



26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DA SCHEELITA EM COMPOSIÇÕES ASFÁLTICAS

Francisco das Chagas da Costa Filho¹; Enio Fernandes Amorim²; Maria Del Pilar Durante³ & David Cavalcante da Silva²

RESUMO

Os setores da mineração e da construção civil são responsáveis por uma parcela significativa do crescimento econômico do país. Porém, assim como todas as atividades humanas, os referidos setores são fontes de grandes impactos ambientais. Em se tratando dos impactos oriundos da mineração citam-se como exemplos, no âmbito econômico, a geração de empregos, o desenvolvimento do local de produção e a injeção de produtos no mercado; e na vertente ambiental, os decorrentes da extração excessiva de matéria-prima e da disposição incorreta dos resíduos produzidos pelo beneficiamento, assim como a diminuição da qualidade da água superficial e subterrânea, do solo, modificação da paisagem e poluição do ar. Baseado neste contexto, o presente estudo avaliou a viabilidade técnica do uso do resíduo do beneficiamento da scheelita proveniente da Mina Brejuí, Currais Novos - RN, na composição de concretos asfálticos, em substituição ao agregado miúdo natural. Para isto, realizaram-se ensaios de caracterização física, química e mineralógica dos materiais, além de dosagens Marshall em composições de concretos asfálticos, tomando-se por base as normas brasileiras vigentes. A partir do programa experimental executado, pode-se verificar que o resíduo se apresentou tecnicamente viável para ser utilizado in natura como agregado miúdo artificial, demonstrando bom desempenho com relação aos parâmetros volumétricos e a estabilidade Marshall. É oportuno destacar que o traço de melhor desempenho foi constituído de 15% de brita 1, 35% de brita 0, 40% de pó de pedra, 6% de resíduo de scheelita e 4% de cimento Portland. Com relação a estabilidade, todos os traços com agregados naturais alcançaram valores de estabilidade acima de 500 kgf.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto Asfáltico; Scheelita; Resíduo de Mineração; Mina Brejuí.

ABSTRACT

The mining and civil construction sectors are responsible for a significant portion of the country's economic growth. However, like all human activities, these sectors are sources of major environmental impacts. When it comes to the impacts arising from mining, examples include, in the economic sphere, the generation of jobs, the development of the production site and the injection of products into the market; and on the environmental side, those resulting from the excessive extraction of raw materials and the incorrect disposal of waste produced by processing, as well as the reduction in the quality of surface and underground water, soil, modification of the landscape and air pollution. Based on this context, the present study evaluated the technical feasibility of using scheelite processing residue from the Brejuí Mine, Currais Novos - RN, in the composition of asphalt concrete, replacing natural fine aggregate. To this end, physical, chemical and mineralogical characterization tests of the materials were conducted, in addition to Marshall dosages in asphalt concrete compositions, based on current Brazilian standards. From the experimental program conducted, the residue was technically viable to be used in natura as artificial fine aggregate, demonstrating good performance in relation to volumetric parameters and Marshall stability. It is worth noting that the best performing mixture consisted of 15% crushed stone 1, 35% crushed stone 0, 40% stone dust, 6% scheelite residue and 4% Portland cement. Regarding stability, all mixes with natural aggregates reached stability values above five hundred kgf.

KEY WORDS: Asphalt Concrete; Scheelite; Mining Residue; Brejuí Mine.

¹ Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: filhoshalom@hotmail.com

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, e-mail: enio_amorim@yahoo.com.br; david.cavalcante@escolar.ifrn.edu.br

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, e-mail: pilarduranteingunza@gmail.com



INTRODUÇÃO

A construção civil é responsável por fatores semelhantes ao segmento ligado a área de mineração e requer uma atenção mitigadora no uso dos bens naturais, uma vez que esses bens se constitui de materiais finitos. Neste sentido, devido a diminuição das reservas dos recursos naturais e ao acúmulo de resíduos no meio ambiente, vários estudos estão utilizando os produtos residuais de diversos setores para compor materiais alternativos no setor da construção civil. A seguir, são apresentados alguns estudos, com fins voltados para o aproveitamento de resíduos na área de pavimentação.

Kato (2017) aplicou o resíduo da mineração do cobre sulfetado em misturas asfálticas visando a melhoria do desempenho frente as propriedades Marshall. Foram elaboradas misturas com as seguintes dosagens: piloto (75% de seixo + 25% de areia); 10% rejeito (75% de seixo + 15% areia + 10% de rejeito); 20% rejeito (75% de seixo + 5% areia + 20% de rejeito) e 25% rejeito (75% de seixo + 25% de rejeito). Com a realização dos ensaios, verificou-se uma melhoria nas características Marshall, com uma redução do teor de CAP em torno de 8% para a dosagem ótima com 7,73% de resíduo, a 4% de teor de vazios, quando comparado a dosagem sem resíduo. Segundo o autor, a redução do teor de ligante foi decorrente das características granulométricas do resíduo, que possibilitou um maior fechamento dos vazios da mistura; o que consequentemente, aumenta a resistência e durabilidade frente a agentes agressivos.

