



# Estudo de misturas compostas por resíduos de scheelita e solos destinados a pavimentação

*Study of mixtures composed of scheelite residues and soils intended for paving*

Gian Melo de Souza 

Enio Fernandes Amorim 

Marcos Alyssandro Soares dos Anjos 

Fagner Alexandre Nunes de França 

## Resumo

O crescimento da quantidade de resíduos provenientes da indústria e do meio urbano tem motivado a realização de pesquisas visando o seu aproveitamento em obras de infraestrutura. No estado brasileiro do Rio Grande do Norte ocorre a exploração do mineral scheelita, que é fonte de obtenção do raro elemento químico tungstênio, que apresenta importantes aplicações industriais. O seu processo de beneficiamento provoca uma elevada geração de resíduos e danos ambientais decorrentes da formação de pilhas de resíduos. Assim, nesse contexto, o presente trabalho apresenta uma análise do aproveitamento dos resíduos da mineração de scheelita associados a três tipos de solos provenientes de jazidas de três regiões do estado do Rio Grande do Norte. Com base em dados de análises granulométricas desses materiais, foram analisadas misturas com incrementos de 20%, 40% e 60% de resíduos de scheelita, em massa, associados aos três solos. Os resultados mostraram que a mistura com melhor composição granulométrica para camadas de base de pavimentos é composta pelo solo mais grosso entre os solos avaliados com 20% de resíduo, conforme normas internacionais da AASHTO e ASTM e conforme norma nacional do DNIT.

**Palavras-chave:** Misturas. Estabilização granulométrica. Pavimentação. Solos. Scheelita.

## Abstract

*The growth in the amount of waste from the industry and the urban environments has motivated the realization of research aimed at its use in infrastructure works. In the Brazilian state of Rio Grande do Norte the scheelite mineral is exploited, which is a source for obtaining the rare chemical element Tungsten, which has important industrial applications. Its beneficiation process causes a high generation of waste and environmental damage resulting from the formation of waste piles. Thus, within this context, the present work presents an analysis of the use of scheelite mining waste associated with three types of soils from deposits in three regions of the state of Rio Grande do Norte. Based on data from particle size analysis of these materials, mixtures with increments of 20%, 40% and 60% of scheelite waste, by mass, associated with the three soils, were analyzed. The results showed that the mixture with the best granulometric composition for pavement base layers is composed of the coarsest soil among the soils evaluated with 20% waste, according to international standards of AASHTO and ASTM, and according to the national DNIT standard.*

**Keywords:** *Mixtures. Granulometric stabilization. Paving. Soils. Scheelite.*

<sup>1</sup>Gian Melo de Souza

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Natal - RN - Brasil

<sup>2</sup>Enio Fernandes Amorim

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Natal - RN - Brasil

<sup>3,4</sup>Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

<sup>3</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba  
João Pessoa - PB - Brasil

<sup>4</sup>Universidade Federal da Paraíba  
João Pessoa - PB - Brasil

<sup>5</sup>Fagner Alexandre Nunes de França

<sup>5</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Natal - RN - Brasil

Recebido em 03/09/22

Aceito em 17/11/22

## Introdução

É cada vez mais importante encontrar soluções de reaproveitamento de resíduos provenientes da indústria e do meio urbano, tendo em vista a preservação da saúde humana e animal, a qualidade do solo e da água e a redução das poluições do ar, sonora e visual. A biodiversidade está relacionada fortemente com a geodiversidade, visto que as rochas determinam a natureza dos meios físicos e bióticos, com os quais os seres vivos interagem (DANTAS, 2019). Portanto, uma vez que o uso de recursos minerais também determina a qualidade de vida das populações, a sua exploração deve ocorrer de modo eficiente, sustentável e que também promova a preservação ambiental.

No Brasil, dentro do estado do Rio Grande do Norte, no município de Currais Novos, está localizada a maior mineradora de scheelita da América do Sul. É oportuno destacar que esse mineral constitui uma importante fonte de tungstênio (W), elemento químico utilizado nas indústrias metalúrgica, elétrica, mecânica aeroespacial, bélica e petrolífera (MEDEIROS, 2016). De acordo com Souza (2019), o processo de beneficiamento da scheelita causa uma elevada geração de resíduos, visto que apenas 0,8% do material extraído das minas são usados para obtenção desse elemento químico, que é um metal raramente encontrado na natureza. Os principais danos ambientais envolvidos na extração de scheelita são a erosão do solo, a abertura de acessos na flora, a poluição sonora gerada por martelotes pneumáticos, a geração de gases poluentes e a poluição visual devido à formação de pilhas de resíduos (GERAB, 2014)

Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho foi avaliar através da análise de dados de ensaios de análise granulométrica a possibilidade de aproveitamento de resíduos de scheelita, estudados por Souza (2019), em possíveis misturas com solos provenientes de três jazidas localizadas no estado Rio Grande do Norte (Médio Oeste, Agreste e Seridó) e caracterizados por Barreto (2020), para fins de aplicação em obras viárias.

## Referencial teórico

### Mineração de scheelita

No Brasil os principais depósitos de scheelita estão localizados na região do Seridó, que está situada entre os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, e constitui região com maior concentração de tungstênio do país. São conhecidas outras ocorrências nos estados do Ceará, Pernambuco, Alagoas, Minas Gerais e São Paulo. Esse mineral é composto quimicamente por tungstato de cálcio ( $\text{CaWO}_4$ ) e é uma importante fonte de obtenção de tungstênio (W). Outra fonte de obtenção desse metal é o mineral volframita ( $(\text{Fe},\text{Mn})\text{WO}_4$ ), com depósitos localizados nos estados do Pará, Rio Grande do Sul, Rondônia, Santa Catarina, São Paulo, Amazonas, Goiás e Mato Grosso (BRASIL, 2009). O tungstênio é um raro elemento químico que apresenta boa condutividade elétrica e elevados valores de densidade e ponto de fusão (maior que  $4.500\text{ }^\circ\text{C}$ ). Essas características possibilitam a sua aplicação nas indústrias metalúrgica, elétrica, mecânica, aeroespacial, bélica e petrolífera. O maior depósito brasileiro de scheelita está localizado no município de Currais Novos (RN), na província scheelitífera formada pelas minas de Brejuí, Barra Verde, Boca de Laje e Zangarelas. Desde a sua descoberta em 1943, esse depósito foi o responsável por 65% da produção nacional, e a mina Brejuí, que detém 70% das reservas da província, é considerada a maior mina de scheelita da América do Sul (DANTAS, 2019).

A extração da scheelita é realizada através do método de lavra subterrânea, que é indicado para extração de minérios em maiores profundidades. Esse processo é subdividido em diversas etapas e se inicia com a investigação do teor de scheelita em testemunhos do maciço rochoso. Com exceção de alguns equipamentos que foram modernizados, o seu processo de beneficiamento ainda é considerado rústico, pois mesas vibratórias e jígues exercem importante papel e não são utilizados efluentes químicos. Dados da Mineração Tomaz Salustino S.A. apontam que esse processo de beneficiamento gera 99,2% de resíduos, visto que apenas 0,8% do material extraído são aproveitados. Dados indicam produção diária de cerca de  $50\text{ m}^3$  de resíduos na mina Brejuí, totalizando aproximadamente  $18.000\text{ m}^3$  de produção anual, e a existência de cerca de 4,5 milhões de toneladas de resíduo grosso e 2,5 milhões de toneladas de resíduo fino (PAIVA, 2013).

