKI, K. Y. Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado. 2019. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

THOMAS, R. J.; FELLOWS, A. J.; SORENSEN, A. D. Durability analysis of recycled asphalt pavement as partial coarse aggregate replacement in a high-strength concrete mixture. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, p. 1-7, 2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002262](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002262).

VISINTIN, P.; XIE, T.; BENNETT, B. A large-scale life-cycle assessment of recycled aggregate concrete: the influence of functional unit, emissions allocation and carbon dioxide uptake. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, p. 119243, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119243>.

YANG, K. H.; SONG, J. K.; SONG, K. I. Assessment of CO₂ reduction of alkali-activated concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 39, p. 265-272, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.001>.

VAN DEN BERGH, W. et al. Assessment of CO₂ reduction of alkali-activated concrete. In: IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING, v. 236, n. 1, set. 2017. IOP Publishing.

Recebido 17/12/2024

Aprovado: 08/08/2025

DOI: 10.3895/rts.v21n65.19683

Como citar:

SANTOS, Gemmelle Oliveira, SILVA, Michael Lima; BRAGA, Sandro Moreira. Concretos sustentáveis: impacto mecânico, econômico e ambiental da incorporação de resíduos sólidos fresados de pavimento asfáltico em concreto de cimento Portland.

Rev. Tecnol. Soc., Curitiba, v. 21, n. 65, p.332-353, jul./set., 2025. Disponível em:

<https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/19683>

Acesso em: XXX.

Correspondência:

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

