

## ANÁLISE ESTATÍSTICA DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DE UMA BRITA GRADUADA SIMPLES (BGS) EMPREGADA EM CAMPO

**Dennya Fernandes Moreira**

**Teresa Raquel Lima Farias**

**Juceline Batista dos Santos Bastos**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

### RESUMO

O desempenho e a eficiência do pavimento dependem do correto planejamento, projeto e construção. A camada de base tem importante papel no comportamento global da estrutura dos pavimentos. Assim, este artigo objetivou caracterizar física e mecanicamente uma Brita Graduada Simples (BGS) extraída de uma rodovia estadual do Ceará (CE). A investigação foi realizada a partir de materiais coletados em seis pontos do trecho, analisando a variabilidade entre as amostras quanto às características físicas e mecânicas. Como resultados médios, o material denotou uma granulometria com predominância de material fino com Dimensão máxima (Dm) de 25mm, abrasão “Los Angeles” de 37%, absorção de 0,9%, Massa Específica Aparente Seca (MEAS) de 2,12 g/cm<sup>3</sup>, umidade ótima de 7,2%, Índice de Suporte Califórnia (ISC) de 77%, sem expansão e Módulo de Resiliência (medido) de 441 MPa. Os resultados indicam que este material atende aos limites estabelecidos pelo DNIT para aplicação em camadas de base rodoviária.

### ABSTRACT

The pavement performance and efficiency depends on the correct planning, design and construction. The base layer plays an important role in the pavement structure global behavior. This paper aimed at the physical-mechanical characterization of graduated gravel extracted from a state highway of Ceará (CE). The investigation was carried out at six points on the stretch, analyzing the variability between samples as the physical and mechanical characteristics. With average results, the material denoted a grain size with predominance of thin material with maximum size of 25 mm, 37% abrasion, 0.9% absorption, 2.12 g/cm<sup>3</sup> dry bulk density, 7.2% optimum humidity, California Bearing Ratio of 77%, without expansion and resilient modulus (measured) of 441 MPa. The results indicate the material answer the limits established by DNIT for the road base layer application.

### 1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Segundo o DENATRAN (2019), no período 2008-2018, o aumento de veículos nas regiões metropolitanas foi de 12,2% e a nível nacional 11,9%. Essa crescente demanda tem levado os pavimentos a processos de deterioração acelerados, principalmente os pavimentos asfálticos com base granular.

Com a função de resistir e transmitir as tensões verticais e horizontais oriundas do tráfego, a estrutura do pavimento é composta por diferentes camadas, de acordo com os níveis de esforços que cada uma está submetida. Segundo Balbo (2009), cada camada do pavimento possui uma ou mais funções específicas, que devem proporcionar aos veículos as condições adequadas de suporte e rolamento.

A camada de base, objetivo desta pesquisa, é a camada situada abaixo da camada de revestimento asfáltico. Possui função de resistir às cargas atuantes devido ao tráfego e minimizar as deformações de consolidação e os esforços cisalhantes nas camadas subjacentes. Para a camada de revestimento, as características mecânicas da base são essenciais para garantir o controle da magnitude das tensões no revestimento asfáltico, de maneira que não cause trincamento prematuro da camada de superfície (PINTO E PREUSSLER, 2002). Além disso, a permeabilidade da camada de base exerce grande influência no volume de água que infiltra através da superfície.

De acordo com Andrade (2017), as bases granulares, principalmente de Brita Graduada Simples (BGS), constituem-se em um dos materiais mais empregados na execução de pavimentos de comportamento flexível. Camadas granulares têm importante papel no comportamento global da estrutura de pavimentos, especialmente quando possuem revestimentos delgados ou não possuem esses. Para estabelecer métodos de projeto mais

eficientes e critérios construtivos, é necessário que a resposta das camadas granulares sob a ação do tráfego seja bem compreendida e levada em consideração (MALYSZ, 2004).

Segundo Bernucci *et al.* (2010), a BGS consiste em um material com distribuição granulométrica bem-graduada, com diâmetro máximo dos agregados não excedendo a 38 mm e finos entre 3 e 9% (passante na peneira nº 200), que confere um bom intertravamento do esqueleto sólido e uma boa resistência. A maior parte das bases granulares de BGS busca uma distribuição granulométrica próxima à máxima densidade.

Os órgãos rodoviários, como Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes (DNIT), e em nível estadual Secretaria de Infraestrutura (Seinfra), estabelecem critérios de qualidade que normatizam a execução de base e sub-base de BGS, envolvendo características físicas e mecânicas. Além disso, para o dimensionamento de estruturas de pavimentos, utilizam-se no país principalmente dois parâmetros de caracterização mecânica: ISC (DNER, 1994a) usado no dimensionamento convencional do DNER e Módulo de Resiliência (MR), conforme DNIT (2018), adotado no método mecanístico-empírico MeDiNa.

