

## **Análise de Solo misturado com Resíduos de Construção e Demolição (RCD) para uso em Obras Rodoviárias**

**Analysis of a Soil Mixed With Construction And Demolition Waste (CD&W) for use in Road Works**

**Análisis de un Suelo Mezclado con Residuos de Construcción y Demolición (RCD) para uso en Obras Viales**

Recebido: 13/05/2022 | Revisado: 12/06/2022 | Aceito: 15/06/2022 | Publicado: 16/06/2022

**Letícia Azevedo de Farias Pereira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1487-4740>  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil  
E-mail: [azevedo\\_leticia@hotmail.com](mailto:azevedo_leticia@hotmail.com)

**Ênio Fernandes Amorim**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7386-3956>  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Brasil  
E-mail: [enio.amorim@ifrn.edu.br](mailto:enio.amorim@ifrn.edu.br)

**Laura Maria Goretti da Motta**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5517-9421>  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil  
E-mail: [laura@coc.ufRJ.br](mailto:laura@coc.ufRJ.br)

### **Resumo**

A indústria da construção civil é responsável por um consumo de 20 a 50% dos recursos naturais existentes no planeta. Uma maneira de mitigar a exploração de jazidas de extração de agregados naturais e ampliar a utilização de resíduos são os estudos da aplicação destes na pavimentação. O presente estudo analisou tecnicamente o potencial de aplicação dos resíduos de construção e demolição de obras (RCD) em misturas com solo areno-siltoso como uma possibilidade de reuso eficiente em camada de base de pavimentos. Tendo em vista as diretrizes do novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) analisar o desempenho mecânico de RCD em misturas com solo pelo módulo de resiliência (MR) e deformação permanente (DP) para verificar a viabilidade do emprego destes materiais nas camadas dos pavimentos é de fundamental importância. Desse modo, foram realizados ensaios triaxiais de carga repetida para determinação do módulo de resiliência de misturas de solo-brita e solo-RCD em várias proporções e posteriormente realizou-se o dimensionamento de uma estrutura de pavimento utilizando o software MeDiNa para verificar se misturas de solo com os agregados de RCD proporcionariam camadas estruturais de base com desempenho comparável ao de solo-brita. A partir da magnitude do módulo de resiliência das misturas e dos dimensionamentos verificou-se a potencialidade de emprego da mistura de solo com os resíduos locais na estrutura de pavimento com características de projeto e espessuras específicas. O dimensionamento utilizando o software MeDiNa comprovou a possibilidade da utilização da mistura de solo-RCD 70-30 em camada de base de forma adequada.

**Palavras-chave:** Pavimentos sustentáveis; Sustentabilidade; Agregados reciclados; Resíduos para pavimentação.

### **Abstract**

The construction industry is responsible for a consumption of 20 to 50% of the existing natural resources on the planet. One way of mitigating the exploitation of natural aggregates extraction deposits and expanding the use of residues is the study of their application in paving. The present article technically analyzed the potential of application of construction and demolition waste (CD&W) in mixtures with sandy-silty soil as a possibility for reuse in the base layer of pavements. The guidelines of the new flexible pavement design method of the Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) propose that the analysis of the materials used in the pavement layers be carried out through the resilience module and permanent deformation. Thus, repeated load triaxial tests were carried out to determine the resilience modulus of soil-crushed and soil-CD&W mixtures in various proportions and later the design of a pavement structure was carried out using the MeDiNa software to verify if mixtures of soil with CD&W aggregates would provide structural base layers with performance comparable to that of conventional crushed rock. From the magnitude of the resilience module of the mixtures and the sizing, the potential of using the soil mixture with local waste in the pavement structure with specific design characteristics and thicknesses was verified. The design using the MeDiNa software proved the possibility of using the soil-CD&W 70-30 mixture in the base layer properly.

**Keywords:** Sustainable floors; Sustainability; Recycled aggregates; Waste for paving.

## Resumen

La industria de la construcción es responsable de un consumo del 20 al 50% de los recursos naturales existentes en el planeta. Una forma de mitigar la explotación de yacimientos para la aplicación de áridos naturales y ampliar el aprovechamiento de los residuos es a través de estudios de pavimentación. El presente artículo analizó técnicamente el potencial de aplicación de residuos de construcción y demolición (RCD) en mezclas con suelo arenoso-limoso como posibilidad de reutilización en la capa base de pavimentos. Los lineamientos del nuevo método de diseño de pavimento flexible del Departamento Nacional de Infraestructura de Transportes (DNIT) proponen que el análisis de los materiales utilizados en las capas de pavimento se realice a través del módulo de resiliencia (MR) y deformación permanente (DP). Así, se realizaron ensayos triaxiales de carga repetida para determinar el módulo de resiliencia de mezclas suelo-triturado y suelo-RCD en varias proporciones y posteriormente se realizó el diseño de una estructura de pavimento utilizando el software MeDiNa para verificar si las mezclas de suelo con agregados RCD proporcionarían capas base estructurales con un rendimiento comparable al de la roca triturada convencional. A partir de la magnitud del módulo de resiliencia de las mezclas y del dimensionamiento, se verificó el potencial de utilizar la mezcla de suelo con residuos locales en la estructura del pavimento con características de diseño y espesores específicos. El diseño con el software MeDiNa probó la posibilidad de utilizar correctamente la mezcla suelo-RCD 70-30 en la capa base.

**Palabras clave:** Pisos sustentáveis; Sustentabilidade; Agregados reciclados; Resíduos para pavimentação.

## 1. Introdução

O pavimento tradicional de rodovias consiste em um revestimento asfáltico e camadas de base e sub-base de brita graduada ou outros materiais granulares graúdos e miúdos combinados. Quanto maior o volume de tráfego, maiores são as exigências para estes materiais. Várias pesquisas buscaram avaliar quais tipos de agregados têm aplicabilidade nas camadas de base e sub-base, em especial em conjunto com solo, e analisaram a viabilidade da obra do pavimento visando a redução da camada de agregado natural ou britado utilizado isoladamente, tais como: Parente *et al.*, (2003); Couto, (2009); Lima *et al.*, (2017); Maria e Bastos, (2018); Oliveira *et al.*, (2018), entre outros.

O desenvolvimento na década de 1980 da metodologia MCT de classificação de solos tropicais é um exemplo exitoso de modificação dos critérios tradicionais de seleção de materiais para base e sub-base, que proporcionou o emprego de solos finos lateríticos nestas camadas, individualmente ou com incorporação de um certo percentual de brita quando o volume de tráfego é médio ou alto (Bernucci *et al.*, 2010).

Para avaliar as características mecânicas dos materiais de pavimentação e do subleito era utilizado no método de dimensionamento tradicional o ensaio do Índice de Suporte Califórnia (CBR) recentemente substituído pelo parâmetro do módulo de resiliência, obtido em ensaios de carga repetida, com a difusão da Mecânica dos Pavimentos nos dimensionamentos de pavimentos asfálticos. No Brasil este tipo de ensaio foi introduzido na década de 1970 e está normalizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) desde 1984 (Motta & Medina, 2006). A atual versão do método de ensaio é de 2018.

O conhecimento do módulo de resiliência dos solos e dos materiais que compõem as camadas de pavimentos rodoviários é de suma importância para prever o comportamento da estrutura e dimensioná-la corretamente. Devido à importância dos materiais granulares como constituintes de camadas de pavimentos flexíveis, tem-se evidenciado maior interesse em abordar a resposta resiliente destes materiais procurando conhecer o seu comportamento mecânico sob a ação de cargas repetidas (Sant'anna *et al.*, 2003).

Os defeitos estruturais mais comuns nos pavimentos asfálticos são: o trincamento do revestimento ou da camada estabilizada quimicamente, denominado de fadiga e o Afundamento de Trilha de Rodas (ATR). Para considerar a fadiga no dimensionamento, de forma simplificada, deve-se calcular as tensões e deformações da estrutura do pavimento e compará-las com valores admissíveis. Para isto é necessário se obter os módulos de resiliência de todos os materiais que irão compor a estrutura do pavimento e do subleito. Para calcular o ATR, que pode ser proveniente da contribuição do subleito e das camadas do pavimento, deve-se realizar ensaios próprios de avaliação de cada material, denominados ensaios de deformação permanente (DP). O DNIT elaborou a primeira norma brasileira deste ensaio para solos e britas em 2018. Porém, este tipo de

ensaio triaxial já é praticado no Brasil desde 1980 com a primeira dissertação de mestrado feita por Svenson (1980), posteriormente seguida por diversos autores. Tanto o ensaio de módulo de resiliência quanto o ensaio de deformação permanente são obrigatórios para se dimensionar um pavimento asfáltico pelo novo método de dimensionamento do DNIT, denominado MeDiNa, que pode ser baixado da página [www.dnit.gov.br](http://www.dnit.gov.br).