Gautam *et al.* (2018) estudaram misturas asfálticas com a incorporação de resíduo de mineração de pedra calcária como agregado em concretos asfálticos e macadame betuminoso denso. Foram realizadas dez misturas diferentes com a incorporação do agregado artificial, variando em um intervalo de 25% em peso, de 0 a 100% para as misturas de concreto asfáltico e macadame betuminoso denso. Em relação a estabilidade Marshall, todas as misturas de concreto asfáltico atingiram valores superiores a 9 kN (variaram de 10,35 kN para 100% de substituição a 12,08 kN sem substituição). As estabilidades das misturas com macadame betuminoso denso, na composição com 100% de substituição resultou em valores abaixo de 9 kN.

Diante dos bons resultados apresentados em diversos estudos com a utilização de resíduos em misturas asfálticas, o presente trabalho teve como objetivo a avaliação da viabilidade técnica do uso de resíduo oriundo do beneficiamento da scheelita na composição de concretos asfálticos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Características dos materiais envolvidos

O resíduo mineral empregado neste estudo é constituído de uma fração grossa de granulometria semelhante a uma areia natural, com diâmetros variando de 0,06 mm a 2 mm, coletado nas pilhas de rejeito da Mineração Tomaz Salustino S/A (Mina Brejuí) em Currais Novos/RN, Brasil. De acordo com Medeiros *et al.* (2010) a scheelita encontrada na região do Seridó do Estado do Rio Grande do Norte, é representante da Província Scheelitífera da Borborema, a mais importante reserva do minério no Brasil. Entre os municípios contidos nesta região, destaca-se Currais Novos - RN, que tem uma parcela da sua economia baseada na extração de recursos minerais; em especial, a scheelita, nas minas e garimpos, predominantemente em rochas metamórficas do Seridó (DANTAS; FERREIRA, 2010). A Figura 1 apresenta detalhes das pilhas de resíduo dispostas no entorno da mineração em Currais Novos/RN.



Figura 1. Entorno da Mina Brejuí: detalhes das pilhas de resíduos (COSTA, 2017)

Os demais agregados naturais foram obtidos com a empresa Britador Caicó, no município de Caicó - RN. Quanto ao ligante asfáltico, utilizou-se o CAP 50/70 adquirido junto a empresa TCPAV Ltda, com sede em Natal/RN. Os detalhes pertinentes a caracterização física dos materiais envolvidos encontra-se detalhados por meio da Tabela 1. A Figura 2 apresenta as curvas de distribuição granulométrica dos materiais.

Tabela 1. Características dos agregados utilizados na pesquisa (COSTA, 2017)

Parâmetros	Resíduo	Areia	Cimento
Dimensão Máxima Característica	2,4 mm	2,4 mm	0,075 mm
Módulo de Finura	2,9	2,0	0,012
Massa específica	2,98 g/cm ³	2,62 g/cm ³	2,82 g/cm ³
Parâmetros	Pó de pedra	Brita 0	Brita 1
Dimensão Máxima Característica	9,5 mm	9,5 mm	25 mm
% de finos	1,02%	-	-
Massa específica	2,78 g/cm ³	2,58 g/cm ³	2,61 g/cm ³
Absorção	-	2,29%	2,15%
Abrasão Los Angeles	-	-	62,51%
Índice de Forma	-	-	0,91

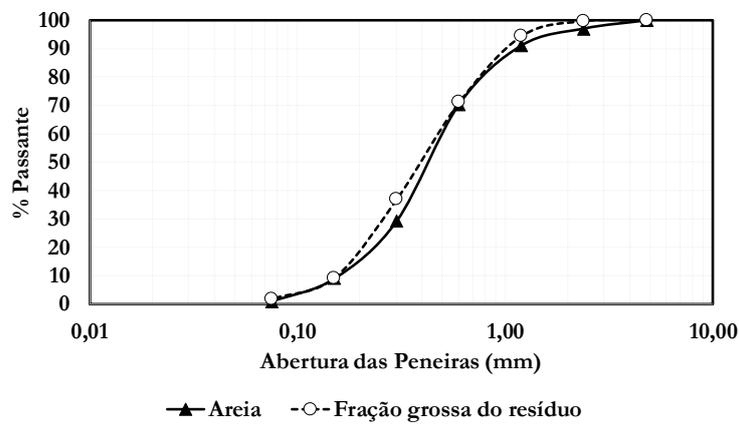


Figura 2. Análise granulométrica das areias natural e artificial (COSTA, 2017)

As características mineralógicas do resíduo ilustram que esse material possui picos discretos com a presença de calcita e do quartzo, como pode ser observado na Figura 3. Além disso, observa-se a existência da enstatita férrica, típica da composição da scheelita.