Segundo Malysz (2004), o bom desempenho das camadas granulares, quanto à resistência ao cisalhamento e deformabilidade, não deve ser atribuído exclusivamente a valores elevados de Índice de Suporte Califórnia (ISC) nem à inclusão em determinada faixa granulométrica. Faz-se necessário um avanço no conhecimento do comportamento mecânico do agregado.

De acordo com Bastos (2013), a experiência adquirida pelos diversos órgãos rodoviários no uso de métodos empíricos faz com que os mesmos sejam utilizados até hoje. No entanto, a deterioração prematura dos pavimentos que é atribuída à fadiga dos materiais gerada pela solicitação dinâmica do tráfego tornou necessário o estudo da resiliência dos materiais empregados na pavimentação nacional.

Com o surgimento de patologias precoces no trecho em estudo, constatou-se a necessidade de analisar as camadas do pavimento e os materiais utilizados na sua execução. Com o objetivo de verificar a causa dessas patologias, a pesquisa visou investigar a camada de base do pavimento em estudo, através de caracterização físico-mecânica, além da análise e da variabilidade estatística de parâmetros avaliados entre as amostras.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a caracterização da BGS e análise da variabilidade estatística de parâmetros físicos e mecânicos, foram obtidas seis amostras, denominadas SP1, SP2, SP3, SP4, SP5 e SP6, decorrentes da camada de base de um pavimento asfáltico de uma rodovia estadual na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) no Ceará.

Em laboratório, as amostras foram preparadas seguindo as especificações da DNER (1994a). Na primeira etapa foram realizados os ensaios de caracterização física, seguindo com a realização dos ensaios de caracterização mecânica. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP), da Universidade Federal do Ceará (UFC), com exceção dos ensaios de granulometria e desgastes por abrasão, ambos realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS), do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE (*Campus* Fortaleza).

### 2.1 Caracterização física

Na primeira etapa da pesquisa, foram realizados os ensaios de granulometria, densidade real, densidade aparente, absorção e limite de plasticidade.

Nos ensaios relativos à análise granulométrica das amostras foram realizados procedimentos descritos em DNER (1994b), em que o material retido na peneira de 2 mm foi submetido à peneiramento com a utilização de peneiras com aberturas de malha de 38,10 mm; 25,40 mm; 19,10 mm; 12,27 mm; 9,52 mm; 4,76 mm e 2,00 mm, enquanto que o material passante foi submetido à peneiramento com aberturas de malha de 1,19 mm; 0,590 mm; 0,420 mm; 0,297 mm; 0,149 mm e 0,075 mm. Além disso, foi realizado ensaio de sedimentação para a determinação da granulometria das frações inferiores a 0,075 mm, correspondente aos finos (siltes e argilas), regido pela DNER (1994b).

A partir desses, foram determinados, com base nas curvas granulométricas obtidas para as amostras: a composição granulométrica, o Módulo de Finura (MF) e Dimensão máxima ( $D_m$ ) dos agregados.

A densidade real relaciona a massa de determinado volume de amostra para massa igual volume de água destilada (DNER, 1995). Com a relação entre massas determinou-se a densidade real do agregado miúdo.

Para a determinação da densidade aparente de agregado graúdo e da absorção d'água seguiu-se as especificações de execução de DNER (1998a). A massa mínima para a realização do ensaio foi 3 kg, seguindo as especificações da norma para dimensão máxima característica do ensaio, adotado 19 mm, de acordo com a granulometria do material.

## 2.2 Caracterização mecânica

A análise mecânica das amostras constituiu a segunda etapa da pesquisa, onde foram realizados os ensaios de abrasão “Los Angeles”, compactação, ISC e MR. A moldagem dos Corpos de Prova (CPs) foi realizada na energia Proctor modificada (55 golpes por camada, com soquete de 4,54 kg).

A abrasão dos agregados analisados foi determinada por meio do ensaio de abrasão “Los Angeles” (DNER, 1998b). Cada amostra seguiu uma faixa de graduação A, B, C, D, E, F e G, de acordo com a granulometria predominante em cada amostra. A carga abrasiva também variou em cada amostra de acordo com a graduação.

No ensaio de compactação determinou-se a curva de compactação das amostras, obtendo-se a umidade ótima e massa específica aparente seca máxima correspondente (DNER, 1994c). Vale ressaltar a utilização de apenas um CP para cada amostra que, não alterou a confiabilidade do resultado, visto que todas as amostras são provenientes do mesmo material. Para o ensaio de ISC das amostras, a BGS foi moldada na umidade ótima seguindo as especificações de DNIT (2016).

Quanto ao MR, no Brasil os estados de tensões aplicados nos ensaios de laboratório são comumente definidos por DNIT (2018). Assim, o CP de cada amostra foi moldado na umidade ótima e ensaiado duas vezes. De acordo com Klinsky *et al.* (2012), o ensaio triaxial cíclico pode ser realizado várias vezes no mesmo CP por aplicar tensões que solicitam o material apenas na faixa elástica. Adotou-se a média entre os resultados para cada amostra.