De acordo com Roza (2018) mais de 80% dos materiais que constituem as camadas do pavimento das rodovias e ruas são materiais britados. Complementarmente, a busca de aplicação dos conceitos de sustentabilidade e de reaproveitamento de materiais e resíduos diversos, tem sido uma temática importante também na pavimentação. O volume de materiais naturais que foram utilizados nos milhares de quilômetros de rodovias brasileiras existentes e a necessidade de construir duplicações ou mesmo expandir a malha pavimentada é muito grande. A possibilidade de avaliar possíveis materiais alternativos ou o aproveitamento de resíduos diversos na pavimentação com os ensaios de carga repetida, tornou-se obrigatória com a recente adoção deste novo método de dimensionamento do DNIT, que tem o módulo de resiliência (MR) como parâmetro de entrada dos materiais.

Os resíduos da construção civil e de demolição (RCD) são quaisquer materiais originados de reformas ou de obras, que, após passar por um processo de beneficiamento podem ser reutilizados em diversas aplicações (Bernucci *et al.*, 2010). Além dos quesitos ambientais e técnicos tem-se os aspectos econômicos uma vez que estes materiais têm sido comercializados por preços inferiores aos das britas graduadas tradicionalmente empregadas nas camadas do pavimento (Motta, 2005).

Segundo a NBR 15115 (2004), o agregado reciclado utilizável na pavimentação é o material granular, obtido por meio de britagem ou beneficiamento mecânico, de resíduos de construção civil, da Classe A da Resolução CONAMA 307. Assim como os materiais convencionais, o material oriundo da reciclagem também deve atender a requisitos como: boa graduação granulométrica; valores mínimos de CBR (visto que a normativa ainda não foi atualizada em relação aos ensaios de módulo de resiliência) e máximos de expansão (conforme o tipo de camada de pavimento); e dimensão máxima característica de 63,5mm. Com o desenvolvimento de diversos estudos, bem como da NBR 15116 (2004), para utilização de agregados reciclados em camadas de pavimento, várias cidades do Brasil e no exterior passaram a utilizar agregados reciclados para este fim e os resultados satisfatórios vêm demonstrando a boa adequação desse material. A referida norma ainda faz referência ao ensaio de CBR, e, portanto, deve passar por revisão para adequar-se à nova metodologia.

O estado de São Paulo publicou uma cartilha de educação ambiental de resíduos sólidos diversos (SP, 2010) que tem um item sobre RCD e as vantagens de seu aproveitamento. Miranda *et al.* (2009) apresentam um balanço sobre a coleta e o aproveitamento de RCD entre 1986 e 2008, em várias partes do país, e relatam a existência, à época, de 47 usinas de reciclagem, sendo 24 públicas (51% do total) e 23 privadas (49% restante), que se destinam a diversas aplicações, inclusive pavimentação.

Quando não gerenciados corretamente, os resíduos de construção e demolição causam diversos impactos ambientais. A Resolução CONAMA n° 307 de 2002 estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para gerenciamento deste tipo de resíduos. Dentre os benefícios ambientais obtidos pelo gerenciamento adequado dos RCD, destaca-se os ganhos econômicos resultantes das múltiplas aplicações práticas dos produtos da sua reciclagem a partir da utilização de tecnologias relativamente simples, amplamente disponíveis no mercado. Uma das opções de uso dos resíduos da construção civil, principalmente em municípios de pequeno porte, é em pavimentação de estradas vicinais, pois para este caso, podem até ser dispensadas as usinas de beneficiamento e equipamentos mais caros (SP, 2010).

Características técnicas de alguns RCD regionais já foram avaliadas por vários autores, e trechos de pavimento já foram implantados em São Paulo, Belo Horizonte e no Rio de Janeiro, entre outros locais, embora oscilem entre “aplicar e não aplicar” de acordo com o governo local nas várias gestões sucessivas. Apesar de existirem normas da ABNT sobre este uso, a falta de normas de órgãos como DNIT ou Departamentos de Estradas de Rodagem (DER) estaduais, impõe dificuldades para

seu uso em rodovias. Por outro lado, o volume relativamente pequeno e a localização destes resíduos estão concentradas nas zonas urbanas, e, assim, sua utilização em ruas e estradas municipais parece muito mais propícia e adequada sob todos os aspectos.

Fernandes (2004) avaliou amostras de RCD dos Municípios do Rio de Janeiro e Belo Horizonte, visando sua aplicação em bases, sub-bases e reforços de subleitos de pavimentos rodoviários, urbanos e rurais. Em cada uma destas cidades havia um local de beneficiamento dos RCD: de propriedade privada no RJ e de controle municipal em BH. O autor visitou muitas obras, terminadas e em andamento, com bom desempenho deste material. A pesquisa também contemplou ensaios de módulo de resiliência e de deformação permanente em dez composições granulométricas e, também, desenvolveu ensaios ambientais de lixiviação e solubilização. As amostras de RCD com predominância de concreto foram as que apresentaram maior módulo de resiliência e a deformação permanente foi muito mais sensível à distribuição granulométrica e à energia de compactação analisadas em conjunto.

Motta (2005) analisou o comportamento mecânico de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil para uso em camadas de base, sub-base e reforço do subleito, em substituição aos materiais convencionais. A autora comparou os resultados dos ensaios de comportamento mecânico realizados com agregado reciclado in natura, com incorporação de 4% de cal ou de 4% de cimento Portland, além de uma brita graduada simples (BGS) de referência e verificou que o agregado reciclado apresentava condições técnicas promissoras para utilização na pavimentação, dadas suas propriedades físicas e mecânicas satisfatórias, comparáveis aos materiais tradicionais estabilizados granulometricamente ou mesmo à brita graduada simples.

Jiménez (2011) também abordou a possibilidade de reuso dos resíduos de construção e demolição de obras produzidos em Brasília como materiais adequados para utilização em pavimentação. Realizou a caracterização física e química do RCD mediante os ensaios tradicionais empregados para agregados naturais, a análise da influência do processo de compactação na variação de tamanho, distribuição e forma das partículas e a avaliação do comportamento mecânico do RCD, submetido a diferentes períodos de cura. Concluiu destacando que o RCD utilizado na pesquisa apresentava características físicas, químicas e mecânicas que permitiam o seu uso como insumo na construção de bases rodoviárias, podendo assim substituir os materiais convencionais.

Autores de artigos, dissertações e teses, como: Rezende (1999); Leite (2007); Quintanilha (2008); Bessa (2010), Sousa (2011); Leite *et al.* (2011); Marques (2012); Beja (2014); Silva (2014); Dias (2014); Rezende *et al.* (2016); Lucca (2017); Moreira (2018); Orioli (2018) e Barreto (2020), também foram consultados para análise do desempenho do RCD em distintas regiões do país.

No que diz respeito às pesquisas internacionais com foco na análise destes resíduos em camadas de base e sub-base, destacam-se, a seguir, dois exemplos, a título de contextualização do tema na atualidade em outros países. Outros autores consultados foram Saravanan *et al.* (2016), Tataranni *et al.* (2017), Chakravarthi *et al.* (2019), Arshad (2019) e Giwangkara (2019).

Arisha *et al.* (2016) utilizaram o RCD obtido de alguns lixões nas margens de estradas e canais em torno da cidade de Mansoura, no Egito. Os autores avaliaram a resposta resiliente de oito corpos de provas de misturas de RCD com tijolo de alvenaria de argila reciclada (RCM) em diferentes proporções (de 0 até 100%). Os corpos de prova foram compactados na energia Proctor Modificada e submetidos à ensaios Triaxiais de Carga Repetida, índice de suporte Califórnia e abrasão Los Angeles que mostraram que o RCD puro pode ser utilizado em camada de base e o RCD misturado com diferentes proporções de RCM é mais adequado para camadas de sub-base, de acordo com as especificações egípcias.