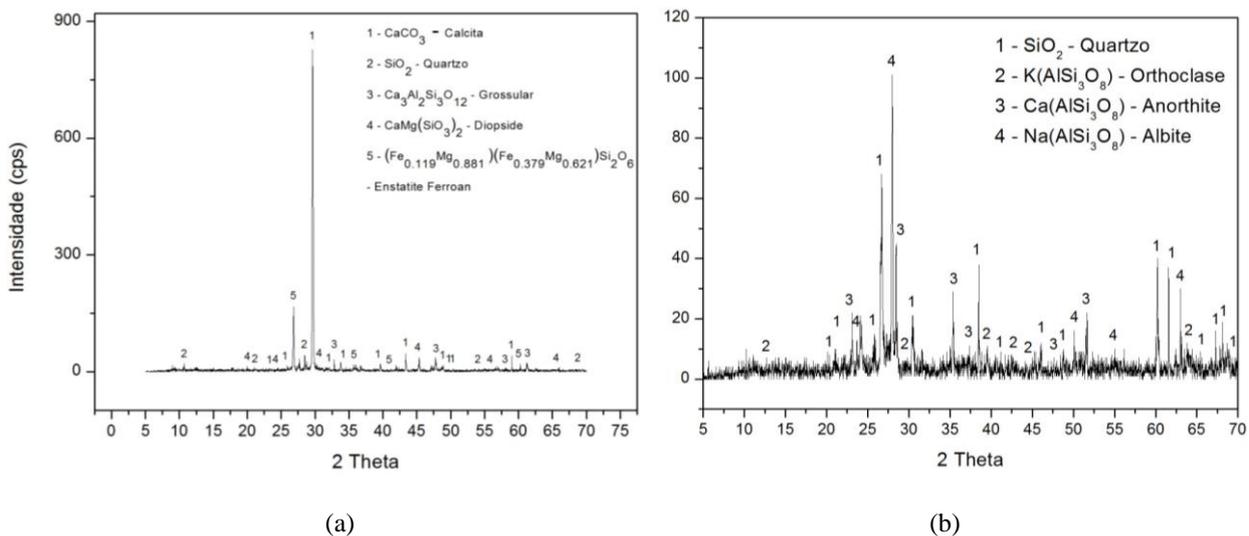


Figura 3. (a) Difratograma do resíduo da Scheelita / (b) Difratograma da areia natural (COSTA, 2017)

Com a Fluorescência de Raios - X (Tabela 2), percebe-se que os agregados miúdos natural e artificial possuem como principais óxidos: CaO, SiO₂, Fe₂O₃, ambos materiais com porcentagens de tais óxidos bem similares. Vale salientar que o alto teor de CaO (43,27%) e a presença de MgO (3,78%) observados na composição do resíduo podem gerar problemas devido ao provável poder expansivo. Tal situação foi mencionada por Fernandes (2011) ao trabalhar com escória de aciaria, onde os autores mencionavam a respeito da expansão comumente causada pela presença desses óxidos. Paiva (2013) realizou FRX de areia natural, e constatou que o dióxido de silício e óxido de alumínio, juntamente apresentavam 90% da composição.



Tabela 2. Composição química por FRX dos agregados miúdos (COSTA, 2017)

Resíduo				Areia Natural			
Óxidos	%	Óxidos	%	Óxidos	%	Óxidos	%
CaO	43,27	WO ₃	0,54	SiO ₂	48,20	MgO	1,30
SiO ₂	24,98	TiO ₂	0,40	Al ₂ O ₃	16,77	TiO ₂	1,14
Fe ₂ O ₃	13,27	MoO ₃	0,32	Fe ₂ O ₃	11,97	BaO	0,39
Al ₂ O ₃	9,65	BaO	0,21	CaO	5,78	P ₂ O ₅	0,24
MgO	3,78	ZrO ₂	0,21	ZrO ₂	5,55	MnO	0,18
SrO	1,47	Rb ₂ O	0,06	K ₂ O	4,15	Rb ₂ O	0,17
K ₂ O	1,01	ZnO	0,06	Na ₂ O	2,03	Y ₂ O ₃	0,14
MnO	0,79			SrO	1,95	ZnO	0,04

Programa experimental

Para analisar a incorporação do resíduo em concretos asfálticos como substituto da areia natural, analisou-se os parâmetros volumétricos e a estabilidade Marshall, regido pela norma do DNIT, ME-031 (DNIT, 2006). Optou-se em deixar pelo menos 45% dos materiais representados pelos agregados graúdos, pois em uma mistura betuminosa como o concreto asfáltico, a capacidade de suporte é fornecida com maior efetividade pelo agregado graúdo. Além disso, optou-se em fixar a quantidade de fíler em 4% para não gerar problemas como o preenchimento excessivo de vazios, o que geraria um pavimento mais rígido. As porcentagens de agregado miúdo variaram de 6% a 22% do total dos constituintes minerais, em virtude do melhor enquadramento granulométrico nos limites da curva C da norma 031/2006 do DNIT e a maior proximidade das curvas ideais. A Tabela 3 ilustra detalhes empregados nos traços em estudo:

Tabela 3. Estudo das Misturas Asfálticas - Dosagem Marshall DNIT - ME 031/2006 (COSTA, 2017)

Quantidade		Material
Amostras Padrão (Sem Resíduos)	Amostras com Resíduos de Scheelita	% de Substituição Prevista (Fração Graúda de Scheelita)
12	12	6%
12	12	8%
12	12	10%
12	12	12%
12	12	14%



