



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

JESSICA RODRIGUES BRITO

**EFEITO DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE COCO EM MISTURAS CIMENTADAS COM
AGREGADOS RECICLADOS PARA SUBCAMADAS DE PAVIMENTOS**

FORTALEZA

2022

JESSICA RODRIGUES BRITO

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE COCO EM MISTURAS CIMENTADAS COM
AGREGADOS RECICLADOS PARA SUBCAMADAS DE PAVIMENTOS**

Dissertação de Mestrado apresentada à
Coordenação do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Transportes da Universidade
Federal do Ceará, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia de Transportes. Área de
concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Profa. Dra. Eng. Suelly Helena de
Araújo Barroso

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B876e Brito, Jessica Rodrigues.

Efeito da Adição de Fibras de Coco em Misturas Cimentadas com Agregados Reciclados para Subcamadas de Pavimentos / Jessica Rodrigues Brito. – 2022.
89 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2022.

Orientação: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.

1. Solo-cimento. 2. Resíduo de construção e demolição. 3. Pavimentação. 4. Reflexão de trincas. I. Título.
CDD 388

JESSICA RODRIGUES BRITO

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE COCO EM MISTURAS CIMENTADAS COM
AGREGADOS RECICLADOS PARA SUBCAMADAS DE PAVIMENTOS**

Dissertação de Mestrado apresentada à
Coordenação do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Transportes da Universidade
Federal do Ceará, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia de Transportes. Área de
concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Profa. Dra. Eng. Suelly Helena de
Araújo Barroso

Aprovada em: 21 / 06 / 2022 .

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Eng. Suelly Helena de Araújo Barroso (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Eng. Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Sc. Ronaldo Stefanutti
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ph.D. Luís Picado Santos
Universidade de Lisboa (ULisboa)

*Ao meu pai Olavio (in memoriam), com todo
meu amor e gratidão.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela coragem concedida e por nunca me deixar desistir diante das dificuldades.

À minha orientadora, Dra. Suelly Barroso, por ser presente, por ser um grande exemplo e inspiração, tanto no âmbito profissional como no âmbito pessoal, e pela confiança em mim depositada.

Agradeço ao professor Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira e Professor Ph.D. Luís Picado Santos, que gentilmente aceitaram o convite para participar da banca avaliadora. E, em especial, ao professor Dr. Ronaldo Stefanutti, pela confiança de sempre.

À Usifort Ambiental, pela disponibilização de agregado reciclado, bem como à Petrobras e à Usina Termelétrica Energia Pecém pelo suporte financeiro que indiretamente ajudaram na elaboração desta pesquisa

Ao laboratorista do grupo de solos do Laboratório e Mecânica dos Pavimentos (LMP), Ricardo, pelo auxílio imprescindível na realização dos ensaios deste estudo.

Aos colegas, amigos e funcionários do LMP, pela convivência durante o Mestrado e por toda ajuda prestada. Em especial à Iolanda, à Annie e ao Assis, que sempre estiveram presentes, auxiliando em diversas questões, à Thaís e ao Webert, pelo companheirismo e incentivo neste processo, e ao Mateus Lira, por ceder as fibras de coco.

Ao amigo Michel Ramos, que foi importantíssimo no início desta jornada.

Aos professores do PETRAN, pelo aprendizado.

À FUNCAP, pela concessão de bolsa de estudo utilizada para realização desta pesquisa.

À FCT (Portugal), pela parceria em projeto, do qual tive o privilégio de participar.

A todos que, direta ou indiretamente, participaram da minha caminhada.

RESUMO

Além da escassez de recursos naturais, o crescente aumento do tráfego das vias vem exigindo subcamadas de pavimento mais resistentes do ponto de vista mecânico. O uso de misturas cimentadas é uma alternativa para suprir essa necessidade, entretanto, esses materiais podem apresentar defeitos, como as trincas de reflexão. A utilização de fibras pode ser benéfica na redução dessas trincas. Dessa forma, o objetivo geral desta pesquisa consistiu em analisar a alteração do comportamento mecânico, com a adição de fibras de coco, de misturas cimentadas para o uso em subcamadas de pavimento. As misturas analisadas, além de conter solo e cimento, foram compostas de agregados reciclados de Resíduo de Construção e Demolição, a fim de contribuir com soluções mais sustentáveis na área de pavimentação. Foram realizados ensaios mecânicos, tais como Módulo de Resiliência (MR), Resistência à Compressão Simples (RCS) e Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD). Como resultados, os compósitos cimentados, com e sem fibras, foram analisados e se mostraram aptos ao uso na pavimentação, considerando especificações vigentes, que ainda se baseiam na RCS mínima de 2,1MPa como parâmetro exigível. As misturas contendo fibras e teor de 7% de cimento, em massa, apresentaram um melhor comportamento mecânico, considerando os resultados dos ensaios de MR. De um modo geral, a inserção de fibras de coco alterou o comportamento mecânico das misturas, tornando-as mais dúcteis, o que conseqüentemente deverá implicar uma menor reflexão de trincas para o revestimento, no caso de elas serem utilizadas em camadas de base de pavimento. Contudo, alguns aspectos, como o comportamento dos materiais à fadiga e a investigação de possíveis impactos ambientais, ainda precisam ser estudados para verificar a viabilidade financeira e ambiental do uso desses materiais.

Palavras-chave: Solo-Cimento. Resíduo de construção e demolição. Pavimentação. Reflexão de trincas.

ABSTRACT

The increasing traffic on roads has required more resistant pavement underlays from a mechanical point of view. The use of cement mixtures is an alternative to meet this need, however, these materials may have defects such as reflection cracks. The use of fibers can be beneficial in reducing these cracks. Thus, the general objective of this research was to analyze the change in mechanical behavior, with the addition of coconut fibers, of cemented mixtures for use in pavement sublayers. The analyzed mixtures, in addition to containing soil and cement, were composed of recycled aggregates from construction and demolition wastewaste, to contribute with more sustainable solutions in the paving area. Mechanical tests were performed, such as Modulus of Resilience (MR), Resistance to Simple Compression (RCS) and Tensile Strength by Diametral Compression (RTCD). As a result, the cemented composites, with and without fibers, were analyzed and proved to be suitable for use in paving, considering the current specifications. The mixtures containing fibers and content of 7% of cement, by mass, presented a better mechanical behavior, considering the results of the MR tests. In general, the insertion of coconut fibers changed the mechanical behavior of the mixtures, giving ductility, which consequently should result in less reflection of cracks for the coating, in case they are used in pavement base layers. However, some aspects, such as the behavior of materials to fatigue and the investigation of possible environmental impacts, still need to be studied to verify the financial and environmental viability of the use of these materials.

Keywords: Soil-cement. Construction and demolition waste. Pavement. Crack reflection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Detalhes dos materiais utilizados	25
Figura 2 – Fluxograma da pesquisa	26
Figura 3– Corpos de prova utilizados na pesquisa	29
Figura 4 – Corpo de prova no ensaio de Módulo de Resiliência.....	32
Figura 5 – Aspecto visual da ruptura dos corpos de prova durante o ensaio de resistência à tração	38
Figura 6 – Processo de Reciclagem de Resíduo de Construção e Demolição.....	46
Figura 7 – Produção de agregado reciclado na Usifort Ambiental.....	48
Figura 8 – Problemas que dificultam a reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição.	48
Figura 9 – Obras com utilização de agregado reciclado em Fortaleza/CE.....	50
Figura 10 – Coleta de agregado reciclado na Usifort Ambiental	52
Figura 11 – Fluxograma da pesquisa.....	55
Figura 12 – Análise visual dos componentes do agregado reciclado	56
Figura 13 – Ensaio do Módulo de Resiliência.....	62
Figura 14 – Corpo de prova após passar pelo ensaio de Deformação Permanente.....	65
Figura 15 – Ensaio de Resistência à Compressão Simples	71
Figura 16 – Diferenças no modo de ruptura por tração das misturas na compressão diametral	72
Figura 17 – Corpos de prova após passar pelo ensaio de módulo de resiliência.....	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva granulométrica do solo	30
Gráfico 2 – Curva de compactação do solo na energia intermediária.....	31
Gráfico 3 – Enquadramento do solo na faixa granulométrica da norma DNIT 143 (2022).....	32
Gráfico 4 – Curvas de compactação das misturas SC5 e SC7.....	33
Gráfico 5 – Resistência à compressão simples aos 7 dias	34
Gráfico 6 – Índice de Suporte Califórnia e expansão.....	35
Gráfico 7 – Resistência à compressão simples, conforme a idade de cura	36
Gráfico 8 – Resistência à tração conforme a idade de cura.....	38
Gráfico 9 – Módulo de resiliência das misturas de solo-cimento	39
Gráfico 10 – Curvas granulométricas do agregado reciclado antes e depois da compactação	58
Gráfico 11 – Curva de compactação do agregado reciclado	60
Gráfico 12 – Comportamento do Módulo de Resiliência do agregado reciclado	61
Gráfico 13 – Deformação Permanente do agregado reciclado para tensão confinante de 40kPa	64
Gráfico 14 – Deformação Permanente do agregado reciclado para tensão confinante de 80kPa	64
Gráfico 15 – Enquadramento de faixa granulométrica.....	66
Gráfico 16 – Curvas de compactação das misturas cimentadas preliminares contendo agregado reciclado.....	67
Gráfico 17 – Valores de Resistência à Compressão Simples aos 7 dias das misturas cimentadas preliminares contendo agregado reciclado	68
Gráfico 18 – Índice de Suporte Califórnia das misturas cimentadas contendo agregado reciclado	69
Gráfico 19 – Resistência à compressão simples das misturas contendo agregado reciclado ...	70
Gráfico 20 – Resistência à tração das misturas contendo agregado reciclado	72
Gráfico 21 – Módulo de Resiliência das misturas AR7 e AR7F.....	74

Gráfico 22 – Módulo de Resiliência das misturas M30S70AR5 e M30S70AR5F 75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exigências para uso de material em solo-cimento da norma do DNIT 143 (2022)	28
Tabela 2 – Parâmetros do modelo de MR em função da tensão principal maior e MR médio das misturas SC7 e SC7F aos 7 e 28 dias de cura	39
Tabela 3 – Classificação e destinação adequada para resíduos de construção civil.....	43
Tabela 4 – Parâmetros estabelecidos pela NBR 15115 para uso de agregados reciclados em pavimentação	49
Tabela 5 – Nomenclatura das misturas estabilizadas granulometricamente para enquadramento de faixa.....	53
Tabela 6 – Nomenclatura das misturas preliminares estabilizadas quimicamente.....	54
Tabela 7 – Resultados da composição do agregado reciclado por análise visual.....	57
Tabela 8 – Uniformidade e curvatura do agregado reciclado.....	58
Tabela 9 – Modelos de Módulo de Resiliência testados para o agregado reciclado	62
Tabela 10 – Massa específica seca máxima e umidade ótima das misturas cimentadas preliminares contendo agregado reciclado	67
Tabela 11 – Parâmetros do modelo de comportamento apresentado e módulo de resiliência médio das misturas cimentadas contendo agregado reciclado aos 7 e 28 dias de cura	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway of Transportation Officials</i>
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AR	Agregado Reciclado
BGS	Brita Graduada Simples
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
COOPERCON	Cooperativa da Construção Civil do Estado do Ceará
CP	Cimento Portland
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
IST	Instituto Superior Técnico
LL	Limite de Liquidez
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos

LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LP	Limite de Plasticidade
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
MR	Módulo de Resiliência
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RCS	Resistência à Compressão Simples
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RTCD	Resistência à Tração por Compressão Diametral
SAC	Solo-Agregado-Cimento
SC	Solo-Cimento
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Considerações iniciais	17
1.2	Objetivos.....	19
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	19
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	19
1.3	Organização da dissertação	19
2	EFEITOS DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE COCO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE SOLO REGIONAL.....	20
2.1	Considerações iniciais	20
2.2	Potencial da utilização de fibras como elemento de reforço de solos	21
2.3	Materiais e métodos.....	25
2.3.1	<i>Materiais.....</i>	25
2.3.2	<i>Métodos.....</i>	27
2.4	Resultados e discussões	29
2.4.1	<i>Caracterização do solo regional.....</i>	29
2.4.1.1	<i>Classificação do material coletado.....</i>	29
2.4.1.2	<i>Curva de compactação Proctor e Índice de Suporte Califórnia/Expansão.....</i>	31
2.4.1.3	<i>Ensaio de Módulo de Resiliência</i>	31
2.4.2	<i>Análise das misturas cimentadas preliminares</i>	32
2.4.2.1	<i>Ensaio de compactação das misturas cimentadas preliminares e escolha do teor de cimento</i>	33
2.4.2.2	<i>Valores de Resistência à Compressão Simples aos 7 dias de cura das misturas cimentadas preliminares</i>	33
2.4.3	<i>Caracterização e análise das misturas cimentadas com o uso de fibras de coco....</i>	34
2.4.3.1	<i>Ensaio de Índice de Suporte Califórnia</i>	34
2.4.3.2	<i>Ensaio de Resistência à Compressão Simples</i>	35
2.4.3.3	<i>Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral</i>	37

2.4.3.4	<i>Ensaio de Módulo de Resiliência</i>	38
2.5	Considerações finais	40
3	EFEITOS DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE COCO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS CONTENDO AGREGADO RECICLADO MISTO	41
3.1	Considerações iniciais	41
3.2	Revisão bibliográfica	42
3.2.1	<i>Resíduos de Construção e Demolição</i>	42
3.2.2	<i>Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição</i>	45
3.2.3	<i>Utilização de Agregado Reciclado na pavimentação</i>	49
3.3	Materiais e métodos	51
3.3.1	<i>Materiais</i>	51
3.3.2	<i>Métodos</i>	52
3.4	Resultados e discussões	56
3.4.1	<i>Caracterização do agregado reciclado</i>	56
3.4.1.1	<i>Composição do agregado reciclado</i>	56
3.4.1.2	<i>Granulometria do agregado reciclado</i>	57
3.4.1.3	<i>Resistência à abrasão</i>	59
3.4.1.4	<i>Absorção de água da fração graúda</i>	59
3.4.1.5	<i>Ensaio de Compactação</i>	59
3.4.1.6	<i>Índice de Suporte Califórnia</i>	60
3.4.1.7	<i>Módulo de Resiliência</i>	60
3.4.1.8	<i>Deformação Permanente</i>	63
3.4.2	<i>Definição das misturas cimentadas preliminares com o uso de agregado reciclado</i>	65
3.4.3	<i>Caracterização das misturas cimentadas com o uso de agregado reciclado e fibras de coco</i>	68
3.4.3.1	<i>Ensaio de Índice de Suporte Califórnia</i>	69
3.4.3.2	<i>Ensaio de Resistência à Compressão Simples</i>	69

3.4.3.3	<i>Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral</i>	71
3.4.3.4	<i>Ensaio de Módulo de Resiliência</i>	72
3.5	Considerações finais	76
4	CONCLUSÕES	77
4.1	Principais Contribuições da Pesquisa	77
4.2	Principais Limitações	77
4.3.	Principais Constatações	79
4.3.1	<i>Quantos às conclusões do primeiro artigo</i>	79
4.3.2	<i>Quantos às conclusões do segundo artigo</i>	79
4.4.	Sugestões para Trabalhos Futuros	80
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Durante a fase de projeto e construção de obras rodoviárias, deve-se levar em consideração a busca e a crescente escassez de materiais que atendam aos critérios de projetos de pavimentação em determinadas regiões. Além disso, existe a preocupação ambiental, a qual estimula a procura por materiais alternativos, por meio de pesquisas que avaliem a possibilidade do uso desses em pavimentos. Também pode-se destacar uma crescente preocupação com a geração de resíduos e com a destinação correta desses materiais. O motivo para isso é que a disposição inadequada de resíduos pode ocasionar problemas ambientais, sendo esses nocivos à saúde humana.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída por meio da Lei 12.305 de 2010, estabelece que, na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento de resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Além disso, os geradores de resíduos são definidos como responsáveis pela sua correta destinação (BRASIL, 2010). No âmbito estadual, tem-se a Lei nº 16.032/2016 que institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Ceará (CEARÁ, 2016), ainda não regulamentada. No que reside à esfera municipal, tem-se também a Lei 10.304/2015 que trata da política de gestão de resíduos sólidos (FORTALEZA, 2015), além do novo Código da Cidade de Fortaleza, em vigor desde 2019 (FORTALEZA, 2019).

Ao se considerar a área rodoviária e a possibilidade do aproveitamento de resíduos em obras de pavimentação é necessário investir em um programa de análise das características dos materiais alternativos. Quando os materiais não atendem aos requisitos exigidos, pode-se utilizar técnicas para melhorar as suas características, como é o caso da estabilização química com cimento. Essa técnica tende aumentar consideravelmente a resistência dos materiais, além de representar uma solução para vias que apresentam maior volume de tráfego. Por outro lado, misturas cimentadas tendem a apresentar trincas, devido às tensões e deformações de tração na porção inferior da camada. Isso pode provocar perda de resistência da camada cimentada, além de transferir as cargas solicitantes para o solo subjacente. Nesse caso, surgem deformações plásticas inevitáveis, bem como a reflexão das trincas para o revestimento betuminoso (SPECHT, 2000; ADASKA; LUHR, 2004).

Várias estratégias podem ser empregadas para minimizar a fissuração nas bases estabilizadas com cimento. Pode-se citar, por exemplo, o pré-trincamento, em que centenas de micro trincas se desenvolvem em vez de trincas transversais. Ademais, pode-se aplicar o alívio das tensões, por meio de uma camada de tratamento superficial, geotêxtil ou material granular entre a camada cimentada e o revestimento (ADASKA; LUHR, 2004; ABCP, 2019).

A inserção de fibras, naturais e artificiais, também pode ser uma aliada para conter as aberturas da propagação das trincas, além de ser um artifício para redução do volume de resíduos sólidos presentes na natureza. Estudos como o de Specht (2000), Casagrande (2005) e Aguilar (2015) fornecem evidências de que as fibras aumentam a ductibilidade dos compósitos. O *software* MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), do novo método brasileiro de dimensionamento de pavimentos utilizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), inclusive, apresenta a opção para inserir uma camada anti-reflexão de trincas. Por padrão, o programa apresenta os seguintes materiais como opções: Tratamento Superficial Duplo (TSD) e *Stress Absorbing Membrane Interlayer* (SAMI).

Segundo Aguilar (2015), a fibra de coco verde tem grande potencial para ser utilizada como reforço geotécnico de baixo custo e com aspectos ambientais adequados, uma vez que a fibra representa um resíduo urbano em abundância no Brasil. No ano de 2020, somente no estado do Ceará, foram produzidas mais de 405 milhões de frutos de coco (IBGE, 2022). As cascas do coco representam de 80% a 85% do peso bruto do fruto (ROSA *et al.*, 2002). Além de possuir um baixo custo de produção e gasto de energia, a utilização da fibra de coco, como material de reforço, implica uma menor geração de resíduos nas cidades (BOLAÑOS; CASAGRANDE, 2014). Specht (2000) também destaca a possibilidade de reduzir a manutenção dos pavimentos, os quais apresentem bases cimentadas com o reforço de fibras, devido ao controle da abertura e propagação das trincas.

Quanto à utilização de resíduos, segundo Schroeder (1994), a indústria da construção de rodovias pode utilizar efetivamente quantidades consideráveis de diversos materiais. Isso faz com que o uso de subprodutos residuais ambientalmente corretos, em vez de materiais virgens, alivie o ônus associado ao descarte, podendo fornecer um produto de construção econômico e vantajoso como é o caso dos Agregados Reciclados (AR). Diversos estudos utilizaram AR, provenientes de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), nas subcamadas do pavimento (MOTTA, 2005; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2019; SILVA, 2009; LEITE *et al.*, 2011; XUAN; MOLENAAR; HOUBEN, 2015). Isso mostra que esses resíduos podem ser empregados na pavimentação com o uso de técnicas de estabilizações, desde que sejam também ambientalmente recomendáveis.

Há a escassez de recursos naturais para utilização na pavimentação. Também deve-se destacar que o aumento do número de veículos trafegando nas vias exige camadas de base mais resistentes e rígidas, conforme comentado anteriormente, e daí a necessidade de se aplicar técnicas de estabilizações químicas como a de cimento, por exemplo. Assim, a utilização de materiais alternativos estabilizados pode ser viável para atender às exigências de uso na pavimentação. Dessa forma, estudos precisam ser desenvolvidos no sentido de melhor aproveitar os resíduos na composição dos pavimentos e, assim, aprimorar as técnicas de construção de rodovias existentes no mercado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o efeito da adição de fibras de coco no comportamento mecânico de misturas cimentadas, contendo agregados reciclados, para aplicação em subcamadas de pavimentos.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Analisar os efeitos da adição de fibras de coco em compósitos cimentícios de solo regional;
- b) Avaliar os efeitos da adição de fibras de coco em compósitos cimentícios contendo agregado reciclado.

1.3 Organização da dissertação

A dissertação foi organizada em formato de artigos. Além deste capítulo introdutório, o Capítulo 2, escrito em formato de artigo, apresenta a análise do efeito de fibras de coco em solo-cimento. O Capítulo 3 apresenta o efeito das fibras de coco em misturas cimentadas contendo agregado reciclado de RCD, também escrito em formato de artigo. O Capítulo 4 aborda as considerações finais obtidas em função das investigações realizadas que foram apresentadas nos capítulos 2 e 3.

2 EFEITOS DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE COCO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE SOLO REGIONAL

O solo-cimento é uma mistura que tem potencial para ser utilizada na construção de pavimentos rodoviários, a fim de proporcionar uma maior resistência mecânica às subcamadas. Porém, a mistura pode provocar problemas na estrutura do pavimento, como o aparecimento de trincas por reflexão. Dessa forma, existe a possibilidade de serem usados resíduos na composição da mistura de solo-cimento, como as fibras, a fim de mitigar esses defeitos. Posto isso, no Capítulo 2 desta pesquisa, foi analisada a alteração do comportamento mecânico de solo-cimento, para o uso em subcamadas de pavimento, com a adição de fibras de coco. A caracterização do solo ocorreu por meio dos ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, granulometria e índice de suporte Califórnia. A esse material, foi adicionado cimento CP II F 32 (7,0% em massa), e, posteriormente, fibras de coco (0,5% em massa). Com o intuito de comparação, foram realizados ensaios mecânicos nesses compósitos, tais como Módulo de Resiliência (MR), Resistência à Compressão Simples (RCS) e Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD), com tempo de cura de 7 e 28 dias. Os resultados mostraram que os valores de MR aumentaram 34,4% no compósito fibroso aos 28 dias. Os valores de RCS diminuíram 15,4% aos 28 dias, o que pode ter sido ocasionado pelo método de ensaio, em que há a inserção dos corpos de prova em água por quatro horas. Tal aspecto atenta para a reflexão sobre as fibras em ambientes saturados e sua degradação. Quanto à RTCD, houve um decréscimo também, mas percebeu-se visualmente a mudança da forma na ruptura, em que, mesmo após rompidos, as partes dos corpos de prova contendo fibras, continuaram unidas. Observou-se um aumento da ductibilidade das misturas com fibras de coco, quando comparadas aos materiais sem as fibras. Sendo assim, do ponto de vista mecânico, evidenciado pelos ensaios de MR, RTCD e RCS, recomenda-se a utilização de fibras de coco em misturas cimentadas. Recomenda-se também, para uma melhor análise, que o estudo possa ser continuado por meio da investigação de um tempo de cura maior para se investigar a degradação ou não das fibras de coco em ambientes saturados, bem como a análise de vida de fadiga para verificação de viabilidade.

