

INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS RECICLADAS A FRIO ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA E CIMENTO PORTLAND

André K. Kuchiishi¹, Lucas R. de Andrade¹, Iuri S. Bessa¹, Sara F. Esteves², Kamilla L. Vasconcelos¹, Liedi L. B. Bernucci¹

¹Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil

²Optimzyer, Lisboa, Portugal

Resumo

A utilização de técnicas de reciclagem a frio com material fresado, também conhecido como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), estabilizado com emulsão asfáltica, apresenta diversas vantagens do ponto de vista econômico e ambiental. Por outro lado, a caracterização deste material quanto ao seu comportamento mecânico é ainda complexa, principalmente devido à sua variabilidade na coleta e amostragem, bem como nas aplicações em obras rodoviárias. Neste trabalho, avaliou-se a influência da granulometria no comportamento mecânico de um material em estudo a partir dos ensaios laboratoriais de Resistência à Compressão Simples (RCS), Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) e Módulo de Resiliência Triaxial (MR). A partir dos resultados, foi possível observar um ganho de resistência com o aumento do teor de finos e uma variação pouco significativa na rigidez. Foi observado que a granulometria do RAP é uma variável fundamental no comportamento mecânico de misturas recicladas a frio. Dessa forma, a heterogeneidade inerente ao RAP deve ser controlada de modo a garantir resultados confiáveis, minimizando eventuais dispersões.

Palavras-chave: Reciclagem a frio, granulometria, heterogeneidade, comportamento mecânico.

1 Introdução

No início da década de 1970, o interesse em se utilizar o RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) em pavimentos ganhou maiores proporções, muito em virtude da falta de disponibilidade de agregados virgens, do custo elevado do petróleo e de restrições ambientais de descarte [1]. Desde então, diversos estudos foram realizados e sua utilização é cada vez mais difundida. Atualmente, toneladas de RAP são produzidas na manutenção e restauração de pavimentos. Somente nos EUA, mais de 100 milhões de toneladas de RAP são fresadas todos os anos durante a construção de rodovias [2]. No Brasil, não há registros oficiais desse dado em referências bibliográficas.

É importante destacar que a reutilização do RAP em pavimentos asfálticos para reciclagem a frio apresenta vantagens relevantes: (i) reduz o consumo de agregados virgens, (ii) diminui os custos com transporte de material (para o caso de reciclagem *in situ*) e (iii) minimiza a geração e disposição indevida de resíduos [3]. Assim, tendo em vista que o RAP pode ser aplicado no próprio local da fresagem, a necessidade de transporte de agregados virgens se reduz, diminuindo inclusive a emissão de gás carbônico [4].

Muitos trabalhos têm avaliado o RAP com o objetivo de melhor compreender seu comportamento. O *Technical Guideline* da *Asphalt Academy* [5] assume que a adição de emulsão ao material fresado não altera a natureza granular da mistura. Dessa forma, diferentemente das misturas asfálticas a quente, o material fresado estabilizado com emulsão

não possui dependência da temperatura. Outros estudos, por outro lado, afirmam que há uma variação evidente na rigidez das amostras para diferentes temperaturas ao se avaliar os resultados de módulo dinâmico obtidos para os materiais fresados e estabilizados com emulsão [6, 7], evidenciando um caráter viscoelástico dessas misturas.

Apesar de estudos afirmarem que o desempenho inicial de pavimentos com RAP é o mesmo em relação ao daqueles com agregados virgens, ainda existem opiniões adversas a respeito. Tais dificuldades se devem à sua complexidade frente à variabilidade granulométrica, especificações de teores e até dificuldades em relação a métodos de seleção, dosagem e suas propriedades para o dimensionamento estrutural [8].

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da distribuição granulométrica no comportamento mecânico de misturas a frio, com RAP e emulsão asfáltica, a partir de ensaios laboratoriais de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), Resistência à Compressão Simples (RCS) e Módulo de Resiliência triaxial (MR).

2 Importância da granulometria e seu controle para a reciclagem a frio

A reciclagem a frio com a estabilização do RAP por meio da emulsão asfáltica apresenta muitas vantagens, principalmente do ponto de vista energético, uma vez que não há a necessidade de aquecimento da mistura para a aplicação do material em campo. Este tipo de material é denominado BSM (*Bitumen Stabilized Material*), cujos primeiros testes foram realizados na África do Sul durante os anos 1960, e costumam ser empregados como materiais para camada de base, em virtude da baixa resistência à abrasão frente aos esforços dos veículos pesados, principalmente nos primeiros dias de cura [9, 10]. O primeiro manual voltado especificamente para utilização de BSMs com emulsão asfáltica é datado de 1972 [9].

A granulometria é um fator importante para o comportamento da mistura do ponto de vista estrutural. Os finos, em especial, desempenham papel fundamental, pois promovem a dispersão da emulsão pela mistura [5]. A adição do cimento como fíler, por sua vez, possui importância tanto física quanto química [11]. Além do ganho de resistência por hidratação, o cimento também funciona como um catalisador, acelerando o processo de ruptura.

Um dos fatores que dificulta a utilização de RAP é o controle granulométrico, que envolve a fresagem do material pré-existente e sua estocagem. Segundo Tebaldi *et al.* [12], a homogeneidade do RAP é um parâmetro difícil de ser controlado, e apenas alguns países possuem normas para este tipo de controle. Na Holanda, há especificações voltadas para o controle da homogeneidade, mas referentes à reciclagem a quente. Tais especificações definem desvios padrões para aceitação da granulometria, do teor de ligante e do valor de penetração para o ligante extraído do RAP [12].

