



## **Substituição parcial de agregados pétreos naturais por agregados reciclados de revestimento cerâmico em uma mistura para aplicação em camada de base de pavimento**

Danieli Bernardo <sup>1</sup>,

Luiz Renato Steiner <sup>2</sup>,

**Resumo:** Devido à geração desenfreada de resíduos, e consequente saturação dos locais específicos de descarte, buscam-se cada vez mais alternativas que visam dar novas utilizações a estes materiais. Em pavimentação, a utilização de resíduos contribui também para a diminuição no uso de recursos naturais, promovendo uma desaceleração no processo de exploração. Neste contexto, este estudo tem como objetivo principal avaliar a substituição parcial dos agregados pétreos naturais por agregados reciclados de revestimento cerâmico (ARRC) na elaboração de uma mistura (BGS+ARRC) para possível utilização como camada de base de pavimento. Nesta mistura (BGS+ARRC), 42,32% dos agregados pétreos naturais foram substituídos pelo ARRC. Os ensaios de granulometria com os agregados possibilitaram o enquadramento da mistura (BGS+ARRC) na faixa granulométrica “A” do DNIT. Para fins de comparação, foram elaboradas também misturas de Brita Graduada Simples - BGS (Referência). Os ensaios físicos demonstraram que o ARRC utilizado apresenta maior porosidade quando comparado ao agregado pétreo natural. E isto é uma característica própria dos revestimentos cerâmicos, demonstrada por sua absorção que, dependendo do tipo de revestimento, pode apresentar teores entre 0 à maiores que 20%. Esta característica do ARRC pôde ser observada também nos resultados obtidos nos ensaios de abrasão “Los Angeles” e degradação do agregado após a compactação, onde o ARRC apresentou maior desgaste e quebras que os agregados pétreos naturais. No ensaio de índice de fôrma do ARRC, verificou-se a forma cúbica predominante e pouca quantidade de partículas lamelares. Os ensaios mecânicos demonstraram que a mistura (BGS+ARRC) demanda maior quantidade de água para atingir sua máxima densificação, porém esta apresenta valores superiores de ISC/CBR em comparação com a BGS (Referência), visto que este é um parâmetro importante para avaliar sua utilização em camadas de pavimento. Por fim, após a verificação dos resultados dos ensaios realizados com a mistura (BGS+ARRC) em estudo, foi possível afirmar que esta alcançou os objetivos esperados, possuindo características que habilitam seu uso em camada de base de pavimento.

**Palavras-chave:** pavimentação; camada granular; base; reutilização; cerâmica de revestimento.

**Partial replacement of natural stone aggregates with recycled ceramic tile aggregates in a mixture for application in the base layer of pavement**

<sup>1</sup> Acadêmica, Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, danybernardo07@hotmail.com.

<sup>2</sup> Professor, Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, luizsteiner@unesc.net.

**Abstract:** Due to the rampant generation of waste and the consequent saturation of specific disposal sites, more alternatives are sought that aim to give new uses to these materials. In paving, the use of waste also contributes to reducing the use of natural resources, promoting a slowdown in the exploration process. In this context, this study has as main objective to evaluate the partial replacement of natural aggregate pieces by recycled aggregates with ceramic tile (ARRC) in the preparation of a mixture (BGS + ARRC) to use as the floor base. In this mixture (BGS + ARRC), 42.32% of the natural stone aggregates were replaced by ARRC. Granulometry tests with enabled aggregates or framing the mixture (BGS + ARRC) in the granulometric size Range “A” of the DNIT. For comparison purposes, mixtures Simple Graduated Gravel – BGS (Reference) were also prepared. Physical tests have shown that the ARRC used has greater porosity when compared to the natural stone aggregate. And this is a characteristic of ceramic tiles, demonstrated by their absorption, which, depending on the type of tile, can present contents between 0 to greater than 20%. This characteristic of the ARRC could also be seen in the results obtained in the “Los Angeles” abrasion tests and degradation of the aggregate after compaction, where the ARRC showed greater wear and breakage than the natural stone aggregates. In the ARRC form index test, the predominant cubic shape and a small number of lamellar particles were found. The mechanical tests demonstrated that the mixture (BGS + ARRC) demands a greater amount of water to reach its maximum densification, however this one presents superior values of ISC / CBR in comparison with the BGS (Reference), since this is an important parameter to evaluate its use in pavement layers. Finally, after verifying the results of the tests performed with the mixture (BGS + ARRC) under study, it was possible to state that it achieved the expected objectives, having characteristics that enable its use in the base layer of pavement.

**Key-words:** paving; granular layer; base course; reuse; ceramic tile.

## Introdução

Utilizando de materiais e estruturas que apresentam resistência aos esforços proporcionados pela ação do tráfego juntamente com condições climáticas, a pavimentação tem como objetivo proporcionar segurança e conforto, e tudo isto a um mínimo custo possível (BALBO, 2007).

Devido à grande quantidade de materiais consumidos pelas obras de pavimentação e à possibilidade de emprego de agregados com diferentes granulometrias, a utilização de materiais reciclados nas camadas de pavimento, principalmente os provenientes da construção civil, pode ser uma alternativa aos materiais convencionais, especialmente pelo fato de os agregados recicláveis apresentarem um melhor custo benefício em comparação com os agregados naturais (MOTTA, 2005).

Embora construções antigas utilizassem tintas à base de chumbo em sua composição e, recentemente, telhas contendo amianto, Pinto (1999) sugere que a maioria dos resíduos de construção e demolição (RCD) são de baixa periculosidade, porém o problema está no excessivo volume gerado e demonstra que este tipo de resíduo representa a maior parte dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados pelas cidades brasileiras de pequeno e médio porte, ressaltando a importância da procura por novas alternativas de reaproveitamento desses resíduos.