O MR é definido como a relação entre a carga cíclica aplicada e a deformação elástica ou recuperável do material. É um parâmetro que caracteriza o comportamento elástico dos materiais, como solos e britas, sob carregamento repetido, em laboratório, ou pelas ações das cargas dos veículos, repetidas sobre o pavimento. É uma propriedade utilizada no método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos.

Segundo o DNIT (2006) entende-se por solos granulares, para fins de classificação quanto à resiliência, aqueles que apresentam menos de 35% em peso de material passando na peneira de nº 200 (0,075 mm). Ademais, o Grupo A – solo com grau de resiliência elevado – aponta que solos nessa classificação não devem ser empregados em estruturas de pavimentos e constituem subleitos de péssima qualidade; o Grupo B – solo com grau de resiliência intermediário – indica que solos nesse grupo podem ser empregado em estruturas de pavimento como base, sub-base e reforço do subleito, ficando seu comportamento dependente das seguintes condições:  $K_2 \leq 0,5$  para bom comportamento e  $K_2 > 0,5$ , comportamento dependente da espessura da camada e da qualidade do subleito; quanto ao Grupo C – solos com baixo grau de resiliência.

O estado de tensões é um dos fatores que mais influenciam no comportamento resiliente dos materiais granulares. Modelos matemáticos que melhor representam a dependência do MR ao estado de tensões atuante para materiais granulares são definidos principalmente em função das tensões confinantes ( $\sigma_3$ ) (Equação 1) (MEDINA, 1997). O comportamento resiliente da BGS é tipicamente linear e crescente com o incremento de tensão confinante na amostra.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (1)$$

Há ainda o modelo constitutivo para o MR que melhor representa os materiais da Região RMF, dado pela Equação 2 (modelo composto). Em estudos já realizados para solos do estado do Ceará, Souza Junior (2005) concluiu que o modelo composto se mostrou bastante aplicável aos solos ocorrentes nesse estado. Posteriormente outros autores ratificaram essa conclusão (LIMA, 2008; ARAÚJO, 2009; SILVA, 2009; e BASTOS, 2013). Para obtenção dos parâmetros referentes à Equação 2, os resultados do ensaio foram submetidos ao processamento utilizando o programa *LABfit*® Ajustes de Curvas, desenvolvido para tratamento e análise de dados experimentais.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (2)$$

A dependência do MR da BGS, em função da tensão confinante, implica maiores MRs em campo (BALBO, 2009). Ainda de acordo com Balbo (2009), para bases de pavimentos asfálticos, em termos de projeto, trabalha-se com valores de MR entre 100 MPa e 500 MPa.

### 2.3 Análise Estatística de variabilidade

De acordo com Bussab e Moretin (2010) a variabilidade refere-se à distribuição de um conjunto de dados, oferecendo uma maneira de descrever a quantidade de conjuntos de dados diferentes e permite se use estatísticas para comparar seus dados com outros conjuntos de dados. Uma análise descritiva de dados limita-se a calcular algumas medidas de posição e variabilidade, como a média e variância, por exemplo. Quando se procede a uma análise de dados, busca-se alguma forma de regularidade ou padrão (EACH.USP, 2019).

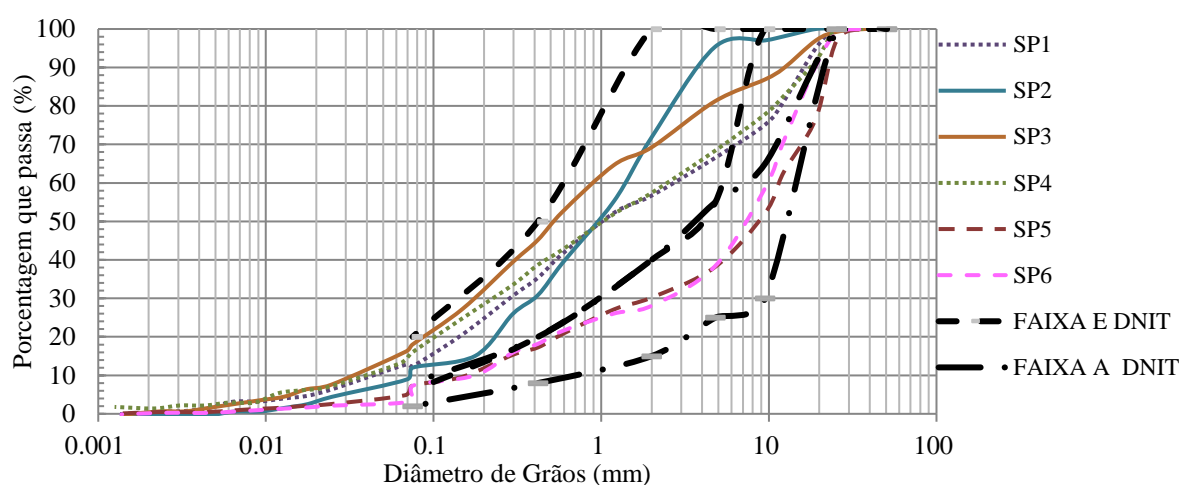
A distribuição normal é uma das mais importantes distribuições de probabilidades da estatística, conhecida também como Distribuição de Gauss ou Gaussiana, e foi desenvolvida pelo matemático francês Abraham de Moivre em 1733. De acordo com Triola (2008), quando a distribuição dos dados é Normal, a média se encontra no centro da distribuição e possui o mesmo valor da mediana e da moda, devido à simetria da curva.