Jayakody *et al.*, (2019) avaliaram as características de desempenho de agregado de concreto reciclado (RCA, do inglês *Recycled Concrete Aggregate*), para aplicação nas camadas dos pavimentos. Os autores executaram ensaios triaxiais de carga

repetida para investigar a resposta do RCA às deformações elásticas e plásticas analisando o módulo de resiliência e o acúmulo de deformação permanente em diferentes tensões de confinamento, com corpos de prova em distintos teores de umidade e saturação. Os resultados mostraram ganho constante de rigidez dos corpos de prova com um aumento dos ciclos de carga em baixos teores de umidade, altas pressões confinantes e alta pressão axial vertical. O módulo de resiliência aumentou com mais ciclos de carga, e as amostras compactadas de RCA apresentaram valores de módulo de resiliência de 233 a 247 MPa, enquanto os materiais da camada base de alta qualidade apresentam de 275 a 450 MPa. Os autores ressaltaram que o acúmulo de deformação plástica do RCA se aproximou da faixa do limite de acomodamento (“*elastic shakedown limit*”) com a estabilização da deformação plástica com o aumento dos ciclos de carga. Este comportamento é similar aos materiais de pavimentação de alta qualidade, que também apresentam o acomodamento da deformação plástica após um certo número de ciclos de carga e passam a se deformar apenas elasticamente. Porém, quando foram aplicadas pressões de confinamento muito baixas, isto é, abaixo de 75 kPa, estas afetaram adversamente o acúmulo de deformação plástica e resultaram em um comportamento acima do limite de plastificação do material (“*plastic shakedown limit*”).

Pereira *et al.* (2022) desenvolveram uma revisão sistemática sobre os trabalhos com resíduos de construção e demolição aplicados nas camadas de pavimento rodoviário entre os anos de 2015 e 2019 e verificaram dentre os trabalhos avaliados que a inserção dos resíduos de construção e demolição em misturas asfálticas aplicadas em camadas de revestimento foi preponderante quando comparada à inserção destes resíduos nas demais camadas do pavimento. Os autores também sugerem execução de novas pesquisas voltadas para a análise do desempenho dos resíduos de construção e demolição nas camadas do pavimento que apresentaram menor número de aplicação tais como: camadas de Base, Sub-base e Reforço do subleito.

À vista do exposto, torna-se relevante entender o efeito da adição de agregados de RCD em misturas com um solo areno-siltoso para avaliação do comportamento mecânico destas composições em relação às composições usuais de solo-brita. Esta comparação se justifica, em parte, pelo fato de que para solo-brita já existem algumas normas de DERs, muito embora não considerem o MR como o parâmetro de decisão tendo em vista terem sido estabelecidas em décadas passadas, na vigência do método do CBR. Assim, esta pesquisa tem como objetivo realizar uma análise do Módulo de Resiliência (MR) das misturas de solo-brita e solo-RCD, bem como, verificar a adequação dessas misturas para execução de camadas base de acordo com as normativas atuais do DNIT, como referência, tendo em vista a ausência de normas e especificações locais que utilizem estes ensaios como parâmetros.

## 2. Metodologia

### 2.1 Materiais

O solo utilizado nesta pesquisa foi coletado no município de Ipueira, no interior do estado do Rio Grande do Norte, situado na região do Seridó a uma latitude de 6°49'13" sul e a uma longitude 37°12'16" oeste. A escolha desta jazida justificou-se principalmente pela necessidade de verificação de sua potencialidade para emprego em obras de pavimentação locais. As amostras de solo coletadas foram acondicionadas em 10 sacos plásticos e a massa aproximada de cada amostra foi de 20 kg, totalizando 200 kg de solo. Após a coleta, o solo foi transportado para o Laboratório de Mecânica dos Solos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) e parte das amostras foram estocadas no Laboratório de Pavimentação do IFRN.

Os agregados oriundos de resíduos de construção e demolição de obras (RCD) foram disponibilizados pela empresa Duarte Usina de Reciclagem de RCC LTDA, localizada na cidade de São José de Mipibu/RN. A empresa comercializa o RCD para confecção de materiais para reforço de subleito de pavimentos urbanos na grande Natal, como revestimento primário em

estradas vicinais, como agregados de blocos de estruturas de contenção e, eventualmente, como matéria prima para fabricação de argamassas para moradias de baixo custo. No caso específico das obras de pavimentação, onde foram utilizados os resíduos nos últimos anos tem-se conhecimento que ainda se emprega o critério mecânico do CBR para dimensionamento das camadas.

A Duarte forneceu agregados reciclados de fração granulométrica equivalente a classificação comercial de brita 1. Na usina, foram coletados da pilha de armazenagem um total de sete sacos com aproximadamente 50 kg de RCD cada, totalizando assim 350 kg. É importante destacar que os agregados de RCD estão sujeitos à sazonalidade, ou seja, as características dos agregados relacionam-se com o tipo de resíduo demolido e coletado na época da pesquisa e tal tipologia não é constante ao longo do tempo.

Através dos trabalhos desenvolvidos por Pederneiras (2017), Azevedo *et al.*(2018) e Queiroz Neto (2019), que também trabalharam com RCD oriundo da usina Duarte, analisou-se que em média o RCD da usina é composto por cerca de 80% de concreto, 12% de materiais cerâmicos, 2,68% de restos de piso, 0,67% de materiais asfálticos e 4,68% de outros materiais. Verificou-se ainda que apesar de possuir certo percentual de material oriundo de matriz cerâmica, o que torna os agregados mais porosos com maior absorção e menor resistência, a matriz predominante é composta por fragmentos à base de cimento Portland. Assim, de acordo com a NBR 15116 (2004) os agregados de RCD se classificam como Agregados de Resíduos Mistos (ARM), visto que foram obtidos por meio do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A e sua composição na fração graúda apresenta menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

Para fins de comparação do desempenho das misturas de solo-RCD com misturas de solo-brita foram adquiridos 80 kg de brita granítica número 1, na RECAL Material de Construção, localizada na cidade de Parnamirim/RN. A Figura 1 exemplifica os materiais utilizados para esta pesquisa.

**Figura 1** – Aparência dos materiais ensaiados nesta pesquisa:

a) RCD e o solo; b) Brita 1 em mistura com o solo na proporção solo-brita 85-15



Fonte: Elaborada pelos autores.

## 2.2 Programa Experimental

Foram confeccionadas misturas de solo-brita e solo-RCD utilizando o solo natural e agregados nos percentuais de 15%, 30%, 45% e 60%, em massa, em relação à porcentagem total das misturas. Optou-se por trabalhar com estes percentuais, visto que, em pesquisa anterior, Barreto (2020) estudou o mesmo solo com inserção de RCD nas proporções de 25%, 50%, 75% e 100%. Assim, pode-se obter o comportamento das misturas em uma longa faixa de variação percentual de agregados de RCD. A partir da definição dos percentuais de solo e agregado foi feito o preparo das misturas para posterior execução dos ensaios de caracterização mecânica.

As designações utilizadas para cada amostra têm as seguintes nomenclaturas: SB-XY referem-se às misturas de solo-brita, cujo X especifica a porcentagem de solo e Y refere-se ao percentual de brita 1; as nomenclaturas SRCD-ZW relacionam-se com as misturas de solo-RCD, no qual o Z refere-se ao percentual de solo e W destaca a porcentagem de RCD.

### **Ensaio de Compactação Proctor**

Foram utilizadas as normas NBR 7182 e 6457 (ABNT, 2016) para os procedimentos de execução do ensaio de compactação Proctor, obtendo-se o teor de umidade ótimo e massa específica aparente seca máxima. Foi utilizado o cilindro grande e todas as amostras apresentaram menos de 10% de material retido na #19,1mm. Optou-se por realizar os ensaios fazendo o reuso de material devido a restrições na quantidade de solo disponível.

O solo puro e todas as proporções analisadas das misturas de solo-brita e solo-RCD foram ensaiadas na energia Intermediária aplicando-se 26 golpes em cada uma das cinco camadas. Os ensaios de compactação foram feitos utilizando um Soquete Automático digital da marca AMC, com controlador de golpes, acoplado a um equipamento automático.