Dentre os resíduos gerados pelas construções, podemos dar destaque aos resíduos de cerâmica de revestimento, visto que o Brasil é um dos principais produtores e consumidores de revestimento cerâmico, ocupando atualmente a terceira posição mundial em produção e a segunda em consumo, além de exportar o produto para diversos países, conforme a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres – ANFACER (2020).

Segundo a Resolução do CONAMA nº 307/2002, as placas de revestimento cerâmico pertencem à Classe A – Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregado, não sendo passíveis de apresentar periculosidade ou toxicidade. Portanto, este material pode ser utilizado em contato com o solo, sem causar prejuízos ao meio ambiente.

Desta maneira, o reaproveitamento destes resíduos em pavimentação pode colaborar para a redução da quantidade descartada, muitas vezes em locais inadequados. Além disso, poderá desacelerar o processo de exploração das jazidas, já que este resíduo poderá substituir um material proveniente de uma fonte não renovável (BRASILEIRO, 2015), contribuindo para a preservação dos recursos naturais e redução do impacto ambiental. Consequentemente, com a diminuição do uso de agregados naturais, pode haver redução nas emissões de gases poluentes e gastos com energia para sua extração e beneficiamento.

Por fim, visando dar nova utilização aos resíduos de cerâmica de revestimento e, desta forma, contribuir para a preservação ambiental, este estudo tem como objetivo principal avaliar, por meio de ensaios físicos e mecânicos, a atuação dos agregados reciclados de revestimento cerâmico como substituto parcial dos agregados pétreos naturais em uma mistura de base granular de brita graduada simples (BGS) para possível uso em camada de pavimento.

## Materiais e Métodos

A fim de avaliar a utilização de Agregados Reciclados de Revestimento Cerâmico (ARRC) na mistura de Brita Graduada Simples (BGS), o presente estudo seguiu as etapas do fluxograma apresentado na Figura 1 abaixo:

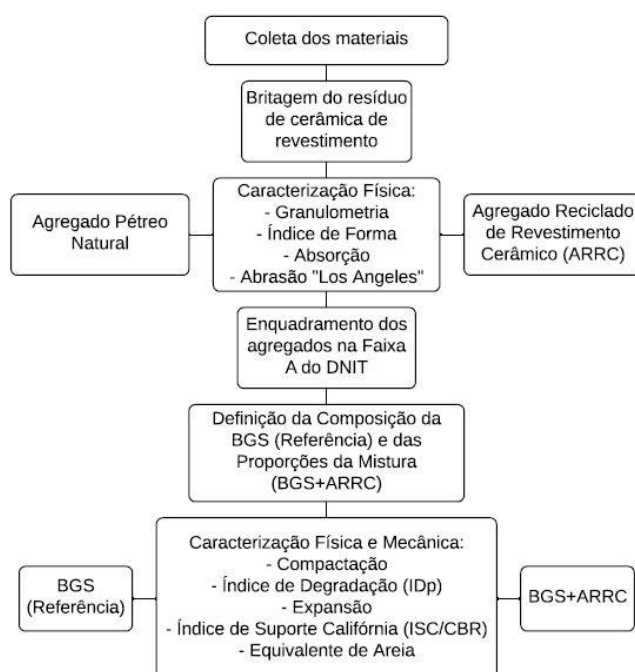


Figura 1. Fluxograma com as etapas do estudo

Os materiais utilizados foram: agregados pétreos naturais (em diferentes frações granulométricas, para posterior elaboração da composição de BGS) e resíduos de cerâmica de revestimento, compostos por variados tipos de revestimentos cerâmicos, como porcelanato, grés, semi-grés, semi-poroso e azulejo, em proporções não mensuradas quanto ao tipo.

Os agregados pétreos foram fornecidos por uma empresa de mineração localizada em Urussanga – SC e os resíduos de cerâmica de revestimento foram coletados em diversas obras situadas no município de Forquilha – SC.

Embora as placas dos revestimentos já estivessem quebradas, estas possuem dimensões variadas e significativamente grandes. Portanto, foi necessário realizar, previamente, uma quebra com marreta e, na sequência, foram encaminhados ao IDT – Instituto de Engenharia e



Tecnologia, localizado no IPARQUE – Parque Científico e Tecnológico da UNESC, situado em Criciúma – SC, onde passaram por um processo de britagem.

Com o intuito de utilizar poucos recursos energéticos e enquadrar o resíduo na faixa de projeto adotada, foi utilizado somente o britador de mandíbula com abertura de 19 mm a fim de gerar agregados que se enquadrem como brita 1 (de 9,5 a 19 mm), pedrisco (de 4,8 a 9,5 mm) e pó de pedra (menor que 4,8 mm), dimensões de partículas utilizadas nesta pesquisa.

Os agregados reciclados de revestimento cerâmico (ARRC) resultantes da britagem, bem como os agregados pétreos naturais, foram encaminhados ao Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) do IPARQUE, onde foi realizado os ensaios de caracterização física para ambos, listados na tabela 1 abaixo:

Tabela 1. Ensaios de caracterização física dos agregados e métodos utilizados

| Ensaio                 | Método             |
|------------------------|--------------------|
| Análise Granulométrica | ABNT NBR 7181/2018 |
| Índice de Forma        | ABNT NBR 7809/2019 |
| Absorção               | DNER-ME 081/1998   |
| Abrasão Los Angeles    | DNER-ME 035/1998   |

Primeiramente foi realizada a granulometria por peneiramento de ambos os agregados, para definição das porcentagens em peso das diferentes frações constituintes do material (DNIT, 2006), para posterior enquadramento na faixa adotada.