2.1 Considerações iniciais

Diferentes técnicas podem ser utilizadas a fim de melhorar as características das propriedades dos materiais. A respeito da estabilização química com o uso de cimento, existem

diversos materiais que podem ser utilizados para tal finalidade. Pode-se citar, por exemplo, solo melhorado com cimento; solo-cimento (SC); solo-brita-cimento; brita graduada tratada com cimento (BGTC) e concreto compactado a rolo (CCR) (SANBONSUGE, 2013).

O solo, quando tratado com cimento, tem demonstrado aumento significativo de resistência e rigidez quando comparado ao material natural (SPECHT, 2000). Specht (2000) ressalta que a considerável fragilidade e a fissuração excessiva de misturas cimentadas têm desmotivado o uso desse tipo de estabilização na pavimentação. O mesmo autor também destaca a possibilidade de redução da manutenção nos pavimentos com bases cimentadas, as quais possuam fibras como reforço. Essa diminuição na frequência da manutenção no pavimento ocorre devido ao controle da abertura e da propagação de trincas na estrutura, o que é proporcionado pela presença de fibras nas misturas estabilizadas.

Conforme Casagrande (2005), a inserção das fibras mostra eficiência quando empregadas tanto em solos cimentados como em materiais não cimentados. Isso acontece devido à melhoria das propriedades mecânicas dessas misturas, como o aumento da resistência, da ductibilidade e da tenacidade. Além disso, pode-se destacar a diminuição da queda de resistência pós-pico. Com base no exposto e a fim de se contribuir para a solução dos problemas mencionados, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da adição de fibras de coco no comportamento mecânico de solo-cimento.

2.2 Potencial da utilização de fibras como elemento de reforço de solos

A técnica do reforço de solos com fibras, nos moldes que se tem no período atual, foi resgatada na segunda metade do século XX. Porém, trata-se de uma técnica bastante antiga (SILVEIRA, 2018). Os materiais resultantes de misturas que utilizam matrizes reforçadas com fibras são denominados compósitos. Esses são materiais alternativos que surgem para atender demandas por matérias-primas que apresentem desempenho igual ou superior aos solos convencionais (JÚNIOR; JUCÁ; FERREIRA, 2018).

Devido ao comportamento frágil de materiais cimentícios, foram desenvolvidos compósitos reforçados com fibras ao longo das últimas décadas com a finalidade de aumentar a capacidade de absorção de energia, conferindo-lhes maior tenacidade e resistência ao impacto. Além do mais, o uso de fibras visa à prevenção, ao retardamento ou ao controle do processo de fissuras das misturas, diminuindo as suas aberturas e conferindo maior durabilidade a esses materiais (MAGALHÃES, 2010).

Santos Júnior (2021), afirma que a adição de fibra tornou a matriz solo-cimento mais rígida com o tempo de cura e alterou o comportamento frágil do material. As fibras estudadas (polipropileno e aço) foram capazes de controlar a propagação de fissuras no solo-cimento evitando que a viga de flexão fosse dividida em duas partes. Um maior teor de fibra induziu um comportamento de endurecimento e uma prevalência de trincas menores, devido ao material mais dúctil.

Segundo Silveira (2018), foram relatadas mudanças relacionadas à compactação, à resistência ao cisalhamento, à deformabilidade e ao modo de ruptura que ocorrem no comportamento mecânico dos solos reforçados com fibras. Existe uma grande variedade de fibras utilizadas em compósitos fibrosos. As características de comportamento de cada uma delas, o que inclui as propriedades físicas, químicas e mecânicas, estão intimamente relacionadas ao material do qual são compostas e ao seu processo de fabricação. Assim, esses fatores afetam o comportamento do material compósito (CASAGRANDE, 2005). Segundo o material de origem das fibras, elas podem ser minerais (carbono, vidro e amianto), vegetais (coco, sisal, curauá, juta, piassava e pupunha.), poliméricas (polipropileno, polietileno, poliéster e poliamida) e metálicas (aço) (SILVEIRA, 2018).

Martins (2014) estudou o comportamento de fibras vegetais em matriz cimentada e verificou que a incorporação desses materiais possibilitou o aumento da resistência à tração da mistura e a melhoria das propriedades pós-fissuração. O autor percebeu também que o uso de fibras vegetais proporcionou, para as misturas cimentadas, a queda da retração por secagem, o aumento da resistência à fissuração e o melhor desempenho sob temperaturas elevadas.

Conforme Specht (2000), algumas características relevantes devem ser consideradas na escolha da fibra para reforço de materiais. Primeiramente, a fibra deve ser quimicamente neutra e não deteriorável; não deve sofrer ataques de fungos, bactérias ou álcalis e não pode ser prejudicial à saúde humana. Além disso, a fibra deve apresentar características físicas e mecânicas adequadas. Fidelis (2014) afirma que matrizes com menor consumo de cimento são favoráveis à incorporação de fibras vegetais, as quais sofrem degradação em ambiente alcalino. De acordo com Silva *et al.*, (2018), dentre os tratamentos utilizados para evitar a deterioração de fibras de coco em meios alcalinizados, o uso de materiais pozolânicos tem se mostrado promissor.

Os principais parâmetros de desempenho das fibras em compósitos, segundo Bolaños (2013), Casagrande (2005) e Specht (2000), são: (i) teor de fibra: quanto maior for a quantidade incorporada de fibra, mais significativo será o ganho de resistência mecânica, porém, existe um teor ótimo desse material, a partir do qual esse aumento não é mais observado;

(ii) módulo de elasticidade da fibra: quanto maior o módulo mais provável de ocorrer o arrancamento das fibras; (iii) aderência entre a fibra e a matriz: as características de resistência, de deformação e de padrões de ruptura, presentes nos compósitos cimentados com reforço de fibras, dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz e (iv) comprimento da fibra: quanto maior for o comprimento das fibras, mais significativo será o ganho de resistência mecânica até um dado limite e menor será a possibilidade de esses materiais serem arrancados.

Segundo Casagrande (2005), além do comprimento da fibra, o diâmetro desse material também se faz importante. A relação l/d (comprimento/diâmetro), conhecida como fator de forma, é proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra (F_t) e a resistência da aderência fibra/matriz (F_a). Essa relação está apresentada na Equação 1. As principais mudanças no comportamento de compósitos fibrosos ocorrem nos seguintes aspectos: compactação; resistência ao cisalhamento de pico; resistência ao cisalhamento pós-pico; deformabilidade e modo de ruptura (BOLAÑOS, 2013; CASAGRANDE, 2005).

$$\frac{l}{d} = \frac{F_t}{2F_a} \quad (1)$$

Segundo Aguilar (2015), a fibra de coco verde tem grande potencial para ser utilizada como reforço geotécnico de baixo custo e com aspectos ambientais adequados, uma vez que a fibra representa um resíduo urbano facilmente encontrado no Brasil. A fibra de coco, produzida a partir das cascas do coco verde, é um resíduo abundante no estado do Ceará, visto que, nessa localização, em 2020, foram produzidas mais de 405 milhões de frutos, representando cerca de 19,5% da produção nacional (IBGE, 2022). Aproximadamente 80% a 85% do peso bruto do coco verde é constituído por cascas que não vêm sendo aproveitadas pela indústria de beneficiamento de fibras. Isso causa problemas, principalmente em grandes centros urbanos, em que o material é de difícil descarte e acaba ocupando espaço em aterros sanitários e lixões (ROSA *et al.*, 2002). De forma geral, as cascas são o fruto sem a água e estima-se que, a cada 300mL de água de coco consumidos, tem-se por volta de 1650g de resíduo gerado.

O descarte desse resíduo implica a ocorrência de alguns problemas, como: poluição ambiental; focos de insetos, mau cheiro e riscos de doenças; emissão de metano (gás de efeito estufa) e a diminuição da vida útil dos aterros sanitários (BOLAÑOS, 2013). Esse autor destaca que o Brasil é o 4º maior produtor mundial de frutos de coco, estimando-se que o país possui uma área plantada de 100 mil hectares de coqueiro-anão. Essas plantações são destinadas à produção do fruto verde para o consumo da água-de-coco. Em 2020, segundo dados do IBGE

(2022), no Brasil, a área destinada à colheita desse fruto chegou a quase 189 mil hectares, totalizando um valor de produção de quase 1,15 bilhões de reais.

A fibra de coco vem sendo utilizada em compósitos, como substrato agrícola, em concreto não estrutural e em misturas asfálticas (BOLAÑOS, 2013). Carrijo *et al.*, (2002) destacam que essas fibras levam mais de oito anos para se decompor, sendo, assim, um tempo considerável para esse processo. Apesar de apresentar características mecânicas inferiores, quando comparadas às fibras sintéticas utilizadas em diversos compósitos, a fibra de coco possui um baixo custo de produção e gasto de energia. E, além disso, o emprego da fibra de coco, como material de reforço, implica a diminuição da geração dos resíduos nas cidades (BOLAÑOS; CASAGRANDE, 2014). Outro ponto a ser considerado é que as fibras naturais possuem diâmetro variável, o que dificulta a obtenção de características relacionadas à resistência desses materiais (AGUILAR, 2015).

Cabala (2007) estudou a adição de fibra de coco com comprimento médio de 15mm em solo-cimento e percebeu que o uso desse resíduo influenciou negativamente na resistência mecânica da mistura (quando avaliada a resistência à flexão), entretanto, ocorreu o aumento da tenacidade e da ductibilidade dos materiais. Bolaños e Casagrande (2014) utilizaram fibra de coco verde com comprimento aproximado de 20mm e apresentaram evidências de que a resistência ao cisalhamento das misturas solo-fibra aumentou. Ademais, houve um incremento da coesão das misturas e do ângulo de atrito, em comparação aos dados obtidos para o solo puro.

Aguilar (2015) estudou a aplicação de fibra de coco em solo arenoso e obteve melhoria na resistência mecânica do material. Esse autor observou que o compósito que apresentou melhor resultado foi o que possuía 0,5%, em massa, de fibra de coco com 50mm de comprimento. Dessa forma, concluiu-se que a fibra de coco verde tem potencial para ser utilizada como reforço geotécnico de baixo custo, além de ser uma aplicação benéfica do ponto de vista ambiental.

Com base nas evidências encontradas na literatura, que as fibras podem melhorar o comportamento de solos e que a fibra de coco é abundante no Estado do Ceará, resolveu-se investir no estudo desse resíduo para possível aplicação na área de pavimentação. Sendo assim, foi estabelecido o seguinte objetivo geral para este artigo: avaliar o efeito da adição de fibras de coco no comportamento mecânico de misturas solo-cimento.

2.3 Materiais e métodos

2.3.1 Materiais

O cimento (Figura 1a) escolhido para o estudo foi o Cimento Portland (CP) composto por filer calcário, com classe de resistência de 32 MPa. Esse tipo de cimento é comumente utilizado em obras de concreto armado, argamassas de revestimento e assentamento e em pavimentos rígidos. Sua especificação no mercado é a CP II F 32.

A respeito do solo regional (Figura 1b), foram coletadas cerca de duas toneladas de solo para as análises. O solo utilizado na pesquisa foi extraído no município de São Gonçalo do Amarante, na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). O ponto de coleta apresenta as coordenadas geográficas de latitude 3°39'46,91" e longitude 38° 50' 32,69".

Quanto às fibras de coco verde coletadas (Figura 1c), elas foram processadas, sendo que o comprimento médio desses resíduos foi de 20mm. Observa-se que o comprimento comumente utilizado em pesquisas varia entre 15 a 35mm, tendo em vista que quanto maior o comprimento das fibras, maior o ganho de resistência mecânica até um limite assintótico, bem como menor a resistência pós pico e a capacidade de absorção de energia (SPETCH, 2000; CASAGRANDE, 2005). Selecionaram-se cocos verdes que passaram por processo de trituração (corte e picadeira de forragem) e secagem ao sol. Após isso, elas foram lavadas para remoção do pó. Essas fibras foram cedidas pela IAPACOCO NORDESTE.

Figura 1 – Detalhes dos materiais utilizados

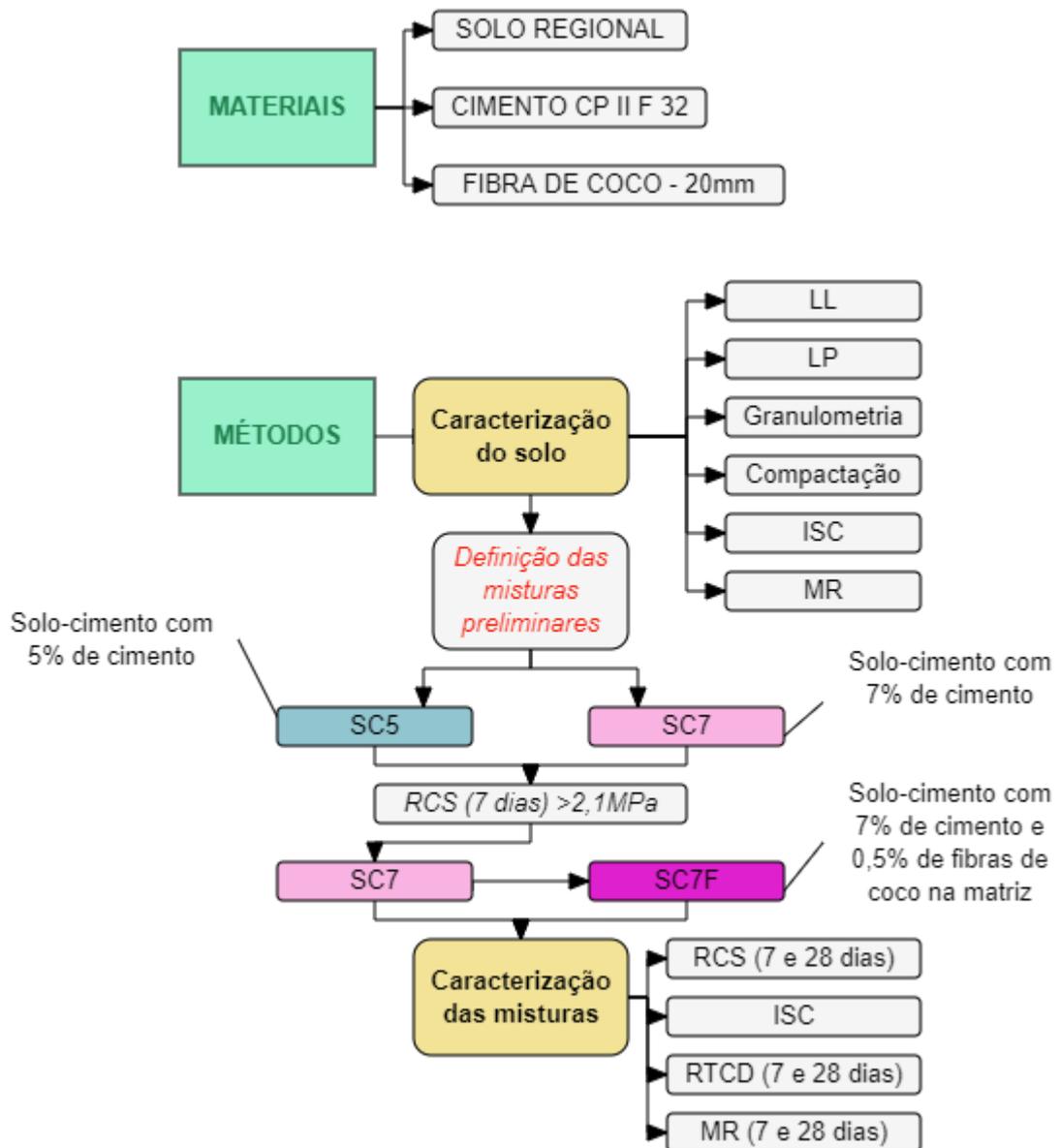


(a) Cimento. (b) Solo Coletado. (c) Fibras de coco. Fonte: Autora (2022).

Quanto às misturas utilizadas, elas foram compostas por solo + cimento (nomeadas por SC) e por solo + cimento + fibra (nomeadas por SCF), utilizando-se diferentes teores de

cimento (5% e 7%) e 0,5% de fibras. Sendo assim, as misturas foram denominadas de SC5 (solo-cimento com 5% de CP II F 32) e SC7 (solo-cimento com 7% de CP II F 32), seguidas da letra F quando indicar que há fibra na sua composição. A Figura 2 mostra um fluxograma para explicar melhor essas misturas, bem como ilustra o programa experimental que será mais bem detalhado no item que se segue.

Figura 2 – Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autora (2022).

2.3.2 Métodos

Após a coleta e aquisição dos materiais, foram realizados ensaios para a caracterização do solo, ensaios mecânicos convencionais e ensaio de Módulo de Resiliência (MR). Para o solo, foram feitos os ensaios de: limite de liquidez (DNER ME 122/1994); limite de plasticidade (DNER ME 082/1994); compactação *Proctor* (DNER ME 162/1994); índice de suporte Califórnia (DNIT ME 172/2016) e módulo de resiliência (DNIT 134 ME/2018). A análise granulométrica foi realizada por peneiramento e por sedimentação, obedecendo à norma DNER – ME 051/94 (DNER, 1994a). Para isso, foi necessária a determinação da densidade real dos grãos, conforme a norma DNER – ME 093/94 (DNER, 1994c).

A partir da curva granulométrica, foram calculados o diâmetro efetivo do solo (C_{10}), o coeficiente de uniformidade (C_u) e coeficiente de curvatura (C_c). A seguir são apresentadas as fórmulas utilizadas para o cálculo desses parâmetros por meio das Equações 2 e 3.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad (3)$$

Em que:

C_u = Coeficiente de uniformidade;

C_c = Coeficiente de curvatura;

D_{10} = diâmetro tal que 10% do solo, em peso, tem diâmetros menores que ele;

D_{30} = diâmetro tal que 30% do solo, em peso, tem diâmetros menores que ele;

D_{60} = diâmetro tal que 60% do solo, em peso, tem diâmetros menores que ele.

A partir da análise do solo, foram avaliadas misturas preliminares de solo-cimento. Para as misturas cimentadas, o teor escolhido inicialmente (5%) para o cimento foi baseado na norma NBR 12253 (ABNT, 2012). Para cada mistura, foi composta uma outra, adicionando 0,5%, em massa, de fibras de coco na porção solo.

Para o uso de misturas quimicamente estabilizadas com cimento em bases de rodovias, a norma DNIT 143 (DNIT, 2022) exige o enquadramento do material em uma determinada faixa granulométrica, presente na Tabela 1.

Tabela 1 – Exigências para uso de material em solo-cimento da norma do DNIT 143 (2022)

Peneiras	Porcentagem (%)	Tolerância (%)
2"	100	-
Nº 4	50 a 100	5
Nº 40	15 a 100	2
Nº 200	5 a 35	2

Fonte: Adaptado de DNIT 143 (2022).

A caracterização mecânica para avaliar a possível melhoria obtida pela adição das fibras nas misturas cimentadas, usando energia intermediária, foi realizada por meio dos seguintes ensaios, nos períodos de cura de 7 e 28 dias: módulo de resiliência (DNIT 134 ME/2018); índice de suporte Califórnia (DNIT 172 ME/2016); resistência à tração por compressão diametral (DNIT 136 ME/2018) e resistência à compressão simples (ABNT NBR 12025/2012). O ensaio de resistência à compressão simples (RCS) seguiu a norma NBR 12025 (ABNT, 2012), exceto pela dimensão dos corpos de prova, que, para fins de comparação, foram moldados com as dimensões de 100mm (diâmetro) por 200mm (altura).

É importante mencionar que, para o caso específico do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RTCD), foram moldados corpos de prova do tipo *Marshall*, de dimensões de 60mm (altura) por 100mm (diâmetro). A quantidade de golpes para simular a energia intermediária foi calculada com base no peso do soquete e na altura de queda, totalizando 28 golpes.

A respeito do módulo de resiliência, a avaliação desse parâmetro se faz importante, visto que se trata de uma propriedade do material que relaciona tensões aplicadas com deformações elásticas ou recuperáveis. Dessa forma, os ensaios para a determinação dos modelos de comportamento do módulo de resiliência das misturas cimentadas foram realizados com base na norma DNIT ME 134/2018 (DNIT, 2018). Para tanto, se fez necessário o uso do equipamento triaxial de cargas dinâmicas. Ressalta-se que, para as misturas cimentadas, esse parâmetro foi obtido em dois tempos de cura (7 dias e 28 dias). Na Figura 3, mostra-se a moldagem dos corpos de prova utilizados nesta pesquisa. O controle da umidade foi feito por meio de um determinador de umidade por infravermelho em todos os corpos de prova moldados, sendo obedecida a faixa de variação de $\pm 2\%$.

Figura 3– Corpos de prova utilizados na pesquisa



(a) Moldagem de corpo de prova no cilindro tripartido para MR. (b) Corpo de prova de 100mm por 200mm desmoldado para MR. (c) Moldagem de corpo de prova *Marshall* para ensaio de RTCD. (d) Corpo de prova *Marshall* desmoldado para ensaio de RTCD. Fonte: Autora (2022).

Algo que também deve ser destacado é que o parâmetro de fadiga se faz presente em *softwares* de dimensionamento de subcamadas cimentadas. A fadiga em misturas cimentadas é estudada há pelo menos algumas décadas. Ceratti (1991) apresentou resultados de ensaios de fadiga por flexão e por compressão diametral em misturas cimentadas. Além disso, esse autor realizou o dimensionamento de subcamada de solo-cimento, por meio de *software* de elementos finitos com base no critério de ruptura por fadiga. O Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) brasileiro já incorporou a vida de fadiga como parâmetro necessário para o dimensionamento de pavimentos asfálticos, contendo subcamadas tanto de solo-cimento, quanto de BGTC.