Na Noruega, para aumentar a homogeneidade do RAP e reduzir a contaminação do material com pó, um procedimento adicional é necessário. No caso de reciclagem em usina, recomenda-se que, logo após a fresagem, o RAP seja separado em grupos de 0-4 mm e 4-11 mm, 0-6 mm e 6-11 mm (ou 6-16 mm), ou 0-8 mm e 8-16 mm [13]. Dessa forma, qualquer eventual redução de adesividade do agregado com o ligante devido à presença indesejada do pó será minimizada. Vale mencionar que procedimentos como a retirada de agregados retidos na peneira de 19 mm também são recomendados [5, 14].

Ma *et al.* [15] observaram que diferentes granulometrias resultam em valores de resistência à tração distintos para os materiais reciclados a frio com emulsão e cimento. Ma *et al.* [15] separaram o RAP em três grupos distintos: 16-31,5 mm (graúda), 2,36-16 mm (média) e 0,075-2,36 mm (fina). Além de garantir melhor controle granulométrico, essa separação permitiu avaliar a superfície específica de cada grupo e correlacionar com os resultados de resistência à tração. Observou-se que com 75% de RAP na granulometria, os valores de superfície específica são diretamente proporcionais à resistência à tração das amostras, as quais variaram de 0,5 a 0,6 MPa, indicando influência da granulometria na resistência do material.

Outro aspecto importante de se destacar é a compactação, a qual pode quebrar os grupos de RAP e alterar a granulometria da mistura. Tendo em vista que os grupos de RAP são

conglomerados compostos de agregados ligados entre si pelo ligante, a compactação pode causar a quebra desses grumos devido ao impacto, alterando assim a granulometria. O controle granulométrico adequado é fundamental para o desempenho da mistura, tendo em vista a elevada heterogeneidade do RAP [16].

Outros fatores que também podem contribuir para a heterogeneidade da mistura é a presença de fragmentos com pintura de sinalização, misturas para selagem de trincas, entre outros elementos indesejados. Para o caso de reciclagem em usina com a necessidade de estocagem do RAP em pilhas, é necessário que o material fresado seja completamente misturado, garantindo assim que qualquer amostra retirada seja representativa de toda a pilha de estocagem [8].

Portanto, a variabilidade na granulometria do RAP é evidente, o que pode influenciar resultados de ensaios ao se considerar de forma equivocada que tais amostras são homogêneas. O cenário ideal para melhoria da homogeneidade é aquele em que a fresagem do RAP é feita em apenas um local, retirando-se apenas uma camada do pavimento. Porém, este procedimento nem sempre é realizado, misturando-se o RAP de diferentes fontes e camadas [12].

3 Caracterização dos materiais reciclados e realização dos ensaios mecânicos

3.1 Teste de fragmentação

O material fresado utilizado em todas as misturas foi coletado de um mesmo trecho experimental localizado na rodovia Fernão Dias (BR-381). Para a caracterização dessas misturas é necessário compreender primeiramente as propriedades do RAP original. Dessa forma, dois ensaios foram realizados: (i) abrasão Los Angeles e (ii) teste de fragmentação.

O ensaio de abrasão Los Angeles foi realizado seguindo a norma DNER-ME 035/98 [17] comparando a redução de massa dos grumos que ficam retidos na peneira 1,7 mm com a massa inicial do RAP colocada no tambor. Observou-se uma redução de 28% em massa do RAP.

O teste de fragmentação, por sua vez, foi realizado com o objetivo de melhor caracterizar o RAP. O teste foi desenvolvido por Perraton *et al.* [16] e consiste na avaliação da quantidade de material passante em uma peneira de controle após a aplicação de golpes com o equipamento compactador Proctor. No interior do molde, cinco camadas de RAP são compactadas com a aplicação de 56 golpes por camada, utilizando um soquete de 4535 g a uma altura de queda de 45,7 cm. O material é extraído do molde e a porcentagem em massa passante na peneira de 1,7 mm, PCS (em inglês, *percent passing through the control sieve*), é então calculada. Recomenda-se que o RAP a ser analisado seja previamente separado em quatro grupos em função do tamanho dos grumos, a saber: 5-10, 10-14, 14-20 e 20-30 mm. Vale acrescentar que o ensaio é realizado em três temperaturas distintas: 5, 20 e 40 °C [16].

Uma das principais vantagens do teste de fragmentação em relação ao ensaio de abrasão Los Angeles é a possibilidade de avaliar a mudança no tamanho dos agregados pela quebra dos grumos em função de diferentes temperaturas. Segundo Perraton *et al.* [16], o ensaio de fragmentação fornece mais informações a respeito do RAP do que a simples análise granulométrica. Vale ainda acrescentar que, por meio deste ensaio, é possível identificar e diferenciar RAPs provenientes de fontes distintas.

O teste de fragmentação foi realizado para os grumos com 5-10 mm, tendo em vista que a variabilidade dos resultados para essas dimensões é mais reduzida [16]. A Figura 1 apresenta os resultados obtidos para as três temperaturas de análise.

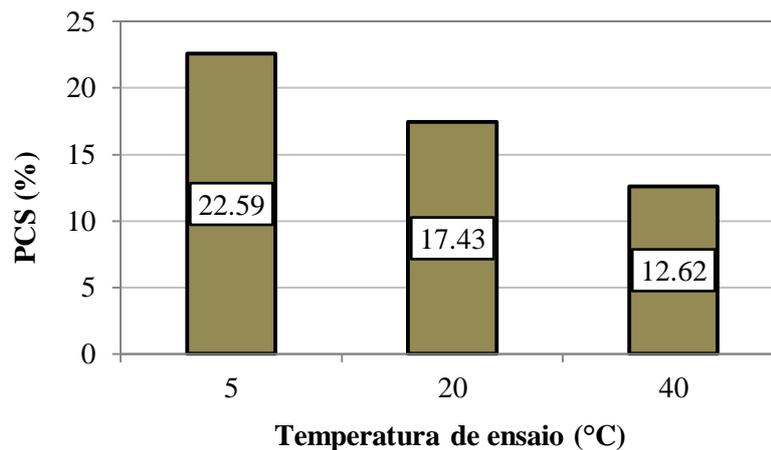


Figura 1 Valores de PCS em função da temperatura para grumos com 0-5 mm

Da Figura 1 observa-se que para menores temperaturas os valores de PCS aumentam. Isto pode ser explicado, tendo em vista que para a temperatura de 5 °C o ligante encontra-se mais elástico e rígido, enquanto que para a temperatura de 40 °C o ligante se apresenta menos viscoso. Dessa forma, para temperaturas mais altas, o ligante dissipa parte da energia proveniente do soquete durante a compactação, reduzindo assim a produção de material fino no momento do impacto. Além disso, em temperaturas mais elevadas o ligante por estar mais viscoso, tem a possibilidade de formar novos grumos com os agregados menores produzidos no início do teste conforme as cargas de impacto são aplicadas [16].