O índice de forma foi determinado por meio da média relacionada ao comprimento e espessura dos agregados com base nas proporções de cada fração dos mesmos utilizada no ensaio, conforme a ABNT NBR 7809/2019. Não é recomendável a utilização de partículas com forma lamelar nas camadas de um pavimento, devido à sua tendência ao fracionamento após a aplicação de uma carga, ocasionando mudanças no arranjo da estrutura da camada e até mesmo patologias (MOTTA, 2005).

A absorção de água dos agregados foi determinada a partir do aumento de sua massa após imerso em água em relação a sua massa seca inicial (DNER ME 081/1998). Através da

absorção é também possível verificar a porosidade do agregado, característica importante visto que durante a britagem, a tendência de uma rocha é romper nas regiões com maior quantidade de vazios (ORCHARD apud BALBO, 2007).

O ensaio de Abrasão “Los Angeles” foi realizado na graduação B, escolhida com base na granulometria mais utilizada neste estudo. Os agregados foram colocados na máquina “Los Angeles” juntamente com as 12 esferas de aço, onde verificou-se o desgaste sofrido pelo agregado. Conforme Bernucci et al (2008), os agregados são suscetíveis a quebras e abrasão durante seu manuseio e execução das camadas estruturais de um pavimento, assim como durante a ação do tráfego, devendo estes ser resistente à estas solicitações.

Após a realização dos ensaios de caracterização dos agregados separadamente, procedeu-se com a elaboração da composição granulométrica da mistura, que foi definida após o enquadramento dos agregados na curva da faixa granulométrica A do DNIT. As composições granulométricas da mistura de BGS (Referência) e da mistura (BGS+ARRC) utilizadas neste estudo estão apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2. Composição granulométrica da mistura de BGS (Referência) e da mistura (BGS+ARRC)

|                         | <b>Brita 1 (%)</b> | <b>Pedrisco (%)</b> | <b>Pó de pedra (%)</b> |
|-------------------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| <b>BGS (Referência)</b> | 41                 | 10                  | 49                     |
| <b>BGS+ARRC</b>         | 25                 | 35                  | 40                     |

Para a elaboração dos corpos de prova de BGS (Referência) foi utilizado 100% de agregados pétreos naturais. Já para os corpos de prova da mistura (BGS+ARRC), 42,32% dos agregados pétreos da mistura foram substituídos pelo agregado reciclado de revestimento cerâmico (ARRC), sendo os agregados retidos na peneira 4,80 mm substituídos integralmente.

Na Tabela 3 consta a faixa granulométrica utilizada na mistura (BGS+ARRC) bem como os percentuais utilizados de cada agregado (pétreo natural e ARRC) em cada peneira, considerando o percentual retido na mistura de cada um.

A Figura 2 mostra a composição da BGS (Referência) e da mistura (BGS+ARRC), elaboradas para a posterior realização dos ensaios físicos e mecânicos.

Tabela 3. Granulometria da mistura (BGS+ARRC) e percentuais de cada agregado utilizado na mistura

| Peneiras     |        | Granulometria (BGS+ARRC) |             | Percentual na mistura (Retido) |               |
|--------------|--------|--------------------------|-------------|--------------------------------|---------------|
| mm           | ASTM   | Passante (%)             | Retido (%)  | Agregado Pétreo Natural        | ARRC          |
| 50,80        | 2"     | -                        | -           | -                              | -             |
| 38,10        | 1.1/2" | -                        | -           | -                              | -             |
| 25,40        | 1"     | -                        | -           | -                              | -             |
| 9,50         | 3/8"   | 61,3                     | 38,7        | 47,49%                         | 52,51%        |
| 4,80         | #4     | 49,0                     | 12,3        | 0,00%                          | 100,00%       |
| 2,00         | #10    | 27,1                     | 21,9        | 75,59%                         | 24,41%        |
| 0,42         | #40    | 12,7                     | 14,4        | 80,18%                         | 19,82%        |
| 0,075        | #200   | 3,7                      | 9,0         | 88,23%                         | 11,77%        |
| <b>Total</b> |        |                          | <b>100%</b> | <b>57,68%</b>                  | <b>42,32%</b> |

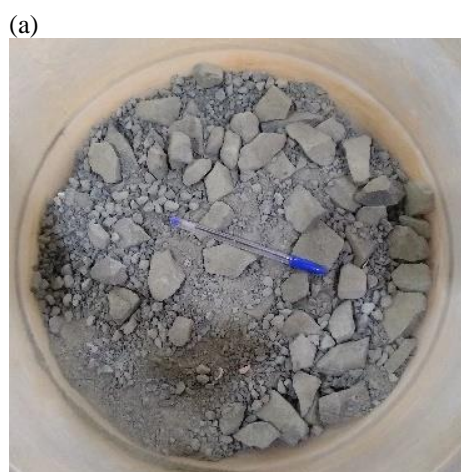


Figura 2. Composição da (a) BGS (Referência) e (b) BGS+ARRC

Para a BGS (Referência) e para a mistura (BGS+ARRC), foram executados os ensaios, seguindo os respectivos métodos, apresentados na Tabela 4:

Tabela 4. Ensaios de caracterização física e mecânica realizados para a BGS (Referência) e para a mistura (BGS+ARRC)

| Ensaio  | Método             |
|---|--------------------|
| Compactação                                       | ABNT NBR 7182/2016 |
| Índice de Degradação (IDp)                        | DNER-ME 398/1999   |
| Expansão e Índice de Suporte Califórnia (ISC/CBR) | DNER-ME 172/2017   |
| Equivalente de areia                              | DNER-ME 054/1997   |



O ensaio de compactação foi executado na energia Modificada e foi utilizado amostras não trabalhadas. Por meio deste ensaio foi determinado o teor de umidade ótima e a máxima densidade seca aparente das amostras de BGS (Referência) e da mistura (BGS+ARRC). A compactação provoca o aumento da massa específica aparente do material, por meio da aplicação de forças que expulsam o ar e fazem com que as partículas do material entrem em maior contato e, desta forma, se obtenha uma máxima estabilidade e diminuição nos recalques decorrentes do tráfego (DNIT, 2006).