Existem disponíveis alguns testes para avaliar se a distribuição de um conjunto de dados adere à distribuição Normal, neste caso, adotou-se o teste Shapiro-Wilk, considerado o mais eficiente por alguns autores como: Cirillo e Ferreira (2003); Lopes (2010). Para a verificação

de normalidade por meio do método Shapiro-Wilk utilizou-se o *Statistical Package for Social Sciences* (SPSS®). O SPSS® é um pacote estatístico usado para a análise de dados que permite transformar, criar tabelas e gráficos que resumam a informação obtida.

### 3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Com base nos resultados de granulometria por peneiramento e sedimentação, foram elaboradas as curvas granulométricas (Figura 1). Essa figura apresenta também as faixas granulométricas estabelecidas por DNIT (2006), na qual se encaixam alguns dos materiais analisados. Percebe-se granulometria aproximada das amostras SP5 e SP6 e das amostras SP1 e SP4. As amostras SP5 e SP6 se encaixam na faixa A, para alto fluxo de veículos, ou seja,  $N > 5 \times 10^6$ , enquanto que as demais amostras se encaixam na faixa E para baixo fluxo de veículos,  $N < 5 \times 10^6$ . Além da composição granulométrica, a Tabela 1 apresenta o Módulo de Finura (MF) e Dimensão máxima ( $D_m$ ) dos agregados.



**Figura 1:** Curva granulométrica das amostras e faixas do DNIT

Nas amostras SP1, SP2, SP3 e SP4 há predominância de material fino (pó de pedra) e nas amostras SP5 e SP6 há predominância de material mais granular. Quanto a  $D_m$  dos agregados, todas as amostras apresentaram  $D_m$  de 25 mm, com exceção do SP2, com  $D_m$  de 19 mm. Observando os dados de MF, as amostras foram classificadas como areia fina, apresentando  $MF < 2,4$ . De acordo com Bernucci *et al.* (2010) na maior parte das vezes esses finos reduzem a permeabilidade dos materiais e sua rigidez, aumenta sua deformabilidade, sua expansão volumétrica em presença de água, causando também uma redução da sua resistência.

**Tabela 1:** Composição granulométrica das amostras (%), MF e  $D_m$

		SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6
Pó de pedra	< 2,4	57	72	69	58	30	28
Pedra 0	> 2,4 < 9,5	18	25	18	20	22	31
Pedra 1	> 9,5 < 19,0	20	3	10	14	25	32
Pedra 2	> 19,0 < 38,0	5	0	3	8	23	9
	MF	1,42	1,49	1,79	1,50	1,37	1,40
	$D_m$ (mm)	25	19	25	25	25	25

Quanto à densidade real, verificou-se aproximação entre os resultados obtidos de massa específica de partículas, variando de 2,513 g/cm<sup>3</sup> a 2,645 g/cm<sup>3</sup>. No ensaio de Densidade aparente ( $D_{ap}$ ) pode-se observar uma discrepância aproximada de 2% entre os valores extremos, variando de 2,54 a 2,63. Destaca-se que a amostra SP6 não tem parâmetros devido à insuficiência de material para realização do ensaio. Em relação à absorção dos agregados,

todos obtiveram resultados satisfatórios, dentro do limite das especificações para utilização em pavimentos, inferior a 2%. Esses resultados constam na Tabela 2.

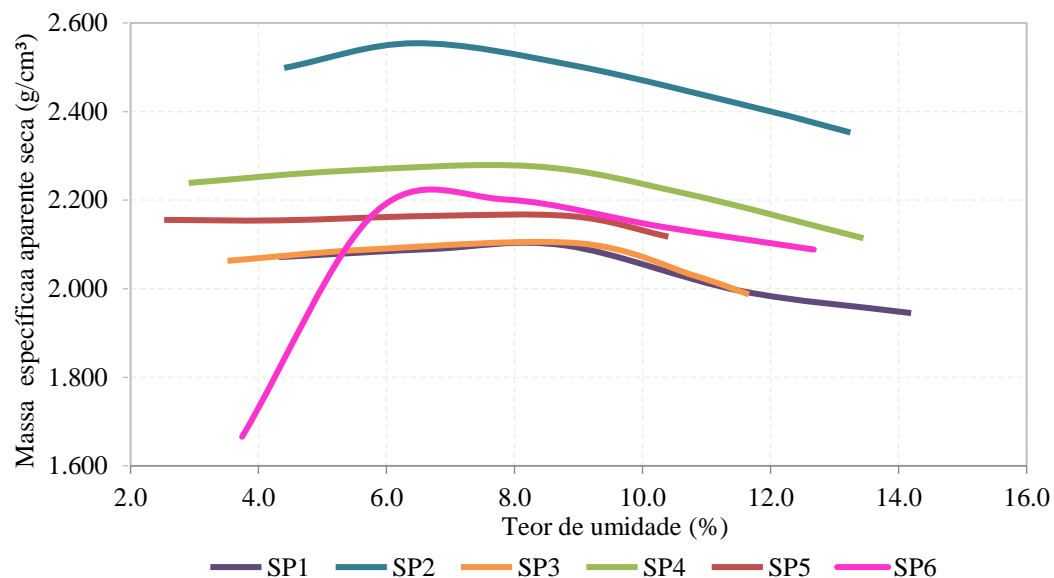
**Tabela 2:** Resultado de densidade real, densidade aparente e absorção das amostras