2.4 Resultados e discussões

2.4.1 Caracterização do solo regional

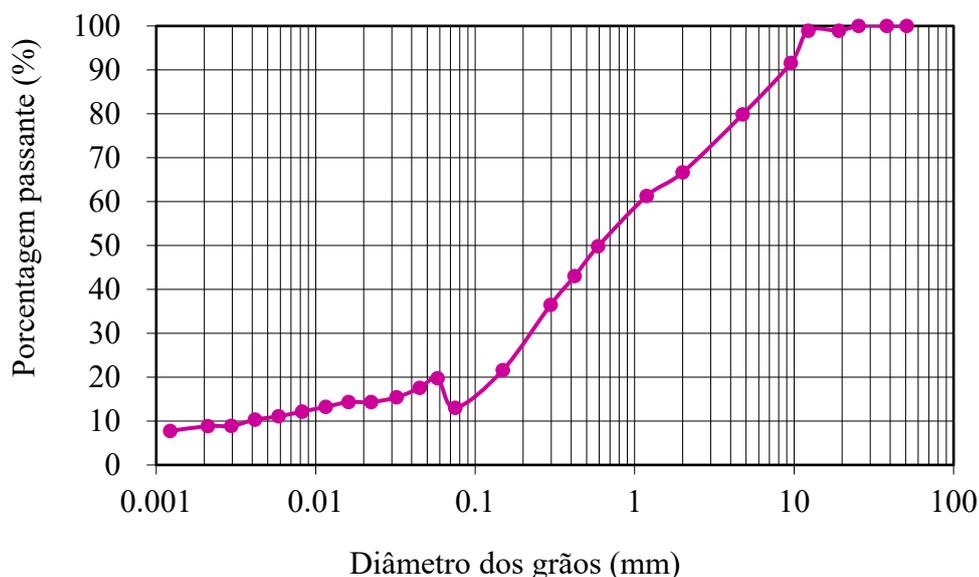
2.4.1.1 Classificação do material coletado

O solo passou por ensaios de determinação de limite de liquidez (27%) e de plasticidade (19%), o que resultou no valor de $IP = 8\%$, análise granulométrica e posterior classificação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), sendo classificado como solo do tipo A-2-4 (solo granular pedregulhoso siltoso).

Observa-se que os limites (LL e IP) se encontram acima dos valores máximos exigidos por DNIT (2006).

O valor encontrado para a densidade real dos grãos foi de 2,65. No Gráfico 1, está presente a curva granulométrica do solo, incluindo as frações de peneiramento e de sedimentação. Em que se percebe uma descontinuidade entre o peneiramento e a sedimentação que é explicada em razão da mudança da metodologia utilizada.

Gráfico 1 – Curva granulométrica do solo



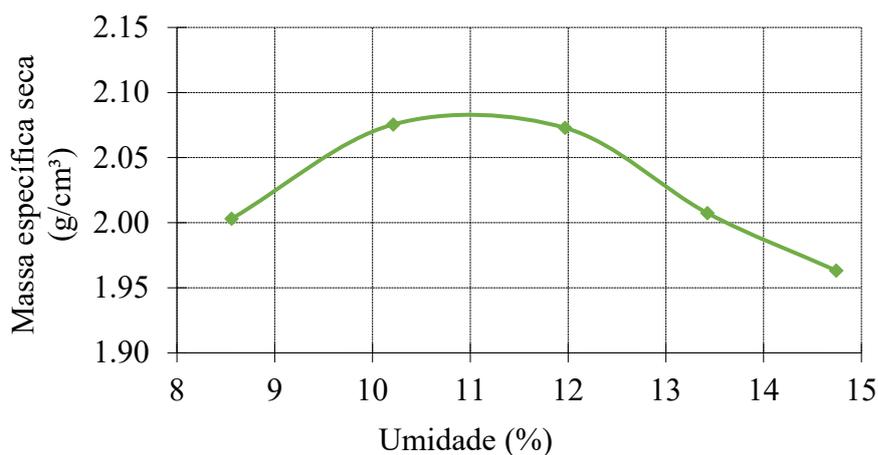
Fonte: Autora (2022).

Solos bem graduados tendem a se comportar de maneira melhor, visto que o intertravamento entre os grãos propicia um menor volume de vazios. Com isso, ao tratar esse tipo de material com cimento, a mistura acaba por consumir uma quantidade menor de aglomerante, tornando a estabilização química menos onerosa. Alguns parâmetros foram calculados com base na curva granulométrica, a fim de verificar se o material em análise é bem graduado ou não. O diâmetro efetivo do solo (C_{10}), é de 0,004mm. O coeficiente de uniformidade (C_u) é de 275 e o coeficiente de curvatura (C_c) é de 11. Isso permite dizer, conforme Caputo (1998), que o solo analisado é do tipo não uniforme e não é bem graduado.

2.4.1.2 Curva de compactação Proctor e Índice de Suporte Califórnia/Expansão

A massa específica seca máxima obtida foi de $2,07\text{g/cm}^3$ para o ponto de umidade ótima de 11%. No Gráfico 2, apresenta-se a curva de compactação gerada para o solo na energia intermediária.

Gráfico 2 – Curva de compactação do solo na energia intermediária



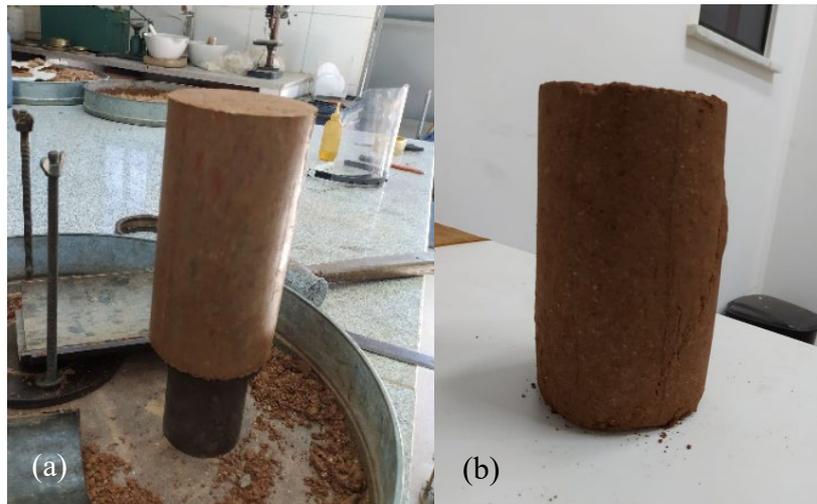
Fonte: Autora (2022).

O valor de ISC encontrado foi de 25%, já o resultado de expansão do solo foi igual a 0,75%. Com base nos valores obtidos nesse ensaio, e, de acordo com DNIT (2006), o solo em análise poderia ser utilizado na sub-base de pavimentos, caso os limites para LL e IP fossem ampliados, considerando a existência de solos tropicais. Percebe-se que a expansão (inferior a 1%) não apresenta correlações de previsão de comportamento com os valores de LL e IP. Isso é comum acontecer em solos tropicais, de acordo com Nogami e Villibor (2009) Entretanto, ressalte-se aqui a importância da determinação de outros parâmetros como os de rigidez (MR e DP) para analisar os solos.

2.4.1.3 Ensaio de Módulo de Resiliência

Não foi possível determinar um modelo de módulo de resiliência para o solo na energia intermediária, pois o material não resistiu à etapa de condicionamento do ensaio, possivelmente em virtude de sua baixa resistência. A Figura 4 mostra um corpo de prova antes e depois da etapa de condicionamento não ter sido concluída, com uma deformação plástica axial de 9,17%.

Figura 4 – Corpo de prova no ensaio de Módulo de Resiliência

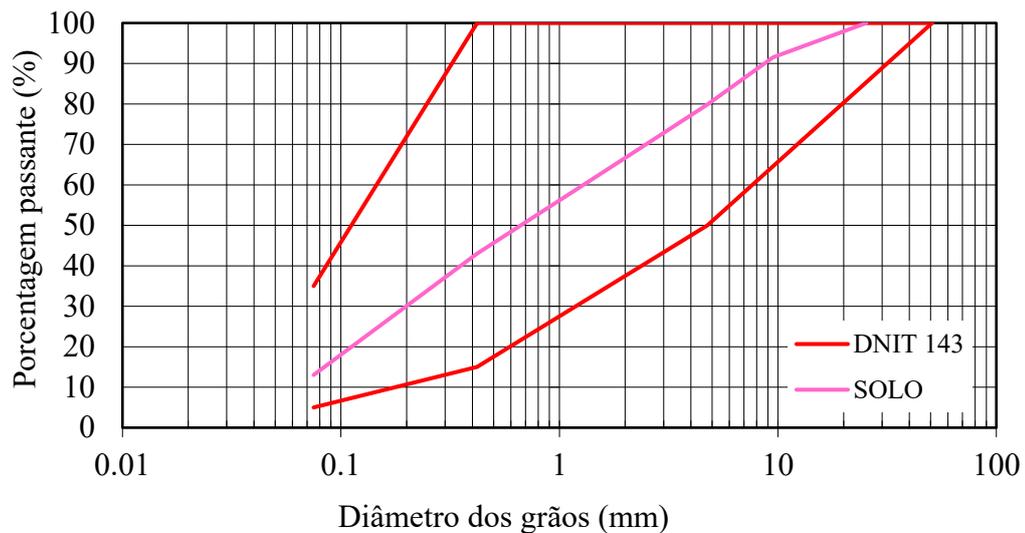


(a) Corpo de prova antes do ensaio de MR; (b) Corpo de prova após não resistir à etapa de condicionamento do ensaio MR. Fonte: Autora (2022).

2.4.2 Análise das misturas cimentadas preliminares

O solo analisado atende à faixa predeterminada pela norma DNIT 143 (2022), conforme pode ser observado no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Enquadramento do solo na faixa granulométrica da norma DNIT 143 (2022)

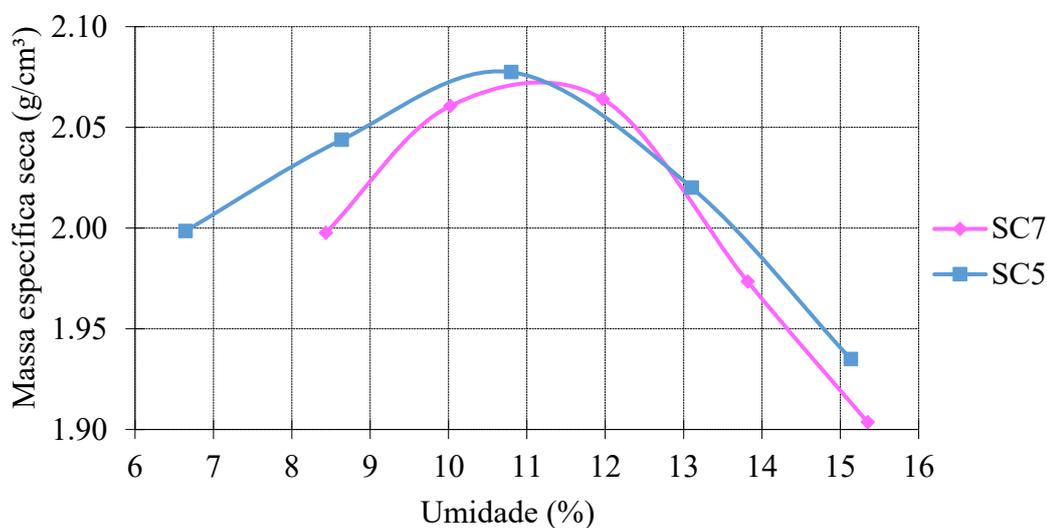


Fonte: Autora (2022).

2.4.2.1 Ensaio de compactação das misturas cimentadas preliminares e escolha do teor de cimento

O teor escolhido inicialmente para o cimento CP II F 32 foi de 5%, em massa, com base na sugestão presente em ABNT (2012b) para solos do tipo A-2-4. ABNT (2012a) estipula a resistência à compressão simples aos 7 dias de no mínimo 2,1MPa para solo-cimento com uso na pavimentação. O teor de 5% não atingiu essa resistência, sendo necessário testar outra porcentagem. A outra porcentagem testada foi a de 7%, em massa, de cimento. As misturas preliminares foram denominadas de SC5 (solo-cimento com 5% de CP II F 32) e SC7 (solo-cimento com 7% de CP II F 32). No Gráfico 4, tem-se as curvas de compactação das misturas cimentadas, das quais foram retirados os parâmetros de compactação para as misturas SC5 ($w_{ót} = 10,8\%$ e $\gamma_{Smáx} = 2,08\text{g/cm}^3$) e SC7 ($w_{ót} = 11,2\%$ e $\gamma_{Smáx} = 2,07\text{g/cm}^3$). Observa-se que, para o maior teor de cimento, a umidade ótima obtida foi maior, em concordância com a maior presença de finos no compósito, que requer mais água.

Gráfico 4 – Curvas de compactação das misturas SC5 e SC7



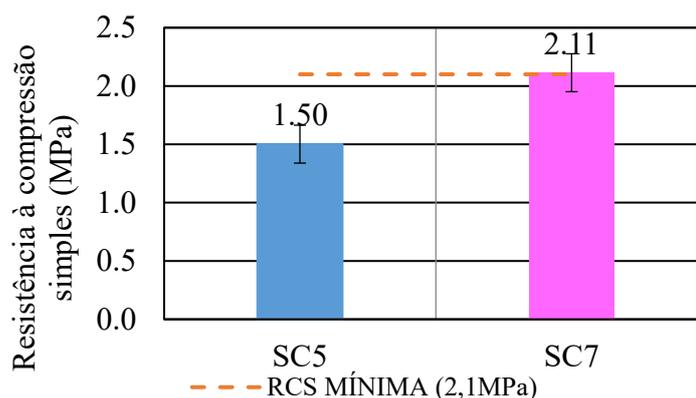
Fonte: Autora (2022).

2.4.2.2 Valores de Resistência à Compressão Simples aos 7 dias de cura das misturas cimentadas preliminares

Os valores de Resistência à Compressão Simples (RCS) obtidos com cura de 7 dias para as misturas cimentadas preliminares estão dispostos no Gráfico 5. O processo de cura é importante, visto que o material ganha resistência à medida que o cimento reage com a água. A

fim de evitar a perda de água para o ambiente, os corpos de prova foram envoltos em plástico filme após a moldagem e permaneceram assim durante todo o período de cura. Com base no parâmetro de 2,1MPa, a mistura escolhida para dar continuidade aos estudos foi a SC7, por apresentar valor de RCS, aos 7 dias, superior à resistência mínima exigida.

Gráfico 5 – Resistência à compressão simples aos 7 dias



Fonte: Autora (2022).

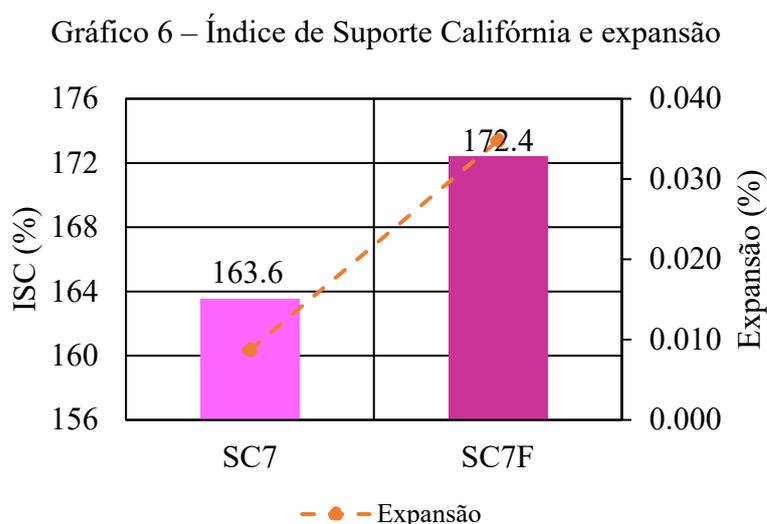
2.4.3 Caracterização e análise das misturas cimentadas com o uso de fibras de coco

Com o intuito de analisar o efeito das fibras de coco em compósitos cimentícios, à mistura SC7 foi adicionado 0,5% de fibras, em massa, de forma aleatória, mantendo o teor de cimento de 7%, em massa. Essa mistura recebeu a denominação de SC7F (solo-cimento com 7% de CP II F 32 e 0,5% de fibras de coco). Conforme indicação por Specht (2000), a umidade ótima considerada na mistura com fibras é a mesma da que não contém fibras. Casagrande (2005) também observou que diversos autores relatam que não há mudanças nos parâmetros de compactação quando as fibras são adicionadas. Com esse valor de umidade ótima de compactação, já obtido anteriormente, foram realizados ensaios mecânicos nas misturas SC7 e SC7F.

2.4.3.1 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

Sabe-se que o ensaio de ISC não é recomendado para misturas estabilizadas quimicamente, entretanto ele foi realizado para atender a alguns questionamentos dos técnicos locais que insistem em conhecer o valor desse parâmetro. No ensaio de ISC, observou-se um aumento pouco significativo no resultado da mistura com fibras em relação à mistura sem

fibras, bem como uma pequena alteração na expansão desses materiais (ver Gráfico 6). O aumento da expansão notado não implica em exclusão da mistura com fibras para eventuais aplicações em camadas de base de pavimentos, conforme DNIT (2006). Chandra, Viladkar e Nagrale (2008) obtiveram um incremento considerável de ISC quando estudaram três tipos de solo (sem cimento) reforçados com fibras de polipropileno.



Fonte: Autora (2022).

Os valores de ISC encontrados para as misturas SC7 e SC7F, foram 163,6% e 172,4%, respectivamente. Enquanto a expansão dos materiais foi de 0,009% para a mistura SC7 e 0,035% para SC7F. Esses valores sugerem, preliminarmente, que essas misturas têm potencial de aplicação em subcamadas dos pavimentos, desde que análises complementares possam ser executadas.

2.4.3.2 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

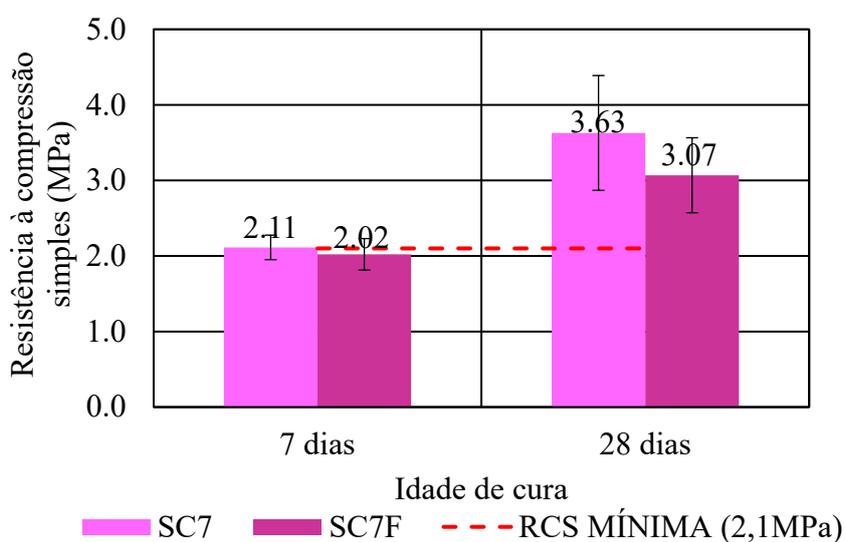
Foram analisados os valores de RCS das misturas aos 7 e 28 dias de cura. Percebe-se que há um pequeno decréscimo ao adicionar as fibras de coco (Gráfico 7). Estabragh, Ranjbari e Javadi (2018) analisaram amostras de solo-cimento com teores de 8% e 10% e constataram que as reforçadas com fibras de polipropileno apresentaram uma maior resistência à compressão. Specht (2000) também obteve valores maiores de RCS em misturas de solo-cimento com fibras de polipropileno.

Uma possível explicação para a ocorrência da diminuição desses valores, em vez de aumento, conforme encontrado pelos autores citados no parágrafo anterior, é a possível

degradação da fibra. A fibra de coco é natural, diferentemente da de polipropileno, sendo mais suscetível à decomposição. No entanto, estudo que envolviam fibras de coco em reatores sugeriu grande resistência à degradação (CRUZ, 2009). Outra possível explicação pode ser decorrente do método de ensaio, visto que o corpo de prova, antes de ser rompido, fica imerso em água por quatro horas. O período de imersão na água tem por objetivo simular a pior situação, o que pode ocasionar danos ao material. A mistura que contém fibras é mais suscetível à entrada de água, por meio da maior porosidade desses resíduos. Essa diminuição dos resultados ao se utilizar fibras não foi observada no ensaio de ISC, que também é realizado após imersão na água por 96h. Isso porque a ruptura ocorre dentro de um espaço confinado que é o cilindro *Proctor*. Esse resultado é compatível com os estudos de Diambra e Ibraim (2015), que analisaram a integração fibra-grão para o reforço de solos arenosos. Segundo os autores, o acréscimo da rigidez do solo induzido por um aumento no confinamento, resulta em uma maior mobilização das fibras.

Cabala (2007), ao estudar o efeito da inclusão de fibras de coco em solo-cimento, concluiu que a adição das fibras resultou na redução da resistência mecânica do material. Além disso, atribuiu esse fato à má adesão do reforço à matriz cimentada, o que ocasiona uma transferência de carga deficiente.

Gráfico 7 – Resistência à compressão simples, conforme a idade de cura



Fonte: Autora (2022).

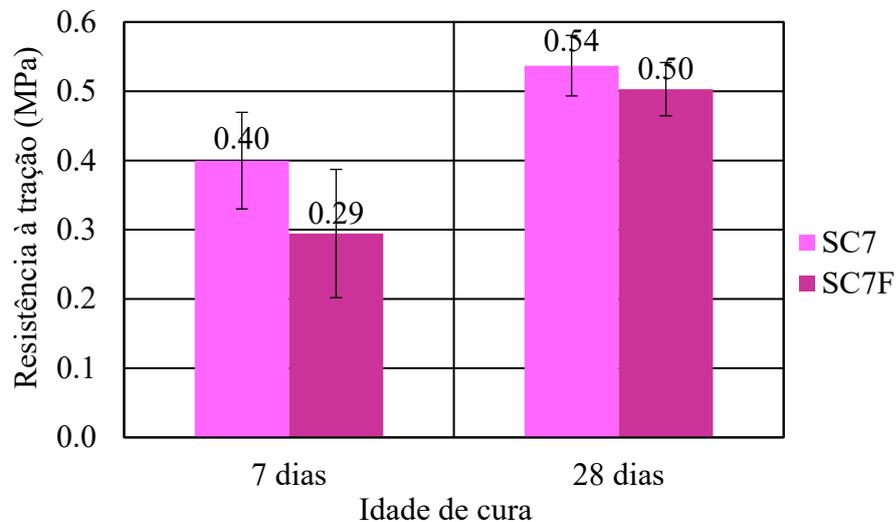
2.4.3.3 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os corpos de prova do ensaio de RTCD foram rompidos nas idades de cura de 7 e 28 dias. Os valores são apresentados no Gráfico 8. Observa-se que, no geral, o comportamento foi muito similar ao da RCS no que diz respeito ao pequeno decréscimo da RTCD. Sendo assim, não foi observada mudança significativa nos valores de RTCD ao adicionar fibras. No entanto, o aspecto visual da ruptura (ver Figura 5) é diferente, sendo possível perceber um acréscimo na ductibilidade. Estabragh, Ranjbari e Javadi (2018) também perceberam um aumento na ductibilidade dos compósitos cimentícios com fibras. As amostras analisadas pelos autores apresentaram uma maior resistência à tração quando acrescidas de fibras de polipropileno. Specht (2000) ao estudar fibras de polipropileno, notou uma diminuição nos valores de RTCD de maneira geral. Em contrapartida, Paula *et al.* (2019), que também estudaram fibras de polipropileno, encontraram valores maiores de resistência à tração em suas análises.