### **Ensaio de Módulo de Resiliência**

Os ensaios de módulo de resiliência foram realizados no Setor de Pavimentos do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ. Para a execução destes ensaios foram seguidas as orientações dispostas no Método de Ensaio 134 (DNIT, 2018). O intuito do ensaio foi avaliar principalmente a magnitude do MR e o modelo que melhor descreve a correlação entre este módulo e as tensões aplicadas. As tensões, confinantes e desvio, respeitaram as diretrizes da normativa para camadas de base de pavimentos. Todos os ensaios de MR foram efetuados com aplicações de carga cíclica na frequência de 1 Hz, sendo 0,1 segundo de carregamento e 0,9 segundo de descarregamento.

A partir dos dados obtidos foi utilizado do *software Statistica* 10.0 para executar uma regressão não linear que resultasse no Modelo Composto, que considera as duas tensões ( $\sigma_3$ ,  $\sigma_d$ ) simultaneamente, modelo mais utilizado atualmente e que melhor se ajustou aos pontos experimentais.

### **Procedimentos do ensaio de Módulo de Resiliência**

Inicialmente, preparou-se no IFRN as misturas de solo-brita e solo-RCD, estas foram embaladas com aproximadamente 6,0 kg cada, colocadas em sacos plásticos com as devidas identificações. Ao todo foram organizadas 27 amostras sendo: 03 amostras de solo natural, 12 amostras de solo-brita e 12 amostras de solo-RCD. As amostras encontravam-se destorroadas e na umidade higroscópica ao serem embaladas (Figura 2). Essas amostras foram despachadas para o Rio de Janeiro por meio de transporte de cargas rodoviário, contratado para tal fim.

**Figura 2** – a) Mistura de Solo-brita 85-15 após homogeneização; b) Misturas pesadas e embaladas para envio até a COPPE.



Fonte: Elaborada pelos autores.

No Setor de Pavimentos da COPPE/UFRJ as misturas foram retiradas das embalagens e foi realizado inicialmente a homogeneização com o teor de umidade necessário para proporcionar um percentual abaixo de 1% da umidade ótima de cada conjunto, obtidas nos ensaios de compactação feitos anteriormente no IFRN. A Figura 3 retrata amostras das misturas de solo-brita 70-30 e solo-RCD 70-30 com o teor de umidade adotado para os ensaios de MR.

**Figura 3** – Misturas após procedimento de homogeneização da umidade:

a) Solo-brita 70-30; b) Solo-RCD 70-30



Fonte: Elaborada pelos autores.

Posteriormente, o material foi colocado em sacos duplos, em câmara úmida, por no mínimo 12 horas. Após a retirada das amostras da câmara úmida, estas foram moldadas em moldes tripartidos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, com camadas de 1/10 da altura do corpo de prova, compactadas por impacto através de compactador automático, utilizando a energia Proctor Intermediária, sendo utilizados 18 golpes por camada. A Figura 4 mostra alguns dos corpos de prova obtidos após o procedimento de compactação no molde tripartido.

Depois da extração de cada corpo de prova, este foi envolto em uma membrana de látex e colocado sobre uma pedra porosa. O conjunto foi inserido na câmara triaxial e o top cap (cabeçote) foi posicionado na parte superior do corpo de prova. Os medidores de deslocamento LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), posicionados de forma oposta diametralmente, foram ajustados. Em seguida foi inserido o cilindro de acrílico da câmara triaxial e conectado o encaixe da tampa e o pistão utilizado para a aplicação de carga. A Figura 5 ilustra estes procedimentos descritos. Finalizada a montagem do corpo de prova e de todo o conjunto, foi feita a inserção dos parâmetros de: tensão confinante, tensão desvio, quantidade de ciclos, diâmetro e altura do corpo de prova no sistema de aquisição de dados.



**Figura 4** – Corpos de prova das misturas preparados para o ensaio de MR:

Solo-brita 70-30; b) Solo-brita 40-60; c) Solo-RCD 70-30; d) Solo-RCD 40-60

(a) (b) (c) (d)



Fonte: Elaborada pelos autores.

**Figura 5** – Sequência de procedimentos para ensaios de MR: a) inserção do corpo da membrana no CP; b) posicionamento dos LVDT; c) equipamento montado.

(a) (b) (c)



Fonte: Elaborada pelos autores.

### 2.3 Dimensionamento no MeDiNa

Utilizando os parâmetros da regressão do modelo composto obtidos através do *software Statistica 10.0* realizaram-se as primeiras análises das misturas de solo-brita e solo-RCD aplicadas na camada de base de um pavimento. Estes dimensionamentos foram executados utilizando o *software MeDiNa*, versão 1.1.5.0 – dezembro 2020. Foram adotados materiais das camadas de revestimento e subleito do banco de dados do programa, com características e parâmetro pré-definidos. Para realização dos dimensionamentos no *software* com as misturas desta pesquisa foi necessário a inserção dos parâmetros resilientes e de deformação permanente das misturas no MeDiNa.

Para fazer um comparativo simplificado entre os dimensionamentos realizados com as misturas de solo-brita e solo-RCD que obtiveram o melhor desempenho nos ensaios de módulo de resiliência foram considerados os valores dos parâmetros de deformação permanente obtidos por meio de ensaios de DP executados na COPPE, que aqui não foram descritos.

Para a mistura de solo-brita 70-30 foram adotados os parâmetros de DP de uma mistura de solo-brita composta com Solo LG' + 30% de brita 1 e 40% de brita 0, presente na base de dados do software MeDiNa. Esta adoção ocorreu devido questões logísticas que impossibilitaram a realização de ensaios de DP neste material. Estes parâmetros foram considerados para fins comparativos, visto que, a magnitude média do módulo de resiliência da mistura SB 70-30 assemelhou-se ao módulo médio da referida mistura de solo-brita. Considera-se então que estes parâmetros são valores de referência que de forma alguma podem ser tomados para o projeto de um pavimento, que pressupõe sempre a realização de ensaios com todos os materiais selecionados para as camadas.

Também foram realizadas as adoções dos seguintes critérios: sistema coletor primário, número equivalente (N) de operações do eixo padrão igual a  $5 \times 10^6$  (tráfego médio representando situações de rodovias estaduais), taxa de crescimento de 2,0%, vida útil de projeto de 10 anos, tipo de revestimento com classe de fadiga 1 e espessura de revestimento inicial inserida no MeDiNa de 5 cm, determinada pela normativa do DNIT (2006) em função do N considerado para o tráfego. A base foi analisada com espessuras de 15 cm, mínimo aceitável no programa, 20 cm, 25 cm e 30 cm. Para o subleito foi adotado o Solo Siltoso NS' com MR de 189 MPa e coeficiente de Poisson de 0,45.

### 3. Resultados e Discussão

Com base na execução dos ensaios de compactação percebeu-se que a umidade encontrada como ótima nas curvas de compactação associava-se à processos de exsudação de água, conferindo também pouquíssima trabalhabilidade para as amostras quando da realização dos ensaios de MR. Isto fez com que se interpretasse que os teores de umidade associados a tais pontos não representavam com fidedignidade a umidade ótima determinada em outro tipo de cilindro. Então, para os ensaios de módulo adotou-se o valor de umidade ótima determinado no IFRN, com 1% a menos no percentual verificado nas compactações. Esta interpretação baseou-se no desempenho de alguns ensaios de módulos realizados no início dos procedimentos com teor de umidade bem próximo da umidade ótima, obtida no ensaio de compactação no IFRN, que resultaram em valores de deformações plásticas acima da capacidade de medição do equipamento. A Tabela 1 a seguir indica as umidades adotadas para os ensaios de módulo de resiliência.

**Tabela 1** – Teores de umidade adotados nos ensaios de módulo de resiliência das amostras desta pesquisa.

Amostra	W ótima adotada (%)
<b>SOLO PURO</b>	11,70
<b>SB 85-15</b>	9,70
<b>SB 70-30</b>	7,80
<b>SB 55-45</b>	6,85
<b>SB 40-60</b>	5,90
<b>SRCD 85-15</b>	11,70
<b>SRCD 70-30</b>	10,40
<b>SRCD 55-45</b>	9,30
<b>SRCD 40-60</b>	8,50

Fonte: Elaborada pelos autores.