3.2 Granulometria

Para a avaliação da influência da granulometria sobre as propriedades das misturas recicladas, quatro granulometrias foram utilizadas na confecção dos corpos de prova (CPs). As granulometrias G1 e G2 foram encaixadas na faixa A da norma brasileira de pré-misturado a frio [18] e estão apresentadas na Figura . O afastamento da região com agregados miúdos e fíler da curva G2 em relação à faixa A pode ser explicado pela dificuldade em se obter as frações finas do RAP durante o fracionamento, tendo em vista que o material fresado é composto por grumos que aglomeram a fração fina (nesse artigo considerado todo material passante na peneira de 2,0 mm), dificultando sua separação. Granulometrias semelhantes, com relação a pouca quantidade de finos, foram previamente aplicadas no Brasil [19]. Apesar das misturas pré-misturadas a frio (PMF) não utilizarem o RAP em sua composição, esta faixa foi adotada tendo em vista a ausência de especificações técnicas voltadas particularmente para misturas com RAP estabilizadas com emulsão. Vale acrescentar que o material em estudo apresenta certas similaridades quanto ao uso de emulsão asfáltica e aplicação em temperatura ambiente quando comparado com o PMF.

A granulometria G3, por sua vez, corresponde ao material fresado em campo e sem correções de curva. Por fim, a granulometria G4 é equivalente à granulometria G3 com adição de pó-calcário com o objetivo de enquadrar a região com agregados finos nos limites da faixa da *Asphalt Academy* [5], como pode ser observado na Figura 3. Conforme mencionado acima, o termo “fino” refere-se aos agregados passantes na peneira 2,0 mm, incluindo tanto os agregados miúdos quanto o fíler (passantes na peneira 0,075 mm).

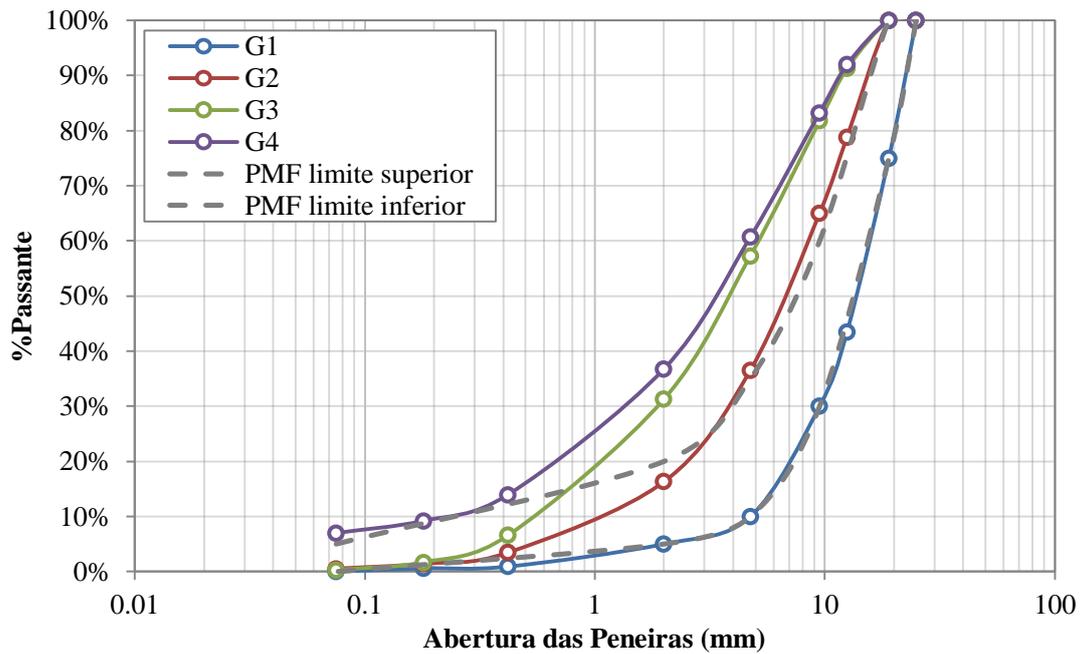


Figura 2 Curva granulométrica das quatro misturas recicladas e faixa A do DNIT para PMF