As composições dos traços utilizados nesta pesquisa são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Composições dos traços de CBUQ (COSTA, 2017)

Traços com agregados naturais					
Materiais	1TP	2TP	3TP	4TP	5TP
Brita 1	15%	15%	15%	15%	15%
Brita 0	35%	35%	35%	31%	30%
Pó de pedra	40%	36%	32%	32%	29%
Areia	6%	10%	14%	18%	22%
Cimento	4%	4%	4%	4%	4%
Total	100%	100%	100%	100%	100%
Traços com a incorporação do resíduo					
Materiais	1TR	2TR	3TR	4TR	5TR
Brita 1	15%	15%	15%	15%	15%
Brita 0	35%	35%	35%	31%	30%
Pó de pedra	40%	36%	32%	32%	29%
Resíduo	6%	10%	14%	18%	22%
Cimento	4%	4%	4%	4%	4%
Total	100%	100%	100%	100%	100%

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tendo como foco as estabilidades alcançadas e os parâmetros volumétricos obtidos nos corpos de provas constituídos pelas composições de agregados naturais e pelo uso do resíduo mineral oriundo do beneficiamento da Scheelita, a Figura 4 apresenta os resultados obtidos neste estudo. Diante desse contexto, é oportuno destacar que os estudos realizados por Kato (2017), empregando resíduos de mineração de cobre sulfetado e Gautam *et. al.* (2018), utilizando resíduos de mineração de pedra calcárea, apresentou comportamentos semelhantes ao alcançados neste estudo, para as composições evidenciadas nas misturas asfálticas avaliadas.