No processo de extração e beneficiamento da scheelita inicialmente são utilizados explosivos no interior da mina. Conforme apresentado na Figura 1, os fragmentos de rocha com maior tamanho são separados por meio de uma grelha, com ou sem uso de martelotes, e o material passante é levado até um britador. Em seguida os fragmentos de rocha são levados a peneiras vibratórias que separam partículas arenosas de materiais que retornam ao britador para nova passagem nas peneiras. O material resultante é estocado e posteriormente conduzido ao moinho de martelo e tubulação em direção ao jig, que promove separação hidráulica das partículas para passagem em mesas vibratórias. Essas mesas vibratórias são formadas por superfícies planas

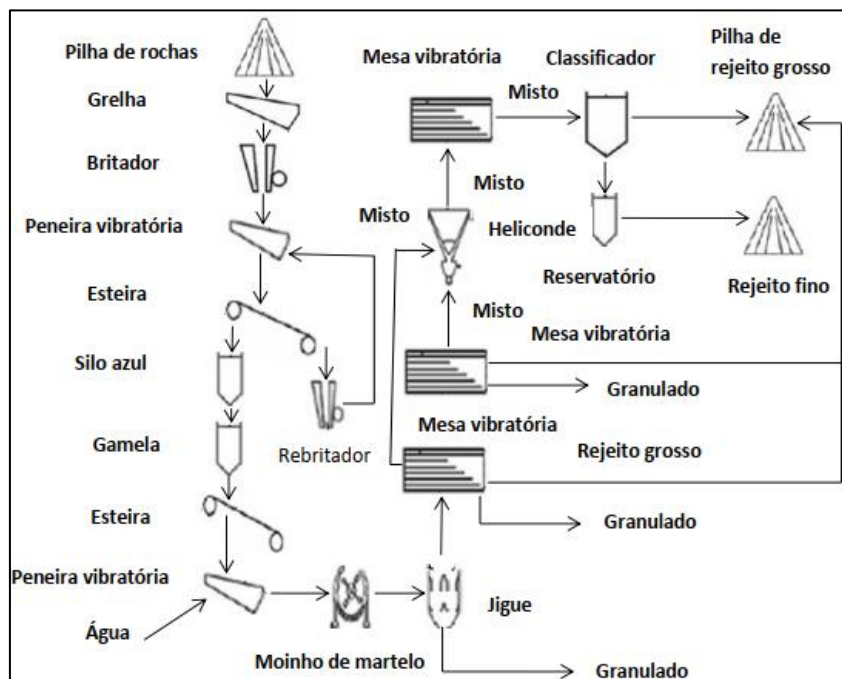
retangulares (deques) que promovem a separação de três tipos de materiais: scheelita, material misto e resíduo, que normalmente é descartado. A scheelita e o material misto são separados em calhas específicas. O material misto é destinado a outras mesas vibratórias e o processo se repete até que toda a quantidade de scheelita desse material seja obtida. O resíduo mais grosso e granular é depositado a céu aberto e a água é reaproveitada nas mesas vibratórias, após separação de partículas mais finas de resíduo por sedimentação. Esses resíduos finos também são descartados ao ar livre. A scheelita após beneficiamento e secagem ao sol é armazenada para posterior queima em fornos e remoção de impurezas e comercialização (GERAB, 2014; MEDEIROS, 2016).

## Estruturas de pavimentos

Pavimento (Figura 2) é uma estrutura composta por camadas com diferentes espessuras situadas sobre o subleito, que é a superfície resultante da terraplenagem, e que deve atender a critérios técnico-econômicos, resistindo com segurança e conforto aos esforços provenientes do tráfego ou condições climáticas. O comportamento estrutural dos pavimentos está relacionado diretamente com a espessura e rigidez das camadas e da interação elas (PEREIRA, 2021), cujas espessuras dependem basicamente das características do subleito, dos materiais empregados e do tráfego (ROZA, 2018). Em geral as características requeridas do subleito são fixadas pelo projeto geométrico, que define o traçado e a localização de ruas e estradas. Caso sejam constatados materiais de baixa capacidade de suporte deve ser realizado o reforço do subleito.

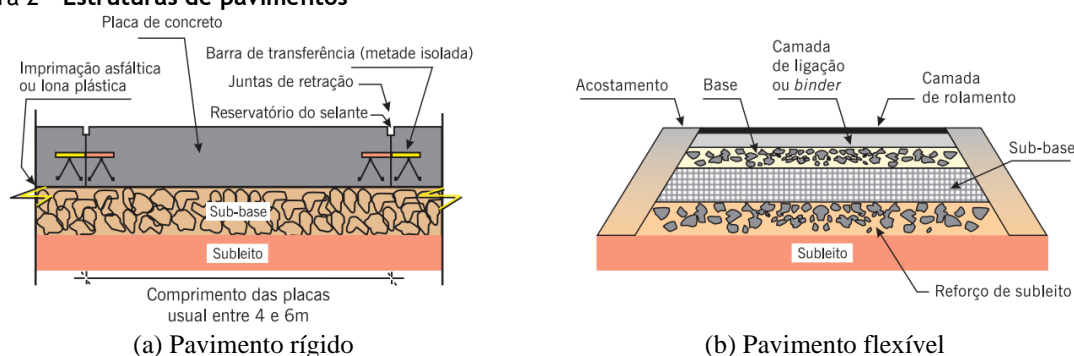
Há dois tipos de pavimentos rodoviários: rígido e flexível, que apresentam respectivamente revestimentos de concreto de cimento Portland e concreto asfáltico. Os pavimentos rígidos são apoiados geralmente sobre uma camada de material granular ou de material estabilizado com cimento, que é construída sobre o subleito ou reforço do subleito. Podem possuir armação com barras de aço para resistir a esforços de flexão, a depender da espessura das placas de concreto e da resistência das camadas adjacentes. Os pavimentos flexíveis podem ser subdivididos nas seguintes camadas: revestimento composto por misturas de agregados e ligantes asfálticos, base, sub-base e reforço do subleito. Os revestimentos asfálticos são compostos pela camada de rolamento, que recebe diretamente os esforços advindos do tráfego e impermeabiliza o pavimento, e pelas camadas de ligação (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Figura 1 - Processo de beneficiamento da scheelita



Fonte: Gerab (2014).

Figura 2 - Estruturas de pavimentos



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

## Solos para camadas de pavimentos

As características físicas dos solos destinados a camadas de pavimentos devem atender a critérios normativos e especificações de projeto que dependem do tráfego e período de projeto, disponibilidade de materiais, relevo e condições climáticas, e geometria e drenagem da via (GERAB, 2014).

De acordo com as normas americanas M 147 (AMERICAN..., 2004) e D 1241 (AMERICAN..., 2007), camadas de base e sub-base podem ser compostas por misturas de solo e argila; cascalho, rocha, escória de alto forno; ou areia, materiais britados constituídos de cascalho, rocha britada, escória com ou sem argamassa de solo ou qualquer combinação desses materiais. Além disso, ser isentas de matéria orgânica e fragmentos de argila. O material retido na peneira 2 mm (AMERICAN..., 2004) ou 4,75 mm (AMERICAN..., 2007) deve possuir abrasão Los Angeles menor que 50%; o material passante nessas peneiras deve possuir fração passante na peneira de abertura 75  $\mu$ m inferior a 2% da fração passante na peneira de abertura 425  $\mu$ m. Essa fração deve possuir limite de liquidez inferior a 25% e índice de plasticidade menor que 6%. A composição granulométrica deve satisfazer a uma das graduações da Tabela 1 (AMERICAN..., 2004) ou da Tabela 2 (AMERICAN..., 2007). De acordo com a norma ES 141/2010 (DEPARTAMENTO..., 2010), os solos destinados a camadas de base de pavimentos rodoviários devem atender a uma das graduações da Tabela 3.

## Pesquisas nacionais e internacionais de misturas com solos para pavimentação

Silva (2016) analisou o comportamento geotécnico de resíduos de polimento de porcelanato tendo em vista o reaproveitamento em aterros rodoviários. Após caracterização geotécnica desses resíduos em misturas com solos, foram avaliados o comportamento mecânico, a capacidade de carga dessas misturas, bem como análise ambiental desse resíduo. Entre os resultados observou-se que tanto as misturas quanto o solo puro não atenderam aos requisitos das normativas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para aplicação em pavimentação em camadas de sub-base, mas somente como reforço do subleito. Os ensaios de adensamento unidimensional apontaram maior tendência de deformação das misturas com o resíduo em relação ao solo puro, bem como os ensaios mecânicos resultaram em maiores recalques e ruptura por punção. Observou-se também que até o teor de 10% de acréscimo desse resíduo ao solo não foram evidenciadas mudanças significativas em relação ao solo puro. No entanto, para acréscimos superiores a 10% ocorreu perda de desempenho mecânico. Por fim, apenas o solo puro e a mistura com acréscimo de 5% apresentaram condições de utilização como camadas de sub-base conforme as normativas do DNIT.