Para determinar o índice de degradação da BGS (Referência) e da mistura (BGS+ARRC), um corpo de prova do ramo seco de cada ensaio de compactação foi destorroado e levado à estufa para secagem. Em seguida, foi realizado a granulometria por peneiramento e comparado à granulometria inicial (antes da compactação).

O Índice de Suporte Califórnia (ISC/CBR) foi verificado através da leitura em função da penetração do pistão no corpo de prova e de um tempo especificado para o ensaio (DNER-ME 172/2016), após os corpos de prova ficarem submersos em água por 96 horas. A expansão foi verificada durante esse período através de um extensômetro analógico acoplado aos corpos de prova submersos.

O ensaio de equivalente de areia é utilizado no controle de finos de materiais granulares e foi determinado pela relação entre a altura de areia depositada após 20 minutos de sedimentação e a altura de areia depositada mais a de finos (silte e argila), pelo mesmo período, numa solução aquosa de cloreto de cálcio (DNIT, 2006).

Após cada ensaio, os resultados foram comparados entre si e avaliados segundo os parâmetros apresentados pela Especificação Técnica do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo DER/SP ET-DE-P00/008 – Sub-base ou Base de Brita Graduada.

## **Resultados e Discussões**

Com os resultados obtidos por meio do ensaio de granulometria dos agregados (pétreos naturais e ARRC), a composição granulométrica da mistura estudada (BGS+ARRC) foi ajustada às proporções da curva granulométrica da Faixa A do DNIT, conforme Figura 3 abaixo:

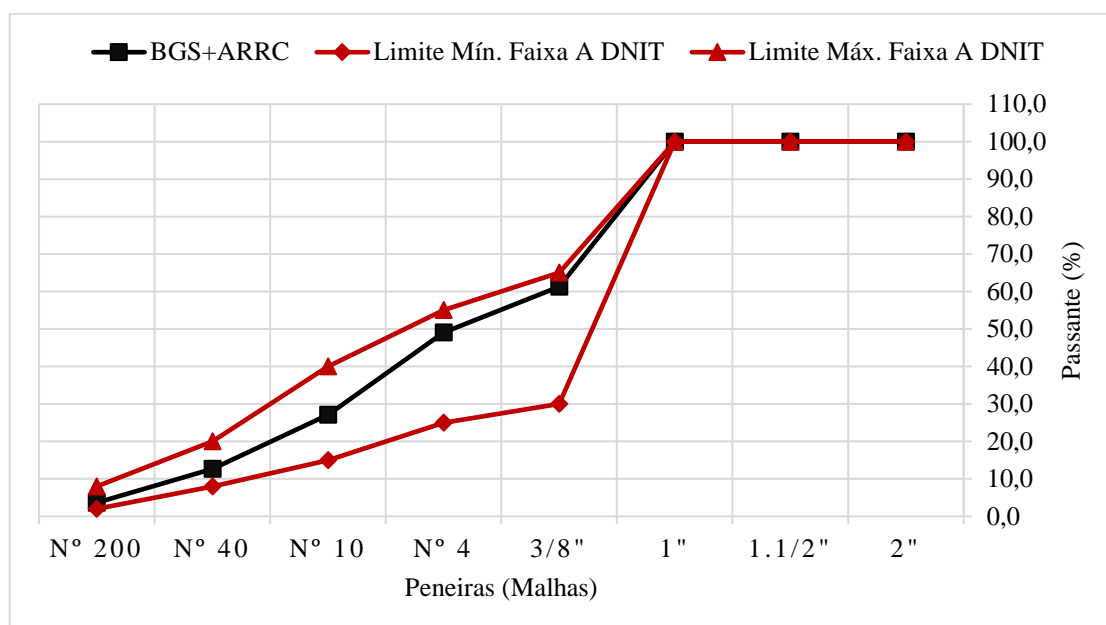


Figura 3. Distribuição granulométrica da mistura BGS+ARRC enquadrada na Faixa A do DNIT

É possível verificar que, segundo a forma da curva, foi utilizado uma mistura com distribuição granulométrica bem graduada e contínua, com 3,67% de finos (passante na peneira Nº 200), o que confere um bom intertravamento das partículas e uma boa resistência (BERNUCCI et al, 2008).

Conforme observado na Tabela 3, o ARRC gera uma quantidade muito pequena de finos quando processado somente no britador de mandíbula, sendo necessário, para o enquadramento na faixa adotada, compensar a ausência dessas frações mais finas pelo agregado pétreo natural. Essa dificuldade em gerar finos do ARRC, se deve ao processo de sinterização aplicado às peças cerâmicas durante sua fabricação, que é definido como um processo de eliminação dos vazios existente entre um conjunto de partículas, tornando-as resistentes e resultando em uma estrutura mais rígida e consideravelmente densa (SILVA, 1998).

Para a geração de maior quantidade de finos seria necessário utilizar outros britadores, como o britador de impacto e o moinho de martelo, que demandaria um maior custo energético, que não é o objetivo deste estudo.

No ensaio de índice de forma os agregados pétreos naturais apresentaram 91,5% das partículas com forma cúbica, 5,5% alongada e 3% lamelar. Já o ARRC apresentou 69,5% das partículas com forma cúbica, 25% alongada e 5,5% lamelar. Estes resultados estão dentro dos parâmetros apresentados pela DER/SP ET-DE-P00/008, que define a quantidade aceitável de partículas lamelares como sendo inferiores a 10%. A forma cúbica das partículas garante o intertravamento dos agregados quando compactado, aumentando a resistência ao cisalhamento (BORBA, 2013).