Ensaio	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6
Densidade Real (Dr)	2,535	2,557	2,513	2,629	2,645	2,620
Densidade aparente do agregado na condição seca em estufa (Dap)	2,54	2,54	2,56	2,63	2,61	-
Absorção (a) (%)	1,1	0,8	1,4	0,8	0,2	-

As amostras foram submetidas ainda ao ensaio de limite de plasticidade (DNER, 1994d), não sendo possível moldar o material. Com esse resultado não se fez necessário determinar o limite de liquidez e o material foi caracterizado como não plástico.

As amostras SP1, SP3 e SP5 foram caracterizadas quanto ao desgaste “Los Angeles”, as demais amostras não foram analisadas por insuficiência de material. Foram obtidos os seguintes resultados: SP1 - 48%; SP3 - 32%; e SP5 - 38%. Considerando as especificações da NBR 11804 (ABNT, 1991), delimitando que bases e sub-bases devem apresentar valores máximos de abrasão de 55% e considerando as especificações do DNIT (2006), para camada de base o desgaste “Los Angeles” deve ser  $\leq 50\%$ , as amostras desta pesquisa mostraram-se dentro dos parâmetros exigidos, podendo ser aplicado para fins de pavimentação.

Quanto aos resultados da caracterização mecânica, as curvas de compactação, os valores de massa específica aparente seca máxima (MEAS) e o teor de umidade ótima ( $H_{ót}$ ) são apresentados na Figura 2 e na Tabela 3, respectivamente. A amostra SP2 apresentou uma MEAS mais elevada (2,55 g/cm<sup>3</sup>), enquanto a SP3 se mostrou semelhante à SP1 quanto à MEAS e  $H_{ót}$ . Destaca-se que as umidades das 6 amostras foram bastante aproximadas.



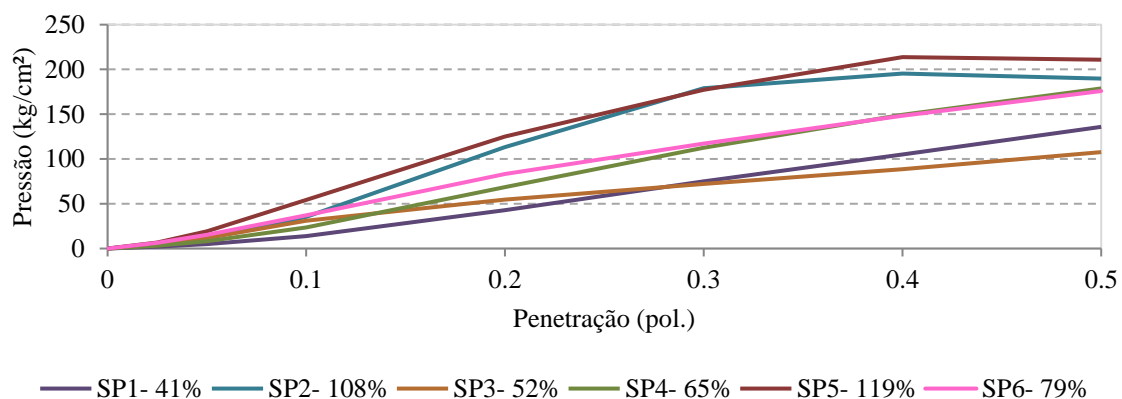
**Figura 2:** Curva de compactação das seis amostras

**Tabela 3:** Resultado das umidades ótimas e das massas específicas secas máximas

Resultados	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6
$H_{ót}$ (%)	7,50	6,00	7,00	7,50	7,00	6,50
MEAS (g/cm <sup>3</sup> )	2,10	2,55	2,10	2,28	2,16	2,20