Vasconcelos, Barroso e Vieira (2019) estudaram a viabilidade do reaproveitamento de cinzas provenientes da queima do carvão que apresentam elevados custos de estocagem e riscos ambientais. Na pesquisa foram analisadas misturas compostas por cinzas de carvão provenientes de uma termoeletrica no estado do Ceará; solos locais; e cal hidratada visando aplicação em obras de pavimentação. Esses materiais foram submetidos a ensaios de caracterização (granulometria, limites de consistência, FRX, solubilização e lixiviação) e mecânicos (compactação Proctor, CBR, expansão, módulo de resiliência, resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, triaxial de carga cíclica) para posterior dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos teóricos. Os resultados das análises indicaram aptidão técnica para projetos de pavimentos na mistura composta por 50% de solo e 50% de cinza e na composta por 95% de cinza e 5% de cal. As análises mecanísticas empíricas revelaram bom desempenho de duas estruturas de pavimentos de acordo com o volume de tráfego, com a presença de cinzas nas camadas de base e/ou sub-base.

Agus e Mohamed (2019) analisaram o emprego de misturas de escória com cimento Portland como material estabilizador para melhoria de um solo expansivo existente abaixo de uma camada de solo arenoso, visando a construção de camadas de sub-base em estradas na cidade de Perth, Austrália Ocidental. Após a realização de ensaios de caracterização e desempenho geotécnico em misturas com três diferentes proporções de escória, foi determinada a sua melhor proporção nesse solo expansivo com base nos resultados de ensaios de compressão axial não confinada e exigências contidas na norma australiana AS 1289 (STANDARDS..., 2019). Os resultados indicaram adequabilidade de misturas contendo 13,5% de escória e 1,5% de cimento com 28 dias de cura, que apresentaram resistência à compressão axial não confinada oito vezes superior ao exigido para aplicação em pavimentação e valor de CBR quatro vezes superior ao solo não estabilizado. De acordo com o *Austrroads Guide of Pavement Technology* (AUSTROADS, 2017), a argila analisada possuía expansibilidade moderada a alta e índice de atividade que a caracterizava como ativa ( $IA > 1,25$ ). Ensaios de permeabilidade também indicaram valores de coeficiente de permeabilidade relativamente baixos, mostrando menor susceptibilidade a lixiviação da pasta de cimento e materiais finos, assim como evitaria que a água subterrânea chegasse às camadas adjacentes do pavimento. Além de melhoria de desempenho do solo destinado a subleito de pavimentos, devido à maior massa específica seca e menor umidade de compactação, o uso desses resíduos mencionados pode diminuir a quantidade desse tipo de poluente na natureza.

Tabela 1 - Graduação de solos para camadas de base

Abertura da peneira (mm)	Graduação (%)					
	A	B	C	D	E	F
50,00	100	100	-	-	-	-
25,00	-	75-95	100	100	100	100
9,50	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-
4,75	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
2,00	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
0,425	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
0,075	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20	8-25

Fonte: American Association of State Highway And Transportation Officials (2004).

Tabela 2 - Graduação de solos para camadas de base

Abertura da peneira (mm)	Graduação (%)					
	Tipo 1				Tipo 2	
	A	B	C	D	E	F
50,00	100	100	-	-	-	-
25,00	-	75-95	100	100	100	100
9,50	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-
4,75	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
2,00	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
0,425	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
0,075	2-8	5-15	5-15	8-15	6-15	8-15

Fonte: American Society for Testing and Materials (2007).

Tabela 3 - Graduação de solos para camadas de base

Abertura da peneira (mm)	Graduação (%)						Tolerâncias
	A	B	C	D	E	F	
50,00	100	100	-	-	-	-	$\pm 7$
25,00	-	75-90	100	100	100	100	$\pm 7$
9,50	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	$\pm 7$
4,75	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100	$\pm 5$
2,00	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	$\pm 5$
0,425	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	$\pm 2$
0,075	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	$\pm 2$

Fonte: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010).

Yin, Lekalpure e Ndiema (2022) caracterizaram misturas compostas por um solo expansivo do oeste do Quênia, cal e cinza vulcânica através de ensaios de determinação de limites de Atterberg, compactação Proctor, expansibilidade e Índice de Suporte Califórnia. Essas misturas foram feitas com diferentes proporções. Esse solo apresentou limite de liquidez igual a 71%, limite de plasticidade 36%, índice de plasticidade 35%, CBR de 1,7% e expansibilidade de 3%. A adição de cal e cinza vulcânica reduziu a plasticidade das misturas e isso foi atribuído a propriedades pozolânicas da cal e da cinza que, após contato com solos expansivos, formam compostos com características cimentícias que reduzem a plasticidade. A redução da massa específica seca máxima e umidade ótima das misturas foi atribuída à agregação de partículas provocada pela cal e substituição de grãos de solo por partículas de cal, que é um material relativamente mais leve. A mistura contendo 4% de cal e 15% de cinza apresentou a maior redução no limite de liquidez (38%). Os resultados mostraram que misturas com 20% de cinza vulcânica 3% e cal aumentou o CBR do solo em 10,76 vezes, reduziu a plasticidade em 29% e a expansibilidade em 88%. Essas misturas possibilitaram atendimento a requisitos normativos do Quênia para materiais de sub-base de pavimentos.

Bandara *et al.* (2020) estudaram o potencial de estabilização de três tipos de solo de baixa qualidade que usualmente são encontrados no subleito de rodovias no estado de Michigan, nos Estados Unidos, com materiais de menor custo. Usualmente esses solos têm sido estabilizados com cimento Portland e cal, que tem elevado custo. Os materiais utilizados para a estabilização nessa pesquisa foram pó de forno de cimento (CKD - Cement Kiln Dust), pó de forno de cal (LKD - Lime Kiln Dust) e cinzas volantes (FA - Fly Ash), que são subprodutos industriais disponíveis localmente e que são parcialmente utilizados para outros fins secundários, enquanto o restante é descartado em aterros sanitários. Os solos foram caracterizados previamente e se trata de duas argilas (Solo 1 e Solo 3) de baixa plasticidade (CL) e um silte de baixa plasticidade (ML) (Solo 2), de acordo com o SUCS, ou solos de classificações A-6 (Solo 1), A-4 (Solo 2) e A-7-6 (Solo 3), e, de acordo com a AASHTO. Posteriormente os corpos-de-prova de solos puros e de misturas foram submetidos a ensaios de compressão não confinada após períodos de cura de 3 dias e 7 dias. As misturas com 6% de LKD apresentaram ganho de resistência com o Solo 1. Os resultados mostraram claramente que os subprodutos industriais utilizados são estabilizadores eficazes para os três tipos de solo de subleito analisados a longo prazo, além de ser uma alternativa com vantagem econômica e sustentável, em comparação com as práticas usuais de uso de cimento e cal.

Praveen, Pandu e Chandrabai (2020) analisaram a eficácia de um solo marginal argiloso do estado de Telangana na Índia reforçado com fibras de aço e modificado com cimento e/ou misturado com cinza volante, para melhorar o valor do CBR para construção de subleito e propor uma solução de descarte de cinzas volantes. A cinza volante foi proveniente de uma usina termoeletrica e foi acrescentada nas misturas com o solo na proporção de 10% em massa. As fibras de aço foram utilizadas na proporção de 4% em volume. Os ensaios CBR com as misturas foram realizados com umidade correspondente à umidade ótima do solo argiloso. As misturas de solo com cimento apresentaram aumento significativo nos valores de CBR com 3% de cimento, e esse comportamento foi atribuído à modificação da natureza plástica das partículas mais finas presentes no solo. Os autores indicam que a mistura de solo com 10% de cinza volante apresentou resultado mais significativo devido a fatores como o preenchimento de vazios e empacotamento de partículas de cinza volante. O solo reforçado com fibras de aço apresentou aumento de resistência significativo nas misturas com 4% de fibras, atribuído ao desenvolvimento de forças de atrito na interface das partículas. O cimento e cinzas volantes nas misturas com esse solo, que possui maior proporção de finos (silte e argila), demonstraram ser benéficas por reduzir a plasticidade, enquanto a fibra de aço aumentou a resistência das misturas.

