

# Utilização de resíduos de mármore e granito em reforços de solos para composição de camadas de subleitos de rodovias pavimentadas

*Use of marble and granite waste in soil reinforcements for composition of layered layers of paved roads*



**Lorena Aparecida Silva**

Graduanda do curso de Engenharia Civil (UNIPAM). e-mail: [lorenasilva.eng@gmail.com](mailto:lorenasilva.eng@gmail.com)

**Nancy Tiemi Isewaki**

Mestranda em Ensino de Ciências e Matemática pela PUC Minas.  
Professora orientadora (UNIPAM). e-mail: [nancyti@unipam.edu.br](mailto:nancyti@unipam.edu.br)

---

**RESUMO:** As estradas são extremamente importantes, visto que são os principais meios de escoamento para todo e qualquer tipo de produto e também são as vias mais utilizadas para viagens e deslocamentos realizados por pessoas. Verifica-se assim uma maior necessidade de investimentos públicos em expansão, reformas e melhoramento das estradas. O presente trabalho teve como objetivo contribuir para o conhecimento do reforço de solos através do acréscimo de resíduos de mármore e granito, caracterizando seus parâmetros físicos, para empregar em camadas subleitos em rodovias pavimentadas. O solo padrão utilizado foi coletado no município de Patos de Minas/MG e foi caracterizado como material muito plástico composto por 46,45% de argila, 42,32% de silte, 2,82% de areia e 8,5% de areia. Os resíduos de mármore e granito passaram por processo de britagem, sendo utilizados com diâmetro menor que 19,0mm e maior que 9,5mm. O acréscimo de resíduos foi realizado em relação à massa de solo seco nas proporções de 0%, 15% e 30%. O solo padrão apresentou CBR de 3,045%. Com acréscimo de 15% de resíduos de mármore e granito, houve ganho de 84,4% no valor do CBR, enquanto para o acréscimo de 30% de resíduos houve ganho de 68,21% no valor do CBR, ambos valores em relação à resistência do solo puro. O reforço de solo com resíduos de mármore e granito atenderam aos requisitos técnicos estabelecidos pelo DNIT (2006) para serem utilizados em subleitos de pavimentos rodoviários.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos de mármore e granito. Solos. Reforço.

**Abstract:** Roads are extremely important as they are the main means of flow for any type of product and are also the most used routes for travel by people. There is thus a greater need for public investments in expansion, reform and improvement of roads. The present work aimed to contribute to the knowledge of soil reinforcement through the addition of

marble and granite residues, characterizing its physical parameters, to be used in subgrade layers on paved highways. The standard soil used was collected in the city of Patos de Minas/MG and was characterized as a very plastic material composed of 46.45% of clay, 42.32% of silt, 2.82% of sand and 8.5% of sand. Marble and granite wastes were crushed and used with a diameter of less than 19.0mm and greater than 9.5mm. The increase of residues was performed in relation to the dry soil mass in proportions of 0%, 15% and 30%. The standard soil presented CBR of 3.045%. With addition of 15% of marble and granite residues, there was an 84.4% gain in the CBR value, while for the 30% increase in residues there was a gain of 68.21% in the CBR value, both values in relation to the resistance of pure soil. The reinforcement of soil with marble and granite residues attended the technical requirements established by DNIT (2006) to be used in road pavement slabs.

**KEYWORDS:** Marble and granite waste, Soils, Reinforcement.

---

## INTRODUÇÃO

Com a expansão do transporte humano e de mercadorias através do uso de carruagens, a partir dos séculos XVII e XVIII, deu-se origem à busca por melhoramentos nas estradas, surgindo diversos programas rodoviários. Com isso, estudos buscando rotas mais rápidas e seguras tornaram-se fundamentais para o transporte de cargas e passageiros (SANTIAGO, 2014).

Atualmente as estradas são extremamente importantes, visto que são o principal meio de escoamento para todo e qualquer tipo de produto e também são as vias mais usadas para viagens e deslocamentos feitos por pessoas. Sendo assim, verifica-se uma maior necessidade de uma política pública voltada para investimentos em expansão, reformas e melhoramento das estradas.

Um ponto que contribui para o desenvolvimento econômico e social de uma determinada região é a pavimentação de uma estrada. No entanto, é necessário que alguns aspectos qualitativos e quantitativos sejam observados, para que esse desenvolvimento seja sustentável.

Visto a necessidade de identificar quais critérios devem ser considerados prioridades, de forma a proporcionar maiores benefícios e melhor investimento de recursos públicos, a busca por métodos que venham contribuindo para facilitar tais diagnósticos, reduzindo os problemas e aumentando os benefícios, é de suma importância.

Sabendo-se que a escassez de recursos é uma realidade nos países em desenvolvimento, em cidades de grande e médio porte, a quantidade de resíduos sólidos da construção civil é considerada inservível quando dispostos de forma inadequada, o que vem causando grandes preocupações em funções ambientais, sociais e econômicas. Estudos demonstram que resíduos sólidos da construção se mostram alternativas interessantes na aplicação em camadas de pavimentos, e vêm sendo destaques no país e mundo (HORTEGAL, FERREIRA, SANT'ANA, 2009).

A ABNT NBR 15115:2004, que regulamenta a gestão e o manejo correto de resíduos da construção civil, prevê que estes podem se tornar agregados reciclados

para execução de subleitos, sub-bases, bases e até mesmo revestimentos primários em rodovias não pavimentadas, desde que tal destinação e execução atendam aos critérios estabelecidos pela norma, sendo esse manejo uma alternativa sustentável tanto ambientalmente quanto economicamente, visto o reuso de tais resíduos.