Essa ausência de padrão de comportamento faz refletir sobre outras variáveis, como, por exemplo, a interação da fibra na matriz. Diambra e Ibraim (2015) constataram que o comprimento da fibra desempenha um papel importante nessa interação e concluíram que o comprimento real da fibra precisa ser pelo menos 10 vezes o tamanho médio dos grãos para garantir um acionamento desse mecanismo. Ou seja, solos granulares mais finos geram interações muito mais eficazes. O solo em estudo possui diâmetro médio dos grãos (D_{50}) de 0,59mm, sendo o comprimento mínimo necessário da fibra de 5,9mm.

Uma outra possível causa para a diminuição da RTCD das misturas com fibras pode ser a falta de adesão desses resíduos ao restante do compósito. Outra hipótese para isso acontecer é a formação de caminhos preferenciais de propagação das tensões pelas fibras. Entretanto, cabe validar que, mesmo após rompidos, as metades dos corpos de prova da mistura SC7F (com fibras) ficaram unidas visualmente (ver Figura 5), diferentemente da SC7 (sem fibras).

Gráfico 8 – Resistência à tração conforme a idade de cura



Fonte: Autora (2022).

Figura 5 – Aspecto visual da ruptura dos corpos de prova durante o ensaio de resistência à tração



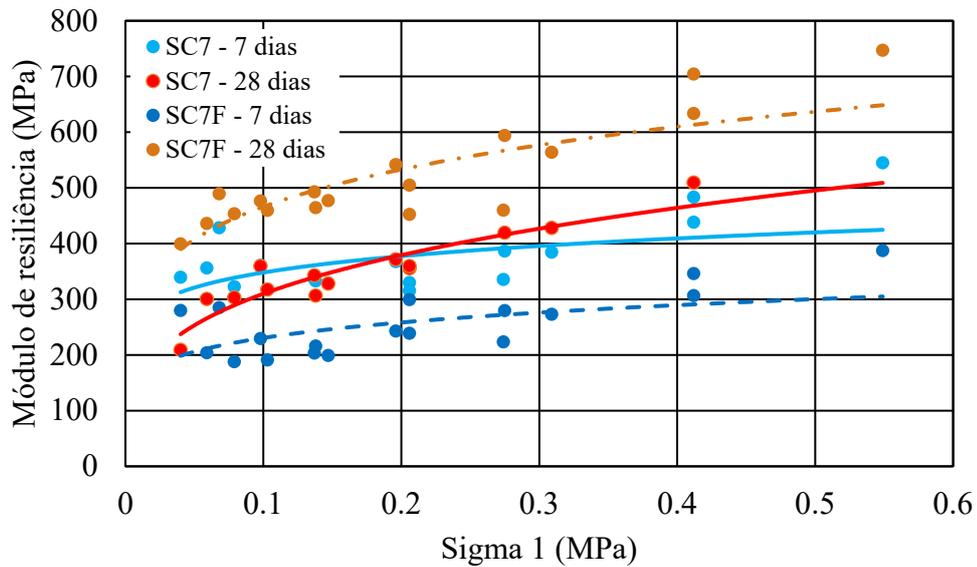
Da esquerda para a direita: SC7 e SC7F. Fonte: Autora (2022).

2.4.3.4 Ensaio de Módulo de Resiliência

Primeiramente, deve-se destacar que misturas estabilizadas quimicamente pouco dependem da tensão de confinamento aplicada, uma vez que possuem coesão quando endurecidas. Ou seja, o comportamento resiliente desses materiais depende da tensão principal maior (σ_1), conforme indica DNIT (2018d), específica para misturas estabilizadas. Entretanto, por limitações do *software* do equipamento disponível, que permitia apenas a execução do ensaio conforme a norma para solos, esse procedimento não pôde ser seguido e acabou-se utilizando a DNIT (2018a), que já vinha sendo usado para análise dessas misturas em diversos trabalhos publicados antes de 2018.

Dessa forma, no Gráfico 9 foi inserido o comportamento do módulo de resiliência das misturas em função da tensão principal maior, seguindo o modelo de potência, com base nos modelos de MR utilizados por Ceratti (1991). As linhas tracejadas representam as misturas que possuem fibras. As linhas de tendência apresentadas seguem a Equação 4. Os coeficientes de correlação para cada mistura estão presentes na Tabela 2, bem como os coeficientes A e B do modelo e os valores de MR médio.

Gráfico 9 – Módulo de resiliência das misturas de solo-cimento



Fonte: Autora (2022).

$$MR = A \times \sigma_1^B \quad (4)$$

Tabela 2 – Parâmetros do modelo de MR em função da tensão principal maior e MR médio das misturas SC7 e SC7F aos 7 e 28 dias de cura

Misturas	Cura (dias)	A	B	R ²	MR médios (MPa)
SC7	7	455,47	0,1168	0,31	373
	28	606,10	0,2914	0,84	387
SC7F	7	336,33	0,1639	0,32	255
	28	728,40	0,1940	0,70	520

Fonte: Autora (2022).

Percebe-se um aumento nos valores de módulo de resiliência de acordo com o tempo de cura, e, quando são adicionadas as fibras. Esse comportamento é contrário ao relatado por Specht (2000) que observou uma diminuição do módulo de resiliência nos compósitos

cimentícios fibrosos. De forma geral, ao avaliar o efeito da adição de fibras de coco no comportamento mecânico de solo-cimento, percebeu-se um ganho no MR com a adição de fibras de coco aos 28 dias de cura.

2.5 Considerações finais

Do ponto de vista mecânico, evidenciado pelos ensaios de MR, RTCD e RCS, recomenda-se a utilização de fibras de coco em misturas cimentadas. Os valores de MR aumentaram no compósito fibroso com 28 dias de cura. Os valores de RCS diminuíram, o que pode ter sido ocasionado pelo método de ensaio, em que há a inserção dos corpos de prova em água por quatro horas. Tal aspecto atenta para a reflexão sobre as fibras em ambientes saturados e sua degradação. Quanto à RTCD, houve um decréscimo também, mas percebeu-se visualmente a mudança da forma na ruptura, em que, mesmo após rompidos, as partes dos corpos de prova contendo fibras, continuam unidas.

É preciso avaliar a evolução das propriedades desses compósitos ao longo do tempo por um período maior, tanto para verificar os parâmetros de resistência, quanto para avaliar em que ponto as fibras de coco começam a se deteriorar. Dessa forma, seria possível estimar o ciclo de vida da camada e compatibilizar com a vida útil estabelecida no projeto do pavimento. Também é importante, por se tratar de materiais cimentados, a análise da vida de fadiga, necessária para o dimensionamento dos pavimentos por meio do *software* MeDiNa.

Em termos de aplicação, observou-se uma dificuldade na mistura das fibras com a matriz cimentícia na escala de laboratório. Essa desvantagem é fator importante na prática, tendo em vista o aumento de escala. Considera-se que o espalhamento das fibras na pista também pode ser dificultado pelo aspecto vento, por se tratar de um material bastante leve. Sendo assim, recomenda-se que a mistura seja preparada em usina e que sejam construídos trechos experimentais para uma melhor análise dos resultados aqui apresentados.

É importante ressaltar que estudos que analisem tempos de cura maiores (56, 112, 365, 730 dias) são de grande importância para verificar a manutenção do aumento da ductibilidade do material em comparação com o material sem a adição das fibras, bem como verificar a degradação das fibras, considerando que são de origem orgânica.

3 EFEITOS DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE COCO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS CONTENDO AGREGADO RECICLADO MISTO

As misturas cimentadas com fibras de coco têm sido pesquisadas para emprego na construção de pavimentos rodoviários. A aplicação desses materiais tende a proporcionar, às subcamadas do pavimento, melhorias das propriedades mecânicas e uma maior resistência ao trincamento por reflexão. Além disso, na composição do solo-cimento, existe a possibilidade de serem utilizados materiais alternativos, como agregados reciclados, a fim de contribuir com soluções mais sustentáveis na área de pavimentação. Sendo assim, o objetivo da pesquisa aqui apresentada foi analisar a alteração do comportamento mecânico de misturas cimentadas, para aplicação em subcamadas de pavimento, com o uso de fibras de coco e de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição do tipo misto. Foram realizados ensaios mecânicos nas misturas, tais como módulo de resiliência, resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral com tempos de cura de 7 e 28 dias. Como resultados, as melhores misturas testadas para pavimentos foram aquelas que apresentaram agregado reciclado puro na sua composição com adição de 7% de cimento. Verificou-se também que o acréscimo das fibras nas misturas cimentadas promoveu um aumento da ductibilidade, sendo incentivado o seu uso para reduzir custo com a aplicação de camadas anti-reflexão de trincas tradicionalmente usadas em pavimentos.

3.1 Considerações iniciais

A utilização de resíduos auxilia na diminuição da atividade exploratória de reservas naturais de matérias-primas. Além disso, os materiais alternativos apresentam um custo menor de produção, no geral, como é o caso, por exemplo, de resíduos de construção e demolição. Esse fator pode atenuar, por consequência, o custo das obras de pavimentação. Com relação ao desenvolvimento sustentável, a implicação mais imediata é a necessidade de se produzir a maior quantidade de bens com a menor quantidade de recursos naturais. Também há a necessidade de reduzir a poluição, ou seja, o desenvolvimento econômico deverá ser desvinculado da ocorrência de impactos ambientais (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

A experiência em diversas obras, ao redor do mundo, demonstrou que foram alcançados resultados positivos e conhecimentos abrangentes ao longo de vários anos de estudos com o uso de resíduos de construção e demolição. Entretanto, há uma subutilização

considerável de agregados reciclados, principalmente, devido à falta de confiança nesses materiais entre empreiteiros e projetistas (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2019).

Outros resíduos que merecem investigação são as fibras vegetais, como as de coco, que podem beneficiar a matriz cimentada contribuindo para a diminuição da fissuração. Visando contribuir com a disseminação do conhecimento para incentivar o uso de materiais sustentáveis, a presente pesquisa tem por finalidade avaliar o efeito da adição de fibras de coco no comportamento mecânico de misturas cimentadas contendo agregado reciclado para aplicação em subcamadas de pavimento.

3.2 Revisão bibliográfica

3.2.1 Resíduos de Construção e Demolição

Os resíduos de construção e demolição (RCD) vêm sendo utilizados há décadas nas mais diversas construções. Países, como a Inglaterra e Alemanha, emergiram do período pós-Segunda Guerra Mundial com significativas quantidades de resíduos de construção e demolição. A falta de capital e o considerável volume de RCD em locais onde deveriam ser reconstruídas as cidades, levaram ao desenvolvimento das técnicas de reciclagem, como solução para os problemas citados. Posteriormente, na Europa e no Japão, a escassez de materiais e a falta de espaço para a deposição final dos resíduos foram as principais motivações para se desenvolver pesquisas acerca da reciclagem de RCD (PEREIRA; VIEIRA, 2013).

Na Europa, de acordo com Sáez e Osmani (2019), há a geração de 850 milhões de toneladas de RCD por ano, sendo a Áustria, Alemanha, Holanda, Bélgica e França os maiores produtores, enquanto Croácia, Eslovênia, Eslováquia, Polônia, Portugal e Espanha são os menores. A Diretiva europeia nº 2008/98/CE estabeleceu uma meta de recuperação para atingir 70% de reciclagem de RCD até 2020 em cada estado-membro da União Europeia (PEREIRA; VIEIRA, 2013; SÁEZ; OSMANI, 2019). No Egito, a reciclagem desses resíduos se tornou uma opção viável para ser incorporada às obras rodoviárias (BEHIRY, 2013). Para Beja (2014), quanto à utilização de RCD, principalmente no que tange aos critérios de dimensionamento de pavimento, necessitam-se de mais pesquisas para suprir essas dificuldades.

No Brasil, Motta (2005) relata que a utilização de agregados reciclados, provenientes de RCD, para uso na pavimentação, tem sido estudada desde a década dos anos 80 no país. Nessa mesma década, foi pavimentada a primeira via de São Paulo com agregados reciclados de RCD com acompanhamento tecnológico, apresentando desempenho considerado

satisfatório na época (MOTTA, 2005). É importante destacar que, ao redor do mundo, existem instalações rodoviárias compostas por agregados reciclados, os quais foram viáveis do ponto de vista técnico e econômico para essas obras (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2019).

A resolução nº 307 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) datada de 2002 tem por finalidade estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Os geradores são definidos como os responsáveis pela correta deposição dos resíduos gerados. Segundo a mesma resolução, resíduos da construção civil são provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil. Também são resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, tintas, madeiras, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações e fiação elétrica (BRASIL, 2002). As resoluções nº 307, 348, 431, 448 e 469 (BRASIL, 2002, 2004, 2011, 2012, 2015) classificam os resíduos de construção civil e as suas respectivas destinações adequadas (ver Tabela 3).

Tabela 3 – Classificação e destinação adequada para resíduos de construção civil

Classificação	Definição	Destinação
Classe A	São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;	Deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a aterro de resíduos classe A para usos futuros;
Classe B	São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;	Deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;
Classe C	São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;	Deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas;
Classe D	São resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles prejudiciais à saúde, oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.	Deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

Fonte: Adaptado de BRASIL (2002, 2004, 2011, 2012, 2015).

As obras de construção civil produzem resíduos principalmente de classe A, passíveis de reciclagem, originando um material chamado de Agregado Reciclado (AR), que pode substituir a brita em algumas aplicações (COOPERCON, 2008). Para Vieira e Pereira (2015), a substituição total ou parcial de materiais convencionais por AR pode contribuir para a mitigação dos impactos ambientais induzidos pela indústria da construção civil. Isso, tendo em vista que pesquisas realizadas em todo o mundo apresentam evidências de um bom desempenho, no geral, referente a esses materiais alternativos.

O uso de AR pode apresentar resultados positivos do ponto de vista ambiental, técnico e econômico. Para Almeida *et al.* (2018), considerando o meio ambiente, o problema principal com esse tipo de resíduo está relacionado à sua deposição irregular e aos grandes volumes produzidos. Por meio do manejo irregular desses materiais alternativos, é possível que aconteçam enchentes, proliferação de vetores nocivos à saúde, interdição parcial de vias e degradação do ambiente. Entretanto, conforme LNEC (2012), para a aplicação de RCD em obras rodoviárias, não basta apenas um desempenho mecânico adequado, mas também verificar a possibilidade de contaminação das águas superficiais e subterrâneas pelo uso desse resíduo.

Do ponto de vista técnico, trabalhos como os de Motta (2005), Leite (2007), Silva (2009), Leite *et al.* (2011), Beja (2014), Xuan, Molenaar e Houben (2015) têm comprovado que o agregado reciclado possui desempenho adequado para utilização em camadas de pavimentos. Na maior parte desses estudos, são apresentados comportamentos mecânicos satisfatórios, por parte dos materiais alternativos, para o uso em subcamadas de pavimentos.

Para Brasileiro e Matos (2015), o grande empecilho para a utilização de AR é cultural, uma vez que há desconfiança de construtores e clientes, quanto ao bom desempenho dos produtos gerados. Também existe o obstáculo normativo, visto que não há normas que assegurem a aceitação de AR no mercado, devido à heterogeneidade desse tipo de material. Miranda, Ângulo e Careli (2009) também destacaram a falta de confiança no uso de AR, devido a sua heterogeneidade. Com isso, nesse último estudo relatado, foram apontadas algumas estratégias para mitigar esse problema, tais como o uso de dosador para se produzirem misturas de agregados reciclados e naturais, e de classificador espiral para remover finos da areia reciclada. Leite (2007), Leite *et al.* (2011) e Motta (2005) relatam que a composição dos resíduos de construção está condicionada às características específicas da região geradora. Esse fator pode influenciar diretamente as propriedades físicas e mecânicas desses resíduos, incluindo a forma dos agregados.

Oliveira *et al.* (2011) avaliaram a composição do RCD proveniente da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e verificaram que a argamassa foi o principal constituinte,

correspondendo, em média, a 38% da massa do RCD, seguida pelos resíduos de concreto e de cerâmica vermelha, com 14% e 13%, em média, respectivamente. Gómez (2016) afirmou que alguns usos potenciais para os materiais reciclados de RCD são: agregado para concreto de baixa resistência, pavimentação de rodovias, componentes para drenos e blocos de concreto.

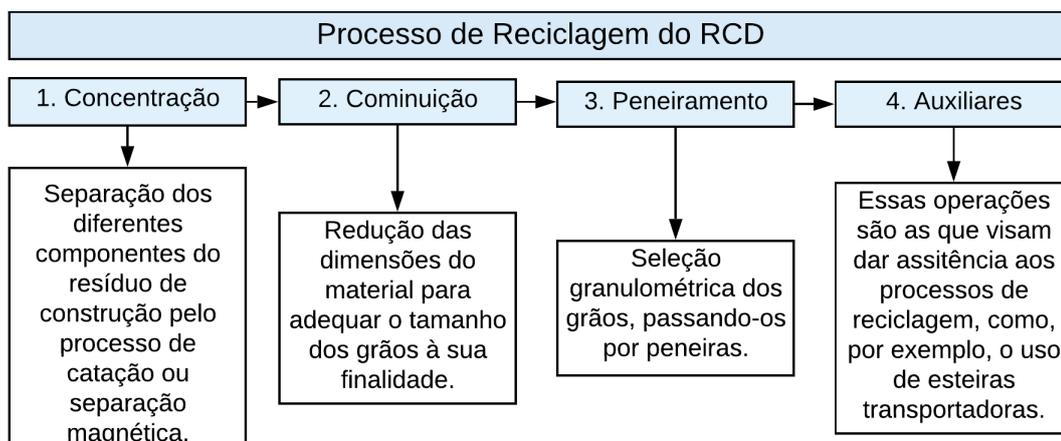
A distribuição granulométrica e a forma do grão do AR podem ser alteradas pelo processo de compactação, devido à quebra da estrutura da partícula durante o processo. Assim, grãos cúbicos podem ser gerados em maior quantidade, conforme a energia utilizada aumenta. Ou seja, o esforço de compactação também é um fator importante para a definição do comportamento físico e mecânico dos agregados, devendo o AR ser rigorosamente controlado, antes e depois da sua aplicação (LEITE *et al.*, 2011). Observa-se ainda, quanto à compactação, que o processo contribui para a exposição de partículas de cimento não hidratadas presentes no AR, podendo aumentar a sua resistência mecânica, principalmente até os sete dias de cura (ORIOLI *et al.*, 2018). Em misturas de AR com cimento, os fatores importantes para a determinação das características são o teor de cimento e tempo de cura. Além disso, deve ser considerado o material fino total, pois com o aumento da quantidade desse constituinte em específico, a taxa de resistência da mistura aumenta dentro dos limites de 10% a 20% (BEHIRY, 2013).

Brasileiro e Matos (2015) afirmam que os materiais provenientes de RCD compõem entre 50% e 60% dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil. Segundo a ABRELPE (2021), a produção de RCD no país no ano de 2020 de acordo com os dados coletados pela associação, foi estimada em 47 milhões de toneladas. Esse valor não considera descartes irregulares e particulares, apenas os efetivados pelas prefeituras. Na cidade de Fortaleza, Oliveira *et al.* (2011) concluíram que a parcela recolhida contabilizada pela prefeitura é de aproximadamente 706 toneladas de RCD por dia. Isso corresponde a uma taxa de geração de 0,11 toneladas de RCD por habitante a cada dia. Assim, é importante mencionar que esse valor está abaixo da média nacional, apontada como 0,50 toneladas de RCD por habitante a cada dia.

3.2.2 Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição

Para ser utilizado em obras rodoviárias, o material proveniente de RCD deve ser submetido à retirada das substâncias estranhas à fração mineral (MOTTA, 2005). De acordo com Silva (2009), o processo de reciclagem (ver Figura 6) é dividido nas seguintes operações: (i) concentração; (ii) cominuição; (iii) peneiramento e (iv) auxiliares.

Figura 6 – Processo de Reciclagem de Resíduo de Construção e Demolição



Fonte: Adaptado de SILVA (2009).

Segundo Silva (2009), a reciclagem de RCD, como material de construção civil, iniciou-se na Europa após a Segunda Guerra Mundial. Entretanto, no Brasil, esse processo encontra-se atrasado, apesar da escassez de agregados naturais e da presença de aterros nas regiões metropolitanas. Conforme Motta (2005), na cidade de São Paulo, desde a década dos anos 90, os RCD são reciclados para uso na pavimentação de ruas e produção de agregados de concreto. Nessa mesma década, deu-se início à instalação de usinas de reciclagem no Brasil. A autora destacou ainda que, em 2002, a prefeitura municipal de São Paulo publicou uma especificação normativa para a utilização de AR na pavimentação. Esse documento foi intitulado “Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil”. Em Belo Horizonte, os AR são utilizados como base de pavimentação e também na produção de argamassas (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

Embora algumas usinas recicladoras tenham sido instaladas no Brasil desde a década dos anos 90, a publicação das primeiras normas nacionais relacionadas aos agregados reciclados de RCD só começou a ocorrer em 2004. Nesse caso, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) lançou quatro especificações que tratam, desde a instalação para o recebimento do material, até sua aplicação em pavimento rodoviário e concreto sem função estrutural e são elas:

- a) NBR 15113 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação (ABNT, 2004c);
- b) NBR 15114 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Área de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação (ABNT, 2004d);

- c) NBR 15115 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos (ABNT, 2004e). Observa-se que o texto da NBR 15115 (ABNT, 2004e) é baseado na norma paulista (MOTTA, 2005);
- d) NBR 15116 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos (ABNT, 2004f).

As maiores diferenças verificadas entre os agregados reciclados e os naturais são:

(i) forma do grão e textura superficial, que, no material reciclado, tende a ser mais regular; (ii) densidade, que normalmente é menor no agregado reciclado, devido à sua alta porosidade e (iii) absorção de água, diferença mais considerável entre os dois materiais, em se tratando de propriedades físicas (BAKOSS; RAVINDRARAJAH, 1999). Quanto à classificação, os agregados reciclados podem ser de dois tipos, segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004f):

- a) Agregado de Resíduo de Concreto (ARC): agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto, na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas;
- b) Agregado de Resíduo Misto (ARM): agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo de classe A, composto, na sua fração graúda, com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

De acordo com Marques (2017), na Alemanha, a taxa de reciclagem de resíduos de construção é de 98%; na Dinamarca, de 94%; na Holanda, país cuja disposição desse tipo de resíduo em aterro é proibida por lei, 90% e em Portugal, 48%. No Brasil, estima-se que a geração anual de RCD seja em torno de 84,2 milhões de m³. Além disso, em território nacional, existem 310 usinas de reciclagem em funcionamento e, ao todo, essas instalações reciclam cerca de 21% do RCD produzido no país. Esse valor subiria para 46%, caso as usinas de reciclagem operassem em capacidade máxima (ABRECON, 2015). Na Figura 7, pode-se visualizar uma usina recicladora localizada na cidade de Fortaleza/CE.

Figura 7 – Produção de agregado reciclado na Usifort Ambiental



(a) Detalhe do terreno da Usifort Ambiental. (b) Unidade britadora de materiais graúdos. Fonte: Autora (2022).