Ao término dos ensaios de MR foram obtidos os teores de umidade dos corpos de prova de solo e das misturas ensaiadas. Analisando-se tais teores verificou-se que estes se encontravam próximos dos teores de umidade adotados, ou seja, as variações ocorridas foram menores que 1% para a maioria das amostras ensaiadas. Somente um dos corpos de prova nas amostras de SRCD 85-15, SRCD 55-45 e SRCD 40-60 apresentou uma variação de umidade um pouco acima de 1%. Essa variação e a dificuldade de reprodução do teor de umidade ótima pode estar relacionado com a heterogeneidade das misturas,

principalmente àquelas com agregados de RCD, visto que a característica dos resíduos de construção e demolição podem variar mais do que a brita.

O valor médio de MR, no geral, foi obtido através da média de três corpos de prova de cada material. Porém, novamente ressalta-se que ao se trabalhar com material granular como brita e RCD misturado a um solo, pode ocorrer variabilidade maior do que no solo puro quanto ao acerto da umidade. Esta dificuldade implica diretamente na repetibilidade dos ensaios mecânicos. Assim, alguns ensaios de módulo de resiliência feitos no início da pesquisa não tiveram sua execução finalizada devido à elevadas deformabilidades e/ou trincas no corpo de prova e para estes casos o valor médio de MR foi obtido da média de dois corpos de prova.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos valores mínimos, máximos e médios dos módulos de resiliência obtidos nos ensaios realizados com o solo, as misturas de solo-brita e com as misturas de solo-RCD. Pode-se observar que não tenderam a um valor constante, e, como esperado, não há linearidade na relação do MR com as tensões aplicadas.

**Tabela 2** – Resultados dos módulos de resiliência médios do solo puro e das misturas desta pesquisa.

Amostra	MR mínimo (MPa)	MR máximo (MPa)	MR médio (MPa)
Solo puro	182	665	
	151	608	339
	209	539	
SB 85-15	-	-	
	349	600	468
	302	972	
SB 70-30	333	862	
	-	-	525
	340	855	
SB 55-45	260	618	
	261	553	424
	334	781	
SB 40-60	203	524	
	-	-	418
	379	761	
SRCD 85-15	-	-	
	282	709	378
	166	748	
SRCD 70-30	244	990	
	290	865	450
	291	854	
SRCD 55-45	252	633	
	279	650	426
	272	705	
SRCD 40-60	223	536	420

Fonte: Elaborada pelos autores.

Analisando os valores médios de módulo de resiliência apresentados verificou-se que a proporção com 70% de solo e 30% de brita 1 foi a que apresentou o melhor valor médio de MR, com 525 MPa. Os resultados médios de módulo de resiliência para as misturas de solo-RCD demonstram que a mistura com 70% de solo e 30% de RCD também foi a que apresentou o melhor valor de MR, com 450 MPa. A magnitude dos módulos médios obtidos para as quatro proporções de solo-

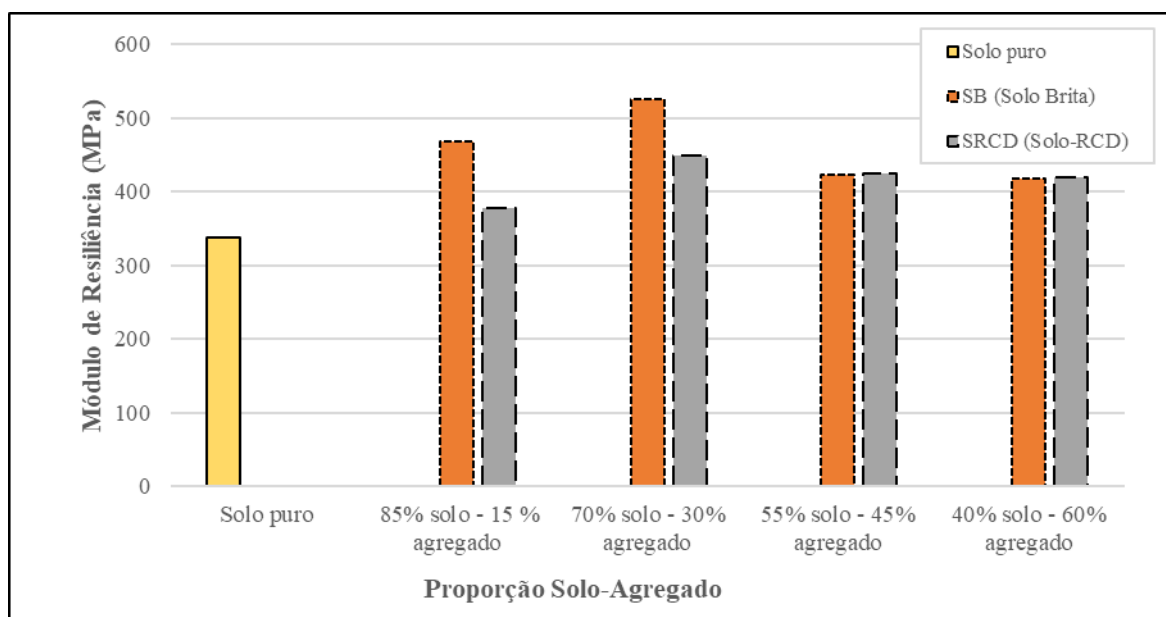
RCD também se encontra semelhante aos módulos de misturas de solo-agregado apresentados em estudos anteriores desenvolvidos por Norback (2018) e Lima (2020), entre outros.

Nos estudos desenvolvidos por Norback (2018) foram analisados o MR de uma brita de granito-gnaiss (que apresentou valor médio de 356 MPa) bem como de misturas de solo-brita preparadas com os 3 tipos de solos e diferentes proporções da brita sob forma de brita 1, brita 0 e pó-de-pedra. Os módulos de resiliência variaram de 156 MPa, para uma mistura composta de 35% de solo NG', 25% de brita 1, 20% de brita 0 e 20% de pó-de-pedra, até 433 MPa, para uma mistura composta por 30% de solo NG', 30% de brita 1 e 40% de brita 0. Comparando os resultados percebe-se que as misturas de solo-brita analisadas nesta pesquisa encontram-se com módulo de resiliência médio com magnitude semelhante aos módulos apresentados na pesquisa da referida autora.

Na Figura 6 pode-se analisar simultaneamente o desempenho do módulo de resiliência médio de todas as misturas confeccionadas. Fazendo-se um comparativo entre os módulos médios das misturas em relação ao solo na condição pura, os módulos de resiliência das misturas de solo-brita e de solo-RCD tiveram valores crescentes até a proporção da mistura com 30% de agregados e valores decrescentes para proporções com mais de 30% de agregados. Assim, tanto nas misturas de solo-brita como nas misturas de solo-RCD, a composição otimizada, ou seja, a composição que apresentou maior magnitude de módulo de resiliência, foi a com 70% de solo e 30% de agregados. As misturas SB 85-15 e SB 70-30 apresentaram desempenho mais expressivo em relação às misturas SRCD 85-15 e SRCD 70-30, como já era esperado devido à natureza granítica dos agregados naturais.

Na prática de campo relatada por Nogami e Villibor em várias épocas, a condição da brita “boiando” no solo é a mais eficiente, ou seja, uma proporção de solo maior do que de brita, especialmente se o solo é laterítico. A partir disto, decorre a definição de solo-brita descontínuo que foi adotada em várias especificações de DERs nas décadas de 1990 e seguintes, embora ainda se baseassem em CBR. Como exemplo citam-se ESP 02/2012 NovaCap; ESP 03/92, ESP 04/92 do DER SP; ES - P - 09/2005 e 10/2005 do DER PR.

**Figura 6** – Comparativo entre o desempenho das misturas de Solo-brita e Solo-RCD desta pesquisa em termos de MR médio.