Para a construção de estradas, as atividades da construção civil encontram-se em destaque, sendo consideradas umas das mais importantes. No entanto, com a grande demanda, destacam-se também os impactos ambientais que elas causam, seja por exploração de recursos naturais, seja por modificação da paisagem ou até mesmo pela geração de resíduos. É um trabalho árduo associar tais atividades com o desenvolvimento sustentável e menos agressivo, uma vez que tais práticas se mostram sem respostas satisfatórias (SINDUSCON-SP, 2005).

Pensando em tal problemática, técnicas que utilizam a reutilização de matéria-prima se mostram viáveis para tais condições ambientais, uma vez que a existência de recursos naturais é de extrema importância para o desenvolvimento de um determinado local, sendo a extração desordenada de tais recursos o principal causador da atual fragilidade ambiental.

Segundo o Sistema Nacional de Viação (SNV), a malha rodoviária nacional compreende 212.866 km de rodovias pavimentadas, contrapondo-se a 1.365.426 km de rodovias não pavimentadas (CNT, 2017). Ainda de acordo com a CNT (2017) a densidade da malha rodoviária pavimentada do Brasil é ainda muito pequena, principalmente quando comparada com a de outros países de dimensão territorial semelhante. São aproximadamente 25 km de rodovias pavimentadas para cada 1.000 km<sup>2</sup> de área, o que corresponde a apenas 12,3% da extensão rodoviária nacional.

Visto que atualmente a destinação dos resíduos de mármore e granito se encontra em destinações desordenadas e muitas vezes em locais inapropriados, a busca por técnicas de reaproveitamento deles vem se tornando cada vez mais essencial, no intuito de reaproveitar e diminuir a extração da matéria-prima de camadas de estradas, uma vez que tal extração levará à sua escassez.

Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo geral analisar e estudar a utilização de resíduos de mármore e granito no município de Patos de Minas, para possível reforços de solos em camadas de subleitos de rodovias pavimentadas. Os objetivos específicos foram caracterizar fisicamente o solo puro e analisar os resultados do ensaio de granulometria nos agregados de resíduos e do ensaio de Índice de Suporte Califórnia com o solo puro e solo reforçado com diferentes proporções de acréscimos de resíduos.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. IMPLANTAÇÃO DE UMA ESTRADA

Antes de se implantar uma estrada, é necessária a realização de alguns estudos, visando o planejamento de transporte e a verificação do comportamento do

sistema viário de determinada região ou localização, estabelecendo prioridades de acordo com dados socioeconômicos em estudo da região analisada (NASCIMENTO, 2008).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente, através da Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, estabeleceu a ABNT NBR 15115:2004 com objetivo de estabelecer critérios quanto à execução de camadas de pavimentação. Nos dias de hoje, a gestão e o manejo correto dos resíduos sólidos da construção civil necessitam de destinos viáveis e mais nobres, podendo atender os critérios de execução em camadas de reforços de subleito, sub-base, base e até a camada de revestimento primário de pavimentos, tornando assim, os resíduos em agregados reciclados (NBR 15115/2004). Para efeitos da ABNT NBR 15115:2004 são definidos:

- Agregados reciclados têm característica granular, sendo obtidos por britagem, conforme as características técnicas para aproveitamento em obras de pavimentação;
- Reciclagem é o aproveitamento dos resíduos após serem submetidos a transformação;
- Reforço do subleito, sub-base e base de agregado reciclado para pavimento são camadas de agregados reciclados.

## 2.2. ROCHA

Para a Geologia, qualquer formação que ocorra na crosta terrestre é denominada rocha, até mesmo os solos. A rocha pode ser definida, de modo geral, como agregados naturais, compostos por um ou mais minerais. Para o engenheiro civil, considerando o conceito de custos de projetos de terraplanagem em decorrência da aplicação diretamente na engenharia civil, a rocha é todo material natural que pode ser desagregado somente com explosivos; já uma rocha branda, ou um maciço de rocha alterada (fraturada) são solos que podem ser escavados mecanicamente (QUEIROZ, 2009).

As rochas são classificadas em três principais grupos: magmáticas, sedimentares e metamórficas.

## 2.3. Mármore

O mármore é uma rocha metamórfica calcária, que nada mais é que a modificação química do calcário e do meio onde se encontra. Tal modificação se dá pela transformação físico-química causada pelo calcário a altas temperaturas e pressão. Esse processo é conhecido por metamorfismo, que advém das palavras *meta* (transformação) e *morphe* (forma).

As maiores jazidas são encontradas com facilidades em pontos que advêm de atividades vulcânicas e que possuam a rocha matriz calcária. No Brasil, a maior concentração da rocha metamórfica se encontra no estado do Espírito Santo (SOUZA, 2017).

## 2.4. Granito

O granito é o resultado da solidificação do magma localizado a grandes profundidades, conhecido como rocha magmática plutônica. Existem rochas que envolvem o granito, impedindo que a liberação do calor aconteça, e com isto, não permitindo o rápido arrefecimento do magma, retardando então a sua solidificação (FRANQUINHO, 2008).

## 2.5. RESÍDUOS SÓLIDOS

Sabe-se que tais resíduos podem se encontrar tanto no estado sólido, quanto no estado semissólido, e isso resulta em diversas atividades, como industriais, hospitalares, comerciais, agrícolas, dentre outras. Entre tais atividades, encontram-se resíduos derivados da construção civil, que advêm de reformas, reparos e demolições, como tijolos, blocos cerâmicos, concretos, solos e rochas.

Para uma melhor definição dos resíduos da construção civil, foi criada a Resolução n° 307 CONAMA (2002), quanto às classes A, B, C e D.

- Classe A: resíduos reutilizáveis (recicláveis) como agregados.
- Classe B: são aqueles recicláveis para outras destinações.
- Classe C: materiais que não foram desenvolvidos por tecnologias, ou até mesmo aplicações economicamente viáveis possibilitando a sua recuperação;
- Classe D: resíduos perigosos que advêm de processos das construções, contaminantes prejudiciais à saúde.