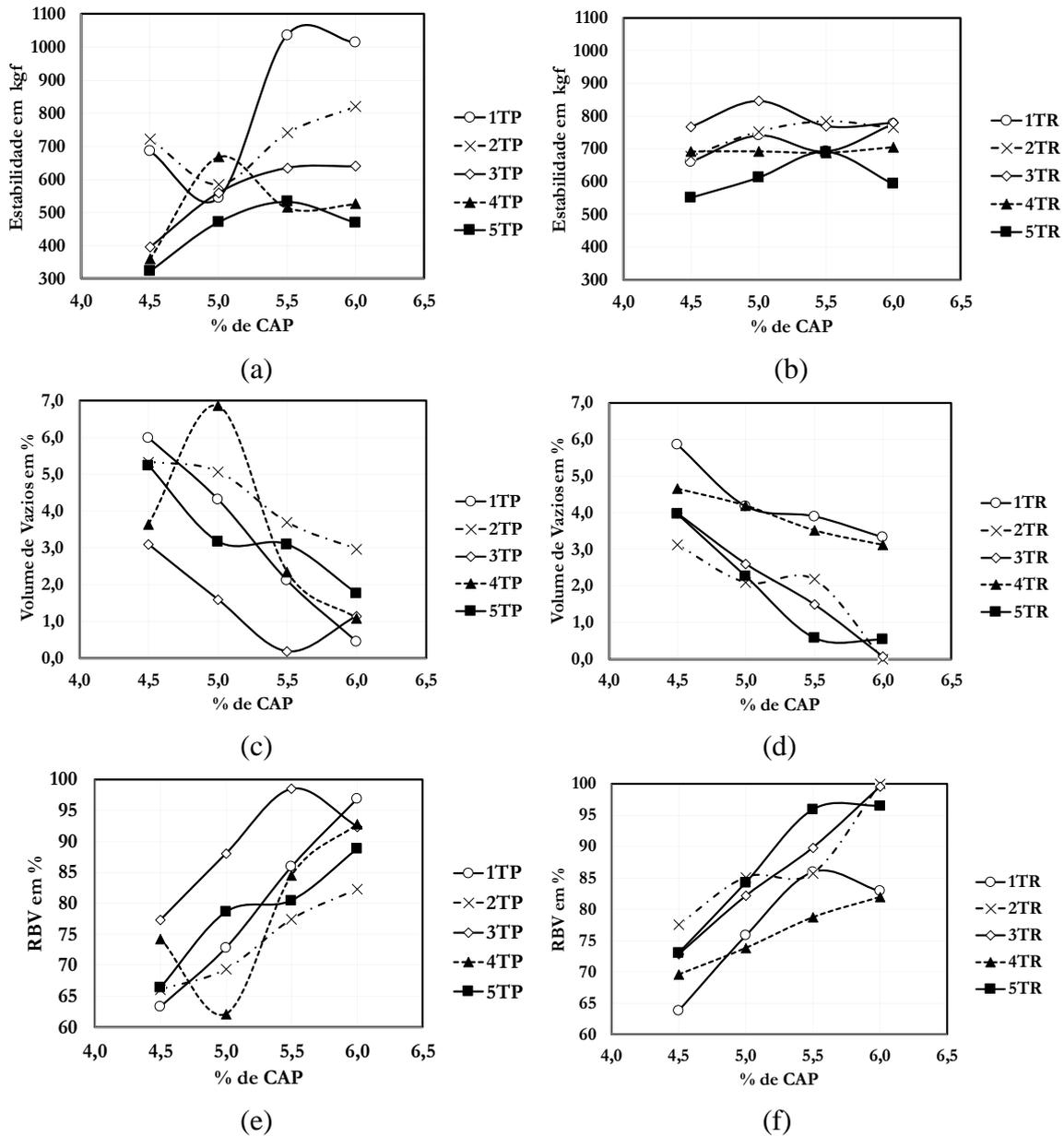


Figura 4. (a) Estabilidade Marshall x CAP - agregados naturais / (b) Estabilidade Marshall x CAP - resíduo / (c) Volume de vazios x CAP - agregados naturais / (d) Volume de vazios x CAP - resíduo / (e) Relação betume/vazios x CAP - agregados naturais / (f) Relação betume/vazios x CAP - resíduo. (COSTA,2017).

Na Figura 4 (a) observa-se que os maiores valores de estabilidade alcançados foram atingidos para os corpos de prova do 1TP, possivelmente por conter menor quantidade de areia em sua constituição, já que a porcentagem de agregado miúdo do primeiro traço (1TP) foi de 6%. Contrária a essa situação, os valores atingidos pelo traço 5TP com 22% de areia foram inferiores ao traço 1TP, apresentando uma menor capacidade de suporte devido à redução significativa da quantidade de agregados graúdos e intermediário, passando de 35% de brita 0 no traço 1TP para 30% no traço



5TP, e 40% de pó de pedra no primeiro traço para 29% no 5TP. Observa-se também que em todos os traços de CBUQ, em seu ponto de pico, foram obtidos valores de estabilidade acima de 500 kgf, atendendo ao requisito recomendado pela norma 031/2006 do DNIT (2006) para camadas de rolamento de pavimentos asfálticos. Para os traços constituídos com o resíduo na condição de agregado miúdo artificial, observou-se pela Figura 4 (b) que as curvas de estabilidade versus porcentagem de CAP não apresentaram um comportamento muito disperso como ocorrido com os agregados naturais. Analisando a viabilidade da utilização do resíduo para as dosagens analisadas somente pela estabilidade, observou-se que todos os traços atingiram valores de acima do recomendado pelo DNIT (2006), 500 kgf.

Na Figura 4 (c) é possível perceber que somente o traço 3TP não alcançou o limite superior para o %Vv, igual a 5%, determinados pela norma do DNIT 031/06 (DNIT, 2006). Isto provavelmente ocorreu devido a maior presença de material com graduação miúda na composição quando comparado com os traços 1TP e 2TP, e conseqüentemente maior preenchimento dos vazios. Este fato se torna prejudicial para camadas de rolamento, pois quando o pavimento for solicitado, não terá vazios suficientes para se deformar e aliviar as tensões, ou seja, se comportará de forma rígida, podendo gerar fissuras, e prejudicar a durabilidade do mesmo.

Analisando as curvas geradas pelos corpos de provas com a substituição do agregado miúdo pelo resíduo na Figura 4 (d), é perceptível que o traço que possui menor quantidade do resíduo (1TR), foi o que alcançou as maiores porcentagens de volume de vazios, e isto provavelmente foi gerado pela menor quantidade de material miúdo para preenchimento de vazios dos corpos de prova. Além disso, observou-se que o valor de %Vv alcançado pelo 1TR a 4,5% de CAP foi muito próximo ao valor atingido pelo 1TP na mesma porcentagem de ligante. Também se percebeu que o 2TR apresentou somente o limite mínimo do DNIT (2006), o que possivelmente geraria um revestimento com comportamento mais rígido do que os outros que se apresentaram dentro da faixa de $3,0\% \leq \%Vv \leq 5,0\%$. Para esse traço específico, percebeu-se que os corpos de prova de 6,0% de CAP tenderam 0% de volume de vazios, isso pode ter ocorrido por uma compactação mais efetiva, por um bom empacotamento dos grãos na mistura, além da massa específica aparente da mistura compactada ter sido semelhante a densidade máxima teórica; tal comportamento também foi observado no 3TR.

Comparando os resultados do 3TR com o traço padrão 3TP (Figura 4 (c)), observou-se que os corpos de prova com resíduo obtiveram melhores resultados, visto que tenderam a 4,0% de %Vv, enquanto os corpos de prova com a areia natural atingiram como valor máximo 3,11%, também a 4,5% de CAP. Com o aumento da porcentagem do resíduo, a partir do segundo traço (Figura 4 (d)), com exceção do 4TR, observou-se uma tendência a baixos valores de %Vv, próximos a valores nulos, devido a um maior preenchimento dos vazios.

Analisando a relação betume vazios - RBV, percebeu-se pela Figura 4 (e) que todas as curvas apresentaram uma tendência ao aumento da %RBV com o aumento do teor de ligante, com exceção para o traço 3TP a 5,5% de CAP e 4TP a 5,0% de CAP. Também foi observado que o traço 3TP a 5,5% de CAP alcançou %RBV próximo a 100%; tal fato pode ter ocorrido por uma compactação menos eficiente, deixando mais vazios para serem preenchidos com betume, além da utilização de agregados menos porosos e mais angulares, possibilitando mais vazios entre os agregados e menos absorção pelos constituintes minerais, de modo a maximizar o valor de RBV. Ainda analisando a Figura 4 (e), também é perceptível que os menores valores de RBV se deu na dosagem mais baixa de ligante, 4,5% de CAP, com exceção do 4TP, que teve seu menor valor a 5,0% de ligante asfáltico.