## **Pesquisas no Rio Grande do Norte de misturas com solos para pavimentação**

Barreto (2020) analisou misturas de resíduos de construção e demolição (RCD) com amostras de solos provenientes de jazidas de três regiões do estado Rio Grande do Norte (Médio Oeste, Agreste e Seridó). Apenas o “Solo 01”, um material mal graduado, apresentou caracterização física adequada quanto aos limites de consistência ( $LL=NL \leq 25\%$ ;  $IP=NP \leq 6\%$ ). A composição granulométrica desse solo satisfaz à Graduação “C” e pode ser aplicado em camadas de base e sub-base. Em relação aos dados de ensaios de compactação com reuso de material, esse solo apresentou valores significativos de peso específico seco máximo ( $\gamma_{d,máx}$ ) para as energias intermediária e modificada e expansão nula. Os ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) mostraram que a aplicação da energia intermediária promoveu melhores resultados. Segundo a NBR 15115 (ABNT..., 2019) esse solo pode ser utilizado como material de base em vias de tráfego com número “N” inferior a  $5 \times 10^6$ . Os demais solos mostraram-se inadequados para aplicação em camadas de base, de acordo com a norma ES 141 (DEPARTAMENTO..., 2010). O “Solo 02” limita-se à aplicação como material de subleito, de acordo com a norma ES 108 (DEPARTAMENTO..., 2009). Por outro lado, o “Solo 03” pode ser

utilizado como material de camada de sub-base granulometricamente estabilizada, quando aplicada a energia modificada; caso aplicadas as energias normal ou intermediária, o material se limita à aplicação em camadas de subleito.

Dantas (2015) estudou a reutilização de resíduos do beneficiamento do minério de ferro de jazida localizada no município de Jucurutu em camadas de base, sub-base, reforço do subleito e subleito em pavimentos de rodovias. Esses resíduos, provenientes do grupo de mineração Mhag Serviços e Mineração S.A., na mina do Bonito, foram empregados com amostras de solo provenientes do município de Macaíba em um ponto localizado na marginal da BR-304 em localidade denominada Reta Tabajara. Os resultados das análises indicaram possibilidade de utilização dos resíduos em camadas de base, sub-base, reforço do subleito e subleito, quando compactados na energia intermediária e modificada. Por outro lado, as misturas com o resíduo (15% de resíduo com 85% de solo; 25% de resíduo com 75% de solo; 50% de resíduo com 50% de solo) estão limitadas à aplicação em camadas de sub-base de pavimentos, reforço do subleito e subleito conforme o prescrito pela norma ES 301 (DEPARTAMENTO..., 1997).

Toledo (2014) analisou misturas de solo laterítico com resíduos de perfuração para extração de petróleo (fragmentos de rochas e solos) visando seu emprego na execução de aterros compactados em obras de terra e destinação do resíduo. O solo foi extraído no município de Parnamirim e segundo Franco (2012) foi caracterizado como latossolo de baixa capacidade carga, sendo classificado como areia argilosa (SC), de acordo com o sistema SUCS (sistema unificado de classificação de solos), e, areia siltosa ou argilosa (A-2-6), conforme o sistema rodoviário TRB (*Transportation Research Board*). Na pesquisa de Toledo (2014), houve mudança apenas na classificação segundo o SUCS, sendo o solo caracterizado como SC-SM. Os ensaios de FRX e DRX indicaram que o solo é constituído principalmente por quartzo com presença do argilomineral caulinita. O resíduo é proveniente de depósito na cidade de Mossoró, RN e foi caracterizado como silte areno-argiloso com presença de pedregulhos, classificado como A4 e CL-ML de acordo com os sistemas TRB e SUCS, respectivamente. Depois da caracterização do solo e do resíduo, foram analisadas misturas compostas por 2,5%, 5%, 10% e 15% de resíduo em relação à massa de solo seco. Os resultados de ensaios de compactação, CBR, cisalhamento direto e adensamento indicaram que as misturas atendem às prescrições normativas vigentes do DNIT e há possibilidade de aplicação, desde que sejam realizados mais ensaios, análises estatísticas e aplicação das misturas em campo.

Pereira (2021) analisou a adequabilidade de misturas compostas por solo típico da região do Seridó no Rio Grande do Norte e resíduos de construção e demolição (RCD) provenientes da cidade de Natal, RN. Foram realizados dimensionamentos de pavimento flexível com essas misturas e comparados com dimensionamentos feitos com misturas de solo-brita, para utilização em camada de base e/ou sub-base. Os dois diferentes métodos de dimensionamento utilizados e comparados conforme a normativa do DNIT foram o “MeDiNa”, que utiliza valores de módulo de resiliência (MR); e o método do DNER, com valores de Índice de Suporte Califórnia (CBR). Essa comparação foi feita também com base no custo relacionado e sustentabilidade. Os resultados obtidos nessa pesquisa levaram à conclusão de que há uma tendência de aumento no valor do MR em misturas de solo com RCD em relação aos solos na condição pura. Em comparação com o método de dimensionamento antigo do DNER, mais simplificado, o método estudado nessa pesquisa conduz a uma otimização na determinação da espessura de cada camada do pavimento, redução de custos (desde que as unidades de beneficiamento do RCD estejam próximas aos locais de geração desse material) e possibilidade de emprego de materiais alternativos, pois considera a variedade de composições granulométricas e de ligantes. Destaca-se a necessidade de maior número de laboratórios no país que realizem os tipos de análises realizadas na pesquisa, bem como crescimento da aplicação de RCD na pavimentação.

Souza (2019) desenvolveu agregados leves com misturas compostas por resíduos de scheelita, lodo de esgoto e cinza da casca do arroz, com ou sem argilas regionais, visando aplicação em obras e serviços de engenharia. Propôs-se também a verificação da teoria de Riley e encontrar a melhor mistura e temperatura para a obtenção desses agregados; investigar a influência desses resíduos e temperatura de sinterização em propriedades desses agregados leves; e realizar classificação baseada em normas técnicas nacionais e internacionais. Os resultados mostraram que esses resíduos apresentam benefícios no processo de produção de agregados leves destinados a diferentes aplicações. Em especial, os resíduos de produção de scheelita (RPS), em virtude de sua composição mineralógica, proporcionam aumento de expansibilidade e redução da absorção de água. Quando aplicados juntamente com os outros resíduos estudados na mistura com essas argilas, é possível fabricar agregados leves de excelente qualidade compostos com até 85% de resíduos para diferentes aplicações, desde não estruturais até concretos de alta resistência. Desse modo, tais resíduos, se devidamente utilizados, deixariam de ser descartados em aterros sanitários e ganhariam atrativo comercial, apresentando também benefícios tecnológicos, sustentáveis e sociais.

## Método

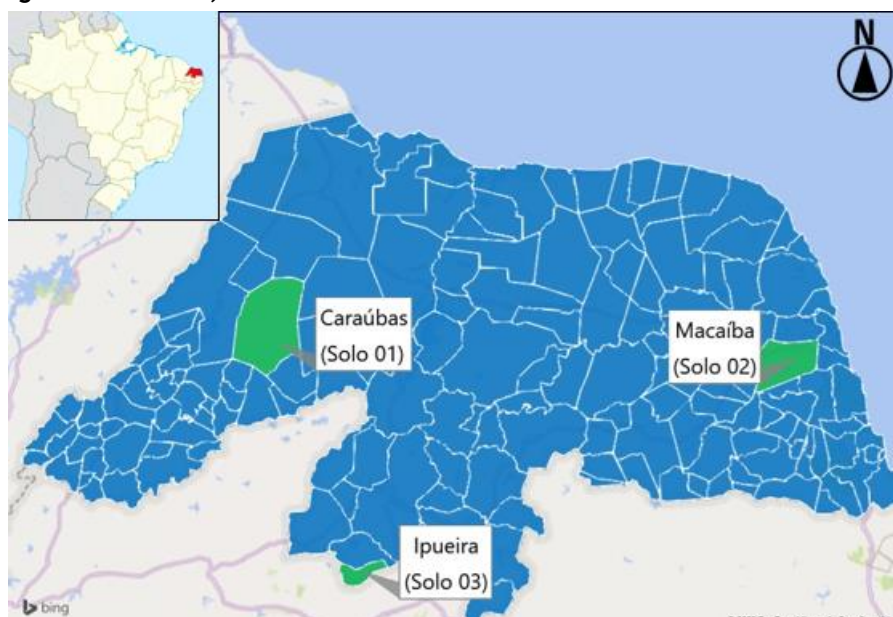
### Solos

Os solos avaliados nesta pesquisa são provenientes de jazidas localizadas em três microrregiões do estado do Rio Grande do Norte denominadas Médio Oeste, Agreste e Seridó, nas quais estão localizados os municípios de Caraúbas, Macaíba e Ipueira, respectivamente.