Dentre as dificuldades encontradas para a reciclagem de RCD, pode-se citar o descarte desses resíduos de forma irregular, por parte principalmente de pequenas construções, e a falta de segregação desses materiais a partir do canteiro de obras. Desde o âmbito federal ao municipal, existem legislações que direcionam tanto o descarte correto dos resíduos como a preferência da reciclagem ao descarte em aterros apropriados. Porém, na cidade de Fortaleza, por exemplo, existem entulhos espalhados em terrenos baldios e em calçadas. Como causas desse problema, podem-se citar a falta de conhecimento e de educação de parte da população, tornando a reciclagem em larga escala inviável. A Figura 8 ilustra os problemas citados.

Figura 8 – Problemas que dificultam a reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição



(a) Descarte irregular de Resíduos de Construção e Demolição em Fortaleza/CE. (b) Ausência de segregação de resíduos em um bairro de classe média de Fortaleza/CE (no bairro Parquelândia). Observa-se desde pneus a lixo orgânico misturados aos Resíduos de Construção e Demolição. Fonte: Autora (2022).

3.2.3 Utilização de Agregado Reciclado na pavimentação

Segundo a ABNT (2004e), o agregado reciclado que pode ser utilizado na pavimentação é o material granular, obtido por meio da britagem ou beneficiamento mecânico de resíduos de construção civil pertencentes à classe A (Tabela 3). Os agregados reciclados devem atender a alguns requisitos dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros estabelecidos pela NBR 15115 para uso de agregados reciclados em pavimentação

Parâmetros	NBR 15115	
Dimensão máxima característica (mm)	≤63,5	
Fração menos que 0,42mm (%)	10 ≤ a ≤ 40	
Coefficiente de Uniformidade	>10	
Porcentagem de materiais indesejados (%)	Mesmo grupo	2
	Grupos distintos	3
Forma dos grãos (% de grãos lamelares)	≤30	
Índice de Suporte Califórnia (ISC %)	Base	≥60*
	Sub-base	≥20
	Reforço de subleito	≤12
Expansão (%)	Base	≤0,5
	Sub-base	≤1,0
	Reforço do subleito	≤1,0
Absorção (%)	≤12	
Desgaste no Abrasão Los Angeles (%)	≤55	

*Permitido o uso de agregados reciclados em camada de base para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo-padrão de 80 kN no período de projeto.

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004e).

Segundo Gómez (2016), o uso de RCD na pavimentação depende da composição do resíduo e das condições locais que incluem: intensidade das cargas mecânicas induzidas pelo tráfego rodoviário, temperatura ambiente, umidade e a reação a vários produtos. Por outro lado, a localização do material alternativo e o custo para transportá-lo são fundamentais para viabilizar seu uso em obras rodoviárias. Beja (2014) ressalta que as especificações nacionais a respeito dos agregados reciclados de RCD possuem poucas limitações em suas normatizações.

Motta (2005) concluiu que o agregado reciclado é de uso promissor em pavimentação, dadas suas propriedades físicas e mecânicas comparáveis aos materiais convencionais. Ademais, a adição de cal ou cimento Portland apresenta-se como alternativa para o aumento de resistência do material reciclado. Nesse caso, verificou-se que a adição de 4% de cimento Portland aos agregados reciclados melhorou notavelmente as características mecânicas da mistura (RCS, RTCD e MR).

Os agregados tratados com cimento consistem em uma técnica tradicional aplicada em subcamadas de estradas. A questão é que, para essas camadas, o método de dosagem de mistura aplicado é experimental e geralmente demorado. Assim, existem obstáculos para a criação de uma técnica de dosagem que permita a previsão das propriedades mecânicas das misturas a partir de parâmetros específicos (XUAN *et al.*, 2012).

Leite (2007) verificou, em seus estudos, que o resultado do módulo de resiliência obtido por retroanálise do agregado reciclado, a ser inserido na camada de base em pavimentos rodoviários, foi igual ao da brita graduada simples. Quando comparado aos outros materiais disponíveis na literatura, como laterita e brita na faixa A do DNIT, o agregado reciclado apresentou deformação permanente inferior, mesmo ao ser submetido a maiores tensões.

No trabalho de Silva (2009), concluiu-se que a adição de agregados reciclados de RCD misto viabilizou, do ponto de vista técnico, solos da Região Metropolitana de Fortaleza. Nesse caso, os materiais convencionais não supriam, na forma *in natura*, as propriedades físicas e mecânicas exigidas para uso adequado na pavimentação. Cabe ressaltar que, em Fortaleza, há vários casos de utilização de AR estabilizado granulometricamente com solo em camadas de base e sub-base de pavimento desde o ano de 2006 (FORTALEZA, 2017). Como exemplos dessas aplicações podem ser citadas as avenidas Jovita Feitosa, Luciano Carneiro, Pontes Vieira, Alberto Craveiro, Paulino Rocha, dentre outras. A seguir, na Figura 9 são exemplificadas algumas obras rodoviárias com utilização de AR na cidade de Fortaleza/CE.

Figura 9 – Obras com utilização de agregado reciclado em Fortaleza/CE



(a) Obra da rotatória do estádio Arena Castelão em Fortaleza/CE. Fonte: FORTALEZA (2017). (b) Avenida Bezerra de Menezes com Túnel da Avenida Humberto Monte em Fortaleza/CE. Fonte: USIFORT (2021).

Beja (2014) realizou estudos utilizando AR com e sem adição de aglomerantes, a saber, 3% de cal e 3% de cimento. A caracterização física e mecânica se mostrou dentro dos limites estabelecidos para uso na pavimentação. O autor concluiu que a mistura contendo

cimento apresentou o maior Módulo de Resiliência em relação às outras misturas. Além disso, por meio de retroanálises das bacias reflectômetras medidas em campo, foi verificado que a mistura contendo cimento apresentou maior rigidez.

Na pesquisa de Gómez (2016), foi possível usar o AR avaliado na camada de base em pavimentos rodoviários. No caso desse estudo, o material alternativo apresentou comportamento mecânico semelhante ao agregado convencional empregado habitualmente, no Distrito Federal, na construção das camadas de base em pavimentos, quando avaliados parâmetros de Módulo de Resiliência e Deformação Permanente.

Xuan, Molenaar e Houben (2015) apontaram que misturas de AR com cimento possuem propriedades mecânicas adequadas para uso na camada de base em pavimentos. A diminuição do conteúdo de alvenaria na composição do AR, bem como o aumento do teor de cimento e do grau de compactação podem melhorar as características da mistura. Os autores ressaltaram ainda que é necessário o uso de técnicas construtivas, a fim de se evitar a reflexão de trincas. Podem-se citar aqui algumas dessas técnicas construtivas usadas como, por exemplo, o emprego de tratamento superficial duplo (TSD), brita graduada simples (BGS) e geossintéticos.

A utilização do agregado reciclado proveniente de resíduo de construção é uma alternativa ao uso de materiais convencionais. Com isso, pode ser promovido um aumento na oferta de vias pavimentadas nos grandes centros urbanos ou mesmo nas cidades de médio porte brasileiras, caracterizadas por baixo volume de tráfego.

Conforme exposto neste tópico, há vários estudos que utilizaram agregado reciclado de RCD para uso na pavimentação com obtenção de resultados experimentais viáveis e satisfatórios do ponto de vista técnico. Em relação ao uso de misturas cimentadas, há uma lacuna referente ao aparecimento de trincas, para tanto, a respeito disso, o presente trabalho avaliou o uso de fibras de coco para aumentar a ductibilidade dessas misturas.

3.3 Materiais e métodos

3.3.1 Materiais

A coleta de Agregado Reciclado (AR) de RCD foi realizada na empresa Usifort Ambiental. A recicladora, em funcionamento na cidade de Fortaleza/CE desde 1997, atua com a produção de diversos tipos de AR: (i) rachão; (ii) britas de tamanhos variados; (iii) BGS; (iv) bica corrida e (v) lastro de pedra e outros produtos oriundos de RCD (USIFORT, 2021).

O tipo de AR coletado foi BGS. A escolha desse tipo de AR se deu em razão da ampla utilização de BGS natural nas subcamadas em rodovias do estado do Ceará. Quanto à origem do material alternativo, esse é proveniente de RCD da Classe A (Tabela 3). O AR coletado foi do tipo misto, por apresentar menos do que 90% de fragmentos oriundos de cimento Portland e rochas (ABNT, 2004f). No total, foram coletados cerca de 800kg de AR para a realização dos ensaios e preparação das misturas. Também se utilizou o mesmo solo, o cimento CP II F 32 (nos teores de 5% e 7%) e as fibras de coco, com comprimento aproximado de 20mm, apresentados no Capítulo 2. Na Figura 10, tem-se fotos do dia da coleta do AR e dele das instalações do laboratório, antes de ser homogeneizado e ensacado.

Figura 10 – Coleta de agregado reciclado na Usifort Ambiental



(a) Coleta de agregado reciclado. (b) Agregado reciclado dentro das instalações do laboratório. Fonte: Autora (2022).

3.3.2 Métodos

A caracterização do solo e da BGS reciclada foi feita por meio de ensaios padrões realizados comumente em materiais para uso na pavimentação, tais como limite de liquidez (DNER ME 122/1994), limite de plasticidade (DNER ME 082/1994), análise granulométrica (DNER ME 051/1994), e índice de suporte Califórnia (DNIT 172 ME/2016). A análise granulométrica do AR foi realizada por peneiramento e sedimentação, conforme a norma DNER – ME 051/94 (DNER, 1994a). Para tanto, foi necessária a realização do ensaio de densidade real, conforme a norma (DNER, 1994c). O ensaio de compactação foi realizado na energia intermediária, conforme a norma DNER – ME 162/94 (DNER, 1994e).

Além dos ensaios supracitados, também foram determinados o Módulo de Resiliência (MR) e a Deformação Permanente (DP) para o AR. O ensaio para determinação do

MR ocorreu conforme a norma DNIT ME 134/2018 (DNIT, 2018). A análise dos dados foi feita por meio do uso dos *softwares LAB Fit e Excel*, para a obtenção de um modelo com melhor coeficiente de correlação.

A deformação permanente ou plástica acontece quando, cessadas as tensões aplicadas, a amostra não é capaz de retornar ao seu estado original. Trata-se de um defeito encontrado nos pavimentos, que pode ocorrer tanto na camada de revestimento quanto nas subcamadas. Para o dimensionamento, considerando aspectos empírico-mecanísticos, esse parâmetro se faz necessário. Os ensaios foram realizados no equipamento triaxial de cargas dinâmicas, para seis pares de tensões, em que foram aplicados 10.000 golpes para cada par, verificando as dimensões finais dos corpos de prova. A quantidade de golpes aplicados foi definida com base na norma europeia de deformação permanente (CEN 13286-7/2004). Utilizou-se a umidade ótima, obtida no ensaio de compactação, para a confecção dos corpos de prova analisados.

Outros autores como Cabral (2021) também usaram a norma europeia para ensaiar a DP de materiais, tendo em vista a sua praticidade e aplicabilidade. Para o AR, também foram feitos ensaios de Gravimetria (Anexo A da NBR 15116/2004), Absorção de Água (DNER ME 081/1998) e Abrasão Los Angeles (DNER ME 035/1998).

A partir da análise das características do solo e do agregado reciclado, foram determinadas misturas cimentadas preliminares com base na faixa granulométrica presente em norma para uso de material em solo-cimento (DNIT ES 143/2022), a fim de verificar a RCS aos 7 dias com 5% de cimento, em massa. Entretanto, foi necessário também testar com 7% de cimento. As proporções do enquadramento granulométrico são apresentadas na Tabela 5. Por sua vez, nomenclatura utilizada para os compósitos cimentados analisados está disposta na Tabela 6.

Tabela 5 – Nomenclatura das misturas estabilizadas granulometricamente para enquadramento de faixa

Simbologias utilizadas	Composições
M50S50AR	Mistura contendo 50% de solo e 50% de agregado reciclado
M30S70AR	Mistura contendo 30% de solo e 70% de agregado reciclado
AR	100% agregado reciclado

Fonte: Autora (2022).

Tabela 6 – Nomenclatura das misturas preliminares estabilizadas quimicamente

Simbologias utilizadas	Composições		
	Cimento (%)	Matriz*	
		Solo (%)	AR (%)
M50S50AR5	5	50	50
M30S70AR5	5	30	70
AR5	5	0	100
AR7	7	0	100

* A matriz representa a porção do compósito sem a presença do cimento.

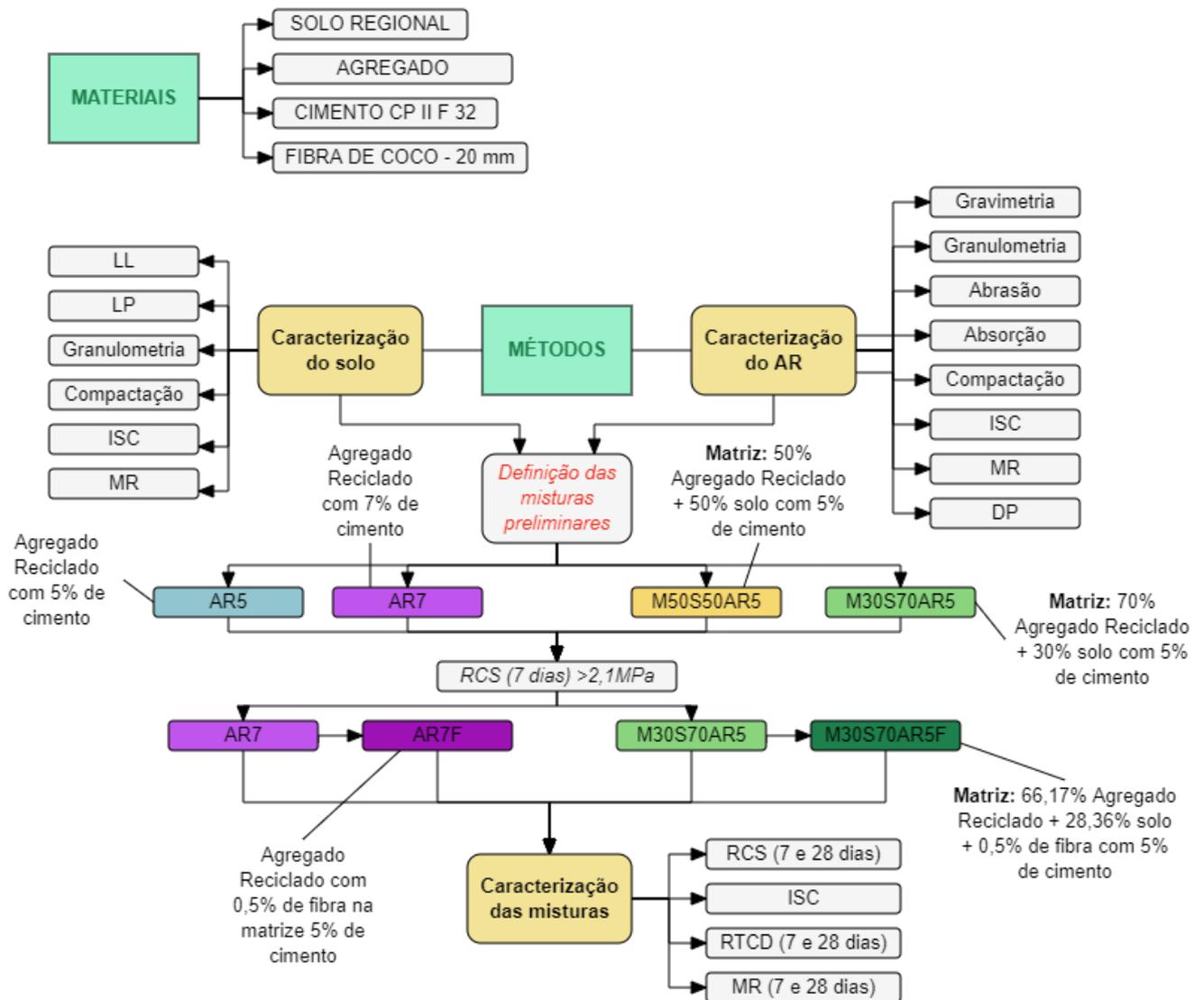
Fonte: Autora (2022).

A partir disso, com as misturas que apresentaram RCS maior que 2,1MPa aos 7 dias, foram ensaiados também compósitos fibrosos, para avaliar a influência das fibras. Quanto a essas misturas cimentadas, foi efetuada a caracterização mecânica necessária para avaliar a possível melhoria obtida pela adição das fibras. Para isso, foram realizados os seguintes ensaios: índice de suporte Califórnia (DNIT 172 ME/2016), módulo de resiliência (DNIT 134 ME/2018), resistência à tração por compressão diametral (DNIT 136 ME/2018) e resistência à compressão simples (ABNT NBR 12025/2012). Todos os ensaios, com exceção do ISC foram realizados com tempos de cura de 7 e 28 dias.

A determinação do ISC não é um ensaio recomendado para misturas estabilizadas quimicamente. A respeito dos ensaios de RCS e MR, foram adotadas as idades de cura de 7 e 28 dias para as misturas. Quanto ao MR, foram gerados modelos de comportamento do MR com o uso do *software Excel*.

Na Figura 11 é apresentado o fluxograma experimental deste estudo.

Figura 11 – Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autora (2022).

3.4 Resultados e discussões

3.4.1 Caracterização do agregado reciclado

3.4.1.1 Composição do agregado reciclado

Com o intuito de avaliar os componentes do AR em sua fração graúda e verificar a origem desse material, realizou-se o ensaio de gravimetria, conforme o anexo A da norma NBR 15116 (ABNT, 2004f). A Figura 12 apresenta o aspecto visual de componentes do AR, com destaque para a presença de materiais betuminosos, visto que esse grupo possui significativa presença no material alternativo. As porcentagens obtidas para os grupos que a norma prevê estão na Tabela 7. A partir disso, pode-se confirmar o enquadramento do material como sendo Agregado Reciclado Misto (ARM), de acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004f). No caso do AR coletado, a soma de porcentagens dos Grupos 1 e 2 (ver Tabela 7) resultou em 71,89% que é menor do que 90%.

Figura 12 – Análise visual dos componentes do agregado reciclado



Fonte: Autora (2022).

Tabela 7 – Resultados da composição do agregado reciclado por análise visual

Grupos	Porcentagem em massa (%)
Grupo 1: Pasta de cimento endurecida	30,47
Grupo 2: Fragmento de rocha	41,42
Grupo 3: Cerâmica vermelha e branca	2,01
Grupo 4: Materiais não minerais*	26,10
*Madeira, plástico, gesso, vidro, entre outros	0,12
*Betume	25,98

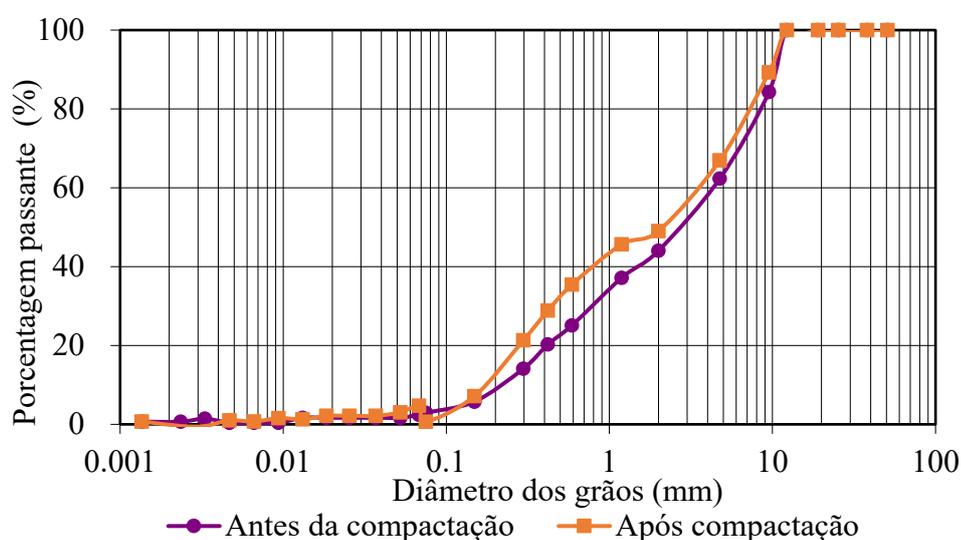
Fonte: Autora (2022).

Ainda assim, a porcentagem encontrada de materiais rochosos e oriundos de concreto e argamassa pode ser considerada alta se comparada aos estudos que avaliaram a composição dos RCD de origem mista produzidos na Região Metropolitana de Fortaleza. Oliveira *et al.* (2011) analisaram os componentes do RCD proveniente dessa região e constataram que, em média, essa porcentagem referente aos Grupos 1 e 2 (Tabela 7) seria de 52% do total do RCD misto.

3.4.1.2 Granulometria do agregado reciclado

A curva granulométrica do material foi feita por peneiramento e por sedimentação. O valor de densidade real obtido, necessário para a confecção da curva, foi de 2,44. O material estudado apresentou diâmetro máximo dos grãos de 19mm, além de presença significativa de finos em sua composição. Por se tratar de um material reciclado, existe uma tendência de eventuais quebras dos grãos quando compactado. Com base nisso, foi também realizada uma análise granulométrica após o agregado reciclado passar por um processo de compactação na energia intermediária. No Gráfico 10, há um comparativo das curvas granulométricas do material antes e depois de ser compactado.

Gráfico 10 – Curvas granulométricas do agregado reciclado antes e depois da compactação



Fonte: Autora (2022).

Percebe-se a quebra do material, por meio da presença de finos. Orioli *et al.* (2018) e Lima (2008) também observaram essa quebra. Entretanto, não há mudança considerável na curva granulométrica. A NBR 15115 (ABNT, 2004e) define a porcentagem passante na peneira Nº 40 (abertura de malha 0,42mm) entre 10% e 40% para ser um agregado aceitável. Pelo Gráfico 10, observa-se que esse valor está dentro dos limites especificados para as duas curvas. A Tabela 8 apresenta o diâmetro efetivo (C_{10}), o coeficiente de uniformidade (C_u) e o coeficiente de curvatura (C_c) calculados para o material. Além da granulometria, foram analisados os limites de consistência, que, por sua vez, apresentaram resultado não líquido e não plástico. Segundo Caputo (1998), e, com base nos coeficientes obtidos, o AR pode ser considerado não uniforme, visto que o C_u é maior que 15. Além disso, esse material alternativo não é considerado bem graduado, em virtude de o C_c estar fora do intervalo entre 1 e 3.

Tabela 8 – Uniformidade e curvatura do agregado reciclado

	C_{10}	C_u	C_c
Antes da compactação	0,23	18,26	0,66
Depois da compactação	0,18	19,44	0,16

Fonte: Autora (2022).