A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios de Absorção e Abrasão Los Angeles. No ensaio de absorção, o ARRC obteve um valor 5,35 vezes maior que o agregado pétreo natural, o que demonstra uma maior quantidade de vazios existente neste agregado e sua permeabilidade. Conforme Junior et al (2010), os revestimentos cerâmicos são classificados conforme sua absorção de água, que varia de 0 até valores maiores que 20%, e que esta propriedade influencia na sua resistência mecânica. Ainda, segundo Gorini et al (1999), o processo de fabricação – via úmida ou via seca, bem como o processo de queima – monoqueima ou biqueima, também influenciam nas propriedades dos revestimentos cerâmicas, visto que as peças produzidas por via úmida são consideradas de melhor qualidade e as que recebem a monoqueima apresentam propriedades superiores como a baixa absorção de água, maior resistência mecânica e à abrasão superficial.

Tabela 5. Resultados dos ensaios de Absorção e Abrasão Los Angeles

|                         | <b>Absorção (%)</b> | <b>Abrasão Los Angeles (%)</b> |
|-------------------------|---------------------|--------------------------------|
| Agregado Pétreo Natural | 0,65                | 9,62                           |
| ARRC                    | 3,48                | 22,31                          |
| DER/SP ET-DE-P00/008    | -                   | < 50                           |

O percentual de desgaste obtido no ensaio de Abrasão Los Angeles do ARRC, pode ser explicado pela sua porosidade, o que torna a estrutura das partículas mais suscetíveis a desgastes e quebras. Apesar de apresentar um percentual elevado em comparação ao agregado pétreo natural, o ARRC está dentro dos parâmetros definidos pela DER/SP ET-DE-P00/008, que determina um percentual de desgaste inferior a 50% aceitável para materiais de base.

A Figura 4 apresenta o comparativo entre a máxima densidade aparente seca e a umidade ótima obtida em cada ensaio de compactação para a BGS (Referência) e a mistura (BGS+ARRC). Como foi utilizado o método de compactação utilizando amostras não trabalhadas, para cada energia foram moldados novos corpos de prova, não reaproveitando as amostras já ensaiadas.

A densidade aparente seca obtida após a compactação depende da natureza do material, de sua granulometria e da massa específica dos grãos (DNIT,2006). Neste caso, as máximas densidades secas da mistura (BGS+ARRC) foram menores em comparação à BGS. Porém, a água adicionada para se chegar a estas densidades foi muito maior.

Esta maior demanda de água para se obter os teores ótimos de umidade na compactação pode ser devido à baixa densidade do ARRC, que necessita de maior quantidade de água para preencher seus vazios, e à composição da mistura (BGS+ARRC), que conforme apresentado na tabela 2, utiliza maior percentual de finos que a mistura de BGS (Referência). Desta forma, a maior fração de finos na composição faz com que a área específica das partículas envolvidas na composição seja maior e isso demanda maiores teores de umidade para poder obter a máxima densidade seca.

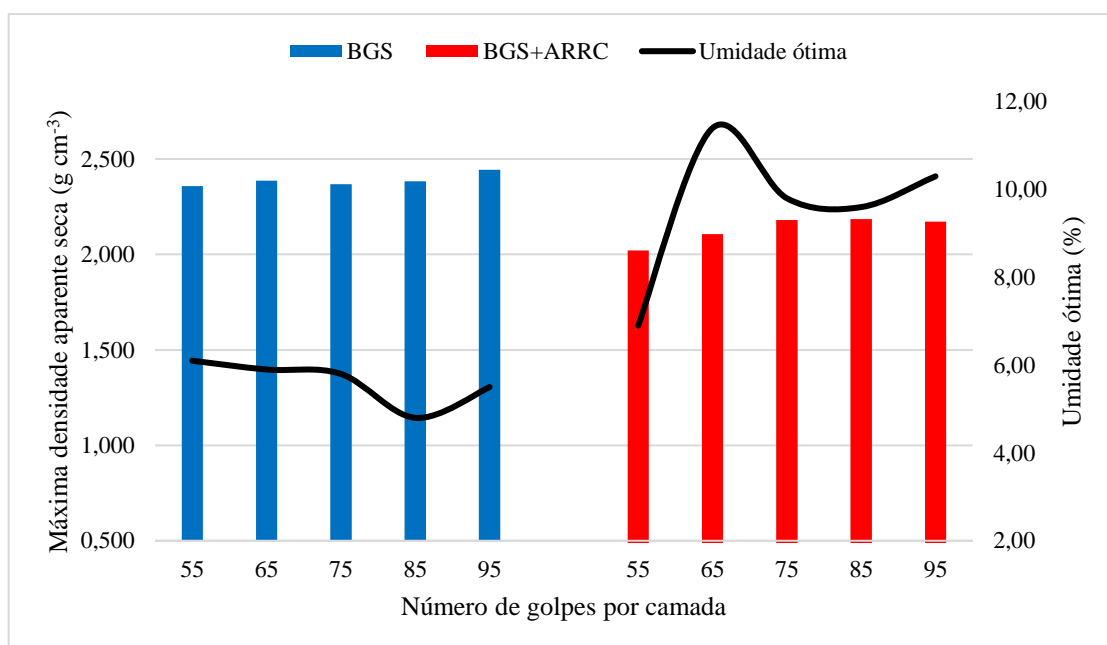


Figura 4. Comparativo entre a máxima densidade aparente seca e umidade ótima da BGS (Referência) e (BGS+ARRC)

A Figura 5 mostra a composição granulométrica dos agregados da mistura (BGS+ARRC) antes e após cada compactação, juntamente com os limites da faixa granulométrica adotada (Faixa A do DNIT). Foi verificado que, após a compactação, o percentual de partículas passantes na peneira 3/8" da mistura (BGS+ARRC) ultrapassou o limite da Faixa A do DNIT para os ensaios de 55, 65 e 75 golpes, porém ainda está dentro das tolerâncias permitidas pela faixa de projeto adotada ( $\pm 7$  para a peneira 3/8"). Nas outras peneiras, os percentuais ficaram dentro dos limites da faixa.