Conforme a Figura 3, a amostra de solo denominada “Solo 01” é proveniente de uma jazida localizada no município de Caraúbas (latitude  $5^{\circ} 47' 45''$  sul e longitude  $37^{\circ} 33' 11''$  oeste). A amostra de solo denominada “Solo 02” é proveniente do município de Macaíba e foi coletada nas proximidades da BR-101. A amostra de solo denominada “Solo 03” foi coletada no município de Ipueira (latitude de  $6^{\circ}49'13''$  sul e longitude  $37^{\circ}12'16''$  oeste). Essas amostras são apresentadas na Figura 4 durante secagem prévia. Barreto (2020) estudou misturas desses solos com resíduos de construção e demolição de obras (RCD) visando aplicação em obras de pavimentação.

As Tabelas 4 e 5 apresentam a classificação dos solos e a caracterização física de cada um deles identificadas por Barreto (2020) e a Figura 5 apresenta as curvas granulométricas dos três solos com e sem o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio, conforme a NBR 7181 (ABNT, 1984). É oportuno destacar, segundo Barreto (2020), que os resultados apresentados com o uso de solução defloculante exerceu menor influência no ensaio de sedimentação com o Solo 01, quando comparado ao Solo 02 e o Solo 03. Não foi possível calcular os valores de CNU (coeficiente de não uniformidade) e CC (coeficiente de curvatura) do Solo 02 e do Solo 03 por serem desconhecidos os diâmetros equivalentes em que passam 10% desses solos ( $D_{10}$ ).

Figura 3 - Origem dos Solos 01, 02 e 03



Fonte: adaptado de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2020).

Figura 4 - Solos 01, 02 e 03



Fonte: adaptado de Barreto (2020).



Tabela 4 - Classificação dos solos

Solo	Sistema unificado de classificação de solos (SUCS)	Transportation Research Board (TRB)
01	Pedregulho mal graduado (GP)	A-1-a
02	Areia siltosa (SM)	A-4
03	Silte de baixa compressibilidade (SM)	A-4

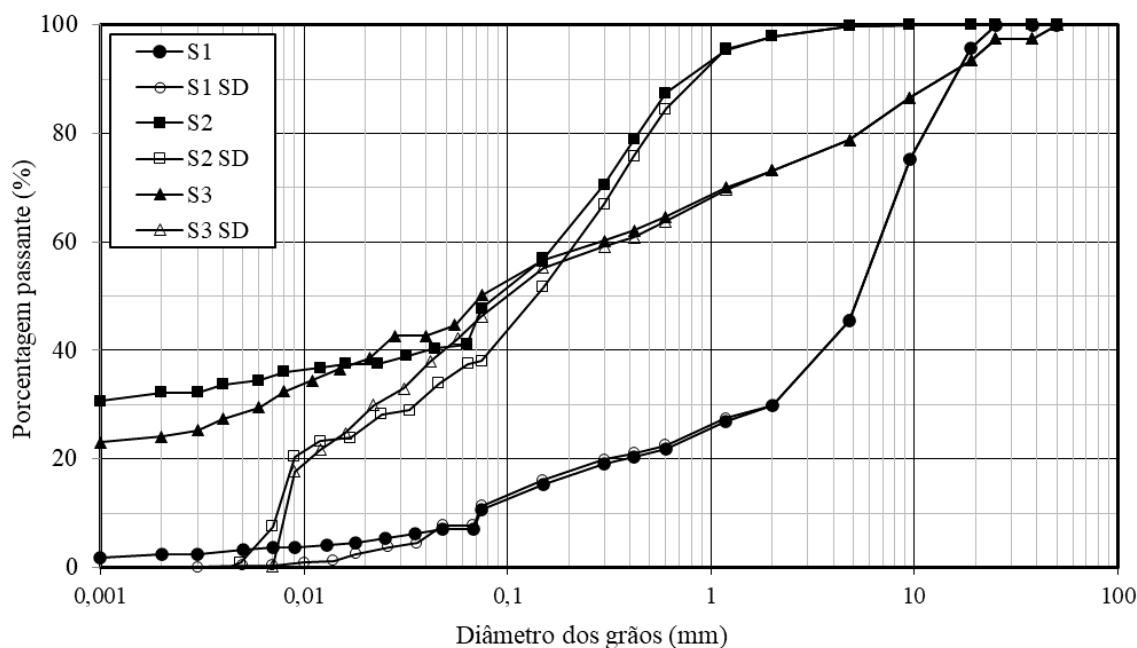
Fonte: adaptado de Barreto (2020).

Tabela 5 - Caracterização física dos solos

Solo	Ensaio de sedimentação	CNU	CC	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Atividade das argilas
01	Com def.	85,00	8,90	2,55	0	0	0	0
	Sem def.	94,44	9,89					
02	Com def.	-	-	2,59	28	23	5	0,15
	Sem def.	29,33	0,66					
03	Com def.	-	-	2,57	31	28	3	0,12
	Sem def.	34,62	0,23					

Fonte: adaptado de Barreto (2020).

Figura 5 - Curvas granulométricas dos solos. (a) SD: sem defloculante



Fonte: adaptado de Barreto (2020).

Quanto ao Solo 01, classificado como um pedregulho mal graduado (GP), Pinto (2006) aponta que a existência de grãos com diferentes tamanhos confere ao material um melhor comportamento sob o aspecto da engenharia, visto que o maior entrosamento promove ganho de resistência e menor compressibilidade. Como o Solo 02 e o Solo 03 possuem quantidade de finos ( $d < 0,075$  mm) maior que 12%, a proporção desses materiais confere maior plasticidade e menor resistência, de acordo com esse autor.

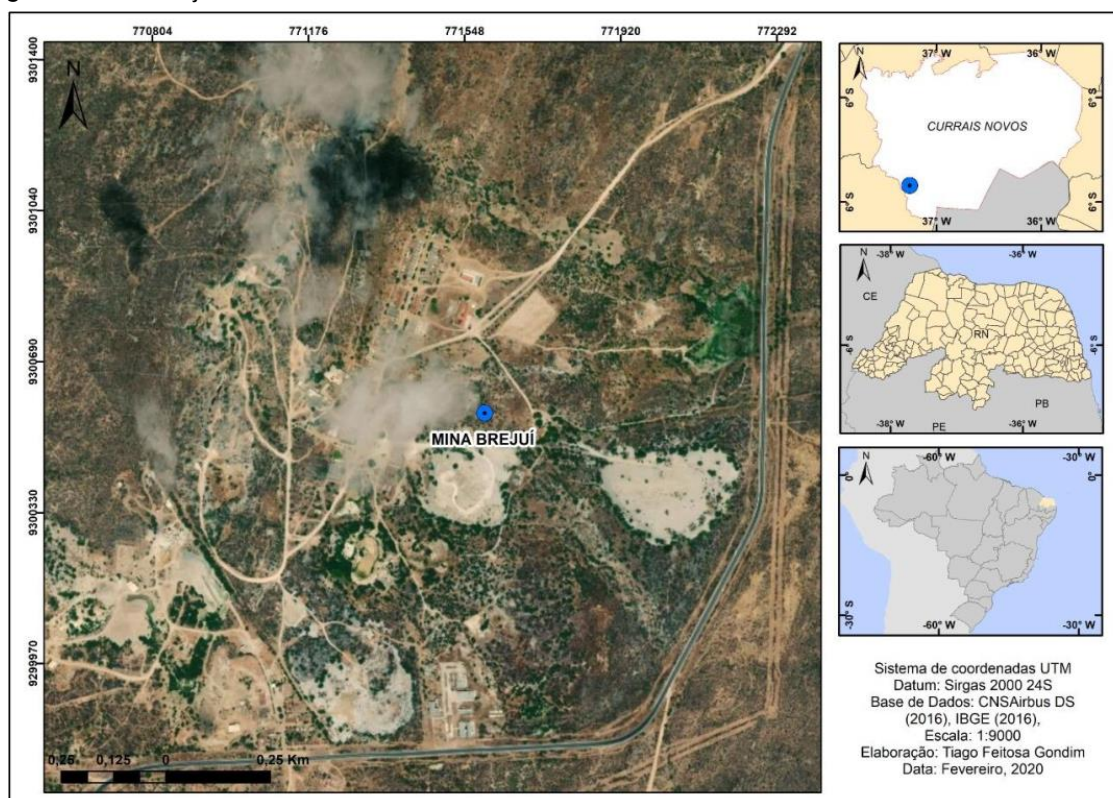
## Resíduos de scheelita

O resíduo de produção de scheelita caracterizado por Souza (2019) e mencionado neste estudo é proveniente de mina de scheelita do grupo de Mineração Tomaz Salustino S.A., situada no município de Currais Novos, no estado do Rio Grande do Norte, em localização apresentada na Figura 6. As amostras foram coletadas em

diversos pontos de depósitos desse resíduo e posteriormente foram submetidas a beneficiamento composto pelas seguintes etapas: secagem inicial em estufa a  $110\pm 5$  °C durante 24h, moagem em um moinho de bolas e peneiramento para obtenção de material com diâmetro máximo de 0,15 mm. Após caracterização para determinação da composição química, composição granulométrica através de granulômetro a laser, análise mineralógica, microestrutura e perda de massa, essas amostras foram reaproveitadas em misturas com argilas locais visando a obtenção de agregados leves por Souza (2019).