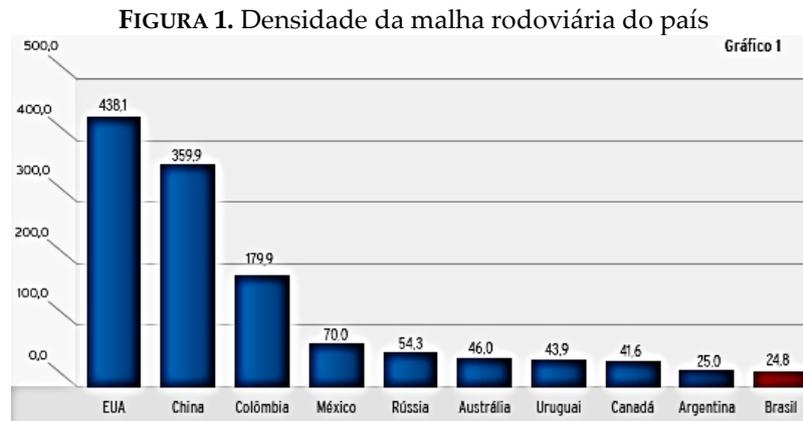
## 2.6. PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA

O transporte rodoviário brasileiro é o principal responsável pela integração de todo sistema de transporte no país. Segundo o Sistema Nacional de Viação (SNV), a malha rodoviária nacional compreende 212.866 km de rodovias pavimentadas, contrapondo-se a 1.365.426 km de rodovias não pavimentadas (CNT, 2017).

A densidade da malha rodoviária pavimentada do Brasil mostra-se pequena quando comparada com a de outros países de dimensão territorial semelhante. São aproximadamente 25 km de rodovias pavimentadas para cada 1.000 km<sup>2</sup> de área, o que corresponde a apenas 12,3% da extensão rodoviária nacional, como apresenta a Figura 1, na página seguinte (CNT, 2017).

Segundo a CNT (2017) ao analisar as regiões, o Nordeste concentra o maior percentual de infraestrutura rodoviária com pavimento (30,8%), seguido do Sudeste (19,3%), do Sul (18,5%), do Centro-Oeste (17,6%) e do Norte (13,7%).

A expansão da malha rodoviária pavimentada também não acompanha o ritmo de crescimento da frota de veículos. Nos últimos dez anos (de julho de 2006 a junho de 2017), a frota cresceu 110,4%, enquanto a extensão das rodovias federais cresceu somente 11,7%.

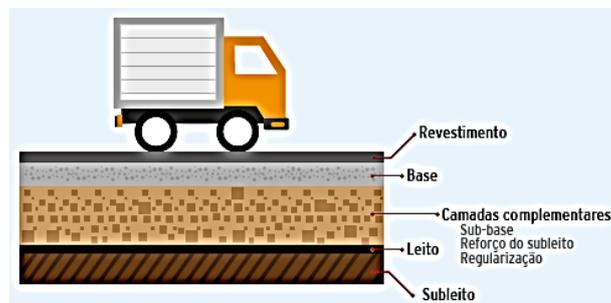


Fonte: CNT, 2017.

## 2.7. ESTRUTURA DE UM PAVIMENTO E SUAS CAMADAS

De acordo com uma terminologia coerente, o pavimento possui cinco camadas: revestimento, base, sub-base, reforço de subleito e subleito, e após estas camadas, tem-se a fundação, que também integra a estrutura, conforme mostra a Figura 2.

**FIGURA 2. Camadas Genéricas de um Pavimento**



Fonte: CNT, 2017

Tais estruturas são constituídas normalmente de materiais estabilizados granulometricamente ou com aditivos, com principal finalidade de resistir e distribuir os esforços solicitantes durante seu período de utilização.

Para a seleção e a caracterização dos agregados, emprega-se tecnologia usual, pautada principalmente na distribuição granulométrica e na resistência, forma e durabilidade dos grãos. Para os materiais constituídos principalmente de agregados graúdos e de agregados miúdos, prevalecem as propriedades dessas frações granulares (BERNUCCI, 2008).

Nos tópicos a seguir, são apresentados os materiais e propriedades comumente utilizadas nas camadas de composição do pavimento rodoviário.

### 2.6.1. Base

Segundo o DNIT 141:2010, a base é a camada de pavimentação destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os adequadamente à camada subjacente, executada sobre a sub-base, o subleito ou o reforço do subleito

De acordo com o Manual do DNIT (2006), para a base, os materiais devem apresentar um CBR > 80%, expansão  $\leq 0,5\%$ , além de um limite de liquidez  $\leq 25\%$  e Índice de Plasticidade  $\leq 6\%$ .

### 2.6.2. Sub-Base

É a camada complementar à base, localizada entre o subleito (ou reforço do subleito) e a camada base. Apresenta como uma de suas funções prevenir o bombeamento do solo do subleito para a camada de base, podendo ser ainda utilizada para regularizar a espessura da base (MARQUES, 2018).

De acordo com o Manual do DNIT (2006), o material a ser utilizado na sub-base deve possuir uma capacidade de suporte melhor que o material do subleito, apresentando CBR > 20%, além de um Índice de Grupo 0 e expansão  $\leq 1\%$ .

### 2.6.3. Subleito

Trata-se da camada de fundação onde será apoiado todo pavimento. Quando irregular, deve ser feita uma regularização visando corrigir falhas da camada, a fim de conformar o leito, transversal e longitudinalmente (MARQUES, 2018).