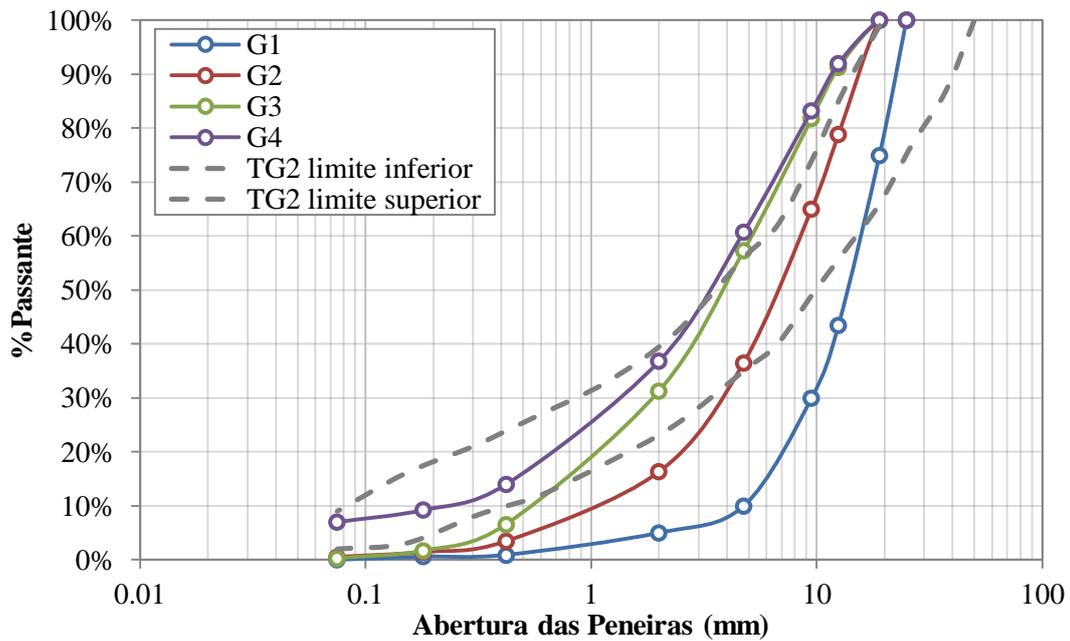


Figura 3 Curva granulométrica das quatro misturas recicladas e faixa da Asphalt Academy para BSM com emulsão asfáltica

3.3 Ensaios mecânicos

Foram moldados CPs de dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura com o compactador Proctor utilizando energia modificada. Os CPs com granulometria G1, G2 e G3 são compostos integralmente por RAP, enquanto aqueles com granulometria G4 possuem 8% de pó-calcário em sua composição. Além disso, fixou-se para todas as amostras 3% de emulsão

asfáltica catiônica modificada por polímero do tipo SBR, 1% de cimento tipo CP-II, 3,4% de água livre e 2,1% de água da própria emulsão.

Para este estudo, optou-se pelo procedimento de cura acelerada, mantendo os corpos de prova a 60°C por sete dias [20], a fim de se obter os resultados dos ensaios de maneira mais rápida, acelerando a perda da umidade.

Para o ensaio de RCS, foi utilizada a norma ASTM D2166 [21]. O ensaio é realizado com aplicação de carga axial em um corpo de prova cilíndrico a uma velocidade de 1,0 mm/min, registrando-se o valor da pressão correspondente à carga de ruptura.

Para o ensaio de RT, foi utilizada a norma ASTM D6931 [22]. O ensaio é realizado com compressão diametral e carga monotônica crescente até que o corpo de prova se rompa por tração em um plano aproximadamente vertical passando pelo diâmetro. Sob velocidade de deformação constante de 50 mm/min, o carregamento é aplicado sobre a geratriz da amostra, registrando-se a carga máxima suportada pelo CP logo antes da ruptura. Esse valor é então utilizado para posterior determinação da resistência à tração por compressão diametral.

Finalmente, o ensaio de MR seguiu a norma AASHTO T307 [23]. Para a realização do ensaio, é utilizado um equipamento pneumático triaxial de carga repetida, com frequência de aplicação de 1,0 Hz, do qual 0,1s corresponde à duração da carga em si e 0,9s ao repouso. Os deslocamentos são medidos por dois LVDTs (*Linear Variable Differential Transductor*) e o MR é calculado como a razão entre a tensão-desvio (σ_d) e a deformação resiliente (ϵ_r).

4 Análise das misturas recicladas

4.1 Análise da superfície específica

Com o objetivo de determinar a superfície específica de cada granulometria, dois métodos distintos foram utilizados: (i) o método presente na metodologia de dosagem francesa [24] e (ii) o método descrito por Santamarina *et al.* [25]. Vale ressaltar que o objetivo da apresentação dos métodos não é compará-los entre si, mas sim ranquear as granulometrias quanto à superfície específica de cada uma, tendo em vista que o primeiro método é utilizado para determinação do módulo de riqueza de misturas asfálticas a quente e o segundo para estimativa de área superficial específica de solos. A Equação 1 apresenta o método presente na dosagem francesa.

$$100\Sigma = 0,25G + 2,3S + 12s + 150f \quad (1)$$

Onde Σ é a superfície específica em m²/kg, G é a proporção de agregados maiores que 6,3 mm, S é a proporção de agregados entre 0,250 e 6,3 mm, s é a proporção de agregados entre 0,063 e 0,250 mm e f é a proporção de agregados menores que 0,063 mm.

O método de Santamarina *et al.* [25] pressupõe que as partículas são perfeitamente esféricas. Apesar de a granulometria em estudo não ser composta por partículas perfeitamente esféricas, a Equação 2 apresentada pode ser utilizada para fornecer um parâmetro comparativo entre as misturas. Os resultados obtidos de ambos os métodos estão apresentados na Tabela 1.

$$S_a = \frac{3(C_u + 7)}{4\rho_w G_s d_{50}} \quad (2)$$

Onde S_a é a superfície específica em m²/kg, C_u é o coeficiente de uniformidade, ρ_w é a massa específica da água (1,0 g/cm³), G_s é a gravidade específica e d_{50} o diâmetro em centímetros pelo qual passam 50% dos agregados.

Tabela 1. Resultados de superfície específica pelo método LCPC [24] e pelo método de Santamarina *et al.*[25]

Granulometria	LCPC (2007)	Santamarina <i>et al.</i> (2001)
	$\Sigma (10^{-2} \text{ m}^2/\text{kg})$	$S_a (\text{m}^2/\text{kg})$
G1	0,95	0,33
G2	2,67	0,85
G3	2,98	1,62
G4	12,98	3,13

Da Tabela 1 observa-se que os valores de superfície específica são distintos entre os métodos utilizados, uma vez que tais métodos são empregados para diferentes finalidades. Porém, o ranqueamento de superfície específica entre as quatro granulometrias é o mesmo em ambos os métodos. As granulometrias G3 e G4, que possuem agregados menores em sua composição, apresentam maiores valores de superfície específica que as granulometrias G1 e G2.