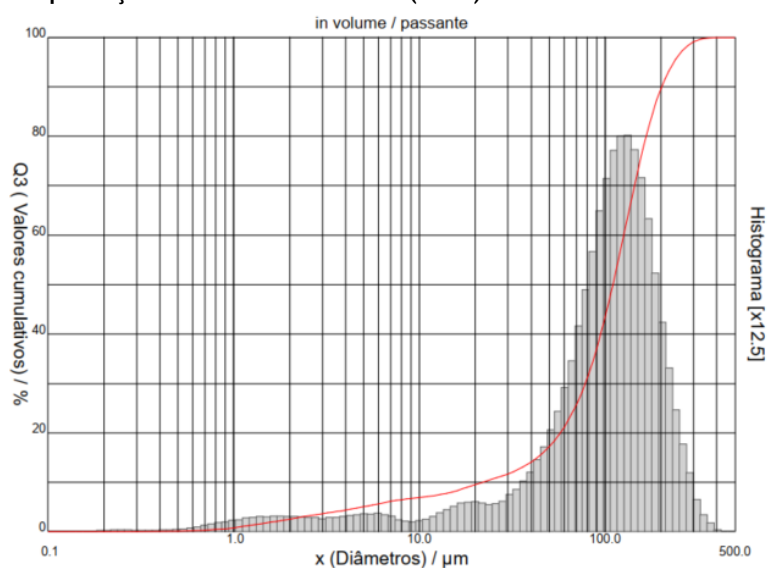
Na Figura 7 estão apresentados os resultados da determinação de granulometria a laser do resíduo de produção de scheelita (a) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliações de 400 (b) e 1.000 (c) vezes. A curva granulométrica (a) foi obtida através de um granulômetro a laser CILAS 1090 para diâmetros de partícula entre 0,10 e 500,00  $\mu\text{m}$ . De acordo com Souza (2019), esse material apresenta boa distribuição granulométrica e, conforme indicam as imagens de micrografia (Figura 7c), presença de grandes grãos com formatos variados e textura lisa, com partículas apresentando diâmetro médio de 114,16  $\mu\text{m}$  e diâmetros  $D_{10}=21,62$   $\mu\text{m}$ ,  $D_{50}=110,06$   $\mu\text{m}$  e  $D_{90}=201,84$   $\mu\text{m}$ , conforme apresentado na Tabela 6. A Figura 8 apresenta a curva granulométrica apenas do resíduo de produção de scheelita beneficiado e os diâmetros  $D_{60}$ ,  $D_{30}$  e  $D_{10}$  são aproximadamente iguais a 125  $\mu\text{m}$ , 77,17  $\mu\text{m}$  e 21,62  $\mu\text{m}$ , resultando em um coeficiente de não uniformidade (CNU) ( $D_{60}/D_{10}$ ) igual a 5,78, coeficiente de curvatura (CC) igual a 2,20 e módulo de finura igual a 0,28.

Figura 6 - Localização da mina de scheelita

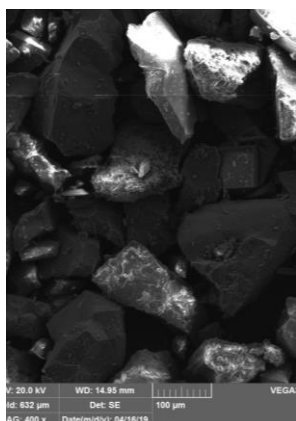


Fonte: Gondim (2020).

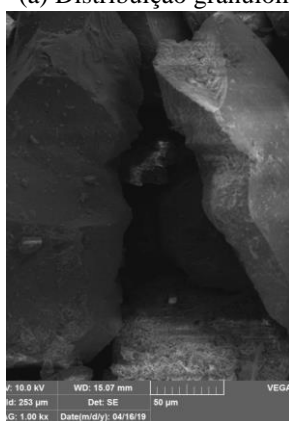
Figura 7 - Resíduo de produção scheelita beneficiado (RPSB)



(a) Distribuição granulométrica



(b) MEV 400x



(c) MEV 1.000x



(d) Resíduo após beneficiamento

Fonte: adaptado de Souza (2019).

Tabela 6 - Caracterização granulométrica do RPSB

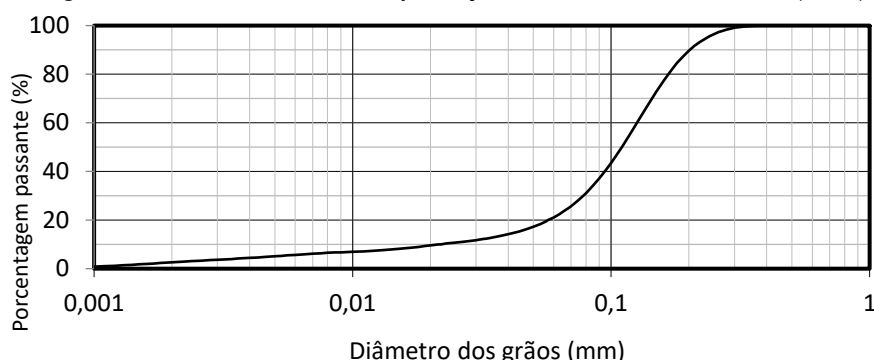
Caracterização granulométrica do RPSB	Valores (μm)
Diâmetro médio	114,16
$D_{10}$	21,62
$D_{30}$	77,17
$D_{50}$	110,06
$D_{60}$	125,00
$D_{90}$	201,84

Fonte: adaptado de Souza (2019).

Nota: Legenda:

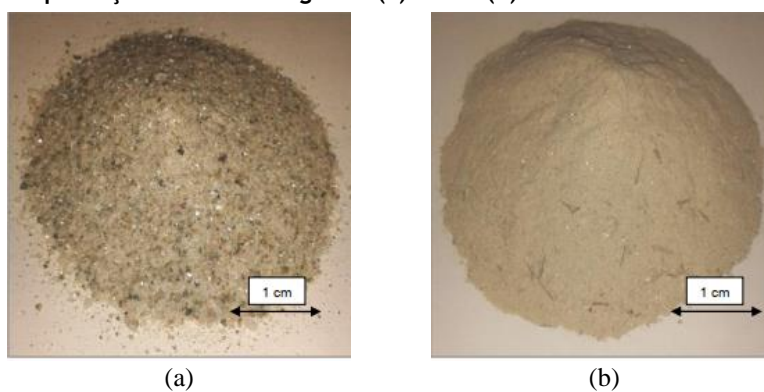
- $D_{10}$  - Diâmetro efetivo do solo, em que passam 10% das partículas;
- $D_{30}$  - Diâmetro em que passam 30% das partículas;
- $D_{50}$  - Diâmetro em que passam 50% das partículas;
- $D_{60}$  - Diâmetro em que passam 60% das partículas; e
- $D_{90}$  - Diâmetro em que passam 90% das partículas.

Figura 8 - Curva granulométrica do resíduo de produção de scheelita beneficiado (RPSB)



Fonte: adaptado de Souza (2019).

Figura 9 - Resíduo de produção de scheelita grosso (a) e fino (b)



Fonte: Medeiros (2016).

Medeiros (2016) caracterizou resíduos grossos (Figura 9a) (módulo de finura: 1,73) e finos (Figura 9b) (módulo de finura: 0,08) provenientes da produção de scheelita no município de Currais Novos (RN), visando analisar a substituição de areias naturais na formulação de argamassas de revestimento. As caracterizações granulométricas indicaram predominância de grãos com diâmetros inferiores a 0,15 mm no resíduo fino e semelhança do resíduo grosso com a areia natural analisada na pesquisa e a areia normal (material conforme a norma NBR 7214 (ABNT, 2015).

Com o objetivo de estudar a destinação adequada de resíduos de scheelita e diminuir o consumo de agregados normalmente já utilizados, Gerab (2014) constatou a viabilidade do reaproveitamento de resíduos grossos em camadas de sub-base de pavimentos rodoviários. Foi observada predominância da fração granulométrica areia, ausência de pedregulhos e porcentagem de finos inferior a 5%. Esse material foi classificado como não plástico após ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade.