A Figura 6 mostra um comparativo entre o índice de degradação (IDp) da BGS (Referência) e da mistura (BGS+ARRC). É possível observar um comportamento similar dos agregados nos ensaios de 55 e 65 golpes, onde se obteve os maiores índices de degradação para ambos.

Esta maior quebra dos agregados nas menores energias de compactação pode estar relacionada com o fato de partículas não conseguirem atingir uma densificação adequada, a ponto de causar um menor entrosamento entre elas, fazendo com que estas fiquem mais suscetíveis a energia aplicada e, conseqüentemente, provoque uma quebra maior do ARRC de maior dimensão.

Por apresentar maior porosidade, conforme demonstrado nos ensaios de Absorção, o ARRC apresenta maior fragilidade e tendência a desgaste e quebras em comparação com os agregados naturais, como mostrado no ensaio de Abrasão Los Angeles. Portanto, o maior índice de degradação apresentado pela mistura (BGS+ARRC) em relação à BGS (Referência), pode ter ocorrido devido à esta característica do ARRC e ao maior percentual utilizado desse agregado em dimensões maiores na composição da mistura (BGS+ARRC).

Os resultados dos ensaios de expansão e de índice de Suporte Califórnia (ISC/CBR) da BGS (Referência) e da mistura (BGS+ARRC) podem ser verificados na Figura 7:

A especificação técnica DER/SP ET-DE-P00/008 indica valores de CBR iguais ou superiores a 100% para projetos de base. É possível verificar que a mistura (BGS+ARRC) além de alcançar esse percentual, obteve resultados maiores que a BGS (Referência) em todas as compactações. Este resultado pode ser explicado pela composição granulométrica da mistura (BGS+ARRC) que, possui um percentual maior de partículas finas em sua composição, comparada à BGS (Referência).

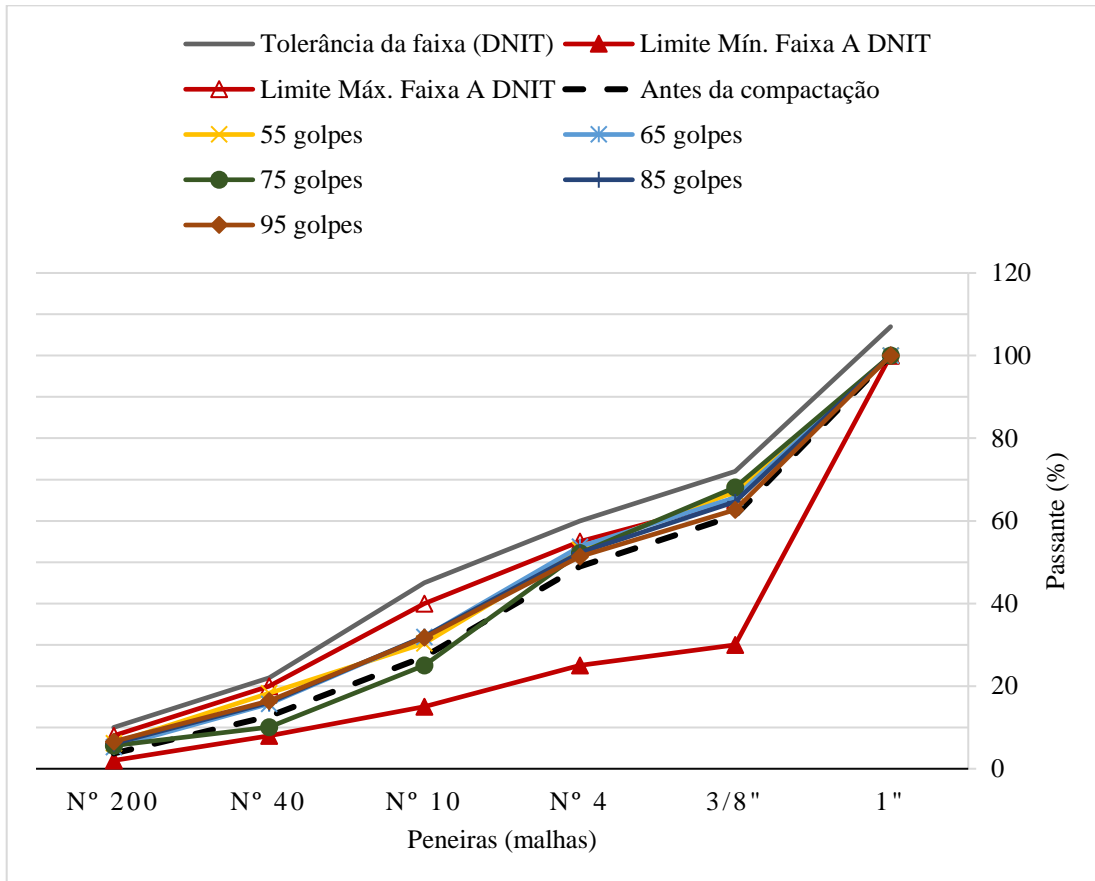


Figura 5. Composição granulométrica dos agregados da mistura (BGS+ARRC) antes e após cada compactação