Na Figura 3 apresenta-se a curva pressão *versus* penetração das amostras e os resultados desse ensaio. Nos resultados de ISC é perceptível a diferença nas respostas das BGS, onde apenas SP2 e SP5 apresentaram resultados esperados considerando a origem do material. É notável ainda, que as amostras SP1 e SP3 obtiveram resultados discrepantes em relação às demais amostras, com ISC muito abaixo do esperado. Segundo DNIT (2006), para camadas de base, o ISC deve ser  $\geq 80\%$ , para qualquer tipo de tráfego, entretanto, poderá ser adotado um ISC de até 60%, quando economicamente justificado, em face da carência de materiais e prevendo-se a complementação da estrutura do pavimento pedida pelo dimensionamento por construção de outras camadas asfálticas. Seguindo essas especificações, quase todas as amostras atendem a tais parâmetros, exceto SP1 e SP3. Tendo em vista que as amostras foram obtidas de uma rodovia já em uso, a justificativa para essa discrepância pode ser atribuída a quantidade de finos, provenientes da quebra do agregado e da percolação de material fino das camadas subjacentes.

Nesse ensaio foi possível determinar ainda que esses materiais não apresentam expansão. Para bases e sub-bases a expansão axial esperada deve ser menor que 0,5%, considerando que a expansão depende da quantidade de poros no material e conforme Bernucci *et al.*, (2010) solos que apresentam valores significativos de expansão sofrem deformações consideráveis ao serem solicitados.



**Figura 3:** Curva pressão *versus* penetração das amostras

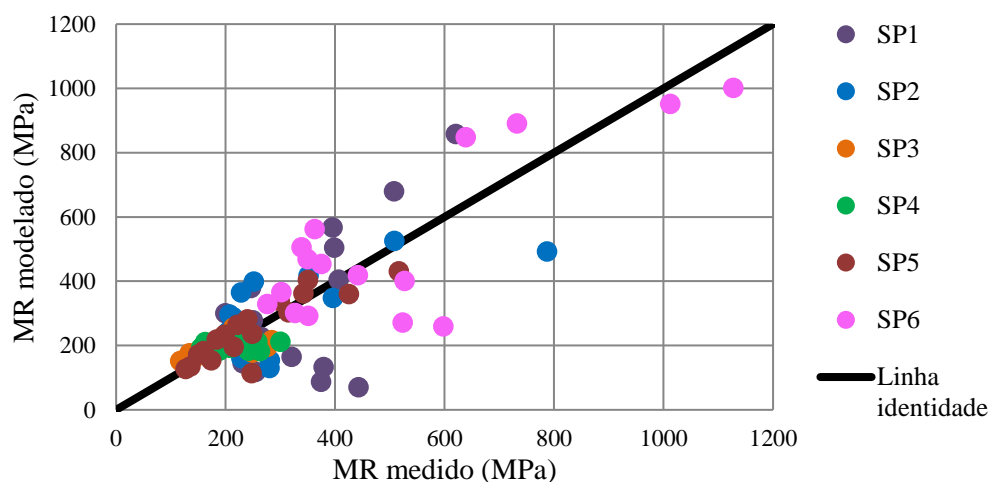
Na Tabela 4 são apresentados resultados do ensaio de MR medido em cada par de tensões durante o ensaio e do MR modelado, por meio dos modelos composto e para materiais granulares. Observa-se para análise do modelo composto o valor de  $K_2$  positivo em todas as amostras com exceção da amostra SP2, indicando que o MR aumenta com o aumento da tensão confinante, e  $K_3$  negativo em todas as amostras, que indica uma diminuição do MR com o aumento da tensão desvio, conforme esperado. Analisando o  $R^2$ , obtido nos dois modelos, percebe-se que o modelo composto fornece um  $R^2$  maior, porém ainda baixos, como a amostra SP4 apresentando  $R^2$  próximo de zero. As amostras mais bem representadas pelo modelo composto foram SP5 e SP6. Foi considerado, com base nas amostras estudadas, o valor médio do MR mais representativo para as amostras SP1 até SP4.

Quanto à classificação resiliente, as amostras SP1, SP5 e SP6 apresentaram um grau de resiliência baixo, correspondente ao Grupo C, que apresentaram baixa deformação, logo é um material utilizável em todas as camadas do pavimento. Já as amostras SP2, SP3 e SP4, a classificação correspondeu ao Grupo B, utilizável como camada de base/sub-base com comportamento dependente da espessura da camada e da qualidade do subleito.