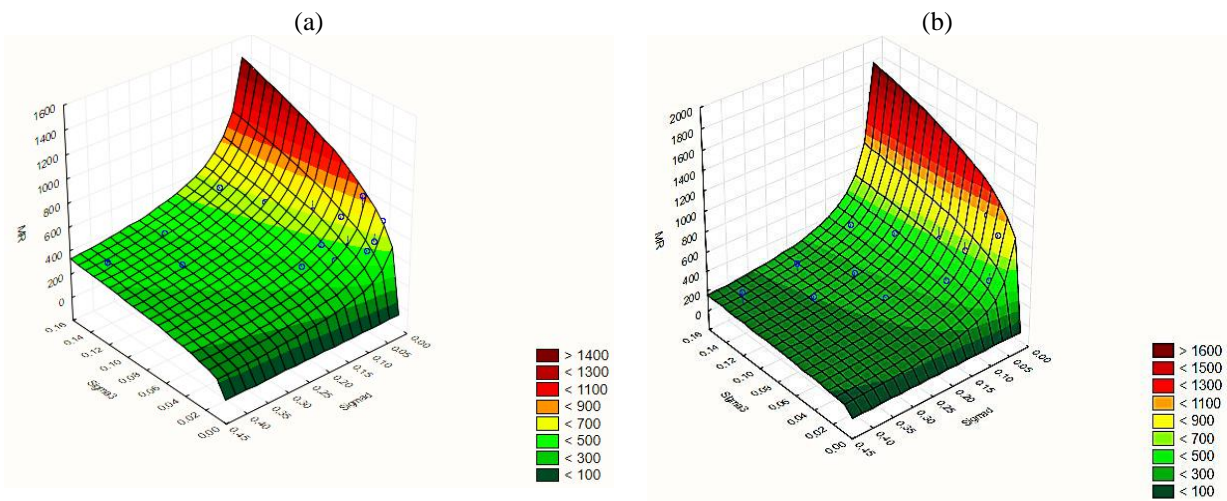
Fonte: Elaborada pelos autores.

É pertinente destacar também que as misturas com 45% e 60% de agregados apresentaram módulo de resiliência médio semelhante com tendência de estabilização, ou seja, não houve nenhum ganho ou perda expressiva na magnitude do módulo em função do aumento do percentual agregados.

### 3.1 Parâmetros da regressão

Utilizando o *software Statistica 10.0*, foram obtidos os parâmetros do modelo composto que considera as tensões desvio e confinante simultaneamente. A Figura 7 mostra algumas das representações gráficas do modelo composto para as misturas de Solo-brita e de Solo-RCD 70-30.

**Figura 7** – Representações gráficas do modelo composto de algumas misturas de Solo-brita e Solo-RCD desta pesquisa: a) SB 70-30; b) SRCD 70-30.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Os resultados das médias dos coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ , das regressões não lineares utilizando o modelo composto, bem como o valor da média de  $R^2$  para cada material avaliado estão expostos na Tabela 3.

**Tabela 3** – Parâmetros das equações do modelo composto para os materiais ensaiados nesta pesquisa.

Material	Modelo Composto			
	$MR = k1 \times \sigma^3 k2 \times \sigma d k3$			
	k <sup>1</sup>	k <sup>2</sup>	k <sup>3</sup>	R <sup>2</sup>
<b>Solo puro</b>	151,61	0,15	-0,58	0,75
<b>SB 85-15</b>	382,66	0,15	-0,32	0,64
<b>SB 70-30</b>	422,77	0,33	-0,49	0,84
<b>SB 55-45</b>	508,44	0,44	-0,47	0,83
<b>SB 40-60</b>	452,68	0,39	-0,46	0,82
<b>SRCD 85-15</b>	265,15	0,20	-0,40	0,58
<b>SRCD 70-30</b>	277,37	0,33	-0,65	0,83
<b>SRCD 55-45</b>	713,63	0,53	-0,48	0,81
<b>SRCD 40-60</b>	352,68	0,34	-0,49	0,70

Fonte: Elaborada pelos autores.

Percebe-se que a regressão não linear do modelo composto gerou correlações (R<sup>2</sup>) que variaram de 0,64 até 0,84. As amostras que obtiveram os melhores índices de correlação para o modelo foram SB 70-30, com R<sup>2</sup> de 0,84, seguida da SB 55-45 e da SRCD 70-30, ambas com R<sup>2</sup> de 0,83. Percebe-se também que os coeficientes obtidos em k2 para o modelo composto são positivos, o que indica um aumento do módulo de resiliência com o aumento da tensão confinante. Porém, em relação à tensão desvio observa-se comportamento distinto, visto que o coeficiente k3 mostra-se negativo, indicando que o módulo é maior para menores tensões desvio, o que está coerente com a presença do solo nas misturas. Nota-se que os expoentes são relativamente elevados, e ao se analisar uma estrutura de pavimento com a presença de um destes materiais, pode ocorrer módulos em toda a faixa de valores entre o máximo e o mínimo obtido nos ensaios e não necessariamente o valor médio, usado somente para comparações relativas.

### 3.2 Dimensionamento

As informações relativas ao tráfego e aos materiais das camadas de revestimento e subleito, definidas anteriormente no item de materiais e métodos, e os parâmetros das misturas de SB 70-30 e SRCD 70-30 foram inseridos no *software* MeDiNa para execução do dimensionamento.

A base foi analisada com espessuras de 15, 20, 25 e 30 cm, visando verificar a espessura da camada de revestimento, o afundamento de trilha de roda e a área trincada obtidos a partir da maior utilização da mistura com resíduos. Quando se realizou o dimensionamento optou-se por otimizar a camada de revestimento, ou seja, redimensioná-la automaticamente para suportar os esforços do tráfego mantendo constante a espessura da camada de base. A espessura de revestimento obtida no programa para todos os dimensionamentos feitos foi maior do que a espessura mínima recomendada na metodologia antiga do DNER, de 5 cm. Este comportamento ocorreu tanto na utilização da mistura de solo-brita 70-30 como na mistura de solo-RCD 70-30. Apesar das estruturas apresentarem revestimento mais espesso que o método do DNER, na metodologia do MeDiNa são levadas em consideração as características dos materiais e isto resulta em maior segurança e confiança no dimensionamento

realizado, compensando o gasto adicional com a elevação da espessura do revestimento com a redução de manutenções ao longo da vida útil de projeto do pavimento.

No Manual do método MeDiNa, constam os critérios utilizados no dimensionamento que estão apresentados na Tabela 4 a seguir e que variam com o tipo de via. Nesta pesquisa foram adotados o período de projeto de 10 anos e o sistema coletor primário, que possui nível de confiabilidade de 85%, área trincada máxima de 30% e deformação permanente máxima de 13mm.

**Tabela 4** - Critérios de dimensionamento constantes do programa de dimensionamento MeDiNa do DNIT.

<b>Tipo de via</b>	<b>Confiabilidade</b>	<b>Área Trincada</b>	<b>Def. Permanente</b>
<b>Sistema Arterial Principal</b>	95%	30%	10mm
<b>Sistema Arterial Primário</b>	85%	30%	13mm
<b>Sistema Arterial Secundário</b>	75%	30%	20mm
<b>Sistema Coletor Primário</b>	85%	30%	13mm
<b>Sistema Coletor Secundário</b>	75%	30%	20mm
<b>Sistema Local</b>	65%	30%	20mm

Fonte: Elaborada pelos autores.

Ao realizar o dimensionamento com o MeDiNa o programa gera um relatório informando a evolução dos danos no pavimento ao longo dos meses de vida útil de projeto e faz análises acerca do afundamento de trilha de roda (ATR), bacias de deflexões e percentual de área trincada. A Tabela 5 e a Tabela 6 apresentam os dados de ATR obtidos para os dimensionamentos feitos com solo-RCD 70-30 e solo-brita 70-30, respectivamente.

**Tabela 5** – Resultados das análises de afundamento de trilha de rodas (ATR) das estruturas com solo-RCD 70-30 analisadas nesta pesquisa.

<b>N</b>	<b>5 x 10<sup>6</sup></b>			
<b>MR Subleito (MPa)</b>	189			
<b>Espessura revestimento (cm)</b>	9,4	9,2	8,8	8,8
<b>Espessura base (cm) – Solo-RCD 70-30</b>	15,00	20,00	25,00	30,00
<b>ATR base (mm)</b>	1,56	2,13	2,80	3,39
<b>ATR total (mm)</b>	3,7	4,1	4,6	5,0
<b>Área trincada estimada (%)</b>	28,9	28,7	29,3	28,1

Fonte: Elaborada pelos autores.