Quanto ao material de sua composição, de acordo com o Manual do DNIT (2006), deve apresentar uma expansão  $\leq 2\%$  e um CBR > 2%. Quando não apresentadas tais características, o material deve ser substituído ou submetido a um reforço de subleito. Caso o material apresente CBR > 20%, este pode ser utilizado como sub-base.

## 3. METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada de forma experimental, para analisar a viabilidade técnica da utilização dos resíduos de mármore da construção civil, como reforço em camadas de subleitos de rodovias pavimentadas.

### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MÁRMORE E GRANITO

Para se caracterizar os resíduos de mármore e granito, foi necessário avaliar e determinar sua caracterização granulométrica de acordo com a NBR NM 248:2003 e sua massa unitária de acordo com a NBR NM 45:2006. Em atendimento às normas, foram utilizadas peneiras de série normal e intermediária, estufa, recipiente cilíndrico, balança, entre outros, para se obterem resultados satisfatórios do ensaio.

A critério dos pesquisadores, para padronização do resíduo, foram limitados para utilização nesta pesquisa os resíduos de mármore e granito que se enquadravam na faixa granulométrica com partículas menores que 19,0 mm e maiores que 9,5 mm.

### 3.2. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

O solo analisado foi caracterizado através de análises táctil-visuais e de ensaios laboratoriais, como análise granulométrica e limites de consistência.

Para caracterizar o solo em questão, foi realizada a coleta de aproximadamente 100 kg de amostra deformada, de acordo com as instruções da ABNT NBR 9604:2016. Tal coleta foi realizada no lote 10 da Quadra 10, situado na Avenida C do bairro Campos Elíseos II, na cidade de Patos de Minas-MG, como a Figura 3 demonstra.

FIGURA 3. Localização da coleta do solo



Fonte: Autor, 2018

A Figura 4 apresenta a coleta do solo analisado na localidade supracitada atendendo todas as especificações normativas previstas na ABNT NBR 9604:2016.

FIGURA 4. Local de coleta do Solo em Estudo



Fonte: Autor, 2018

Após a coleta, as amostras de solo foram armazenadas em uma câmara úmida adotada pelo Laboratório de Tecnologia dos Materiais de Construção Civil

- Mecânica dos Solos do Centro Universitário de Patos de Minas, com o objetivo de que tais amostras mantivessem a umidade natural, para evitar alterações em procedimentos experimentais posteriores, como ressalta a ABNT NBR 9604:2016.

### 3.2.1. Análise tátil-visual

A análise tátil-visual permite uma pré-definição das propriedades e características do solo em estudo, pois é através de tais técnicas que é possível detectar particularidades do solo, como presença ou não de matérias e/ou odores estranhos, cor natural, coesão entre as partículas, sensação ao tato (diferenciar quando seco e úmido), entre outras. A ABNT NBR 6484:2001 ressalta que através do exame tátil-visual deve-se anotar e detectar granulometria principal e secundária, bem como origem e cor. A ABNT NBR 9604:2016 prevê que é possível avaliar a predominância do tamanho dos grãos através do ensaio do tato, friccionando a amostra de solo com os dedos e, dessa forma, separando solos grossos (ásperos ao tato) dos solos finos (macios ao tato). As argilas diferem-se dos siltes pela plasticidade e pela resistência coesiva quando secas ao ar.

### 3.2.2. Análise granulométrica

O ensaio granulométrico nada mais é que a porcentagem que cada faixa especificada de tamanho de grãos representa na massa seca total utilizada para o ensaio, ou seja, este ensaio determina a distribuição granulométrica do solo. Através de tal ensaio, o objetivo principal é obter a curva granulométrica, pois a curva permite estimar as porcentagens correspondentes a cada fração granulométrica do solo (SENÇO, 2007). O solo foi devidamente preparado de acordo com a ABNT NBR 6457:2016 e ensaiado conforme requisitos da ABNT NBR 7181:2016. De acordo com o aspecto granulométrico do solo, foi necessário realizar o ensaio de sedimentação com o material passante na peneira 2,0 mm (#10), para uma melhor caracterização da tipologia do solo em questão, como apresenta a Figura 5.

**FIGURA 5.** Série de peneiras e mistura do solo com solução após 14hs para ensaio de sedimentação



Fonte: Autor, 2018.

### 3.2.3. Limite de liquidez

O limite de liquidez corresponde à umidade abaixo da qual o solo se comporta como material plástico, é o teor de umidade em que ocorre a transição entre os estados líquido e plástico do solo. Experimentalmente corresponde ao teor de umidade com que o solo fecha certa ranhura sob o impacto de 25 golpes do aparelho de Casagrande (CAPUTO, 2008). Foram utilizados aproximadamente 200,0g do solo em estudo, o qual foi transferido para uma cápsula de porcelana onde se adicionou água destilada em pequenas quantidades. Com o auxílio de uma espátula de lâmina flexível, a mistura foi homogeneizada, obtendo-se uma pasta com a consistência conforme a ABNT NBR 6459:2016 e ABNT NBR 6457:2016, como Figura 6.

FIGURA 6. Pasta para ensaio de Limite de Liquidez



Fonte: Autor, 2018.

### 3.2.4 Limite de Plasticidade

O ensaio foi realizado conforme as especificações da ABNT NBR 7180:2016. Realizada a moldagem da massa em forma elipsoidal em uma placa de vidro de superfície esmerilhada, como objeto de comparação, foi utilizado um gabarito cilíndrico de 3,0 mm de diâmetro e 100,0 mm de comprimento.

Destas moldagens, foram retiradas sete amostras para o ensaio de limite de plasticidade, como demonstra a Figura 7. Cada amostra teve sua massa úmida e seca aferida para que o teor de umidade fosse obtido e calculado.