**Tabela 4:** Análises do Módulo de Resiliência

Amostras	Modelos	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	R <sup>2</sup>	MR médio modelado	MR médio medido
SP1	Composto: $MR = 88,57 \times \sigma_3^{0,85} \times \sigma_d^{-1,60}$	88,57	0,85	-1,60	0,64	368	412
	Material granular: $MR = 459,78 \times \sigma_3^{0,90}$	459,78	0,90	-	0,01	358	
SP2	Composto: $MR = 69,98 \times \sigma_3^{-0,07} \times \sigma_d^{-0,53}$	69,98	-0,07	-0,53	0,47	290	296
	Material granular: $MR = 133,77 \times \sigma_3^{-0,25}$	133,77	-0,25	-	0,17	276	
SP3	Composto: $MR = 376,50 \times \sigma_3^{0,35} \times \sigma_d^{-0,15}$	376,5	0,35	-0,15	0,36	199	199
	Material granular: $MR = 374,44 \times \sigma_3^{0,23}$	374,44	0,23	-	0,33	195	
SP4	Composto: $MR = 207,99 \times \sigma_3^{0,12} \times \sigma_d^{-0,13}$	207,99	0,12	-0,13	0,07	196	196
	Material granular: $MR = 207,95 \times \sigma_3^{0,03}$	206,95	0,03	-	0,01	192	
SP5	Composto: $MR = 1255,45 \times \sigma_3^{0,46} \times \sigma_d^{0,16}$	1255,45	0,46	0,16	0,78	960	979
	Material granular: $MR = 1060,70 \times \sigma_3^{0,53}$	1060,70	0,53	-	0,75	774	
SP6	Composto: $MR = 606,71 \times \sigma_3^{0,91} \times \sigma_d^{-1,08}$	606,71	0,91	-1,08	0,72	552	562
	Material granular: $MR = 971,05 \times \sigma_3^{0,24}$	971,05	0,24	-	0,09	505	

Ao comparar o valor de MR médio medido para cada par de tensões ao modelo composto, observa-se comportamento esperado de aproximação dos resultados. Os pontos, em ambos modelos, apresentaram resultado de MR entre  $100 \leq MR \leq 500$  MPa. Segundo Fernandes (2000), é recomendado manter o módulo da BGS superior a 300 MPa, pois, abaixo deste valor, os indicadores estruturais (deflexão elástica máxima na superfície, deformação específica de tração e tensão de tração no fundo do revestimento, além de deformação específica vertical no topo do subleito) tendem a crescer rapidamente com as solicitações do tráfego. Na Figura 4, apresenta-se um comparativo dos valores de MR calculados pela equação do modelo composto e MR medido para cada par de tensões. Verifica-se que as amostras SP5 e SP6 são as que mais se distanciam da aproximação dos dados.



**Figura 4:** Identities do modelado composto *versus* medido

### 3.1 Análises Estatísticas de variabilidade

O teste de normalidade foi realizado no software *IBM SPSS®* adotando o método Shapiro-Wilk para análise do resultado das amostras. Os resultados obtidos após o processamento mostraram um nível de significância  $p$  (normal)  $> 0,05$  para todos os ensaios de caracterização analisados, sendo esses: granulometria, densidade real, densidade aparente, absorção, abrasão, compactação Proctor e ISC, ou seja, os dados não diferem de uma distribuição normal. São apresentados os resultados das médias calculadas e do desvio padrão para cada variável na Tabela 5. Os valores de média e desvio padrão foram obtidos com uma



confiabilidade de 95% nos resultados. Na Tabela 6 apresenta-se a composição granulométrica média das amostras.

**Tabela 5:** Resultado pós-análise da variabilidade - IBM SPSS®

Estatística	MEAS (g/cm <sup>3</sup> )	Hót (%)	Densidade Real Agr. Miúdo	Densidade Ap. Agr. Graúdo	Absorção (%)	Abrasão (%)	ISC (%)
Média	2,120	7,2	2,564	2,57	0,9	37	77
Limite inferior	2,033	6,4	2,388	2,47	-0,7	14	45
Limite superior	2,216	7,9	2,740	2,67	2,5	60	109
Variância	0,00	0,08	0,01	0,00	0,42	0,90	9,60
Erro Padrão	0,03	0,29	0,07	0,04	0,65	0,95	3,10

**Tabela 6:** Composição granulométrica média- IBM SPSS®/Autor (2019)

Materiais	N	Média	Desvio Padrão
Pó de Pedra	6	52,2	19,0
Brita 0	6	22,3	5,0
Brita 1	6	17,3	10,5
Brita 2	6	8,2	8,1
Brita 3	6	0	0,0