3.4.1.3 Resistência à abrasão

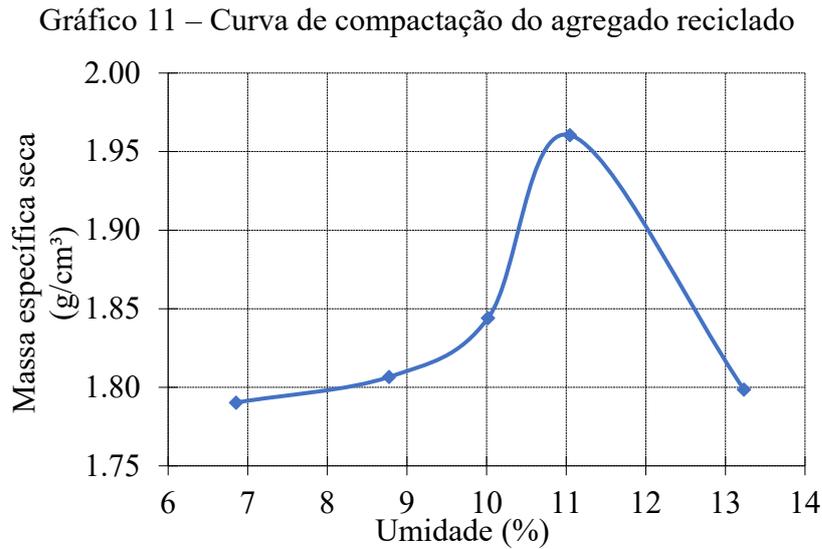
Para a análise da resistência à abrasão do agregado reciclado, foi realizado o ensaio de Abrasão Los Angeles conforme DNER (1998). Com base nos aspectos granulométricos do material, foi escolhida a graduação C para a execução do ensaio. O resultado foi uma abrasão de 39%, valor em concordância com ABNT (2004e) que delimita o valor máximo de 55%. No geral, o resultado de Abrasão Los Angeles é bastante dependente da composição gravimétrica do material, conforme apontamentos de Lima (2008).

3.4.1.4 Absorção de água da fração graúda

O ensaio de absorção de água da fração graúda foi realizado, de acordo com ABNT (2009). O procedimento analisa a capacidade de o agregado graúdo absorver água. Esse parâmetro é importante porque interfere diretamente no cálculo da água a ser adicionada, a fim de se obter a umidade ótima de compactação. O agregado reciclado apresentou uma taxa de absorção de 4,27%, não ultrapassando o limite imposto de 12% (ABNT, 2004e).

3.4.1.5 Ensaio de Compactação

A massa específica seca máxima e a umidade ótima encontradas foram, respectivamente, 1,963g/cm³ e 10,8%. No Gráfico 11, está inserida a curva de compactação do material. Durante a moldagem dos corpos de prova, o controle da umidade foi feito, por meio de um determinador de umidade por infravermelho, sendo obedecida a faixa de variação de $\pm 2\%$.



Fonte: Autora (2022).

3.4.1.6 Índice de Suporte Califórnia

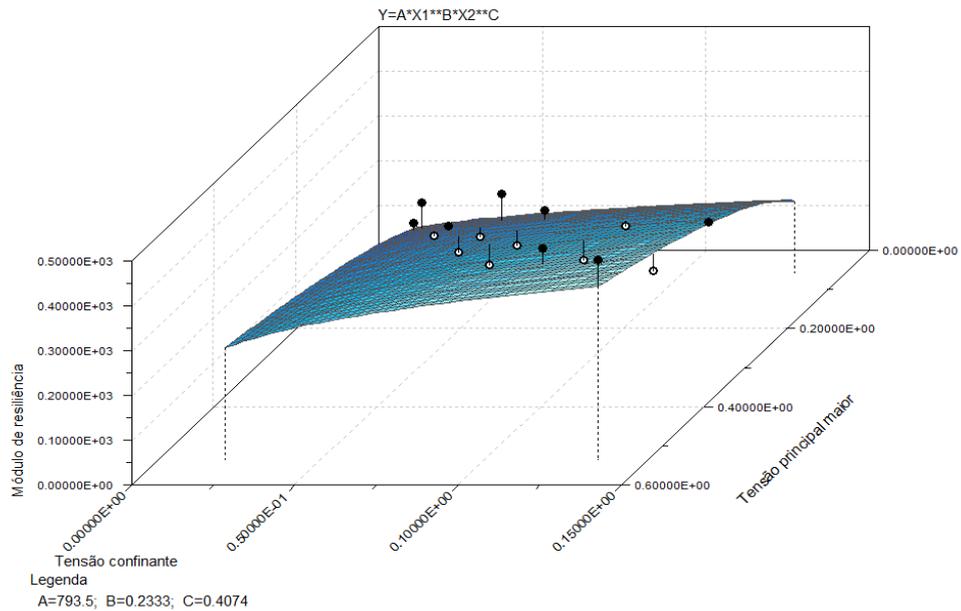
Os resultados obtidos foram de 42% de ISC e 0% de expansão para o agregado reciclado. Com esse valor de ISC, DNIT (2006) recomendaria o uso em camadas de sub-base de pavimentos.

Orioli *et al.* (2018), em seus estudos, obtiveram um valor de ISC de 80% para agregado reciclado misto, o que possibilitaria a utilização em camadas de base de pavimentos. Lima (2008) e Leite (2007) também obtiveram resultados de ISC bem maiores para AR misto. Vale ressaltar que há uma grande diferença na composição gravimétrica dos AR analisados, sendo a quantidade de betume (presente de forma significativa no AR deste estudo) um fator relevante.

3.4.1.7 Módulo de Resiliência

A análise dos dados foi feita por meio do uso do *software LAB Fit*, para a obtenção de um modelo com o coeficiente de correlação satisfatório. O modelo de comportamento resiliente que apresentou melhor correlação (0,82) está em função da tensão confinante e da tensão principal maior, conforme o Gráfico 12. Figura 13 apresenta a execução do ensaio de módulo de resiliência.

Gráfico 12 – Comportamento do Módulo de Resiliência do agregado reciclado



Fonte: Autora (2022).

O MR médio calculado foi de 226MPa. A fórmula que descreve o módulo de resiliência do material, representado pelo modelo composto, se encontra na Equação 5. Na Figura 13, pode-se observar a montagem do corpo de prova e o equipamento utilizado no procedimento.

$$MR = 739,50 \times \sigma_3^{0,2333} \times \sigma_1^{0,4074} \quad (R^2 = 0,82) \quad (5)$$

Em que:

MR = Módulo de Resiliência;

σ_3 = Tensão de confinamento;

σ_1 = Tensão principal maior;

R^2 = Coeficiente de Correlação.

Figura 13 – Ensaio do Módulo de Resiliência



(a) Montagem do corpo de prova para MR; (b) Equipamento triaxial dinâmico. Fonte: Autora (2022).

Os demais modelos de MR testados, que apresentaram menores coeficientes de correlação comparados ao modelo composto apresentado na Equação 5, e seus respectivos coeficientes de correlação estão mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Modelos de Módulo de Resiliência testados para o agregado reciclado

Equações dos modelos	Coefficientes de Correlação (R^2)
$MR = 791,63 \times \sigma_3^{0,4471}$	0,54
$MR = 612,77 \times \sigma_d^{0,5008}$	0,69
$MR = 775,87 \times \sigma_3^{0,3734} \times \sigma_d^{0,0864}$	0,56

Em que: σ_3 = Tensão de confinamento e σ_d = Tensão-desvio.

Fonte: Autora (2022).

Leite (2007) analisou AR misto e encontrou valores de MR variando entre 160MPa e 440MPa para a energia intermediária de compactação. Vale ressaltar que os corpos estudados pela autora possuíam dimensões maiores – 15mm (diâmetro) por 300mm (altura) – porém, com a mesma razão diâmetro/altura.

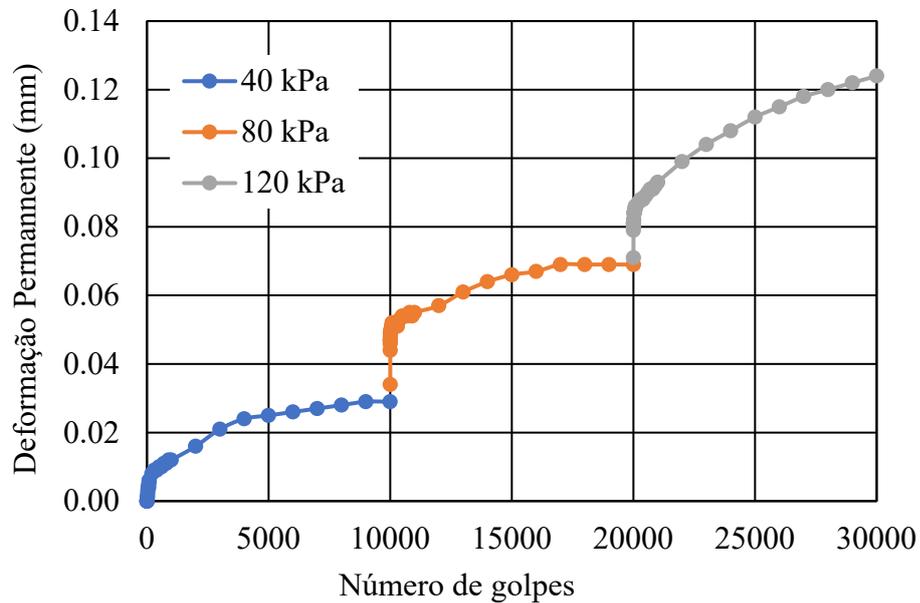
ABCP (2019) apresenta uma faixa de MR para britas graduadas entre 150MPa e 300MPa para a utilização desse material em camadas de base. Com suporte nisso, o AR, que é do tipo BGS, estaria apto a compor essa subcamada.

3.4.1.8 Deformação Permanente

Foram analisados os valores de deformação permanente em dois níveis de tensões confinantes: 40kPa (Gráfico 13) e 80kPa (Gráfico 14). Para cada nível de tensão confinante foram analisadas três tensões-desvio. A cada par de tensões foram aplicados 10.000 golpes, conforme a norma europeia (CEN 13286–7/2004) e com base nos estudos de Cabral (2021). Outro fator decisivo para escolha desse método de ensaio foi a questão do tempo de ensaio, pois na atual norma do DNIT 179 IE (2018) seria necessário um tempo de cerca de 375 horas (mais de 15 dias ininterruptos) para a sua conclusão, considerando os nove pares de tensão. Cabral (2021) observou que o acúmulo quase total de afundamento (acima de 90%), se concentrou nas primeiras 6.000 aplicações de carga, indicando que após esse período o material tende a estabilizar para o caso dos solos por ele investigados.

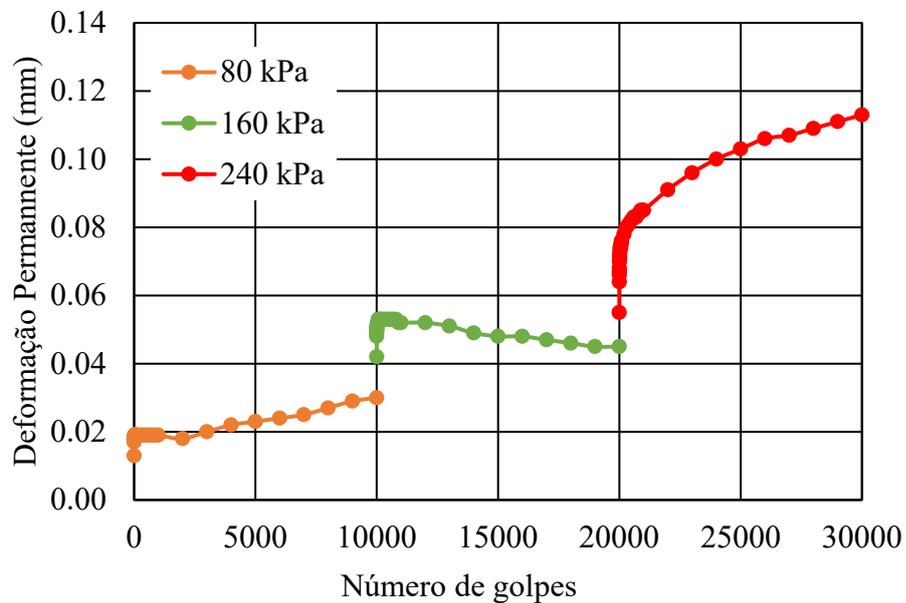
Percebe-se, pelos Gráficos 13 e 14, que o valor de deformação permanente não ultrapassa 0,13mm para a tensão de confinamento de 40kPa e 0,12mm para 80kPa. De acordo com os parâmetros do *software* MeDiNa, a deformação permanente máxima no pavimento é de 12,5mm (somando as deformações de todas as camadas). De acordo com dados mostrados por Guimarães (2009) e Cabral (2021), os resultados obtidos para esse material são insignificantes, visto que, se o material for usado como base de 20cm de espessura e submetido às tensões estudadas, sua contribuição representará apenas 1,04% do afundamento de trilha de roda aceitável. Estudos mostram, de forma geral, que agregados reciclados de RCD não apresentam valores de deformação permanente consideráveis (LEITE *et al.*, 2011; BEJA, 2014).

Gráfico 13 – Deformação Permanente do agregado reciclado para tensão confinante de 40kPa



Fonte: Autora (2022).

Gráfico 14 – Deformação Permanente do agregado reciclado para tensão confinante de 80kPa



Fonte: Autora (2022).

Na Figura 14, tem-se uma amostra após passar pelo ensaio. É possível notar que não há abaulamento considerável no corpo de prova, evidenciando a pequena deformação sofrida.

Figura 14 – Corpo de prova após passar pelo ensaio de Deformação Permanente



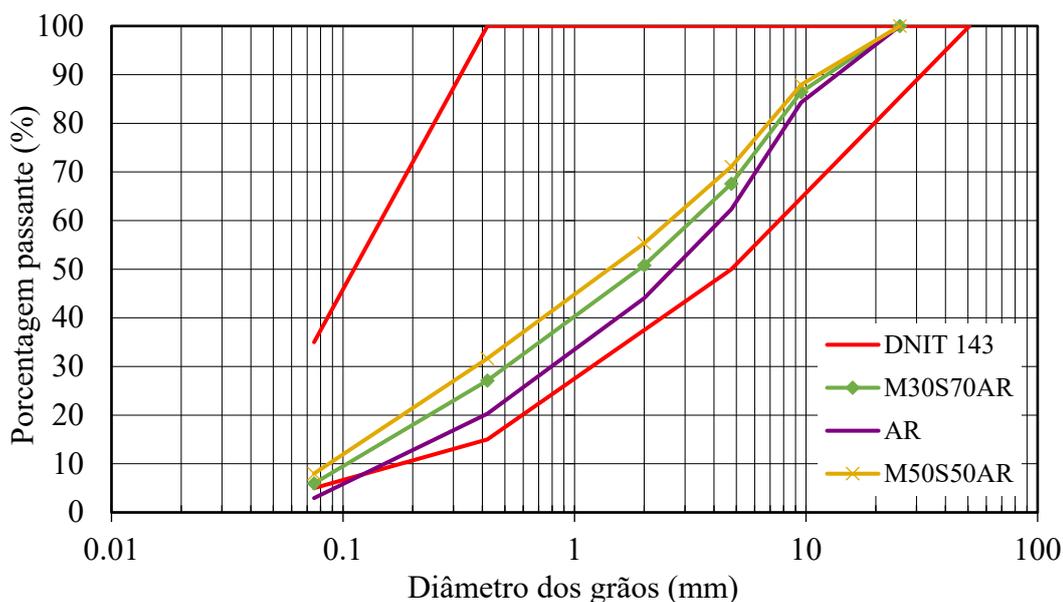
Fonte: Autora (2022).

3.4.2 Definição das misturas cimentadas preliminares com o uso de agregado reciclado

A fim de adequar o uso do agregado reciclado para pavimentação de acordo com os diâmetros dos grãos exigidos em DNIT (2022), foram realizadas estabilizações granulométricas com o solo regional apresentado no Capítulo 2. Isso foi testado até o ajustamento à faixa. A nomenclatura das misturas está presente na Tabela 5.

O enquadramento da faixa pode ser visualizado no Gráfico 15. Percebe-se que o AR ultrapassa, em menor grau, os limites exigidos pela faixa no tocante à peneira N° 200 (abertura de malha 0,075mm). Contudo, os finos do AR tendem a ser de qualidade razoável, visto que são provenientes de materiais que já foram cimentados. Lima (2008) conclui que mesmo o AR sem a adição de cimento apresenta aumentos em parâmetros (ISC, RCS, RT e MR) com o decorrer do tempo de cura. Dessa forma, optou-se por seguir com a mistura de AR para testes.

Gráfico 15 – Enquadramento de faixa granulométrica



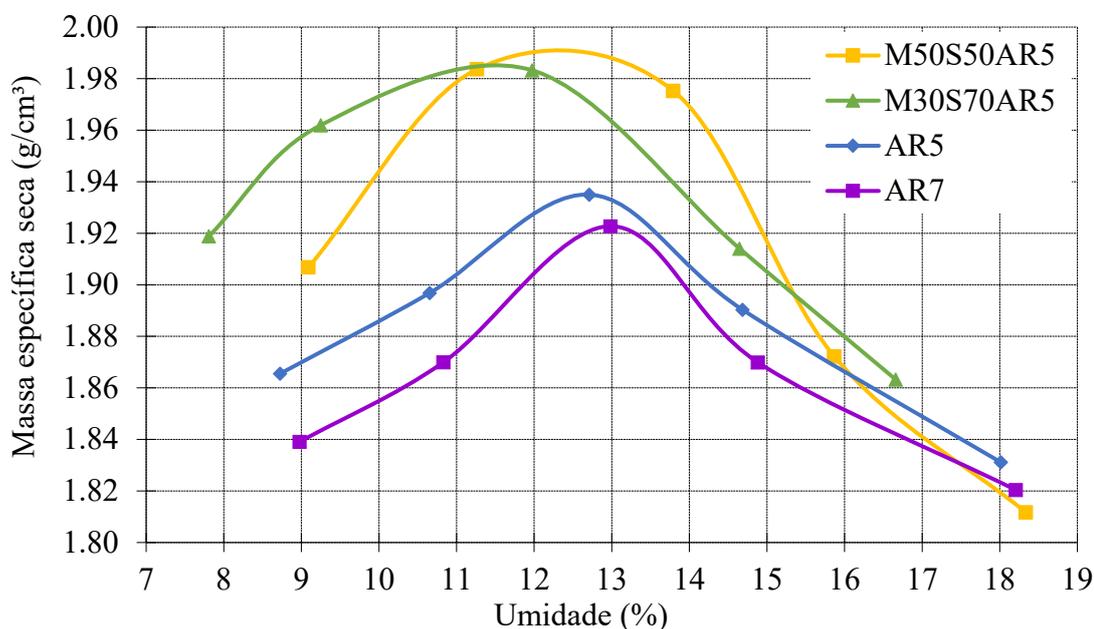
Fonte: Autora (2022).

Definidas as proporções das misturas, decidiu-se utilizar o teor de 5% de cimento, em massa, para os testes iniciais com base nos estudos de Simoni *et al.* (2019). A matriz dos compósitos foi definida no enquadramento granulométrico (Tabela 5), sendo adicionado o teor de 5% de cimento em massa. A nomenclatura utilizada para os compósitos cimentados analisados está disposta na Tabela 6.

Foram realizados, nas misturas citadas na Tabela 6, ensaios de compactação para a determinação das umidades ótimas. Com isso, no Gráfico 16, tem-se as curvas de compactação das misturas estudadas e, na Tabela 10, estão presentes os valores de massa específica seca máxima e umidade ótima equivalentes.

Percebe-se, nas misturas de AR estabilizado com solo que, quanto maior o teor de AR, menor a umidade ótima de compactação. A diminuição desses valores pode acarretar uma redução nos custos das obras rodoviárias, principalmente em regiões secas. A quantidade de água necessária para a compactação, bem como a distância percorrida para levar água à obra, podem influenciar financeiramente a construção de uma rodovia. Com relação às misturas AR5 e AR7, nota-se que o aumento do teor de cimento provoca um acréscimo na umidade ótima.

Gráfico 16 – Curvas de compactação das misturas cimentadas preliminares contendo agregado reciclado



Fonte: Autora (2022).

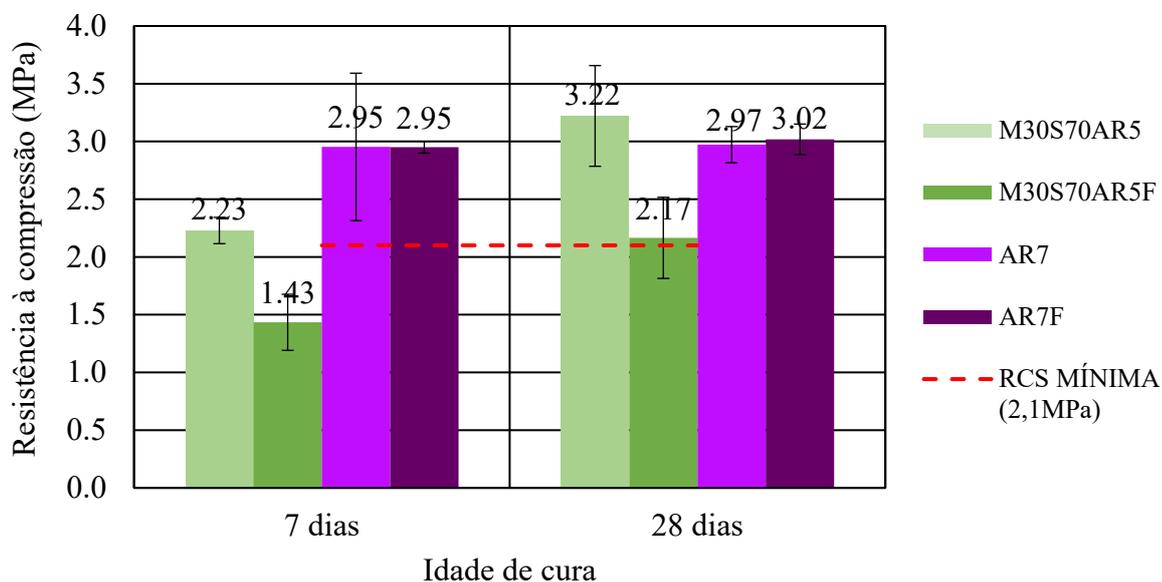
Tabela 10 – Massa específica seca máxima e umidade ótima das misturas cimentadas preliminares contendo agregado reciclado

Parâmetros <i>Proctor</i>	AR5	AR7	M50S50AR5	M30S70AR5
Massa específica seca máxima (g/cm³)	1,935	1,923	1,990	1,985
Umidade ótima (%)	12,7	12,9	12,5	11,5

Fonte: Autora (2022).

Os valores de RCS obtidos aos 7 dias de cura, para essas misturas, estão presentes no Gráfico 17. É preciso destacar, primeiramente, que a mistura de AR contendo 5% de cimento, em massa, não obteve valores de resistência à compressão simples mínimos, de 2,1 MPa. Assim, foi também testada uma mistura de AR com teor de 7% de cimento em massa (AR7). Isso foi feito com o intuito de serem realizados novos testes com um maior teor de AR, a fim de maximizar o uso desses resíduos. Por fim, escolheu-se seguir os ensaios, para avaliar o efeito da adição das fibras de coco, com as misturas AR7 e M30S70AR5, visto que apresentaram valores maiores do que 2,1MPa de RCS aos 7 dias de cura.