De forma análoga, observou-se nas curvas de %RBV versus %CAP que os maiores valores de %RBV se deu em dosagens mais altas, a 5,5% e 6,0% de CAP; tal característica pode ter ocorrido devido a maior quantidade de ligante na mistura asfáltica ou menores valores de %Vv, ocasionado por uma compactação mais eficiente ou pela utilização de agregados menos angulosos. Para os valores de RBV obtidos, infere-se que as curvas dos traços estudados ultrapassaram o limite superior recomendado pelo DNIT (82%), fato este relevante, porque altos valores de %RBV como os alcançados pelo primeiro traço com agregados naturais (98,83%) podem gerar problemas ao revestimento; pois, segundo Bernucci *et al.* (2006), o concreto asfáltico é muito sensível a variação do teor de ligante, e estes, se forem utilizados em altas doses, podem ocasionar deformações permanentes por fluência e/ou exsudação.

Analisando as curvas de %RBV versus %CAP dos traços constituídos por agregado miúdo artificial (Figura 4 (f)), percebeu-se a mesma tendência apresentada pelas curvas de %RBV x %CAP dos corpos de prova com agregados naturais, ou seja, a um aumento da porcentagem de RBV com o aumento da dosagem de ligante, sendo os maiores valores de %RBV a 6,0% de CAP, com exceção do traço 1TR, a 5,5% de CAP. Ainda no tocante aos parâmetros volumétricos, analisou-se qual seria a influência da estabilidade versus a porcentagem de volume de vazios e a relação betume/vazios. A seguir a Figura 5 ilustra detalhes dos resultados obtidos.

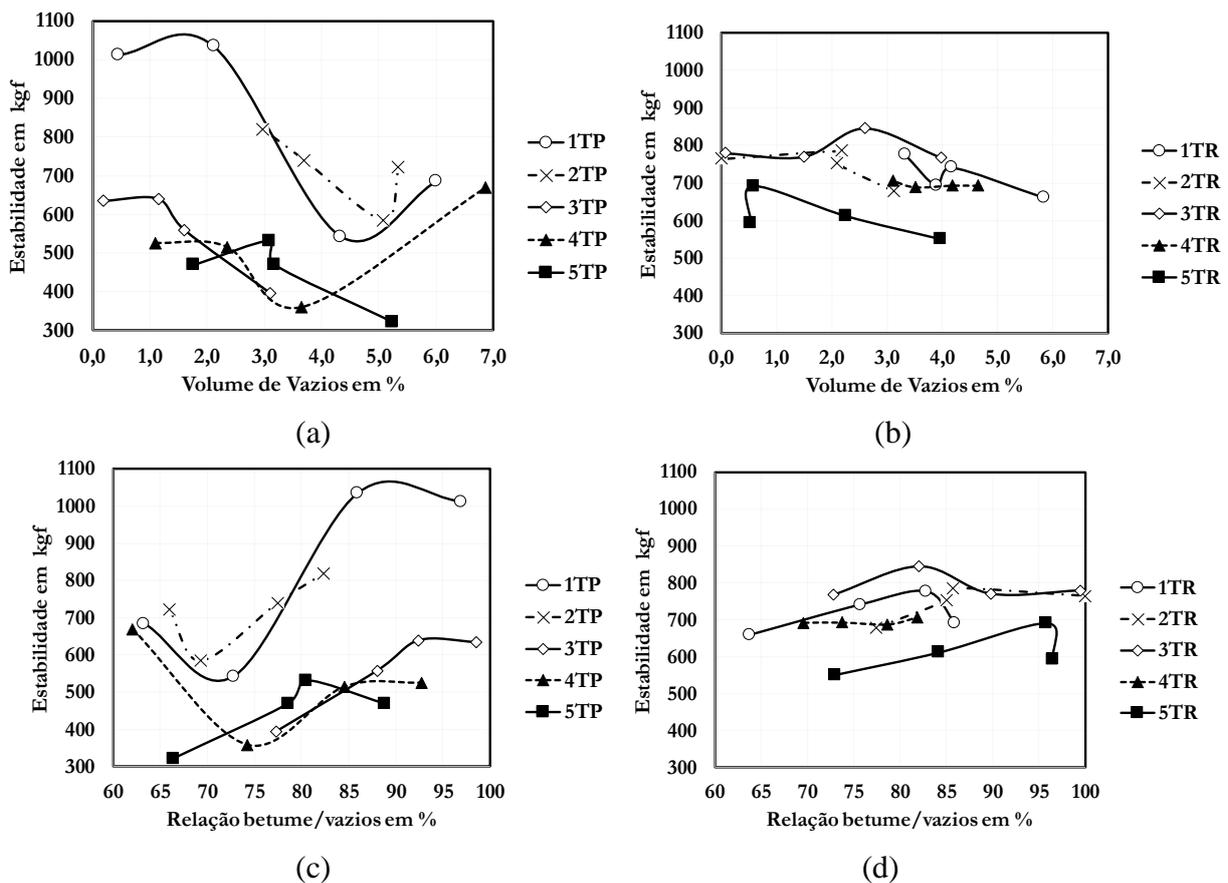


Figura 5. (a) Estabilidade versus %Vv - agregados naturais / (b) Estabilidade versus %Vv - resíduo / (c) Estabilidade versus %RBV - agregados naturais / (d) Estabilidade versus %RBV - resíduo. (COSTA, 2017).