FIGURA 7. Amostras para ensaio de Limite de Plasticidade



Fonte: Autor, 2018

## 3.3. REFORÇOS DE SOLO COM ACRÉSCIMO DE RESÍDUOS

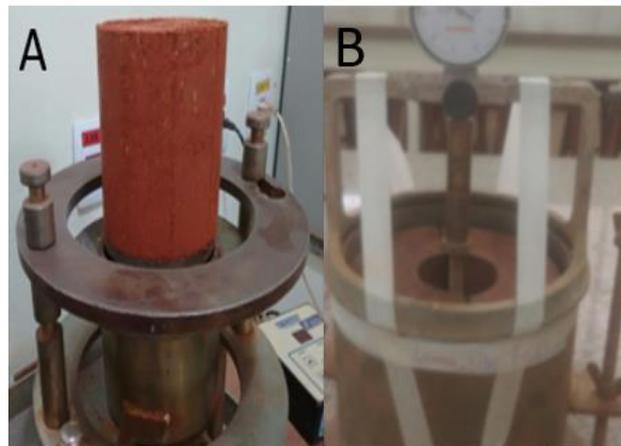
Gonçalves e Medeiros (2015) acrescentaram resíduos de construção civil na proporção de 1/3 e 2/3 de resíduos da construção civil em solos para camadas não pavimentadas. Os resultados não foram totalmente satisfatórios, uma vez que apresentaram possíveis aplicações apenas em camadas primárias de pavimentação (GONÇALVES; MEDEIROS, 2015).

Com isto, através de tais parâmetros, o presente trabalho realizou experimentos com 0%, 15% e 30% de adição de resíduos da construção civil em relação à massa de solo seco. Os resíduos foram devidamente britados, atingindo sua dimensão aproximada da brita nº 1, ou seja, partículas com diâmetros menores que 19 mm e maiores que 9,5mm. Realizou-se o ensaio de compactação dos solos, conforme ABNT NBR 7182:2016, a fim de se determinar o teor de umidade ótimo de compactação na energia de compactação *Proctor Normal*.

Obtidos os dados de compactação, realizou-se o ensaio *Califórnia Bearing Ratio* (CBR), ABNT NBR 9895:2016, conhecido como Índice Suporte Califórnia, um método empírico que foi adotado não apenas no Brasil, como no mundo, por uma grande parcela de órgãos rodoviários. Foram moldados para cada teor de resíduo analisado dois corpos de prova na energia de compactação *proctor normal*.

Após quatro dias imersos em água, aferiu-se a expansão de cada corpo de prova compactado e realizou-se o rompimento na prensa do CBR para comparação dos padrões de resistência atingida por cada composição, conforme Figura 8.

FIGURA 8. Corpo de prova de compactação e CBR



Fonte: Autor, 2018.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico encontram-se todos os resultados obtidos através de procedimentos visuais e experimentais, atendendo a prescrições normativas e seus parâmetros.

## 4.1. CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MÁRMORE E GRANITO

## 4.1.1. Granulometria

Através da análise granulométrica foram obtidos resultados de duas amostras, como especifica a NBR NM 248:2003, que são as porcentagens de massa retida e acumulada em cada peneira, com as dimensões máximas características próximas umas das outras, como o Quadro 1 demonstra.

QUADRO 1. Classificação Granulométrica do solo

Ensaio 1. Balança Digimed					Ensaio 2. Balança Digimed				
Amostra (g)	5016				Amostra (g)	5016			
Série	Peneira (mm)	Massa Retida (g)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)	Série	Peneira (mm)	Massa Retida (g)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)
Normal	19,00	105,20	2,10	2,10	Normal	19,00	66,60	1,33	1,33
Intermediária	12,50	3360,10	66,99	69,08	Intermediária	12,50	3518,90	70,15	71,48
Normal	9,50	1427,20	28,45	97,54	Normal	9,50	1287,40	25,67	97,15
Intermediária	6,30	111,40	2,22	99,76	Intermediária	6,30	116,40	2,32	99,47
Normal	4,75	1,30	0,03	99,78	Normal	4,75	3,20	0,06	99,53
Normal	2,36	1,60	0,03	99,82	Normal	2,36	3,20	0,06	99,60
Fundo	-	8,90	0,18	99,99	Fundo	-	19,60	0,39	99,99
<b>Total</b>		5015,70	99,99	-	<b>Total</b>		5015,30	99,99	-

Fonte: Autor, 2018.

## 4.1.2. Massa unitária

Analisando os resultados da massa unitária, ensaiados de acordo com o método A e C da NBR NM 45, foram obtidos 816,198 kg/m<sup>3</sup> com o material compactado e 753,440 Kg/m<sup>3</sup> com o material solta.

## 4.2. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

## 4.2.1. Análise tátil-visual

Atendendo os requisitos da ABNT NBR 6484:2001, a análise tátil visual possibilitou a determinação das seguintes características:

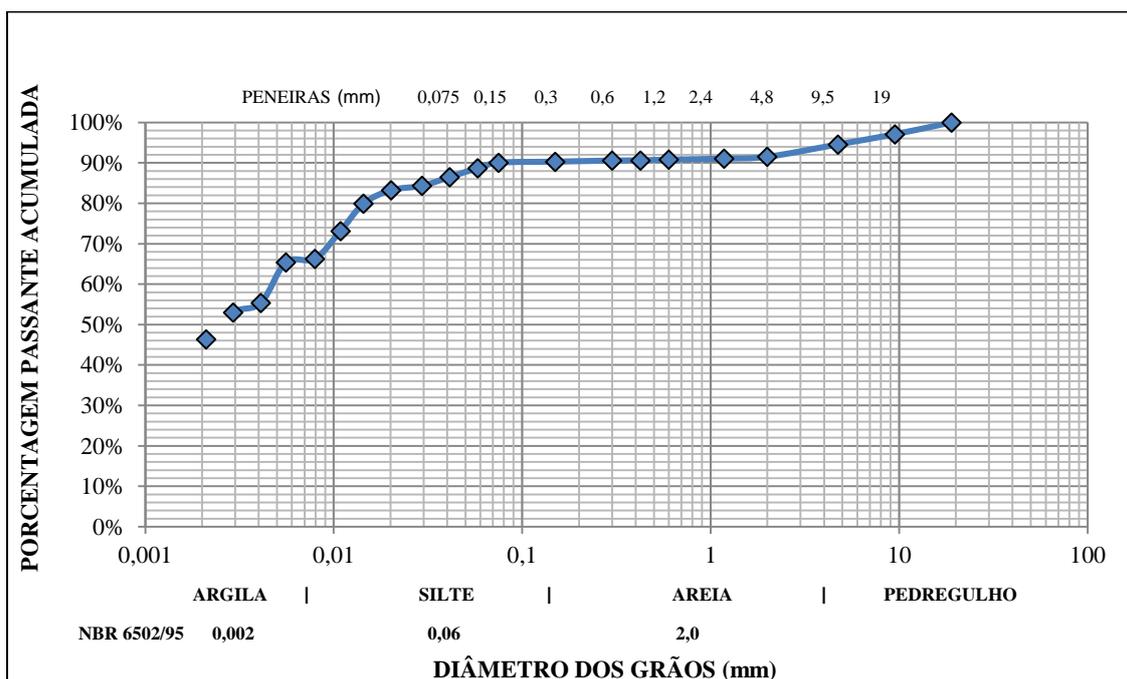
- Pequena presença de matéria orgânica, como raízes;
- Não foi detectado odor estranho;
- Cor ligeiramente avermelhada;
- Considerável coesão entre as partículas;
- Solo ligeiramente úmido ao tato.

#### 4.2.2. Análise Granulométrica

Atendendo as especificações normativas da ABNT NBR 7181:2016, os resultados são expressos pelo Gráfico 1, em que o eixo das abcissas são os valores passantes em cada peneira, em porcentagem, e o eixo das ordenadas são expressos pelas aberturas das peneiras em escala logarítmica.

Com estes resultados, é possível notar que foi traçada uma curva, cuja denominação é curva granulométrica, através da qual é possível determinar a classificação do material em estudo, podendo ser um material graúdo, sendo a maior porcentagem retida na peneira 4,8 mm, e miúdo, sendo a maior porcentagem passante na peneira 4,8 mm (DNIT, 2006).

GRÁFICO 1. Curva Granulométrica do solo



Fonte: Autor, 2018.

Após uma análise da curva e da classificação de acordo com o manual do DNIT, é notável que o solo analisado apresenta uma maior porcentagem de grãos consideravelmente finos, sendo 88,67% de silte e argila, ou seja, ele se enquadra como material miúdo, e a sua maior porcentagem foi a passante na peneira 4,8mm, como apresenta o Quadro 2.

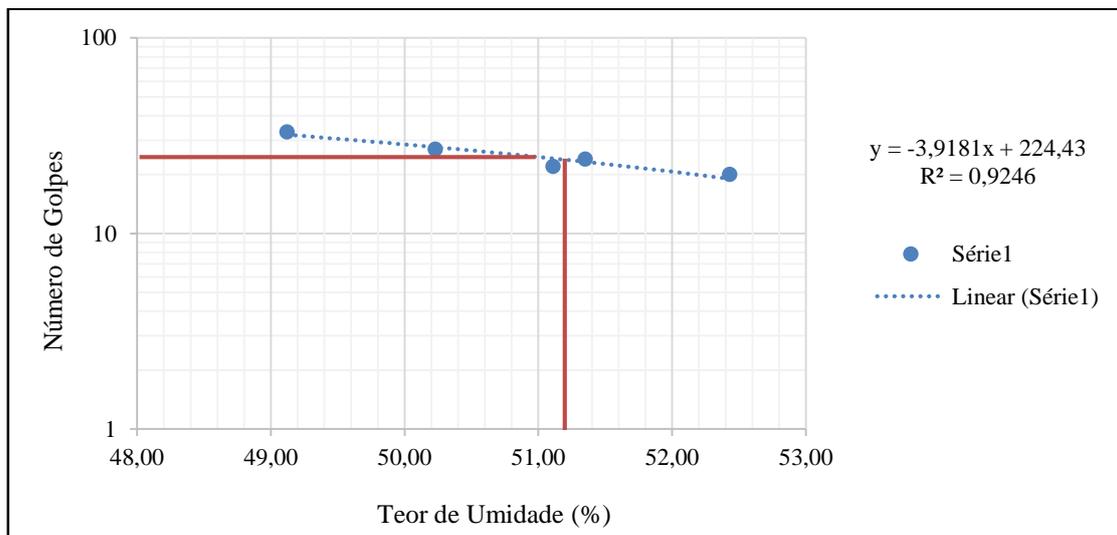
**QUADRO 2.** Resumo de Porcentagens Passantes Acumuladas em cada peneira

PEDREGULHOS	8,50%
AREIA	2,82%
SILTE	42,32%
ARGILA	46,35%

Fonte: Autor, 2018.

#### 4.2.3. Limite de liquidez

O ensaio de limite de liquidez (LL) dos solos, de acordo com as especificações da ABNT NBR 6459:2016, tem o resultado expresso em um gráfico, em que o eixo das abscissas são os números de golpes, em escala logarítmica, e o eixo das ordenadas são as médias dos teores de umidades das amostras ensaiadas. Nota-se no Gráfico 2 que o limite de liquidez do solo é de 51,0%, porcentagem de umidade do solo correspondente a 25 golpes.