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo objetivou a análise estatística da caracterização física e mecânica de materiais provenientes de uma camada de base, que apresentou defeitos precocemente. Quanto aos resultados físicos, têm-se: i) o material apresenta um granulometria com maior predominância de material fino e miúdo, material de enchimento, e a composição granulométrica apresentou 52% de pó-de-pedra, justificado pelo fato de ser um material que foi retirado de um pavimento em uso, compactado e que já recebeu as solicitações de tráfego, além da possível percolação de materiais finos das camadas subjacentes; ii) a média da absorção dos agregados foi de 0,9%, resultado aceitável para utilização em pavimentos, que deve ser inferior a 2%; iii) a densidade real apresentou média de 2,564 e, quando comparado aos resultados extremos, apontou uma diferença de aproximadamente 2,5%; iv) a média da densidade aparente foi de 2,57 e uma discrepância aproximada de 2% entre os valores extremos. É perceptível uma aproximação dos resultados de Dap com os resultados de Dr, no resultado final e nas amostras individuais. Quanto aos resultados mecânicos, têm-se: i) a resistência abrasiva do material foi de 37% com um desvio de 9%, vale ressaltar que no ensaio de abrasão obteve-se desvio padrão elevado, justificado por ter sido analisado apenas com três amostras; ii) para a compactação, o resultado médio obtido foi uma MEAS de 2,120 g/cm<sup>3</sup> e Hót de 7,2%, sendo o ensaio que obteve menor diferença entre as amostras ensaiadas. A análise do ISC apresentou uma média final de 77%, sendo o ensaio que obteve maior diferença entre as amostras, variando cerca de 90% entre os valores extremos e a média. Ainda assim apresentou resultado médio acima do limite estabelecido pelos órgãos competentes (60%). Para o item iii) MR, o valor final medido no ensaio foi 441 MPa, para os modelados composto e base granular, 428 MPa e 383 MPa, respectivamente, com coeficiente de determinação, R<sup>2</sup> maior para modelado composto, denotando sua melhor representação para a Região Metropolitana de Fortaleza, cabendo ainda uma análise mais detalhada, pois os modelos testados apresentaram valores baixos de R<sup>2</sup>.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, L. R. (2017). *Comparação do comportamento de pavimentos asfálticos com camadas de base granular, tratada com cimento e com estabilizantes asfálticos para tráfego muito pesado*. Dissertação de mestrado em Engenharia de Transporte, Universidade de São Paulo. São Paulo.

- Balbo, T. J. (2009). *Pavimentação Asfáltico: materiais, projetos e restauração*. 2ª edição. Oficina de Textos, São Paulo.
- Bastos, J. B. S. (2013). *Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da Região Metropolitana de Fortaleza*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- Bernucci, L.B.; Motta, L.M.G.; Ceratti, J.A.P.; Soares, J.B. (2010). *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. 2ª Edição. Petobras: Abeda, Rio de Janeiro.
- Bussab, W. O. Morettin, P. A. (2010) *Estatística Básica*. 6ª edição. Editora Saraiva, São Paulo.
- Cirillo, M. A.; Ferreira, D. F. (2003). *Extensão do Teste para Normalidade Univariado Baseado no Coeficiente de Correlação Quantil-Quantil para o Caso Multivariado*. Rev. Mat. Estat., v. 21, n.3, p.67-84. São Paulo.
- DENATRAM (2019) - *Mapa da motorização individual no Brasil – Relatório 2019*. Departamento Nacional de trânsito Rio de Janeiro, RJ.
- DNER (1994a) ME 041 - *Solos – Preparação de amostras para Ensaio de Caracterização*. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Brasília, DF.
- DNER (1994b) ME 051 - *Solos – Análise Granulométrica*. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Brasília, DF.
- DNER (1994c) ME 162 - *Solos – Compactação utilizando amostras trabalhadas*. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Rio de Janeiro, RJ.
- DNER (1994d) ME 082 - *Solos – Determinação do limite de plasticidade- Método de ensaio*. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Rio de Janeiro, RJ.
- DNER (1995) ME 084 - *Agregado miúdo – Determinação da densidade real*. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Brasília, DF.
- DNER (1998a) ME 195 - *Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo*. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Brasília, DF.
- DNER (1998b) ME 035 - *Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”*. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT (2006) *Manual de Pavimentação*. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT (2016) 172 ME - *Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio*. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT (2018) ME 134 - *Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura dos Transportes (DNIT) – Guia para Utilização do Método Mecânico-Empírico de Dimensionamento (versão provisória) Projeto TED nº682/2014, Processo nº 50607.002043/2013-00, 2018.
- EACH.USP (2019) *Estatística Descritiva*. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.each.usp.br/rvicente/Guedes>>, acesso em: 16 de set. de 2019.
- Fernandes, I. S. (2000). *Contribuição à caracterização do comportamento mecânico da camada de brita graduada “in situ”*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- Klinsky, L. M. G.; Furlan, A. P. e Fabbri, G. T. P. (2012). *Estudo do efeito da adição de areia de fundição e cal em algumas propriedades de solos argilosos*. Transportes, v. 20, p. 22-30.
- Lima, J. H. C. (2008). *Utilização de Resíduos de Construção e Demolição para pavimentos urbanos da Região Metropolitana de Fortaleza*. Dissertação de Mestrado. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- Lopes, M. M. (2010). *Programa Interlaboratorial de Agregados e Misturas Asfálticas da REDE ASFALTO N/NE*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. Departamento Engenharia de Transporte. Fortaleza, CE.
- Malysz, R. (2004). *Comportamento Mecânico de Britas Empregadas em Pavimentação*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Departamento Engenharia de Transporte. Porto Alegre, RS.
- Medina, J. (1997) *Mecânica dos pavimentos*. Editora UFRJ. Rio de Janeiro.
- Pinto, S.; Preussler, E. (2002) *Pavimentação Rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis*. 2ª edição. Rio de Janeiro, RJ.