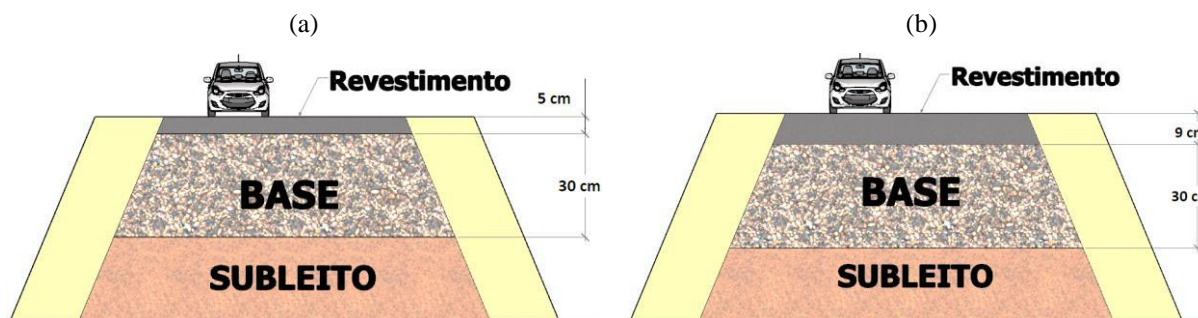
**Tabela 6** – Resultados das análises de afundamento de trilha de rodas (ATR) das estruturas com solo-brita 70-30 analisadas nesta pesquisa.

N	$5 \times 10^6$			
MR Subleito (MPa)	189			
Espessura revestimento (cm)	9,4	8,80	8,80	8,20
Espessura base (cm) – Solo-brita 70-30	15,00	20,00	25,00	30,00
ATR base (mm)	2,34	3,28	3,98	4,88
ATR total (mm)	4,5	5,3	5,8	6,5
Área trincada estimada (%)	28,3	29,7	28,3	29,7

Fonte: Elaborada pelos autores.

Na Figura 8 pode-se verificar uma das seções transversais inicialmente lançadas no programa, bem como a seção final obtida para a estrutura esta estrutura após execução do dimensionamento.

**Figura 8** – a) Estrutura inicial lançada no MeDiNa; b) Dimensionamento de uma das estruturas avaliadas nesta pesquisa com camada de base com solo-RCD 70-30 ou solo-brita 70-30.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Avaliando o ATR e a área trincada das estruturas obtidas observa-se que ambas apresentaram desempenho semelhante, com baixos valores de deformação permanente para a camada de base e para o pavimento como um todo. A mistura de SRCD 70-30, ao ser utilizada em camada de 30 cm de base com cerca de 9 cm de concreto asfáltico, contribuiu para o ATR com 3,39 mm, enquanto a mistura de SB 70-30 apresentou um valor de 4,88 mm. A área trincada prevista no pavimento (ao final do período de vida útil do projeto) com camada de base de 30 cm de SRCD 70-30, foi de 28,1%. Para o SB 70-30 a previsão de área trincada foi um pouco superior de 29,7%, mas na mesma ordem de grandeza. Ressalta-se novamente que para a mistura de SB 70-30 foram adotados parâmetros para o modelo de DP disponível no software e não foi feito o ensaio no material, o que influenciou a magnitude deste resultado.

A título comparativo, a ordem de grandeza do ATR e de área trincada foi semelhante e, como muitos autores relatam que pode haver quebra dos grãos maiores do RCD, o resultado de desempenho deste material em relação ao tradicional se mostra equivalente e promissor. Entende-se que em uma camada de revestimento com 9 cm as tensões que chegam na base são menores do que as tensões de uma camada com espessura inferior, permitindo então a utilização de materiais alternativos.

A Figura 9 mostra as informações apresentadas na tela do programa após o dimensionamento de uma das seções com SRCD 70-30.



**Figura 9** – Tela do MeDiNa após realização do dimensionamento com o Solo-RCD na camada de base.

The screenshot shows the MeDiNa software interface. At the top, there are tabs for 'ESTRUTURA', 'MODELAGEM', and 'RESULTADOS'. Below the tabs, there are input fields for 'RESPONSÁVEL:' (Letícia Azevedo), 'EMPRESA:' (UFRN), 'PROJETO:' (Projeto Artigo), and 'MODOS:' (Pavimento Novo (Nível A)).

The main table displays the following data:

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Classe 1	8,8	5764	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Solo-RCD	30	Resiliente Não Linear	0,35
SL	SUBLEITO	Solo Siltsoso NS'	0,0	189	0,45

Below the table, there are two sections:

- EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO**
  - DADOS DO TRÁFEGO**

Tipo de Via:	Sistema Coletor Primário
VMD (1º ano):	1250
FV:	1,000
N anual (1º ano):	4,56e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da Faixa:	4,56e+05
Taxa de crescimento (%):	2,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	5,00e+06
  - VMD (1º ano):**  
Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego
- DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO NOVO ---**  
Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.  
Nível de confiabilidade da análise: 85%  
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 28,1%  
Afundamento de Trilha de Roda: 5,0mm  
Os resultados obtidos pelo programa devem ser avaliados criteriosamente antes de serem aprovados para a execução de campo.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Naturalmente outras opções de estrutura poderiam ter sido avaliadas. Uma das vantagens de um método mecanístico-empírico é permitir variações das estruturas consideradas pelo projetista de forma rápida e assim poder fazer uma análise de viabilidade e de custos dos pavimentos de acordo com o tráfego, confiabilidade do projeto e os materiais disponíveis, inclusive os alternativos. Também poderiam ser testadas outras misturas asfálticas, por exemplo, considerando as quatro classes de misturas representativas das mais variadas combinações de agregados e ligantes asfálticos, que estão no MeDiNa. Todas estas variáveis proporcionam distintos dimensionamentos e resultados, cabendo ao projetista a adoção das opções mais viáveis.

#### 4. Considerações Finais

Por meio dos ensaios triaxiais dinâmicos realizados no Setor de Pavimentos do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, verificou-se que as misturas solo-RCD e solo-brita obtiveram desempenho satisfatório quanto ao módulo de resiliência, sendo semelhante ao comportamento de misturas de solo-brita avaliadas em pesquisas desenvolvidas por distintos autores indicados nas referências. Os ensaios de módulo de resiliência mostraram que a mistura otimizada, ou seja, as misturas que apresentaram maior MR, foram SB 70-30 e SRCO 70-30.

Realizando um comparativo com os módulos de resiliência médios das misturas de solo-brita e solo-RCD constatou-se que em relação ao solo na condição pura, os MR de ambas as misturas tiveram valores crescentes até a proporção com 30% de agregados e valores decrescentes para proporções com mais de 30% de agregados. Porém, todos os valores médios de MR das misturas foram superiores aos valores médios de MR do solo na condição pura. As misturas de solo-brita com teores de 15% e 30% de agregados apresentaram melhor desempenho do MR quando comparadas com as misturas de solo-RCD com mesma proporção de agregados, mas próximos. Todas as misturas mostraram dependência da tensão confinante e da tensão desvio, compatível com a natureza mista da sua composição.

Mediante a análise dos relatórios fornecidos pelo software MeDiNa comprovou-se que as misturas com os resíduos de construção e demolição de obras na proporção com 70% de solo e 30% de RCD, assim como as misturas de solo-brita, podem

ser empregadas alternativamente em camadas de base quando aplicadas nas mesmas situações de projeto, uma vez que as deformações permanentes e a área trincada obtidas para o período de vida útil foram equivalentes para os dois materiais.

Destarte é importante enfatizar que a nova metodologia de dimensionamento adotada pelo DNIT recentemente necessita da determinação do Módulo de Resiliência e da Deformação Permanente dos mais variados tipos de materiais alternativos, oriundos de todas as regiões do Brasil, destinados às estruturas dos pavimentos. Somente com estes tipos de análises torna-se possível mudanças significativas no dimensionamento dos pavimentos e difusão da utilização dos resíduos de construção e demolição utilizando o novo método.