A Figura 5 (a) descreve o comportamento de curvas que relaciona a estabilidade com a porcentagem de volume de vazios dos corpos de provas contendo agregados naturais, onde, observa-se que para alguns traços analisados como o 1TP, 2TP, 3TP, e, parcialmente, o 4TP e 5TP, verificam-se uma tendência a valores maiores de estabilidade em baixas porcentagens de volume de vazios e um decréscimo acentuado de estabilidade com o aumento da %Vv. Tal característica exposta pela Figura 4 (a), se dá pelo fato de que quanto menor o número de vazios em um corpo de prova, mais resistente será o mesmo; porém, com maior facilidade de sofrer deformações como trincas, visto que não se comportará adequadamente como um pavimento flexível, pois não terá vazios suficiente para permitir a ocorrência de deformações elásticas quando o pavimento for solicitado por carregamentos externos. Além disso, contribuem para este comportamento, o tipo, o tamanho e a angulosidade dos grãos da mistura. Com os dados expostos, pode-se perceber que os traços que obedecem às recomendações da norma do DNIT 031/2006 (2006) com relação a estabilidade e a %Vv, de no mínimo 500 kgf e $3,0\% \leq \%Vv \leq 5,0\%$, respectivamente, foram: 1TP, 2TP, e 5TP, ressalvando que o 5TP não atingiu os 4,0% para a determinação do teor ótimo de ligante acima dos 500 kgf; para tais traços, analisando somente a estabilidade acima de 500 kgf e %Vv de 4,0%, o mais viável a produção de pavimentos seria o 2TR, visto que oferece maior estabilidade as cargas solicitantes e %Vv adequado.

Outra relação muito importante é a interação entre a estabilidade e a %RBV, visto que se a quantidade de ligante em uma mistura asfálticas não for bem dimensionada, a mesma poderá estar susceptível a diversos problemas. A Figura 5 (c) mostra as curvas que relaciona a estabilidade com a %RBV dos corpos de provas com agregados naturais. Com a referida figura, percebeu-se que os possíveis traços que poderão ter problemas devido ao excesso de ligante nos vazios são: 1TP, 3TP, 4TP e 5TP; isto com base nas recomendações da norma do DNIT 031/2006 (2006), onde a relação betume/vazios deve estar entre o intervalo 75% - 82% para camadas de rolamento. Diante desses resultados, os pavimentos projetados com tais traços, poderão sofrer deformações permanentes por fluência e/ou exsudação caso não seja levando em consideração a dosagem ótima de ligante. A mesma análise pode ser feita para baixas porcentagens de ligante nos corpos de prova; os traços 1TP, 2TP, 4TP e 5TP poderão ter a durabilidade afetada e consequentemente serão susceptíveis a trincas. Vale salientar que tais análises estão sendo feitas para trechos específicos do gráfico.

Tendo em vista a determinação dos teores ótimos de ligante, calculou-se a média dos valores obtidos nas dosagens referentes a estabilidade máxima, ao maior valor da massa específica aparente da mistura compactada, e aos valores médios dos limites da %Vv e %RBV. Para os traços com agregados naturais em ordem crescente, observou-se consecutivamente os seguintes teores ótimos de ligante: 5,45%, 5,74%, 5,15%, 5,23% e 5,06%; sendo a maior dosagem de 5,74% e a menor 5,06% relacionada consecutivamente aos traços 2TR e 5TR. Para os traços com a incorporação do resíduo, apresentaram consecutivamente em ordem crescente de traço, os seguintes valores de teores ótimos de ligantes: 5,46%, 5,16%, 5,07%, 5,27% e 5,06%, sendo o maior valor (5,46%) associado ao traço 1TR e o menor (5,06%) ao 5TR.

CONCLUSÕES

Tendo em vista a caracterização física, química e mineralógica apresentada pelos materiais e o estudo das dosagens asfálticas, pode-se listar as seguintes considerações:

O resíduo em estudo se assemelha a uma areia natural quando se analisa as suas propriedades granulométricas e minerais constituintes. A presença da calcita, neste tipo de resíduo, não acarreta



nenhum prejuízo para efeito de quebra dos grãos. Os materiais naturais e o cimento asfáltico de petróleo apresentaram-se satisfatórios para aplicação em questão, obedecendo aos requisitos expostos nas normas pertinentes. A brita 1 obteve dimensão máxima característica de 25 mm e classificou-se como cúbica devido ao índice de forma resultar em 0,91. A Perda a abrasão de 62,51% foi superior ao recomendado pela norma 031/2006 do DNIT (2006), porém aceita, pois o material já fora utilizado em rodovias do RN apresentando desempenho satisfatório.