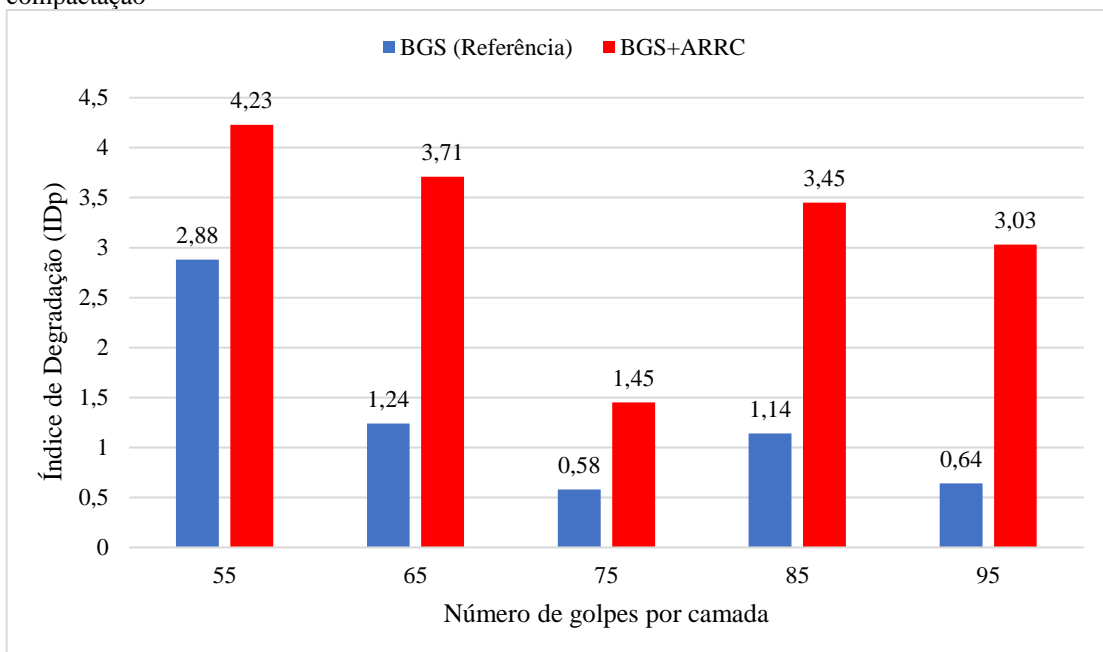


Figura 6. Comparativo entre o Índice de Degradação da BGS (Referência) e da mistura (BGS+ARRC)

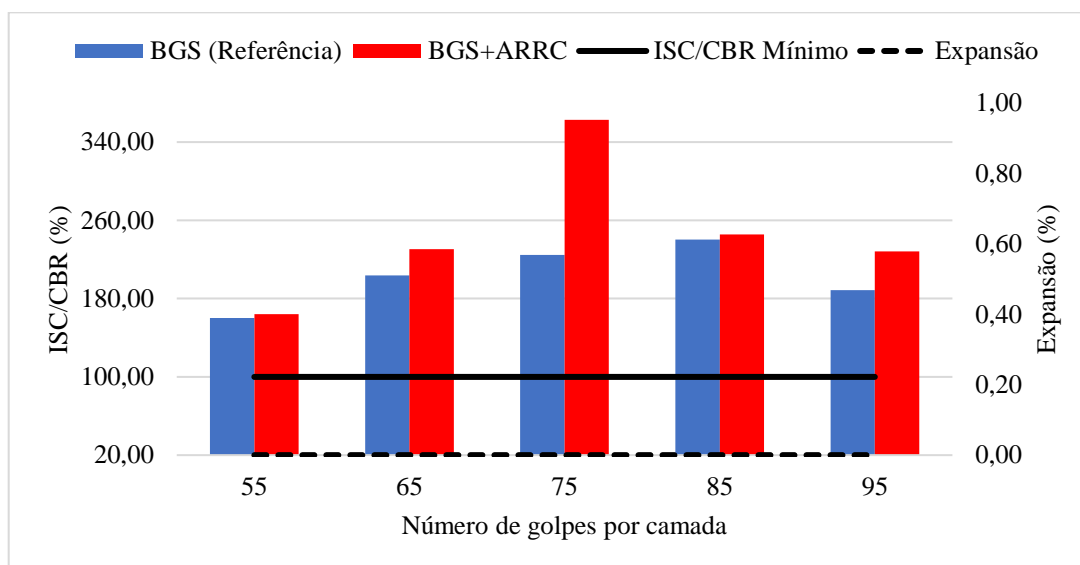


Figura 7. Resultados de expansão e ISC/CBR para umidade ótima de cada compactação

Além disso, a compactação promoveu uma maior degradação dos agregados da mistura (BGS+ARRC), principalmente os de maior dimensão, como foi demonstrado no ensaio de Índice de Degradação (IDp), o que pode ter contribuído para aumentar ainda mais o percentual de finos da mistura.

Desta forma, a presença de maiores porcentagens de finos na mistura promove maior facilidade de compactação e maior travamento dos agregados graúdos, reduzindo os vazios e tornando a mistura mais coesa (MOTTA, 2005). Outro fator que pode ter influenciado nos bons resultados é a forma das partículas do ARRC que, visualmente, apresentam faces e arestas mais angulosas que o agregado pétreo natural, o que contribui para o melhor arranjo das partículas na mistura e colaborou para o seu intertravamento, resultando consequentemente, em maior capacidade de suporte.

Os resultados dos ensaios de expansão foram nulos tanto para as amostras de BGS quanto para a mistura (BGS+ARRC), satisfazendo a DER/SP ET-DE-P00/008 que define para base uma expansão igual ou inferior a 0,3%. Este resultado demonstra que o ARRC não apresenta, em sua composição mineralógica, materiais com tendência a aumentar seu volume, quando em contato com água.