Ficou evidente que a reincorporação dos resíduos na cadeia da construção encontra-se adequada para os novos critérios de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNIT. Isto reforça ainda mais a justificativa relacionada aos fatores ambientais e econômicos, fazendo da técnica uma maneira de conter a exploração dos recursos naturais, garantindo a sustentabilidade das obras de pavimentação, bem como assegurando a redução dos custos destas construções.

Diante do exposto sugere-se para pesquisas futuras a execução de outros estudos com misturas de solo-RCD para verificar a influência da compactação na intensidade da quebra das partículas e o reflexo desta quebra nos parâmetros de módulo de resiliência e deformação permanente destas misturas. Outra vertente de estudo possível é a análise de mais tipos de solos combinados com o RCD e também o ensaio de misturas de solo-RCD em distintas umidades de compactação para verificar a influência desta variável no módulo de resiliência.

## Referências

- Arisha, A., Gabr, A., El-Badawy, S., & Shwally, S. (2016). Using Blends of Construction & Demolition Waste Materials and Recycled Clay Masonry Brick in Pavement. *Procedia Engineering*, 143, 1317-1324. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.148>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). NBR 15115 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2004). NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas– ABNT. (2016). NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2016). NBR 7182: Solos - Ensaio de Compactação.
- Azevedo, J. G., Santos, C. B., & Amorim, E. F. (2018). Análise geotécnica comparativa da aplicação de misturas de solo-RCD dos estados do Rio Grande do Norte e Mato Grosso em camadas de pavimentos urbanos. *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. Salvador: ABMS.
- Barreto, A. C. (2020). *Desempenho Técnico de misturas de diferentes tipos de solos com RCD para uso em obras de pavimentação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Beja, I. A. (2014). *Agregado reciclado de construção e demolição com adição de aglomerantes hidráulicos como sub-base de pavimentos*. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Bernucci, L. B. et al. (2010). *Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros*. Petróbras: Abeda.
- Bessa, I. S. (2010). *Caracterização de agregados e misturas asfálticas utilizando o processamento digital de imagens*. Monografia do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Chakracarthy, S., Boyina, A., Singh, A., & Shankar, S. (2019). Evaluation of cement treated reclaimed asphalt pavement and recycled concrete pavement bases. *Journal Pavement Research and Technology*, 12, 581-588. <https://doi.org/10.1007/s42947-019-0069-1>
- Couto, J. B. (2009). *Estudo de misturas de solo-agregado em bases e sub-bases rodoviárias do Rio Grande do Sul: caracterização de laboratório e execução de trecho experimental*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. (2018). DNIT 134/2018 - ME - Pavimentação- Solos - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. (2018). DNIT 179/2018 - IE - Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio. Rio de Janeiro.
- Dias, M. C. (2014). *Viabilidade do uso de solo tropical e resíduo de construção civil em sistemas de cobertura de aterro sanitário*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

- Estado de São Paulo. (2010). *Cadernos de Educação Ambiental*, 6. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. SMA.
- Fernandes, C. G. (2004). *Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e Belo Horizonte para uso em pavimentação*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Franco, F. A., & Motta, L. M. (2018). *Guia para utilização de Método Mecânico-Empírico - MeDiNa*. Convênio UFRJ/DNIT.
- Jayakody, S., Gallage, C., & Ramanujam, J. (set de 2019). Performance characteristics of recycled concrete aggregate as an unbound pavement material. *Heliyon*, 5(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02494>
- Jiménez, A. M. (2011). *Estudo experimental de um Resíduo de Construção e Demolição (RCD) para utilização em pavimentação*. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília.
- Leite, F. C. (2007). *Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos*. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Leite, F. d., Motta, R. d., Vasconcelos, K. L., & Bernucci, L. (2011). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, 2972-2979. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105>.
- Lima, C. D. (2020). *Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas*. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Lima, C. D., Motta, L. M., & Rodrigues, A. C. (2017). Estudo da deformação permanente de britas granito-gnaiss para uso em base e sub-base de pavimentos. *Transportes*, 25(2), 41-52. <https://doi.org/10.14295/transportes.v25i2.1262>.
- Lucca, P. V. (2017). *Avaliação do Resíduo de Construção e Demolição produzido e tratado no Município de Curitiba-PR e de seu uso como base de Pavimentos Urbanos*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Maria, R. P., & Bastos, C. A. (2018). Estudo para melhoramento da capacidade de suporte de um solo residual com adição de agregado pétreo britado. *Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*. 16. São Paulo: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.
- Marques, M. O. (2012). *Avaliação de trechos de pavimentos experimentais construídos com materiais alternativos na região metropolitana de Goiânia*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- Miranda, L. F., Angulo, S. C., & Careli, É. D. (2009). A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. *Ambiente Construído*, 9, 57-71. jan./mar. 2009.
- Moreira, E. B. (2018). *Comportamento Mecânico de um Solo Argiloso Misturado com Resíduos de Construção e Demolição para Utilização em Pavimentação*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- Motta, L. M., & Medina, J. (2006). Investigação e Desenvolvimento em Mecânica dos Pavimentos na COPPE - Brasil. *Revista Engenharia Civil*, 26.
- Motta, R. (2005). *Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego*. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Norback, C. (2018). *Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de três solos e misturas de solo-brita*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Oliveira Júnior, J. M., Araújo, C. B., & Ayres, T. M. (2018). Estudo comparativo entre solo seixo e solo brita para fins de pavimentação. *Revista Tecnologia*, 39(1), 1-17. <https://doi.org/10.5020/23180730.2018.7905>.
- Orioli, M. A. (2018). *Estudo de uso de agregado reciclado de resíduos de construção e demolição em misturas solo-agregado*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Parente, E. B., Boavista, A. H., & Soares, J. B. (2003). Estudo de comportamento mecânico de misturas de solo e escória de aciaria para aplicação na construção rodoviária na região metropolitana de Fortaleza. *Congresso de pesquisa e ensino em Transportes. Rio de Janeiro: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*.
- Pedemeiras, C. M. (2017). *Avaliação de blocos intertravados com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição de obras do município de Natal/RN*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Pereira, L. A. F.; Amorim, E. F.; Freitas Neto, O. (2022). Construction and demolition waste applied to road pavement layers: a systematic review. *Research, Society and Development*, 11(4), e28611426689. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i4.26689>.
- Queiroz Neto, M. L. (2019). *Aplicação de concreto asfáltico a quente utilizando resíduos da construção e demolição de obras (RCD) em via urbana na cidade de Natal/RN*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Quintanilha, F. S. (2008). *Avaliação de Utilização e Desempenho de Resíduos de Construção e Demolição em Bases e Sub-bases de Pavimentos Flexíveis*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- Rezende, L. R. (1999). *Técnicas Alternativas para a Construção de Bases de Pavimentos Rodoviários*. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília.

- Rezende, L. R., Marques, M. d., Oliveira, J. C., Carvalho, J. C., Guimarães, R. C., Resplandes, H. d., & Costa, L. C. (2016). Field Investigation of Mechanic Properties of Recycled CDW for Asphalt Pavement Layers. *American Society of Civil Engineers*, 8p. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001420](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001420)
- Roza, A. E. (2018). *Contribuição para o projeto mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos na região norte do estado do Mato Grosso*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Sant'Anna, G. L., Machado, C. C., Carvalho, C. A., Lima, D. C., & Minetti, L. J. (2003). Módulo de resiliência de um solo arenoso e de suas misturas com alcatrão fracionado e cal. *Revista Árvore*, 27(4), 527-534. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000400013>
- Saravanan, S., Venkatasubramanian, C., Muthu, D., & Ramakrishnan, K. (2016). Construction of Rural Roads Using C&D Waste Materials. *Indian Journal of Science and Technology*, 9 (27). 10.17485/ijst/2016/v9i27/97634
- Silva, P. B. (2014). *Estabilização de Misturas de Resíduos Sólidos de Demolição e da Indústria Cerâmica para Uso em Camadas de Pavimentos Viários*. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Sousa, W. F. (2011). *Estudo sobre a aplicação de agregado reciclado de concreto em construção de pavimentos*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Svenson, M. (1980). *Ensaio Triaxiais Dinâmicos de Solos Argilosos*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ.
- Tataranni, P., Sangiorgi, C., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C., & Dondi, G. (2017). A laboratory and field study on 100% Recycled Cement Bound Mixture for base layers. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11, 427-437. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.11.005>