Gráfico 17 – Valores de Resistência à Compressão Simples aos 7 dias das misturas cimentadas preliminares contendo agregado reciclado



Fonte: Autora (2022).

Simoni *et al.* (2019) estudaram o comportamento de misturas solo-agregado-cimento (SAC) e obtiveram, com o uso de agregados convencionais, valores de RCS aos 7 dias de 5,11MPa e 7,16MPa para teores de cimentos, em massa, de 5% e 7%, respectivamente. Comparando os resultados encontrados nesta pesquisa com os de Simoni *et al.* (2019), percebe-se uma RCS inferior. As misturas do tipo SAC são as que melhor representam o material dos compósitos M30S70AR5 e M30S70AR5F, ao passo que para as misturas AR7 e AR7F, as BGTC apresentam melhor correspondência.

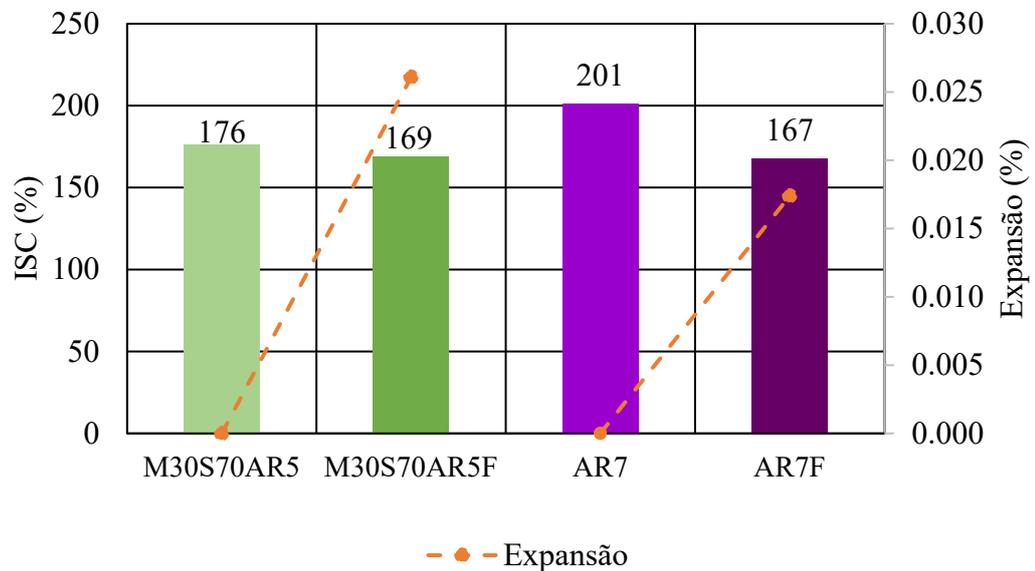
3.4.3 Caracterização das misturas cimentadas com o uso de agregado reciclado e fibras de coco

Após a escolha das misturas para seguir com a pesquisa a partir das inserções das fibras de coco, foram realizados os demais ensaios de caracterização mecânica. As misturas escolhidas foram AR7 e M30S70AR5, sendo adicionada uma porcentagem de 0,5%, em massa, de forma aleatória, de fibras de coco (nomeada aqui pela letra F), criando duas outras misturas, denominadas de AR7F e M30S70AR5F, respectivamente.

3.4.3.1 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

Os resultados obtidos de ISC são apresentados no Gráfico 18. Observa-se que a adição de fibras de coco à mistura M30S70AR5 não causou uma diminuição significativa (3,57%) do ISC. Houve, também, uma queda do ISC na mistura AR7F, se comparada à AR7. A expansão, representada pela linha tracejada no Gráfico 18, aumentou com o acréscimo das fibras, mas de forma que não descartaria o uso desses materiais nas camadas de base para pavimentos rodoviários, pois todas foram inferiores a 0,03%.

Gráfico 18 – Índice de Suporte Califórnia das misturas cimentadas contendo agregado reciclado



Fonte: Autora (2022).

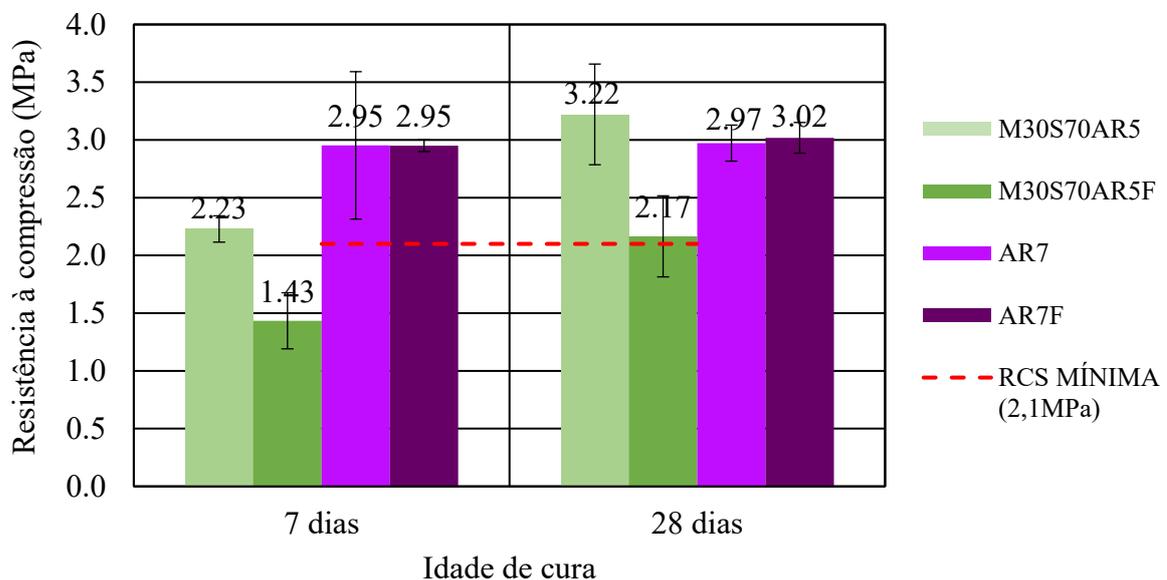
3.4.3.2 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

O Gráfico 19 apresenta os valores encontrados no ensaio de RCS aos 7 e 28 dias de cura. Com o uso de fibras de coco, a mistura com matriz de AR e solo expressou uma queda nos valores, tanto aos 7 quanto aos 28 dias de cura. Esse fato pode estar relacionado ao método de ensaio, em que os corpos de prova ficam imersos na água por quatro horas antes da ruptura. As fibras podem ter sua resistência diminuída em ambientes saturados, tendo em vista sua porosidade. As misturas que contém apenas AR na sua matriz apresentaram valores de RCS idênticos, não indicando alteração com a adição de fibras de coco.

Há indicativo que a utilização de um maior teor de cimento implica em uma melhor adesão das fibras na matriz. Essa maior adesão pode ter influenciado para a não diminuição desse parâmetro quando o compósito fibroso foi submetido a um ambiente saturado.

Santos (2019) utilizou fibras de polipropileno em BGTC e observou uma redução do parâmetro de RCS, conforme o aumento da porcentagem de fibras, para a cura aos 28 dias. Nos experimentos de Specht (2000) e Cheng *et al.* (2020), também com o uso de fibras de polipropileno, houve um aumento na resistência à compressão.

Gráfico 19 – Resistência à compressão simples das misturas contendo agregado reciclado



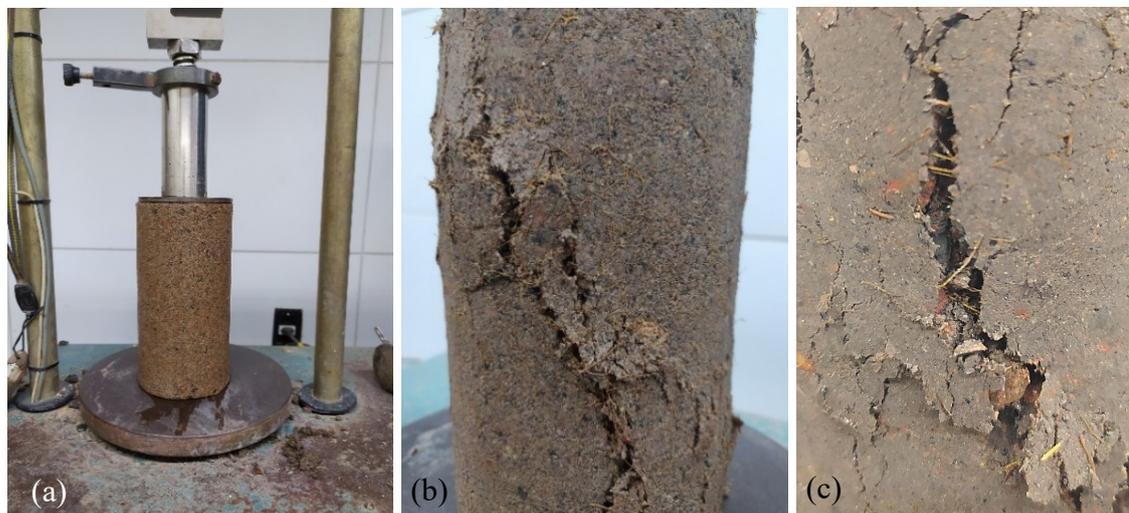
Fonte: Autora (2022).

Outra comprovação importante a ser ressaltada é que quando se compara somente as misturas com fibras há acréscimo da RCS com o aumento do tempo de cura de 7 para 28 dias. Para o caso da mistura M30S70AR5F, a RCS aumentou de 1,43MPa para 2,17MPa. Para o caso da mistura AR7F, a RCS aumentou de 2,95MPa para 3,02MPa. Observa-se que as misturas somente com AR apresentam um melhor comportamento em comparação aquelas com solo, o que ambientalmente ou financeiramente pode ser interessante porque há a possibilidade de se empregar no campo uma mistura 100% reciclada.

Observa-se também que corpos de prova com fibras de coco na composição apresentaram um rompimento da estrutura mais contido, o que pode ser visualizado na Figura 15b. Cabala (2007) constatou que, na superfície de fratura dos corpos de prova de solo-cimento reforçados com fibras de coco, ocorre o arrancamento de fibra e não o rompimento do elemento

de reforço. Isso indica falhas na adesão das fibras à matriz cimentada. Na Figura 15c, nota-se que o fato citado por Cabala (2007) também se adequa aos experimentos desta pesquisa.

Figura 15 – Ensaio de Resistência à Compressão Simples



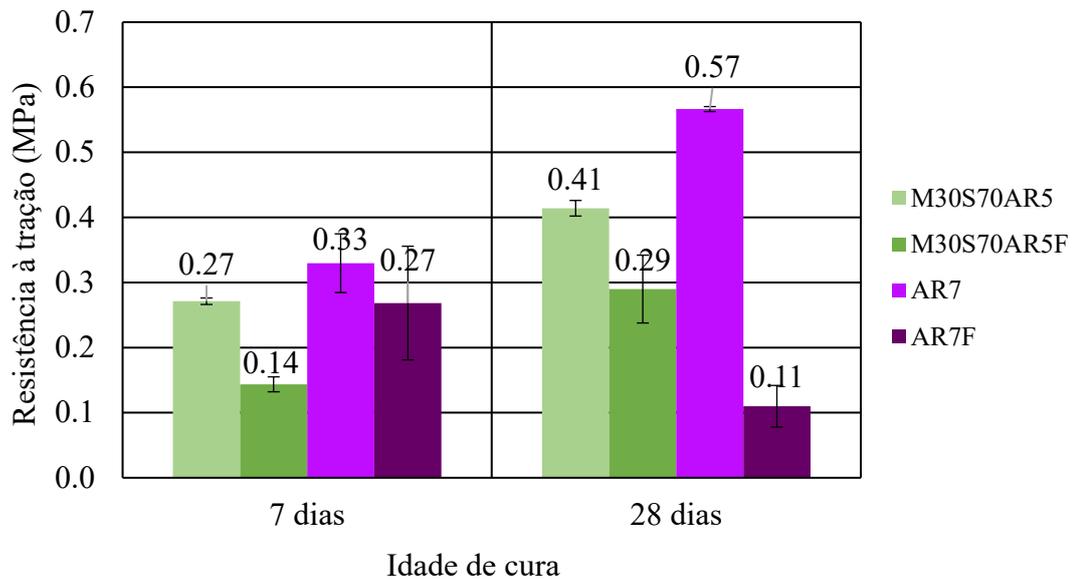
(a) Corpo de prova durante o ensaio. (b) Rompimento de corpo de prova com fibras de coco. (c) Detalhe da ruptura. Fonte: Autora (2022).

3.4.3.3 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Para avaliar a resistência à tração das misturas, foram realizados ensaios de RTCD. Houve dificuldade na moldagem das amostras para as misturas AR7 e AR7F, devido à falta de coesão, se fazendo necessária uma maior cautela e ocorrendo a perda de alguns corpos de prova nesse processo. Essa dificuldade pode ter afetado os resultados obtidos nos ensaios.

No Gráfico 20, são indicados os resultados de RTCD. A adição de fibras não beneficiou as misturas das matrizes estudadas. Somente para o caso da mistura M30S70AR5F, a RTCD aumentou de 0,14MPa (M30S70AR5) para 0,29MPa com o tempo de cura, mas esse mesmo comportamento não ocorreu para a mistura AR7F. Porém, na Figura 16, tem-se a representação visual da forma de ruptura. A respeito disso, nas misturas com fibras de coco, o rompimento das amostras aconteceu de maneira mais dúctil, de forma a concordar com os estudos de Fatahi, Khabbaz e Fatahi (2012). Sobhan e Mashnad (2002) também afirmam que não houve acréscimo nos valores de resistência à tração, entretanto, notaram um aumento na tenacidade em experimentos com fibras plásticas. É visível a mudança da forma de ruptura do material, que não se segrega por completo após atingir o máximo de carregamento

Gráfico 20 – Resistência à tração das misturas contendo agregado reciclado



Fonte: Autora (2022).

Figura 16 – Diferenças no modo de ruptura por tração das misturas na compressão diametral



Da esquerda para a direita: M30S70AR5, M30S70AR5F, AR7 e AR7F. Fonte: Autora (2022).

Simoni *et al.* (2019), ao analisarem misturas SAC, encontraram valores de RTCD, para o teor de cimento de 5%, variando entre 1,03MPa (7 dias) e 1,26MPa (28 dias). Specht (2000) notou uma queda no valor da RTCD nos seus compósitos fibrosos, quando comparados aos não fibrosos. Santos (2019), por sua vez, afirma que houve um aumento gradual da resistência à tração (na flexão) das misturas com o aumento da quantidade de fibras.

3.4.3.4 Ensaio de Módulo de Resiliência

Foram gerados modelos de comportamento do MR, em função da tensão principal maior (σ_1), para as misturas analisadas em diferentes períodos de cura. Esses modelos seguem o que é descrito na Equação 6.

$$MR = A \times \sigma_1^B \quad (6)$$

Na Tabela 11 são apresentados os coeficientes de correlação, os coeficientes A e B do modelo e os valores de MR médio. Para as misturas AR7 e AR7F não foi possível gerar valores de MR aos 7 dias, visto que houve um problema técnico no equipamento utilizado com relação às leituras realizadas, em que o equipamento estava a aplicar cargas diferentes das que deveriam ser aplicadas, sendo necessário conserto. Portanto, o ensaio não foi realizado para essa mistura nessa idade.

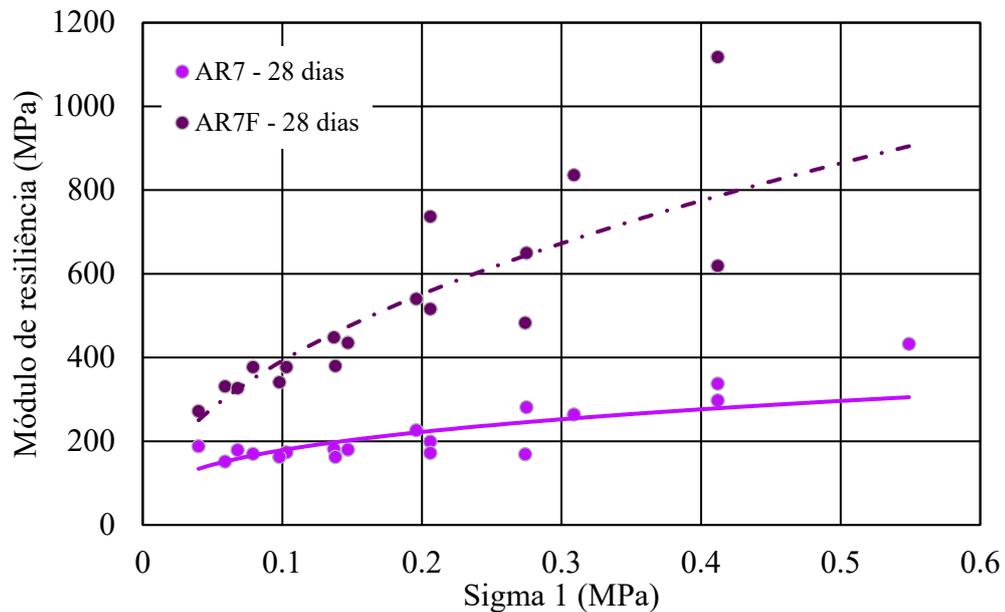
Tabela 11 – Parâmetros do modelo de comportamento apresentado e módulo de resiliência médio das misturas cimentadas contendo agregado reciclado aos 7 e 28 dias de cura

Misturas	Cura (dias)	A	B	R ²	MR médios (MPa)
AR7	7	-	-	-	-
	28	368,31	0,3139	0,60	218
AR7F	7	-	-	-	-
	28	1214,40	0,4909	0,79	692
M30S70AR5	7	763,36	0,2331	0,56	513
	28	815,02	0,1255	0,15	682
M30S70AR5F	7	450,13	0,2711	0,56	285
	28	472,27	0,2423	0,56	315

Fonte: Autora (2022).

No Gráfico 21, pode-se visualizar o comportamento do módulo de resiliência das misturas AR7 e AR7F aos 28 dias de cura, de acordo com o modelo aplicado. As fibras foram benéficas, aumentando os valores de MR em 217,43%. O fato de a matriz contendo apenas agregado reciclado possuir um maior número de micropartículas de cimento em sua composição pode ter contribuído para uma maior aderência das fibras na matriz, considerando uma maior rigidez no material, culminando em resultados positivos. Esse resultado mostra que a utilização de fibra pode melhorar o comportamento mecânico dos materiais e consequentemente aumentar a capacidade de carga da camada, aumentando a vida útil da rodovia, evitando patologias precoces devido ao aumento do tráfego com o decorrer dos anos.

Gráfico 21 – Módulo de Resiliência das misturas AR7 e AR7F



Fonte: Autora (2022).

No Gráfico 22, estão presentes os modelos de comportamento das misturas M30S70AR5 e M30S70AR5F, aos 7 e 28 dias de cura. As linhas tracejadas representam as misturas que contêm fibras. Percebe-se um decréscimo nos valores de módulo de resiliência, representados pelas linhas tracejadas, com o uso das fibras. Além disso, houve um aumento de 10,53% nos valores de módulo da mistura M30S70AR5F com o aumento do tempo de cura. Por outro lado, os valores médios estão em conformidade com a utilização em camada de base de pavimentos, não sendo excluída a sua utilização, principalmente se for considerado o benefício do aumento da ductibilidade do material para reduzir custo com a aplicação de camadas anti-reflexão (TSD, geossintéticos e BGS). De maneira visual, estão apresentados corpos de prova depois de passarem pelo ensaio de MR na Figura 17. Khattak e Alrashidi (2007), ao analisarem compósitos cimentados fibrosos, constataram que o valor do módulo de resiliência ou se manteve ou aumentou quando comparado com os compósitos sem fibras.

Gráfico 22 – Módulo de Resiliência das misturas M30S70AR5 e M30S70AR5F

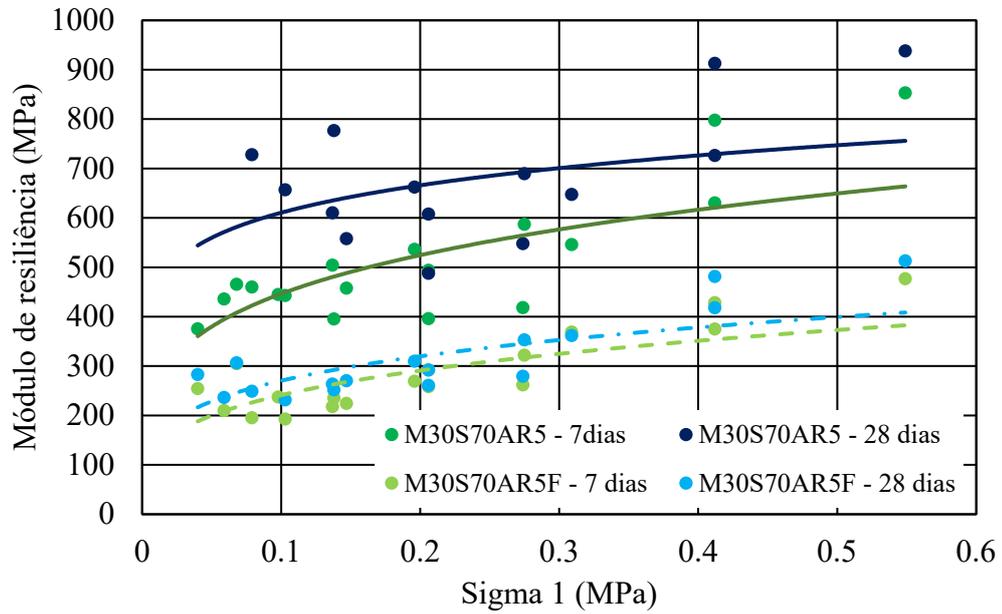


Figura 17 – Corpos de prova após passar pelo ensaio de módulo de resiliência



Da esquerda para a direita: M30S70AR5 e M30S70AR5F. Fonte: Autora (2022).

3.5 Considerações finais

Com base nos resultados de ISC e de expansão, o AR pode ser utilizado em camada de sub-base de pavimentos, de acordo com DNIT (2006). Quanto às normas específicas para uso de AR na pavimentação, em relação às características estudadas, o resíduo analisado está dentro das especificações também para uso em camadas de sub-base.

Tendo em vista os aspectos analisados, as fibras contribuem para uma melhor resistência mecânica de forma geral, o que foi evidenciado pelo aumento nos valores de MR. Esse resultado indica que a adição das fibras em camadas de base pode ser uma grande aliada na melhoria das condições do pavimento. A forma de ruptura no ensaio de RTCD evidencia uma não segregação total quando há a existência das fibras de coco, mostrando também que pode contribuir na redução da reflexão de trincas em camadas superiores.

Os resultados obtidos nos ensaios não são conclusivos, sendo necessários mais estudos. Também deve-se considerar a heterogeneidade dos materiais em estudo, que pode contribuir para a não generalização dos benefícios das fibras.