**GRÁFICO 2.** Limite de Liquidez do Solo

Fonte: Autor, 2018

#### 4.2.4. Limite de Plasticidade

Para a análise dos resultados, de acordo com a ANBT NBR 7180:2016, apenas as amostras 02, 03, 06 e 07 foram satisfatórias, as demais foram descartadas, não se enquadrando nos cálculos, em que o solo estudado apresenta limite de plasticidade (LP) de 36%, como apresenta o Quadro 3.

QUADRO 3. Limite de Plasticidade

Amostra	W 02 (%)	Média 02	35,835	Índice Consistência	W (%)
02	35,71	5%	1,792	Limite de Liquidez	51,00
03	35,51	LP (%)	36,00	Limite de Plasticidade	36,00
06	34,62	Limite Sup. (%)	37,627	Índice plasticidade	15,00
07	37,50	Limite Inf. (%)	34,043		

Fonte: Autor, 2018.

Com os resultados obtidos a partir do limite de consistência, foi possível determinar o índice de plasticidade (IP), que nada mais é que a porcentagem do LP menos o LL. Este IP representa fisicamente a quantidade de água necessária a ser acrescentada no solo para que este deixe o estado plástico para o estado líquido. São definidos alguns intervalos quanto à classificação do solo e quanto a sua plasticidade, que são as seguintes (KRAINER, 2016):

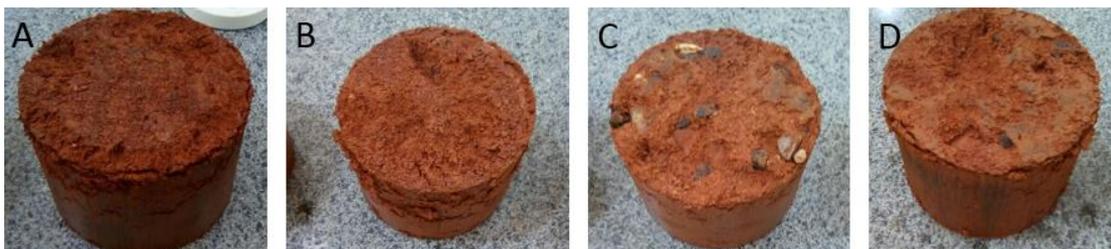
- IP = 0, não plástico;
- $1 < IP < 7$ , pouco plástico;
- $7 < IP < 15$ , plasticidade média;
- IP > 15, muito plástico.

De acordo com o resultado obtido, o IP do solo em estudo é de 15%, sendo uma característica de solo muito plástico, uma vez que tal resultado condiz com a análise da curva granulométrica, que classificou o solo estudado em siltoso e argiloso, pois estes são solos extremamente plásticos.

#### 4.2.5. Reforços de solos com resíduos de mármore e granito

Seguindo os parâmetros exigidos pela ABNT NBR 9895:2016, duas amostras para cada teor de acréscimo foram ensaiadas para a determinação do Índice Suporte Califórnia (ISC) e da expansão do solo. A Figura 9 demonstra imagens de alguns corpos de provas do ensaio CBR.

FIGURA 9. Corpos de prova CBR



Fonte: Autor, 2018.

O Quadro 4 demonstra o resumo dos resultados do ensaio de CBR e as médias calculadas para cada acréscimo, uma vez que foram utilizadas duas amostras para cada acréscimo:

QUADRO 4. Expansão e CBR

Corpo de prova	(%) Acréscimo resíduo	Expansão (%)	Expansão média (%)	CBR (%)	CBR (%) média
02	0%	0,309	0,2135	2,97	3,045
03	0%	0,12		3,12	
06	15	1,29	1,505	5,4	5,615
08	15	1,72		5,83	
09	30	1,18	1,2965	6,4	5,122
10	30	1,38		3,84	

Fonte: Autor, 2018.

Para reforço de subleito, o DNIT (2006) especifica que a expansão do solo deve ser menor que 1%. Verifica-se, nos acréscimos de 15 e 30% de resíduos de mármore e granito, que os valores de expansão são maiores que 1%, invalidando assim o uso dessas composições como reforço de subleito. No entanto, é válida a utilização para subleitos nas duas composições, já que, neste caso, são aceitos valores de expansão menores ou iguais a 2%.

Os resultados encontrados demonstram que o solo puro possui CBR = 3,045% e expansão igual a 0,2135%. Parâmetros definidos pelo DNIT (2006) especificam que, para utilização em subleitos, os solos devem apresentar expansão menor ou igual a 2% e CBR maior ou igual a 2%. Portanto, mesmo sem o reforço com resíduos de granito e mármore, o solo estudado poderia ser utilizado para composição de camadas de subleitos.

Quando se acrescentaram 15% de resíduos de mármore e granito, o CBR elevou-se para CBR de 5,615%, um ganho de resistência de 84,4% em relação ao solo puro. A expansão também aumentou, passando a um valor de 1,505%.