4.2 Resistência à compressão simples

As quatro granulometrias foram avaliadas com reprodução de três CPs para cada uma. Os resultados médios obtidos para o ensaio de RCS estão apresentados na Figura 4, em conjunto com as barras de erro com \pm um desvio padrão.

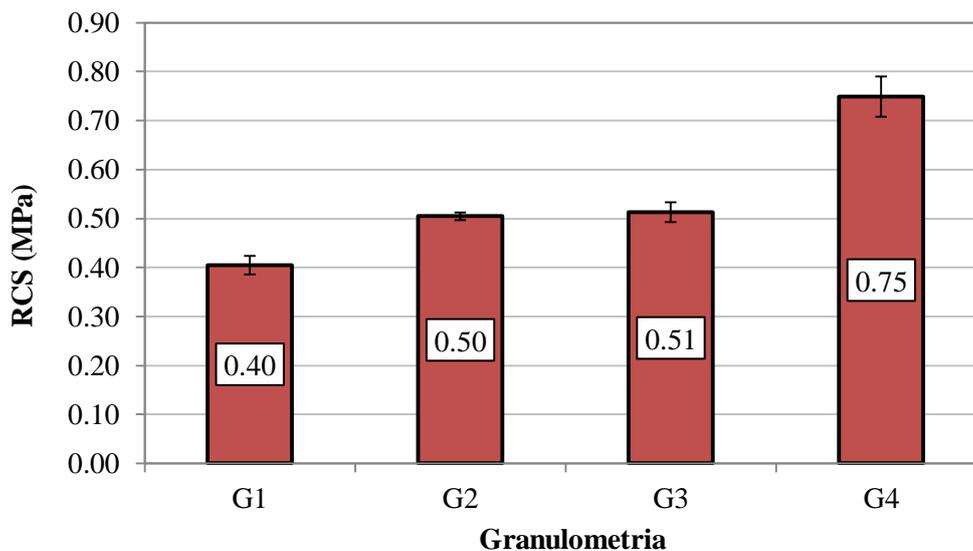


Figura 4 Resultados de RCS

Da Figura 4, observa-se que quanto maior o teor de finos na curva granulométrica maior é a RCS da amostra, uma vez que os agregados finos preenchem os vazios deixados pelos agregados graúdos, aumentando a interação entre os agregados. Dessa forma, a densidade da amostra aumenta, implicando em um ganho de resistência à compressão [26]. Comparando as misturas G1 e G2, observa-se um aumento médio de 25% da RCS. Vale destacar que o valor de RCS para a granulometria G2 foi maior que a G1, tendo em vista que a G2 apresenta maior superfície específica que a G1, como apresentado na Tabela 1. Sabendo que o teor de cimento foi o mesmo para as quatro misturas, o ganho de resistência devido à sua hidratação não foi uma variável significativa para avaliar os resultados de RCS entre as granulometrias.

A diferença de RCS entre as granulometrias G2 e G3, por sua vez, não foi significativa. Assim, mesmo com o aumento do teor de finos na granulometria G3, não foi observado um ganho de resistência em relação ao material G2. Isto pode ter ocorrido considerando a alteração granulométrica do RAP. Durante a compactação do CP, o impacto causado pelo soquete pode ocasionar a quebra desses grumos, modificando a granulometria, podendo assim alterar o comportamento das misturas [16]. Tendo em vista que a granulometria G2 possui grumos maiores do que a G3, é possível que parte desses grumos tenham sido quebrados durante a compactação, gerando agregados finos que contribuiriam para um ganho inesperado de resistência, aproximando a granulometria G2 da G3 em termos de RCS. Isto pode ter ocorrido com a granulometria G2, pois quanto maior a quantidade de agregados graúdos, maior a concentração de esforços no contato desses agregados durante a aplicação de carga, logo, maior susceptibilidade de quebra dos grumos; a presença de material fino ajuda a dissipar as cargas durante o ensaio, reduzindo a possibilidade de quebra dos grumos. Dos resultados de fragmentação obtidos neste artigo, observa-se que tais valores são superiores àqueles encontrados por Perraton *et al.* [16], indicando assim uma maior susceptibilidade à fragmentação do RAP utilizado neste estudo e corroborando a possibilidade de quebra dos grumos durante a compactação. Além disso, a Tabela 1 indica que as granulometrias G2 e G3 são similares quanto aos valores de superfície específica, o que justificaria os valores próximos de RCS.

Por outro lado, observa-se um ganho mais significativo na RCS da mistura G4 em relação à G3 de aproximadamente 1,5 vezes. A adição de pó-calcário como fíler na granulometria G4 pode ter ocasionado um aumento da densidade, uma vez que o fíler preenche os vazios deixados pelo material miúdo. Da Tabela 1, observa-se um aumento significativo no valor de superfície específica da granulometria G3 e G4 em ambos os métodos. Assim, quanto menor a dimensão da partícula do fíler maior será a quantidade incorporada na mistura, contribuindo assim para o aumento da resistência [27]. Esse aumento de RCS por acréscimo de fíler já foi previamente observado na literatura [28].

Além disso, a presença do pó calcário na granulometria G4 também contribui para o aumento da resistência do ponto de vista químico, melhorando a adesividade do mástique em relação aos agregados. Alguns estudos [29, 30] indicam que as cargas eletropositivas do pó calcário adsorvem quimicamente as moléculas de ligante formando o naftanato de cálcio. Este composto, insolúvel em água, fornece uma espécie de blindagem à película de ligante, favorecendo sua adesão para o recobrimento dos agregados. Portanto, o ganho de resistência expressivo por parte da granulometria G4 pode ser explicada a partir de um viés físico e químico do pó calcário.