## Procedimentos

Para efeito desse artigo, analisou-se misturas obtidas com base em dados de composições granulométricas dos solos estudados por Barreto (2020), e na dimensão otimizada dos resíduos do beneficiamento de scheelita avaliados por Souza (2019), visando a obtenção de uma composição granulométrica otimizada a partir de misturas propostas com esses materiais.

O resíduo de produção de scheelita foi utilizado com proporções de 20%, 40% e 60% em massa e foram elaboradas curvas visando o enquadramento em faixas granulométricas apresentadas em normas nacionais e internacionais para materiais destinados a pavimentos rodoviários. A Equação 1 descreve o modo de obtenção da porcentagem passante em cada abertura de peneira para cada mistura:

$$P_{mistura} = \left( \frac{PP}{100} \times P_{solo} \right) + \left( \frac{100-PP}{100} \times P_{RPSB} \right) \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

$P_{mistura}$  é porcentagem passante na curva da mistura para a referente abertura de peneira;

PP é a proporção do solo na mistura;

$P_{solo}$  é a porcentagem de solo na mistura; e

$P_{RPSB}$  é a porcentagem de resíduo na mistura.

A Tabela 7 apresenta as nove misturas conforme as proporções em porcentagem do resíduo.

Inicialmente os dados dos ensaios de granulometria dos solos foram elencados em planilha com dados das aberturas das peneiras normatizadas pela NBR 7181 (ABNT, 1984) e diâmetros máximos das partículas em suspensão com base na Lei de Stokes, obtidos nos ensaios de sedimentação, assim como as porcentagens passantes relacionadas. Posteriormente, para cada proporção de resíduo (20%, 40% e 60%) e para cada um dos três solos foram produzidas planilhas com dados de diâmetros dos grãos e porcentagens passantes, a partir das quais foram produzidas as curvas granulométricas dessas misturas.

Visando verificar o enquadramento granulométrico, com dados das normas americanas M 147 (AMERICAN..., 2004) e D 1241 (AMERICAN..., 2007) e da norma brasileira ES 141/2010 (DEPARTAMENTO..., 2010), foram obtidas as curvas dessas faixas granulométricas para analisar quais proporções de resíduo possibilitaram adequação a essas faixas.

## Resultados e discussões

Para efeitos de resultados, serão apresentadas apenas as curvas granulométricas obtidas com uso de defloculante devido à semelhança de resultados. Araújo *et al.* (2017) afirmam que a composição granulométrica dos solos é fortemente afetada pelo grau de intemperismo e existência de agentes cimentantes que afetam a sua estrutura. Assim, esse é um dos fatores que provocam a diferença entre resultados de ensaios de sedimentação com e sem uso de substâncias defloculantes. Esses autores constataram similaridade entre os resultados obtidos no ensaio de análise granulométrica convencional, que pode incluir ensaio de sedimentação com defloculantes, e os obtidos com granulômetro a laser.

As Figuras 10, 11 e 12 apresentam as curvas granulométricas das misturas dos Solos 01, 02 e 03 com RPSB em proporções de 20%, 40% e 60% em massa. Conforme se observa na Figura 10, a inclusão desse resíduo provoca efeitos mais significativos nas misturas com o Solo 01, uma vez que as misturas realizadas com esse solo apresentam materiais mais grossos e, conseqüentemente, com maiores capacidades de carga para obras viárias. O acréscimo de resíduo nas misturas gera uma granulometria descontínua, em que não há uniformidade nas porções das diversas frações (SENÇO, 2007). O Solo 1 apresenta granulometria contínua densa, em que a porcentagem de finos preenche os vazios e aumentando a densidade. Amorim (2013) aponta que materiais com granulometria contínua aberta e com menor presença de materiais finos possuem maior potencial para uso em obras de pavimentação, visto que a presença de frações mais grosseiras influencia diretamente a capacidade de suporte de um pavimento.

A Tabela 8 apresenta parâmetros granulométricos dessas misturas e apenas aquelas realizadas com o Solo 01 possuem parâmetros conhecidos, uma vez que o valor do diâmetro efetivo ( $D_{10}$ ) das demais misturas não podem ser determinados, com exceção da mistura S3-60RPSB.

A mistura S1-20RPSB apresentou enquadramento nas faixas “D”, para tráfego com número de repetições do eixo padrão (N) maior que  $5 \times 10^6$ , e “E”, para tráfegos com número “N” menor que  $5 \times 10^6$  (DEPARTAMENTO..., 2010), conforme a Figura 13. As misturas dos Solos 02 e 03 com 20%, 40% e 60% de RPSB não se enquadraram em nenhuma faixa granulométrica devido às suas elevadas proporções de materiais finos, conforme as Figuras 14 e 15. O crescente acréscimo do RPSB promove a redução da proporção de materiais finos nessas misturas, uma vez que o resíduo beneficiado e os Solos 02 e 03 apresentam granulometrias semelhantes para diâmetros inferiores a 0,075 mm. A mistura com outros solos mais granulares pode promover o enquadramento nas faixas granulométricas especificadas.

Tabela 7 - Misturas analisadas

Solo 01	Solo 02	Solo 03
S1-20RPSB	S2-20RPSB	S3-20RPSB
S1-40RPSB	S2-40RPSB	S3-40RPSB
S1-60RPSB	S2-60RPSB	S3-60RPSB

**Nota: Legenda:** S1-20RPSB representa a mistura do Solo 01 com 20% de resíduo de produção de scheelita beneficiado

Figura 10 - Composições granulométricas do Solo 01 com 20% (S1-20RPSB), 40% (S1-40RPSB) e 60% (S1-60RPSB) de RPSB

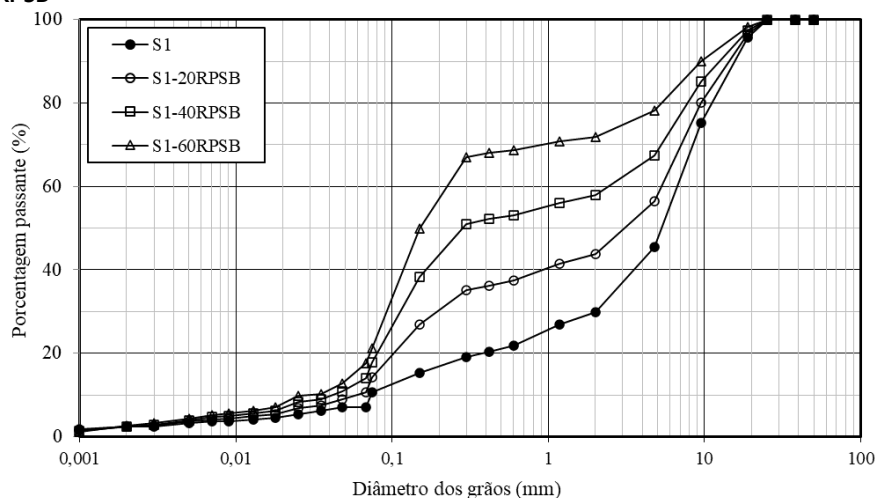


Figura 11 - Composições granulométricas do Solo 02 com 20% (S2-20RPSB), 40% (S2-40RPSB) e 60% (S2-60RPSB) de RPSB

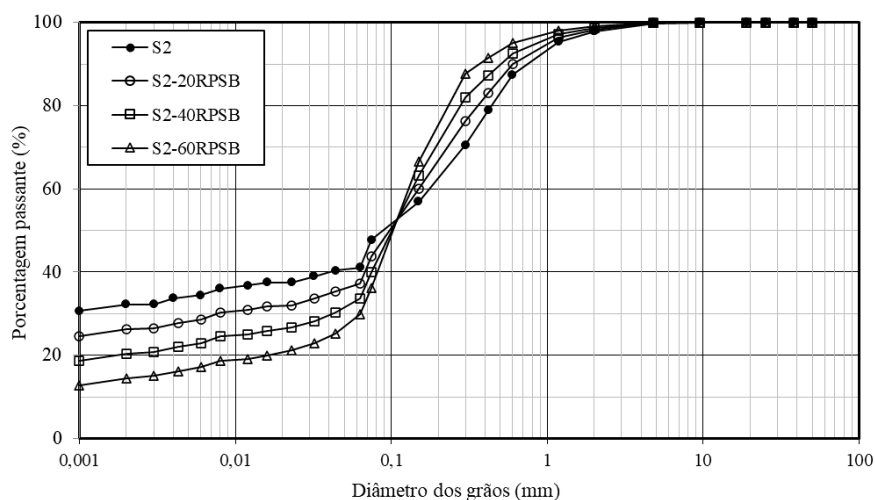


Figura 12 - Composições granulométricas do Solo 03 com 20% (S3-20RPSB), 40% (S3-40RPSB) e 60% (S3-60RPSB) de RPSB