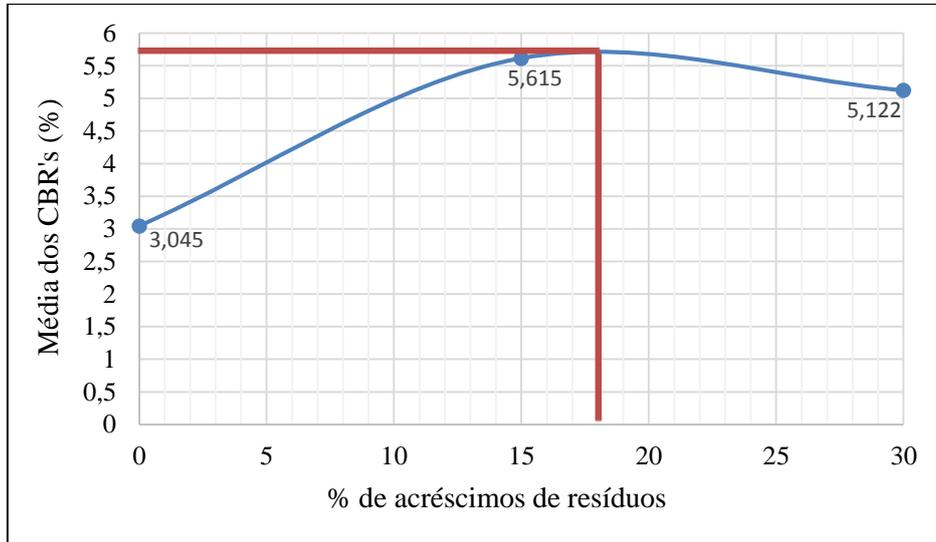
Ao se acrescentarem 30% de resíduos de mármore e granito, o CBR da composição apresentou um aumento de resistência em relação ao solo puro de 68,21%; no entanto, em relação ao acréscimo de resíduos de quinze por cento, houve uma perda de resistência correspondente a 8,78% de queda. Demonstra-se no Gráfico 3 (na página seguinte) a modelagem para os resultados de CBR do solo estudado na característica puro e quando com acréscimo dos resíduos de mármore e granito.

A resistência à penetração CBR para o solo estudado, quando acrescido de resíduos de mármore e granito, não apresentou crescimento linear, tendo seu ponto de curvatura máxima correspondente à 18% de acréscimo de resíduos de mármore e granito em relação à massa de solo seco, obtendo-se CBR igual a 5,75%.

Portanto, o solo reforçado com resíduos de mármore e granito atendeu aos

requisitos de resistência ao CBR e expansão definidos pelo DNIT (2006), comprovando a viabilidade para destinação e aproveitamento adequados desses resíduos da construção civil.

GRÁFICO 3. Evolução do CBR quanto à adição de resíduos



Fonte: Autor, 2018.

### CONCLUSÕES

Após as análises elaboradas na presente pesquisa, pode-se concluir o seguinte:

- (i) O solo utilizado com padrão possui características de alta plasticidade e predominância de materiais finos, por conter 88,67% compostos por silte e argila;
- (ii) Com acréscimo de 15% de resíduos de mármore e granito, houve ganho de 84,4% no valor do CBR comparado ao solo puro;
- (iii) Com acréscimo de 30% de resíduos de mármore e granito, houve ganho de 68,21% no valor do CBR comparado ao solo puro;
- (iv) O reforço de solo com resíduos de mármore e granito atendem aos requisitos técnicos estabelecidos pelo DNIT (2006) para serem utilizadas em subleitos de pavimentos rodoviários;
- (v) Tais composições são viáveis devido ao aproveitamento e destinação adequada de resíduos da construção civil, mitigando o impacto ambiental da extração de solos resistentes (cascalhos);
- (vi) Necessário dar continuidade à pesquisa para avaliação do comportamento de novas composições com granulometrias diferentes dos resíduos, uma vez que, ao se acrescentarem 30% de resíduos, a resistência diminuiu.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15115/2004. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457/2016. Amostra de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459/2016. Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9604/2016. Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas - Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180/2016. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484/2001. Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181/2016. Solos – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- CAPUTO, H. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1988.
- CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. *Pesquisa CNT de rodovias*. Brasília, 2017.
- FRANQUINHO, Granito – Formação, Constituição, Transformação Naturalmente Espaço Web, 2005. Disponível em:< <http://carlos.franquinho.info/2008/01/granito-formacao-constituicao-transformacao/>>.  
Acesso em: 04 de março de 2017.
- GIL, Antônio Carlos. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- GONÇALVES, G. H. MEDEIROS, S. L. J. *Viabilidade Técnica dos Agregados Reciclados obtidos pelo Beneficiamento dos Resíduos Sólidos gerados na Construção Civil em Revestimentos Primários em Camadas de Baixo Volume de Tráfego*. Patos de Minas, 2015.

HORTEGAL, FERREIRA, SANT'ANA. *Utilização de agregados de resíduos sólidos da construção civil em São Luís-MA*. Departamento de Expressões Gráficas e Transportes, Universidade Estadual do Maranhão, Cidade Universitária Paulo VI. São Luís, 2009.

KRAINER, C. W. M. *Laboratório de Mecânica dos Solos – conceito de plasticidade e ensaios de LL, LP e LC*, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná. Paraná, 2016.

QUEIROZ, R. C. *Geologia e Geotecnia Básica para Engenharia Civil*. São Carlos: Editora Rima, 2009.

SANTIAGO, E. *História das estradas*, Infoescola Navegando e Aprendendo 2014. Disponível em: < <http://www.infoescola.com/curiosidades/historia-das-estradas> >. Acesso em: 3 mar. 2017.

SENÇO, W. *Manual de Técnicas de Pavimentação*, 2008. Volume I, 2. ed. São Paulo: Pini, 2008.

SINDUSCON. *Gestão Ambiental de resíduos da construção civil – a experiência do Sindus-Con-SP*. São Paulo, 2005. Disponível em: <[http://www.cuiaba.mt.gov.br/upload/arquivo/Manual\\_Residuos\\_Solidos.pdf](http://www.cuiaba.mt.gov.br/upload/arquivo/Manual_Residuos_Solidos.pdf)>. Acesso em: 6 de março de 2017.

SOUZA, L.A. *Mármore: reação química na natureza*, Brasil Escola, 2017. Disponível em: < <http://brasilecola.uol.com.br/quimica/marmore-reacao-quimica-na-natureza.htm>>. Acesso em: 28 de fevereiro de 2017.