Com relação a estabilidade, todos os traços com agregados naturais alcançaram valores de estabilidade acima de 500 kgf, porém, deve-se verificar a dosagem ótima de ligante para atingir o desempenho e as propriedades desejadas para o pavimento projetado. Os traços contendo o resíduo como agregado miúdo apresentaram-se com boa eficiência no quesito de estabilidade, visto que todas as curvas, para as dosagens de ligantes propostos, apresentaram valores de estabilidade acima de 500 kgf, tornando-se viáveis para produção de CBUQ.

Considerando a porcentagem de volume de vazios, todos os traços apresentaram-se na faixa permitida pelo DNIT; porém, os traços 3TP, 2TR alcançaram somente o mínimo estabelecido pela norma 031/2006 do DNIT (2006). No tocante da porcentagem da relação betume vazios, todos os traços apresentaram-se viáveis para a produção de CBUQ; contudo, se faz necessário verificar a dosagem de ligante utilizada, visto que os traços 2TR, 3TR, 5TR, 3TP e 1TP alcançaram valores altos de %RBV para dosagens de CAP específicas, estando os mesmos susceptíveis a deformações por fluência e/ou exsudação.

Tendo como foco as correlações entre os parâmetros volumétricos e estabilidade, verificou-se uma tendência para o aumento de estabilidade a baixos valores de porcentagem de volume de vazios, corroborando com as observações feitas na relação entre estabilidade versus %RBV, visto que as curvas apresentaram uma tendência ao aumento de estabilidade com o aumento da %RBV, devido a ocupação dos vazios pelo ligante asfáltico.

Diante dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que para os ensaios realizados, o resíduo do beneficiamento da scheelita in natura apresentou-se viável para ser utilizada como agregado miúdo artificial em concreto betuminoso usinado a quente, para os traços analisados e expostos neste trabalho. Contudo, recomenda-se a realização de outros ensaios tecnológicos como o de adesividade por umidade induzida, módulo de resiliência, resistência a tração estática, vida de fadiga, creep estático, desgaste cântabro, simulação de tráfego em laboratório ou mesmo a aplicação de um trecho experimental, para fornecer um respaldo maior na análise do potencial técnico-econômico da aplicação do resíduo da scheelita em pavimentos asfálticos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas Mineração Tomaz Salustino S/A e Britador Caicó Ltda pelo fornecimento dos materiais da pesquisa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte por todo o suporte da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DANTAS, M. E.; FERREIRA, R. V. F. (2010). **Relevo**. In: PFALTZGRAFF, P. A. do S. **Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Norte**. Recife: CPRM, 227f, 2010.



DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2006 - ES: Pavimentos flexíveis, concreto asfáltico, especificação de serviço.** Rio de Janeiro/RJ, 2006.

FERNANDES, B. R. B. **Aproveitamento dos finos de Scheelita utilizando concentração centrífuga e lixiviação ácida.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal do Pernambuco. Recife/PE, 2011.

GAUTAM, P. K.; KALLA, P.; NAGAR, R.; AGRAWAL, R.; JETHOO, A. S. **Laboratory investigations on hot mix asphalt containing mining waste as aggregates.** Construction and Building Materials, 168, 143-152, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.115>.

GERAB, A. T. F. de S. C. **Utilização do resíduo grosso do beneficiamento da scheelita em aplicações rodoviárias.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN, 2014.

GODEIRO, M. L. da S.; BORGES JÚNIOR, J. P.; FERNANDES, B. R. B.; LEITE, J. Y. P. **Caracterização de pré-concentrado do rejeito de scheelita da mina Brejuí em concentrador centrífugo.** HOLOS, Ano 26, Vol. 5, 2010. ISSN 1807-1600.

KATO, R. B. **Aplicação do resíduo de mineração do cobre para melhoria do desempenho de misturas asfálticas.** Revista Eletrônica de Engenharia Civil – REEC, vol. 14, n. 1, 2017. ISSN: 2179-0612. D.O.I. 10.5216/reec.V14i1.46021.

LOBO, A. V. L.; J. S. MOTTER; L. F. R. MIRANDA. **Avaliação da utilização de agregado reciclado de concreto na fabricação de concreto betuminoso usinado a quente.** Revista Sodebras, v. 10, Nº 110, Fevereiro, 2015. ISSN 1809-3957.

MACHADO, T. G. **Estudo da adição de resíduo de scheelita em Matriz cerâmica: formulação, propriedades físicas e microestrutura.** Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN, 2012.

MEDEIROS, V. C.de; NESI, J. de R.; NASCIMENTO, M. A. L. do. **Recursos Minerais. In: PFALTZGRAFF, Pedro Augusto do Santos. Geodiversidade do estado do Rio Grande do Norte.** Recife: CPRM, 2010. 227f.

PAIVA, E. H. G. **Avaliação do concreto de cimento Portland com resíduo da produção de scheelita em substituição ao agregado miúdo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN, 2013.