4.3 Resistência à tração

Para a avaliação da resistência à tração, três CPs de cada granulometria foram preparados. Os resultados médios obtidos são apresentados na Figura 5, em conjunto com as barras de erro com \pm um desvio padrão. Devido à falta de material disponível da granulometria G3, não foi possível realizar o ensaio de RT para essa mistura.

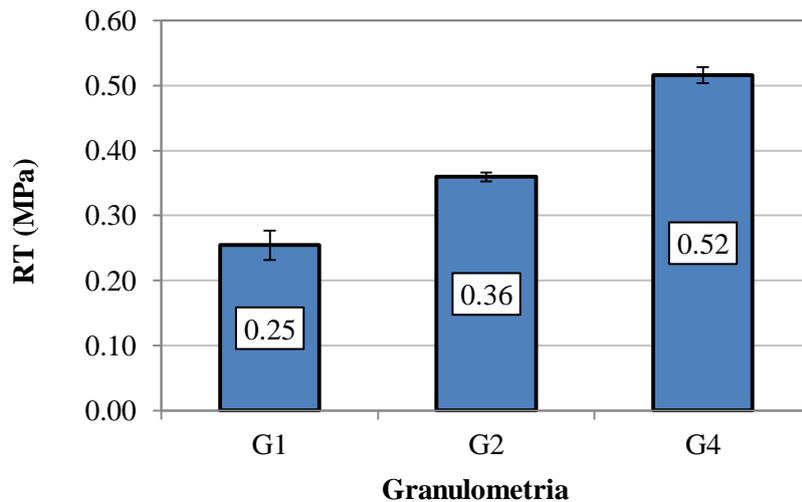


Figura 5 Resultados de RT

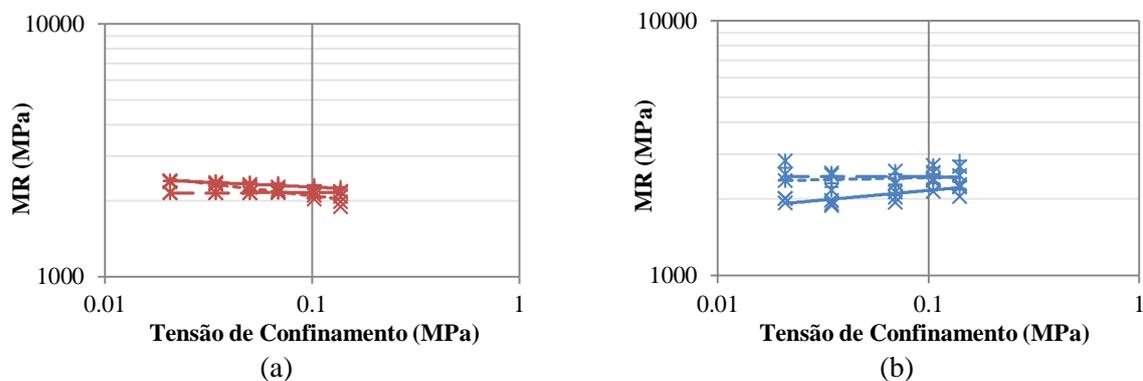
A partir da Figura 5, é possível observar a correlação entre o ganho de resistência à tração com o aumento da quantidade de finos na granulometria; quanto maior a quantidade de finos, maior será a superfície específica, permitindo assim que a adesão entre o ligante e os agregados seja favorecida. Além disso, o fino possui um papel essencial, pois é por ele que a emulsão se dispersa na mistura.

Da Tabela 1, observa-se que as misturas com maiores valores de RT apresentam também maior superfície específica para ambos os métodos, o que corrobora a explicação apresentada anteriormente. Os CPs com granulometria G4, que possuem maior superfície específica, apresentaram RT aproximadamente duas vezes maior que os CPs da mistura G1, que possuem a menor superfície específica.

Vale acrescentar que a presença do pó calcário contribuiu diretamente no aumento da RT para a mistura G4. Como mencionado no item anterior, a contribuição do pó calcário para a mistura é evidente tanto do viés físico quanto químico, melhorando significativamente a resistência da mistura.

4.4 Módulo de resiliência

A análise da rigidez, bem como sua dependência do estado de tensão, foi realizada através do ensaio de módulo de resiliência triaxial (após sete dias de cura). Para esse ensaio foram reproduzidos três CPs por mistura, resultando assim em três curvas para cada granulometria. Os gráficos de MR em função da tensão de confinamento (σ_3) estão apresentados na Figura 6.



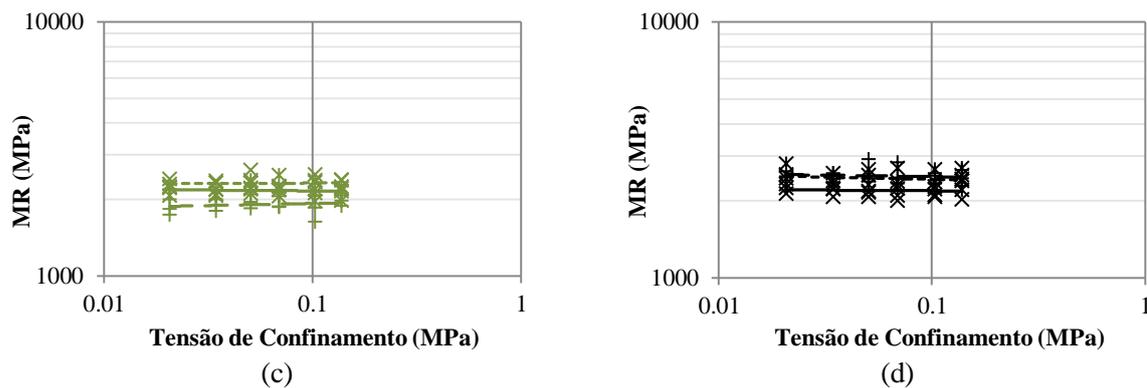


Figura 6 MR em função de σ_3 para as granulometrias (a) G1, (b) G2, (c) G3 e (d) G4

De acordo com o *Technical Guideline* (2009), misturas compostas de material fresado com adição de emulsão asfáltica são consideradas granulares, porém essa consideração não é mundialmente aceita. Países como Inglaterra e Austrália assumem que essas misturas têm um comportamento mais semelhante ao de misturas asfálticas a quente convencionais [31, 32].