Com o intuito de finalizar a caracterização mecânica, realizar ensaios de fadiga por compressão diametral. A fadiga seria avaliada em três níveis de tensões: 75%, 85% e 90% de RTCD, com base nos estudos de Nascimento e Albuquerque (2018) que verificaram a vida de fadiga em BGTC. Esses ensaios possibilitariam o uso de programas de dimensionamento de pavimentos e posterior análise da viabilidade financeira do material. Entretanto, devido aos problemas técnicos no equipamento a ser utilizado, sem previsão de conserto, e devido também à pandemia de COVID-19, não foi possível realizá-los. Essas simulações com parâmetros de fadiga definidos para os materiais em estudo são importantes para uma melhor avaliação do uso de fibras de coco e de RCD com base no atual cenário, com métodos de dimensionamento baseados em características mecânicas.

4 CONCLUSÕES

4.1 Principais Contribuições da Pesquisa

A principal contribuição desta pesquisa foi analisar o efeito da adição de fibras de coco no comportamento mecânico de misturas cimentadas, contendo materiais alternativos, para aplicação em subcamadas de pavimentos. Os compósitos cimentados, com e sem fibras, foram analisados e se mostraram aptos ao uso na pavimentação, considerando as normas e manuais vigentes. As misturas contendo fibras e teor de 7% de cimento, em massa, apresentaram um melhor comportamento mecânico, considerando os resultados dos ensaios de MR.

A inserção de fibras de coco alterou o comportamento mecânico das misturas, tornando-as mais dúcteis, o que conseqüentemente deverá implicar uma menor reflexão de trincas para o revestimento, no caso de elas serem utilizadas em camadas de base de pavimento.

Alguns aspectos, como o comportamento dos materiais à fadiga e investigação de possíveis impactos ambientais por meio de ensaios, ainda precisam ser investigados para verificar a viabilidade financeira e ambiental do uso desses resíduos. Com a incorporação dos resíduos estudados em obras rodoviárias, é possível diminuir o impacto causado quando esses são descartados de forma incorreta e a extração de matérias-primas virgens.

4.2 Principais Limitações

A aplicação de fibras de coco em materiais cimentados apresenta lacunas a serem preenchidas. Essas fibras são heterogêneas, não sendo possível realizar um controle em relação ao comprimento, ao diâmetro ou à quantidade de pó presente.

Por se tratar de um material natural, também deve ser feito um estudo a respeito de sua deterioração. É preciso avaliar a evolução desses compósitos ao longo do tempo por um período maior, tanto para verificar os parâmetros de resistência, quanto para avaliar em que ponto as fibras de coco começam a se deteriorar. No geral, elas aumentam a expansão do compósito, mas sem prejudicar seu uso, permanecendo dentro dos limites estabelecidos pelas normativas.

Algo a ser destacado é a necessidade de avaliar a influência da adição de fibras quanto ao dano por umidade, tendo em vista a possível degradação desse resíduo em ambiente aquoso. Além disso, as fibras de coco são materiais orgânicos e é importante estimar sua

durabilidade no interior das misturas cimentadas, para que se possa estimar a vida útil do pavimento com mais precisão. Outro aspecto que se mostrou importante para ser investigado foi a aderência das fibras de coco à matriz dos compósitos.

Os resíduos de construção e demolição, assim como as fibras de coco, podem ser bastante heterogêneos. Cada lote de material requer um estudo adequado para sua utilização correta na pavimentação, visto que não é possível supervisionar rigorosamente a sua origem e conseqüentemente a composição desses resíduos.

No âmbito do RCD, faz-se necessário a aplicação das diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos a fim de controlar melhor a origem dos materiais e reduzir a heterogeneidade. Na prática, isso requer leis mais rígidas e a conscientização do setor de construção civil. Devido ao grande volume de material utilizado em obras de pavimentação, na ocasião da utilização de AR, é aconselhável também que haja o revolvimento desse material no local de armazenamento, antes da aplicação na pista a fim de mitigar a questão da heterogeneidade dentro de uma mesma obra. No caso das fibras, por serem naturais, não há como ter o controle de origem, mas recomenda-se realizar a homogeneização do material utilizado em cada lote. De um modo geral, para o caso do uso desses materiais alternativos em grandes extensões de obras rodoviárias, recomenda-se a mistura dos materiais em usinas.

Do ponto de vista prático, há dificuldade em misturar as fibras de coco na matriz de maneira homogênea, posto que o resíduo citado é leve e tende a empolar. Em campo, esse problema pode ser mais significativo, em razão da ordem de grandeza da quantidade de material. Uma forma de mitigar em parte o problema do empolamento, observada em laboratório, é a mistura da porção solo/solo-agregado com as fibras após a adição do cimento. Ressalta-se, novamente, que a utilização de usina *in loco* seria o mais recomendado, pois não se deve demorar muito tempo após a mistura com o cimento para a aplicação em pista, devido ao tempo de pega desse aglomerante.

Devido à pandemia de Covid-19, iniciada no ano de 2020, o Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará (UFC) foi fechado por alguns meses, atrasando todo o cronograma. A carência de alguns equipamentos e a quebra de outros fez com que alguns ensaios previstos inicialmente não fossem realizados, tais como ensaios de caráter ambiental e ensaios de vida de fadiga.

4.3. Principais Constatações

4.3.1 *Quantos às conclusões do primeiro artigo*

Nas misturas de solo-cimento, o uso de fibras parece ter influência na melhoria dos valores de MR, uma vez que os resultados foram superiores a 500MPa aos 28 dias de cura. Entretanto, essa influência parece ser limitada quando se trata da RCS e da RTCD por serem ensaios nas quais as misturas devem ser submersas em água antes do rompimento dos corpos de prova. A má adesão entre as fibras e a matriz cimentada pode ter contribuído para a obtenção dessas resistências (RCS e RTCD) menores na mistura com fibras.

É importante validar que o aumento da ductibilidade é visível na mistura contendo fibras de coco em comparação à mistura sem fibras. Para tanto, de forma geral, os resultados sugerem que a utilização das fibras de coco em misturas cimentadas é benéfica do ponto de vista das características mecânicas, quando em condições não saturadas.

4.3.2 *Quantos às conclusões do segundo artigo*

Em relação às características estudadas, o Agregado Reciclado (AR) analisado está dentro das especificações para uso em camadas de sub-base, de acordo com as normas específicas para seu uso na pavimentação. No que diz respeito às misturas, observou-se uma queda dos valores de RCS e MR para a mistura com a matriz composta por solo e agregado reciclado com adição de fibras de coco em comparação à mistura sem fibras.

Para a matriz de agregado reciclado, os valores de RCS se mantiveram constantes e o MR aumentou notadamente (217,43%). Em relação à RTCD, o uso de fibras acarretou uma diminuição dos resultados dessa propriedade nas amostras. Entretanto, vale destacar a dificuldade em moldar corpos de prova das misturas (sem fibras) e (com fibras). Em todas as misturas analisadas, a mudança na forma de ruptura, quando acrescidas de fibras de coco, foi observada visualmente.

De maneira geral, as fibras apresentaram melhora no comportamento mecânico das misturas com o maior teor de cimento (7%) e piora nas com teor menor (5%), tanto que contém apenas solo como nas que contém AR na matriz. Isso pode indicar uma possível dependência da melhora dos aspectos com o aumento do teor de cimento.

4.4. Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, tem-se:

- a) Estudo da viabilidade da aplicação dos compósitos fibrosos em campo;
- b) Estudo da degradação das fibras, considerando sua reação com o cimento e em virtude da saturação do ambiente no decorrer do tempo (análise do ciclo de vida);
- c) Estudo sobre a viabilidade financeira da utilização dos resíduos utilizados;
- d) Estudo sobre a aderência das fibras à matriz em relação ao aumento do teor de cimento;
- e) Estudo sobre o comportamento dos materiais quanto à fadiga, bem como simulações em programas de dimensionamento (por exemplo, MeDiNa), comparando com outros materiais, a partir dos dados produzidos nesta dissertação, para a avaliação da viabilidade financeira.

REFERÊNCIAS

- ADASKA, Wayne. S.; LUHR, David. R. Control of reflective cracking in cement stabilized pavements. Proc., 5th Int. RILEM Conf., RILEM Publication SARL, p. 1–8, Bagneux, Paris, 2004.
- AGUILAR, Jaime Rodrigo Tamayo. Análise do Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso Reforçado com Fibras de Coco. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- ALMEIDA, J. *et al.* Estudo de viabilidade econômica do uso do agregado de RCD em pavimentação de vias urbanas. Revista de Engenharia Civil, n. 54, p. 16–25, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Curso de Bases Cimentadas de Pavimentos Rodoviários: Caracterização de materiais para bases. Fortaleza, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005: Lixiviação de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.
- _____. NBR 10006: Solubilização de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.
- _____. NBR 11798: Materiais para base de solo-cimento – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a.
- _____. NBR 12253: Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b.
- _____. NBR 15113: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004c.
- _____. NBR 15114: Resíduos Sólidos da Construção Civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004d.
- _____. NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004e.
- _____. NBR 15116: Agregados Reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004f.
- _____. NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Mercosul: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO. Pesquisa setorial 2014/2015. Brasil: ABRECON, 2015. p. 1–36.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021. Brasil: ABRELPE, 2021. p. 24.

BAKOSS, S.L.; RAVINDRARAJAH, R.S. Recycled construction and demolition materials for use in roadworks and other local government activities. Scoping Report. 72 p. Centre for Built Infrastructure Research. University of Technology, Sydney. Sydney, 1999.

BOLAÑOS, Rafael Eduardo Zaccour. Comportamento Mecânico de um Solo Argiloso Reforçado com Fibras de Coco. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

BOLAÑOS, Rafael Eduardo Zaccour; CASAGRANDE, Michéle Dal Toé. Estudo Experimental de Solo Reforçado com Fibra de Coco Verde Para Carregamentos Estáticos em Obras Geotécnicas. Anais XVII COBRAMSEG. p. 1-10., 2014.

BEHIRY, A. E. A. E.-M. Utilization of cement treated recycled concrete aggregates as base or subbase layer in Egypt. Ain Shams Engineering Journal, v. 4, n. 4, p. 661–673, 2013.

BEJA, Igor Amorim. Agregado Reciclado de Construção e Demolição com Adição de Aglomerantes Hidráulicos como Sub-base. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

BRASIL. Lei nº12.305 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, p. 3, col. 1, 3 ago. 2010.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União: Brasília, DF, nº 136, seção 1, p. 95-96, 17 de julho de 2002.

_____. Resolução CONAMA nº 348, de 17 de agosto de 2004. Altera a resolução CONAMA nº 307 de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. Diário Oficial da União: Brasília, DF, nº 158, seção 1, p. 70, 17 de agosto de 2004.

_____. Resolução CONAMA nº 431. Altera o artigo 3º da Resolução no 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso. Diário Oficial da União: Brasília, DF, nº 99, p. 123, 25 de maio de 2011.

_____. Resolução CONAMA nº 448. Altera os artigos. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10 e 11 da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Diário Oficial da União: Brasília, DF, nº 14, 19 de janeiro de 2012.

_____. Resolução CONAMA nº 469. Altera a Resolução CONAMA no 307, de 05 de julho de 2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União: Brasília, DF, nº 144, seção 1, p. 109-10, 30 de julho de 2015.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil (Literature review: reuse of construction and demolition waste. Cerâmica. v. 61, p. 178–189, 2015.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS EN 13286-7:2004: Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures. London, 2004.

CABALA, Guillermo Van Erven. Estudo do Comportamento Mecânico de Estruturas de Solo-Cimento Reforçado com Fibras de Coco e Hastes de Bambu. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

CABRAL, Wendel Silva. Exploração, Análise Comparativa e Modelagem da Deformação Permanente de Materiais Granulares da Microregião de Mossoró/RN. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

CAPUTO, Homero Pinto. Mecânica dos Solos e suas aplicações: Fundamentos. 6ª edição, v. 1, LTC editora, 1998.

CARRIJO, O. A.; LIZ, R. S.; MAKISHIMA, N. Fibra de casca de coco verde como substrato agrícola. Horticultura Brasileira, Brasília, v.20, n. 4, p.533-535, 2002.

CASAGRANDE, Michelé Dal Toé. Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CEARÁ. Lei nº 16.032 de 20 de junho de 2016. Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos no Âmbito do Estado do Ceará. Diário Oficial do Estado do Ceará: 29 de jun. 2016

CERATTI, Jorge Augusto Pereira. Estudo do Comportamento a Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para a Utilização em Pavimentos. 1991. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1991.

CHANDRA, Satish; VILADKAR M. N.; NAGRALE, Prashant P. Mechanistic Approach for Fiber-Reinforced Flexible Pavements. Journal of Transportation Engineering. Jan. p. 15-23, 2008.

CHENG, Qiangqiang *et al.* Experimental Study on Unconfined Compression Strength of Polypropylene Fiber Reinforced Composite Cemented Clay. Crystals, 10(4), 247. <https://doi.org/10.3390/cryst10040247>. 2020.

CRUZ, Luana Mattos de Oliveira. Tratamento de esgoto sanitário em reator anaeróbio preenchido por casca de coco verde (cocos nucifera) combinado com filtro de areia. Dissertação De Mestrado. Unicamp. Campinas, SP.2009.

COOPERATIVA DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DO CEARÁ. Manual de Gestão Ambiental de Resíduos Sólidos na Construção Civil. 1ª edição. Fortaleza: COOPERCON, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER - ME 035: Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro: DNER,1998.

_____. DNER - ME 051: Solos – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: DNER, 1994a.

_____. DNER - ME 081: Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

_____. DNER - ME 082: Solos – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: DNER, 1994b.

_____. DNER - ME 093: Solo – Densidade real. Rio de Janeiro: DNER, 1994c.

_____. DNER - ME 122: Solos – Determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito. Rio de Janeiro: DNER, 1994d.

_____. DNER-ME 162: Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro: DNER, 1994e.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 134 - ME: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro: DNIT, 2018a.

_____. DNIT - ME 136: Pavimentação asfáltica – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2018b.

_____. DNIT 143- ES: Pavimentação – Base de solo-cimento. Rio de Janeiro: DNIT, 2022.

_____. DNIT - ME 172: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Brasília, 2016.

_____. DNIT 179 - ME: Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente. Brasília, 2018c.

_____. DNIT - ME 181: Pavimentação – Material estabilizado quimicamente – Determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro: DNIT, 2018d.

_____. DNIT - ME 434: Pavimentação – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em camadas estabilizadas quimicamente. Rio de Janeiro: DNIT, 2021.

_____. Manual de Pavimentação, Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DIAMBRA, A.; IBRAIM, E. Fibre-reinforced sand: interaction at the fibre and grain scale. *Géotechnique*, 65(4), 296-308. 2015.

ESTABRAGH, A.R.; RANJBARI, S.; JAVADI, A.A. Properties of Clay Soil and Soil Cement Reinforced with Polypropylene Fibers. 2018. *ACI Materials Journal*. American Concrete Institute. v. 114, p. 195 – 205, 2018.

FATAHI, B., KHABBAZ, H.; FATAHI, B. Mechanical characteristics of soft clay treated with fibre and cement. *Geosynthetics International*, 19(3), 252–262. <https://doi.org/10.1680/gein.12.00012>. 2012.

FIDELIS, Maria Ernestina Alves. Desenvolvimento e Caracterização Mecânica de Compósitos Cimentícios Têxteis Reforçados com Fibras de Juta. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

FORTALEZA, Lei nº 10340 de 28 de abril de 2015. Altera os artigos 1º ao 33 da Lei 8.408, de 24 de dezembro de 1999, e dá outras providências. Diário Oficial do Município de Fortaleza: ano LXI, nº 15.517, 8 de maio de 2015. Fortaleza, 2015.

_____. Lei complementar nº 270 de 2 de agosto de 2019. Dispõe sobre o Código da Cidade e dá outras Providências. Fortaleza: PMF, 2019.

_____. Secretaria de Infraestrutura. Experiências de aplicação de RCC/RCD em pavimentação de vias na PMF. Seminário Internacional Resíduos da Construção Civil: Um recurso a explorar na Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Ceará. Fortaleza, 2017.

GOMÉZ, Alejandra Maria Jiménez. Comportamento Mecânico de um agregado reciclado a partir de resíduos de construção e demolição submetido a carregamentos cíclicos. 2016. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, 2016.

GUIMARÃES, Antônio Carlos Rodrigues. Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola 2022. 2022. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1613>. Acesso em: 28 de fevereiro de 2022.

JÚNIOR, A. I. DE O.; JUCÁ, J. F. T.; FERREIRA, J. A. Influência da Adição de Fibra de Coco (Coco nucíferas) na Compressibilidade de um Solo Argiloso. Anais do XIX COBRAMSEG. Bahia, 2018.

KHATTAK, Mohammad J.; ALRASHIDI, Mohammad. Durability and mechanistic characteristics of fiber reinforced soil–cement mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 7(1), 53–62. <https://doi.org/10.1080/10298430500489207>. 2006.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. SUPREMA – Aplicação Sustentável de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Infraestruturas Rodoviárias – Relatório de progresso do projeto PTDC/ECM/100931/2008 – Ano 2. Relatório 234/2012. Lisboa: LNEC, 2012.

LEITE, Fabiana da Conceição. Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

LEITE, Fabiana da Conceição *et al.* Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 6, p. 2972–2979. 2011.

LEITE, Fabiana da Conceição *et al.* Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 6, p. 2972–

2979. 2015.

LIMA, João Henrique Camelo. Utilização de Resíduos de Construção e Demolição para Pavimentos Urbanos da Região Metropolitana de Fortaleza. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

MAGALHÃES, Margareth da Silva. Caracterização Experimental de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de PVA: Processo de Fratura, Propriedades Térmicas, Deformações Diferidas e Estabilidade Térmica. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.

MARQUES, Rui Cunha. A experiência europeia no gerenciamento e aplicação dos RCC. Seminário Internacional Resíduos da Construção Civil, Fortaleza, 2017.

MARTINS, Adriana P. S. Desenvolvimento, Caracterização Mecânica e Durabilidade de Compósitos Solo-Cimento Autoadensáveis Reforçados com Fibras De Sisal. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, É. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. p. 57–71, 2009.

MOTTA, Rosângela dos Santos. Estudo Laboratorial de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido na Construção Civil para Aplicação em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

NASCIMENTO, Rodrigo da Silva; ALBUQUERQUE, Fernando Silva. Estudo de Desempenho à Fadiga de Base Cimentada tipo BGTC na BR- 101/SE. 2018. Revista Transportes. v. 26, nº1, p.21-36. 2018.

OLIVEIRA, Maria Elane Dias de *et al.* Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE. Engenharia Sanitária e Ambiental, Nota técnica, v. 16, n. 3, p. 219–224, 2011.

ORIOLI, M. A. *et al.* Estudo do Uso de Agregado Reciclado Misto (ARM) em Misturas Solo-agregado. ANPET, v. 32, p. 1943–1954. Gramado, 2018.

PAULA, Thaís Martins de *et al.* Behaviour of fibre-reinforced cemented sand under flexural tensile stress. E3S Web of Conferences, 92. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199212005>. 2019.

PEREIRA, Paulo Miguel; VIEIRA, Castorina Silva. Resíduos de Construção e Demolição. Um estado de arte visando a sua valorização em Trabalhos Geotécnicos. Relatório de Investigação no âmbito do projeto “Aplicação sustentável de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em estruturas reforçadas com geossintéticos – RCD-VALOR” (PTDC/ECM-GEO/0622/2012). Universidade do Porto. 2013.

PORTAL G1 (Brasil). G1 Economia. Brasil sai de lista das 10 maiores economias do mundo e cai para a 12ª posição, aponta ranking. 2021. Por Darlan Alvarenga. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/03/03/brasil-sai-de-lista-das-10-maiores->

economias-do-mundo-e-cai-para-a-12a-posicao-aponta-ranking.ghtml. Acesso em: 05 mar. 2021.

ROSA, Morsyleide de Freitas. *et al.* Utilização da casca de coco como substrato agrícola. Documentos 52. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2002.

SÁEZ, P. V.; OSMANI, M. A diagnosis of construction and demolition waste generation and recovery practice in the European Union. *Journal of Cleaner Production*, v. 241, p. 118400, 2019.

SANBONSUGE, Kendi. Comportamento Mecânico e Desempenho em Campo de Base de Solo-cimento. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

SANTOS JÚNIOR, Ricardo Domingos. Mechanical performance of fibre-reinforced soil-cement mixtures for pavement bases applications / Ricardo Domingos Santos Junior; advisor Jefferson Lins da Silva. São Carlos, 2021.

SANTOS, Márcio Antônio Zardini. Análise do efeito da adição de fibra de polipropileno no comportamento mecânico de uma brita graduada tratada com cimento. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

SCHROEDER, R. L. The use of recycled materials in highway construction. *Public Roads*, v. 58, n. 2, p. 32, 1994.

SILVA, Bruno Tiago Angelo da. Utilização de Materiais Alternativos para a Construção de Pavimentos Urbanos na Região Metropolitana de Fortaleza. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2009.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. *Journal of Cleaner Production*, v. 236, p. 117629, 2019.

SILVA, Everton José da Silva *et al.* Compósito cimentício com elevado teor de fibra de coco tratada: propriedades físicas e durabilidade. *Revista Matéria*. Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, 2018.

SILVEIRA, Mariana Vela. Análise do Comportamento Mecânico e da Durabilidade em Compósitos de Areia Reforçada com Fibras Naturais de Curauá e Sisal. 2018. Tese (Doutora em Engenharia Civil) – Universidade Pontifícia Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

SIMONI, Julia Patrocínio S. C.; VALOURA, Luiza Rijo; FURLAN, Ana Paula. Contribuição ao Estudo da Dosagem e do Comportamento Mecânico de Misturas Solo-Agregado-Cimento. *Revista ANPET*. p. 2028-2039. Balneário Camboriú, 2019.

SPECHT, Luciano Pivoto. Comportamento de Misturas Solo-Cimento-Fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

SOBHAN, Khaled; MASHNAD, Mehedy. Tensile Strength and Toughness of Soil–Cement–Fly-Ash Composite Reinforced with Recycled High-Density Polyethylene Strips. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(2), 177–184. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:2\(177\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:2(177)). 2002.

USIFORT. Produtos. Disponível em: <http://www.usifort.com.br/paginas.php?pagina=1>. Acesso em: 20 de janeiro de 2021.

VIEIRA, Castorina Silva; PEREIRA, Paulo Miguel. Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 103, p. 192–204, 2015.

VILLIBOR, Douglas Fadul; NOGAMI, Job Shuji. *Pavimentos Econômicos: Tecnologia do Uso de Solos Finos Lateríticos*. Editora Arte e Ciência. 291p. São Paulo, 2009.

XUAN, D. X. *et al.* Mechanical properties of cement-treated aggregate material - A review. *Materials and Design*, v. 33, n. 1, p. 496–502, 2012.

XUAN, D. X.; MOLENAAR, A. A. A.; HOUBEN, L. J. M. Evaluation of cement treatment of reclaimed construction and demolition waste as road bases. *Journal of Cleaner Production*, v. 100, p. 77–83, 2015.