O percentual médio encontrado no ensaio de equivalente de areia da mistura (BGS+ARRC) foi 31,14% maior que o da BGS (Referência) e ambas atenderam a especificação

técnica DER/SP ET-DE-P00/008 que define um percentual mínimo de 55%, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6. Resultados do ensaio de Equivalente de Areia da BGS (Referência) e da mistura (BGS+ARRC)

|                                   | <b>BGS<br/>(Referência)</b> | <b>BGS+ARRC</b> | <b>DER/SP ET-DE-<br/>P00/008</b> |
|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------|----------------------------------|
| Leitura do topo de areia - Média  | 7,77                        | 7,93            | -                                |
| Leitura do topo de argila - Média | 12,7                        | 9,9             | -                                |
| Equivalente de areia - Média (%)  | 61                          | 80              | > 55                             |

Este aumento de 31,14% em relação à amostra de referência, em termos de equivalente de areia, pode estar associado à parcela utilizada do ARRC na mistura, que devido a sua composição mineralógica e ao processo de queima, gerou menor quantidade de material solúvel e pulverulento, com partículas menores que 0,075 mm apresentado um comportamento mais arenoso.

Também foi verificado que a mistura estudada (BGS+ARRC) está dentro dos limites da Norma DNIT 141/2010 e da DER/SP ET-DE-P00/008 em relação ao percentual de material passante na peneira N° 200. Para nenhuma das compactações esse percentual ultrapassou 2/3 do percentual que passa na peneira N° 40.

## Conclusões

Por meio dos ensaios realizados, foi possível verificar que o ARRC, apesar de apresentar um considerável índice de vazios e uma tendência maior à quebra e ao desgaste, em comparação com os agregados pétreos naturais, apresentou resultados satisfatórios na mistura (BGS+ARRC).

A forma das partículas do ARRC pode ter contribuído para o bom resultado obtido. Com a maior parte das partículas apresentando formato cúbico e um baixo percentual de partículas lamelares, como apresentou o ensaio de índice de forma, o ARRC estudado garantiu um maior intertravamento à mistura. Além disso, as faces e arestas mais angulosas do ARRC proporcionaram um bom entrosamento e um melhor arranjo das partículas na composição.

O desempenho do ARRC obtido no ensaio de absorção demonstra a elevada quantidade de vazios presentes nas partículas desse agregado, visto que este apresentou uma absorção 5,35 vezes maior em relação ao agregado pétreo natural. Esta característica é confirmada também no ensaio de abrasão “Los Angeles”, onde o ARRC obteve um percentual de desgaste 131,91% maior que o agregado pétreo natural e no ensaio de compactação, onde a mistura (BGS+ARRC) obteve valores menores de densidade máxima seca em comparação com a BGS (Referência).

Com relação a degradação dos agregados após a compactação, foi possível observar que a mistura (BGS+ARRC) obteve um índice maior que a BGS (Referência) e isto pode estar associado, novamente, ao elevado índice de vazios presentes nas partículas do ARRC, confirmado nos ensaios de Absorção e Abrasão Los Angeles.

Também foi observado que a mistura (BGS+ARRC) tendo em sua composição um maior percentual de finos que a BGS (Referência), apresentou certas características devido a isso, como a necessidade de maior acréscimo de água na fase de compactação, um percentual de equivalente de areia consideravelmente maior, além de valores de ISC/CBR superiores. Este último ensaio citado também relacionou as arestas angulosas das partículas aos bons resultados alcançados e demonstrou que a utilização do ARRC proporciona maior capacidade de suporte à mistura.

Por fim, comparando os resultados dos ensaios da mistura (BGS+ARRC) com os da BGS (Referência) e avaliando segundo as especificações, foi possível concluir que a BGS+ARRC atendeu aos requisitos propostos e, sua utilização em obras de pavimentação, pode ser uma forma de reduzir custos, haja visto que houve substituição de 42,32% de materiais pétreos naturais por estes agregados reciclados, reduzindo, desta forma, o consumo dos agregados naturais e, conseqüentemente, sua intensa exploração. Desta maneira, a mistura (BGS+ARRC) está apta para ser utilizada na construção de camada de base de pavimento.

## Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**: Agregado graúdo – Índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA. **Setor cerâmico brasileiro em números**. Disponível em: < <https://anfacer.org.br/>>. Acesso em: 25 de julho de 2020.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica**: Materiais, Projeto e Restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 560 p. – il.

BERNUCCI, L. B.; DA MOTTA, L. M. G.; SOARES, J. B.; CERATTI, J. A. P. **Pavimentação Asfáltica**: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008. 504 p. – il.

BORBA, V. Q. **Projeto de base drenante realizado de acordo com a especificação técnica DER/SP ET-DE-P00/008**. 2013. 20 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, São Paulo, v.61, p.178-189, abr./jun. 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em: 20 de março de 2020.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO. **ET-DE-P00/008**: Sub-base ou base de brita graduada. São Paulo, 2005.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 054**: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 081**: Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 172**: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 398**: Agregados – Índice de Degradação após compactação Proctor (IDp). Rio de Janeiro, 1999.



DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT 141: Pavimentação** – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**, 3 ed. Rio de Janeiro, 2006.

GORINI, A. P. F.; CORREA, A. R. Cerâmica para revestimentos. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 10, p. 201-251, set. 1999.

JUNIOR, M. C.; BOSCHI, A. O.; MOTTA, J. F. M.; TANNO, L. C.; SINTONI, A.; COELHO, J. M.; CARIDADE, M. Panorama e Perspectivas da Indústria de Revestimentos Cerâmicos no Brasil. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v.15, n.3, p.7-18, maio/jun. 2010.

MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Departamento de Engenharia de Construção Civil - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVA, A. G. P.; JUNIOR, C. A. A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização. **Cerâmica**. São Paulo, v.44, n.290, nov./dez. 1998.