Por outro lado, a Figura 6 indica que a rigidez das misturas recicladas a frio não é dependente da tensão de confinamento. Este tipo de comportamento se assemelha ao de materiais cimentados que, apesar de poderem apresentar valor absoluto de MR superior, também são indiferentes à variação do confinamento. Isso se deve à hidratação do cimento que, mesmo em teores reduzidos de 1%, contribuem para o aumento de rigidez do material. Bessa *et al.* [33] obtiveram resultados similares para misturas recicladas a frio com os mesmos teores de cimento e emulsão. Em todos os tempos de cura avaliados (7, 28, 60 e 90 dias a 25°C) não houve influência da tensão de confinamento no MR da mistura.

Vale acrescentar que as quatro granulometrias apresentaram MR de aproximadamente 2000 MPa, não havendo diferença significativa entre si. Nos ensaios de RCS e RT, por outro lado, a diferença nos resultados é mais evidente, como pode ser observado na Figura 4 e Figura 5, respectivamente. Essa característica pode ser explicada pela magnitude de carregamento utilizado nos ensaios e pela coesão das misturas devido à presença da emulsão asfáltica. Para o ensaio de MR, o carregamento axial aplicado sobre os CPs é reduzido, fazendo com que a coesão da mistura seja pouco solicitada, o que implica em pequenos deslocamentos. Dessa forma, mesmo com granulometrias distintas, a aplicação de uma carga baixa não mobiliza significativamente o esqueleto mineral dessas misturas, fazendo com que os resultados de MR aparentem ser similares em uma análise visual preliminar. Por outro lado, nos ensaios de RT e RCS, as cargas geradas são muito maiores, logo, o esqueleto mineral como um todo é mobilizado e a coesão por betume do material desempenha um papel mais significativo nessas condições. Assim sendo, as diferenças observadas nos resultados de RCS e RT são mais evidentes e indicarão o efeito da coesão, devido ao ligante asfáltico, do material em função de granulometrias distintas.

5 Considerações finais

A partir dos ensaios realizados foi observada a influência da granulometria no comportamento mecânico das misturas asfálticas recicladas com emulsão estudadas.

Em relação aos valores de RCS, foi observado um ganho de resistência com o aumento do teor de finos, aumento este quantificado por dois métodos de determinação de superfície específica. Da granulometria G1 para a G2 houve um aumento de 25% da resistência enquanto que da G3 para a G4 esse aumento foi de 47%. Por outro lado, da granulometria G2 para a G3 não houve ganho significativo de resistência mesmo com adição de finos. Isso pode ser

explicado pela possibilidade da ocorrência de quebra de grumos da mistura G2 durante a compactação dos CPs, alterando sua granulometria e elevando sua resistência.

No ensaio de RT, resultados equivalentes foram encontrados. Quanto maior a porcentagem de material fino na composição da mistura, maiores foram os valores de RT obtidos. Tendo em vista a importância dos finos para dispersão da emulsão asfáltica, foi observado que as misturas com maior superfície específica apresentaram maiores valores de RT, uma vez que há uma melhoria na adesão do ligante aos agregados.

Finalmente, quanto aos resultados de MR, observou-se que dentro de cada uma das granulometrias o efeito do confinamento não se mostrou evidente, fazendo com que as misturas apresentassem comportamento mais parecido com a de material cimentado e não granular. Em segundo lugar, constatou-se que a granulometria não possui influência significativa nos resultados de MR. Isto ocorre devido à baixa magnitude das cargas utilizadas no ensaio de MR. Nos ensaios de RCS e RT, por outro lado, a variação nos resultados foi significativa, pois as cargas utilizadas são mais altas, mobilizando o esqueleto mineral e a coesão gerada pelo ligante asfáltico da mistura. A análise isolada do MR poderia indicar de maneira equivocada que a adição de finos na granulometria não influencia no seu desempenho em campo.

Dessa forma, a utilização do RAP para construção ou reabilitação de rodovias pode influenciar o comportamento do pavimento como estrutura, devido à variabilidade granulométrica inerente ao próprio RAP. A ausência de procedimentos específicos relacionados à garantia da homogeneidade deste material é também um fator importante que dificulta a sua caracterização. Portanto, fica evidente a necessidade de controlar a granulometria do RAP, garantindo assim maior confiabilidade tanto na etapa de projeto quanto na etapa construtiva, minimizando o surgimento prematuro de eventuais patologias no pavimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Howard, I. L.; L. A. Cooley Jr e J. D. Doyle. Laboratory Testing and Economic Analysis. *Mississippi Department of Transportation*, Report No. FHWA/MS-DOT-RD-09-200, p. 104, 2009.
- [2] Copeland, A.; C. Jones e J. Bukowski. Reclaiming Roads. *Federal Highway Administration*, Report No. FHWA-HRT-10-001, vol. 73, n. 5, p. 12, 2010.
- [3] Copeland, A. Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. *Federal Highway Administration*, FHWA-HRT-11-021, p. 55, 2011.
- [4] Lee, N.; C. P. Chou e K. Y. Chen. Benefits in Energy Savings and CO₂ Reduction by Using Reclaimed Asphalt Pavement. *Transportation Research Board*, p. 18, 2012.
- [5] Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials. *A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials* (2^a ed.), Asphalt Academy, 2009.
- [6] Čížková, Z.; J. Suda; J. Valentin e O. Krpálek. Complex modulus and stiffness modulus of cold recycled mixes. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, n. 4, pp. 40-53, 2015.
- [7] Diefenderfer, B. K.; B. F. Bowers; C. W. Schwartz; A. Farzaneh e Z. Zhang. Dynamic modulus of recycled pavement mixtures. *Transportation Research Record*, n. 2575, pp. 19-26, 2016 DOI: 10.3141/2575-03.
- [8] Karlsson, R. e U. Isacson. Material-Related Aspects of Asphalt Recycling – State-of-the-Art. *Journal of Materials of Materials in Civil Engineering*, v. 18, n. 1, pp. 81-92, 2006, DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:1(81).
- [9] Ebels, L. J. Characterisation of Material Properties and Behaviour of Cold Bituminous Mixtures for Road Pavements. *Tese de Doutorado*, Stellenbosch, África do Sul, p. 269, 2008.
- [10] Modarres, A.; M. Rahinzadeh; M. Zarrabi. Field investigation of pavement rehabilitation utilizing cold in-place recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, n. 83, pp. 112-120, 2013, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.011>.
- [11] Hodgkinson, A. e A. T. Visser. The Role of Fillers and Cementitious Binders when Recycling with Foamed Bitumen or Bitumen Emulsion. *8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa*, n. 84, p. 10, África do Sul, 2004.
- [12] Tebaldi, G.; E. Dave; P. Marsac; P. Muraya; M. Hugener, *et al.* Classification of Recycled Asphalt (RA) Material. *2nd International Symposium on Asphalt Pavement and Environment*, p. 14, França, 2012.

- [13] NPRA. *Cold Bitumen Stabilized Base Courses*. Norwegian Public Roads Administration. Oslo, Noruega, p. 84, 1999.
- [14] Graziani, A.; C. Godenzoni; F. Cardone; M. Bocci. Effect of curing on the physical and mechanical properties of cold-recycled bituminous mixtures. *Materials and Design*, n. 95, pp. 358-369, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.094>, 2016.
- [15] Ma, T.; H. Wang; Y. Zhao; X. Huang e Y. Pi. Strength Mechanism and Influence Factors for Cold Recycled Asphalt Mixture. *Advances in Materials Science and Engineering*, p. 10, 2015, DOI: dx.doi.org/10.1155/2015/181853.
- [16] Perraton, D.; G. Tebaldi; E. Dave, F. Bilodeau *et al.* Tests Campaign Analysis to Evaluate the Capability of Fragmentation Test to Characterize Recycled Asphalt Pavement (RAP) Material. *8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials*, p. 965-976, 2016, DOI: 10.1007/978-94-017-7342-3_77.
- [17] DNER-ME 035/98 Método de Ensaio – Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, p. 6, 1998.
- [18] DNER-ES 317/97 Especificação de Serviço – Pavimentação – Pré-misturado a frio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, p. 14, 1997.
- [19] Marcandali, A. H.; K. L. Vasconcelos; A. L. Aranha; L. B. Bernucci; J. M. Chaves Laboratory and Field Evaluation of Cold-in-place RAP Recycling. *In: Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*, Washington, DC, 2013.
- [20] Esteves, S. F. Reciclagem de pavimentos betuminosos – Influência da granulometria nas propriedades mecânicas de misturas recicladas a frio com emulsão. *Dissertação de Mestrado*, Porto, Portugal, p. 90, 2014.
- [21] ASTM D 2166/06. *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. American Society for Testing and Materials, 2006.
- [22] ASTM D 6931/07. *Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures*. American Society for Testing and Materials, 2007.
- [23] AASHTO T307-99. *Standard Method for Preparing and Determining the triaxial resilient Modulus of soils*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 1999.
- [24] LCPC Bituminous Mixtures Design Guide, *The RST Working Group – Design of bituminous mixtures*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, França, 2007.
- [25] Santamarina, J. C.; K. A. Klein; Y. H. Wang e E. Prencke Specific surface: determination and relevance. *Canadian Geotechnical Journal*, n. 39, p. 233-241, 2002, DOI: 10.1139/T01-077.
- [26] Wirtgen. Manual de Reciclagem a Frio (2^a ed.), WirtgenGroup, p. 254, Alemanha, 2004.
- [27] Bardini, V. S. dos S.; J. L. F. Júnior e L. M. G. Klinsky. Influência do fíler mineral nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas. *Associação de Pesquisa e Ensino em Transportes*, p. 12, 2013.
- [28] Semmelink, C. J. The effect of material properties on the compactability of some untreated roadbuilding materials. *Tese de Doutorado*, Pretoria, p. 368, 1991.
- [29] Barra, B. S. Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas. *Tese de Doutorado*, Florianópolis, Santa Catarina, p. 327, 2009.
- [30] Barra, B. S.; L. Momm; Y. Guerrero e L. B. Bernucci. Characterization of granite and limestone powders for use as fillers in bituminous mastics dosage. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 86, n. 2, p. 995-1002, 2013. DOI: dx.doi.org/10.1590/0001-3765201420130165.
- [31] Milton, L. J. e Earland, M. Design guide and specification for structural maintenance of highway pavements by cold in-situ recycling. *Transportation Research Laboratory*, Reino Unido, 1999.
- [32] AUSTROADS. Review of structural design procedures for foamed bitumen design. AUSTROADS Technical Report, AP-T188/11, Sidney, Austrália, p. 82, 2011.
- [33] Bessa, I. S.; L. R. Almeida; K. L. Vasconcelos e L. B. Bernucci. Design of cold recycled mixes with asphalt emulsion and Portland cement. *Canadian Journal of Civil Engineering*, n. 43, p. 773-782, 2016. DOI: dx.doi.org/10.1139/cjce-2016-0111.