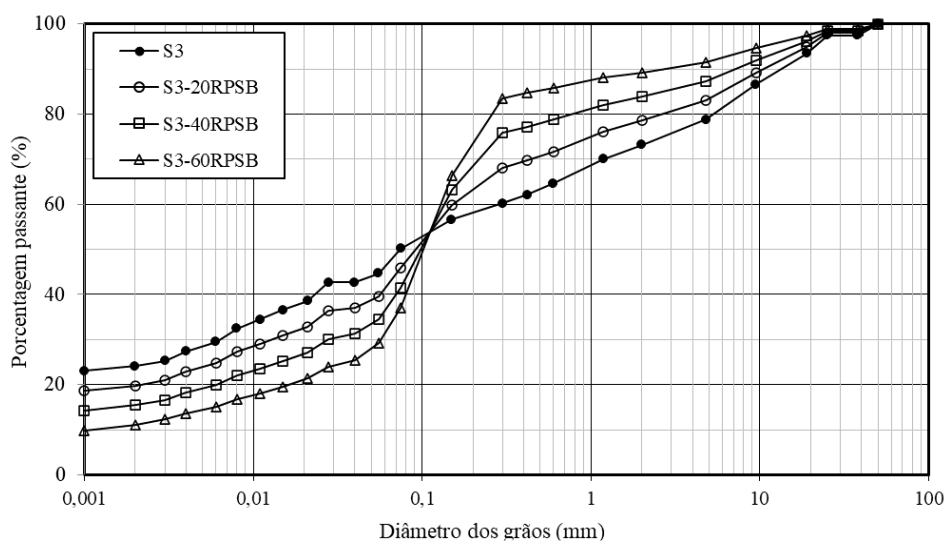


Tabela 8 - Parâmetros granulométricos das misturas

Solo	Mistura	D <sub>10</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>60</sub>	Cc	CNU
01	S1-20RPSB	0,068	0,20	5,00	73,53	73,53
	S1-40RPSB	0,045	0,11	2,30	51,11	51,11
	S1-60RPSB	0,025	0,09	0,21	8,40	8,40
02	S2-20RPSB	-	-	-	-	-
	S2-40RPSB	-	-	-	-	-
	S2-60RPSB	-	-	-	-	-
03	S3-20RPSB	-	-	-	-	-
	S3-40RPSB	-	-	-	-	-
	S3-60RPSB	0,001	0,055	0,11	27,50	110,00

Nota: Legenda:

D<sub>10</sub> - Diâmetro efetivo do solo, em que passam 10% das partículas;  
 D<sub>30</sub> - Diâmetro em que passam 30% das partículas;  
 D<sub>60</sub> - Diâmetro em que passam 60% das partículas;  
 CNU - Coeficiente de não uniformidade; e  
 Cc - Coeficiente de curvatura.

Figura 13 - Composições granulométricas de misturas do Solo 01 com 20%, 40% e 60% de RPSB e Faixas “D”, “E” e “F”

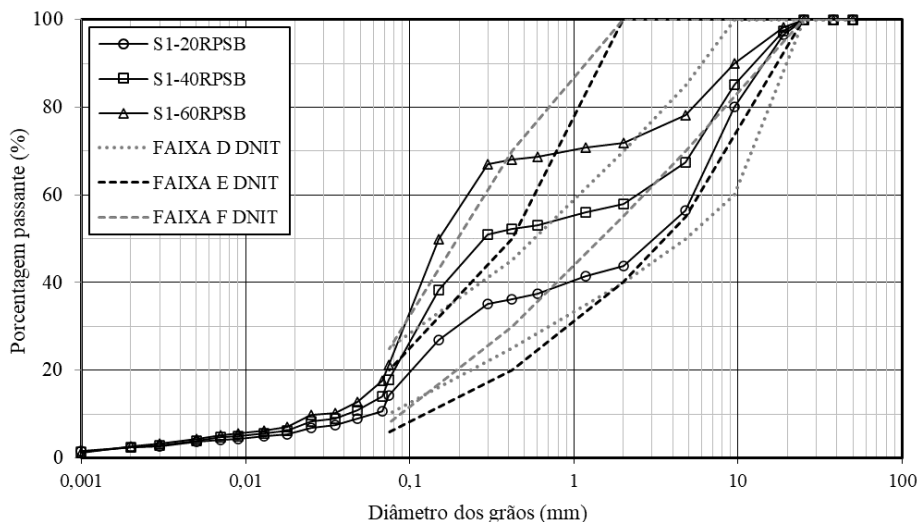


Figura 14 - Composições granulométricas de misturas do Solo 02 com 20%, 40% e 60% de RPSB e Faixas “D”, “E” e “F”

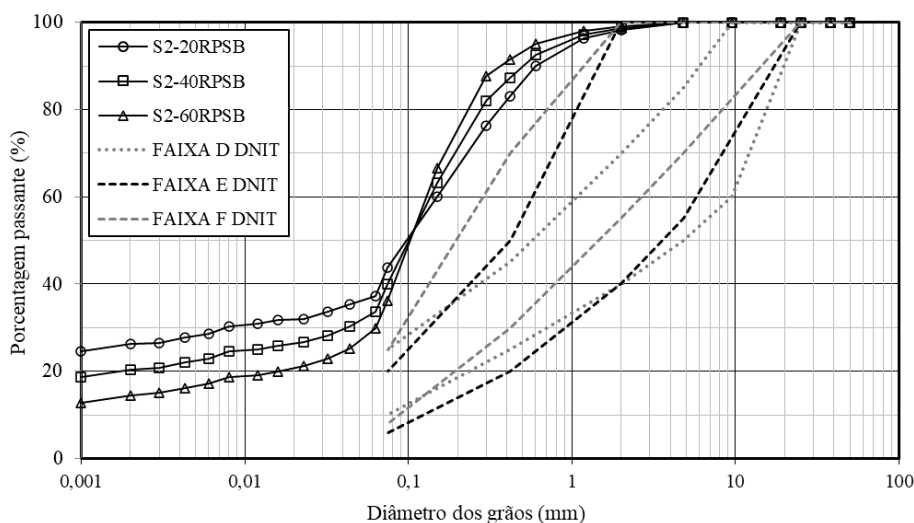


Figura 15 - Composições granulométricas de misturas do Solo 03 com 20%, 40% e 60% de RPSB e Faixas “D”, “E” e “F”

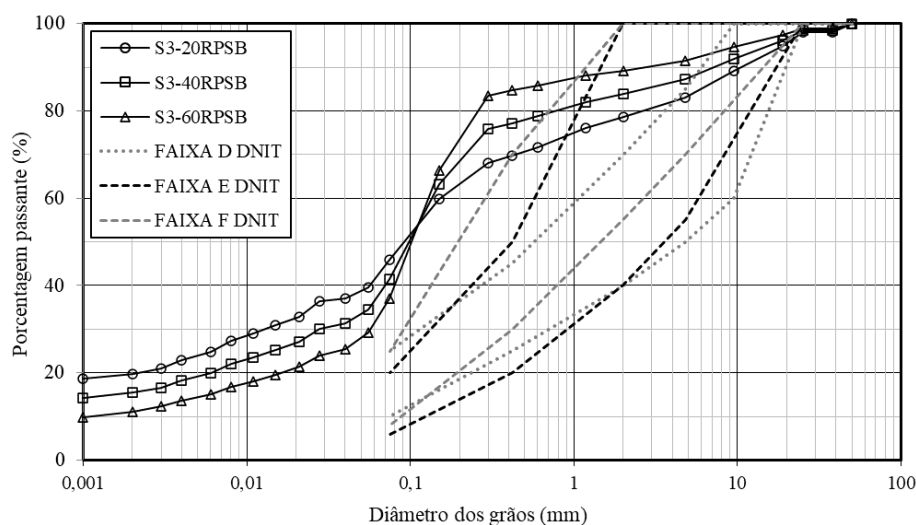
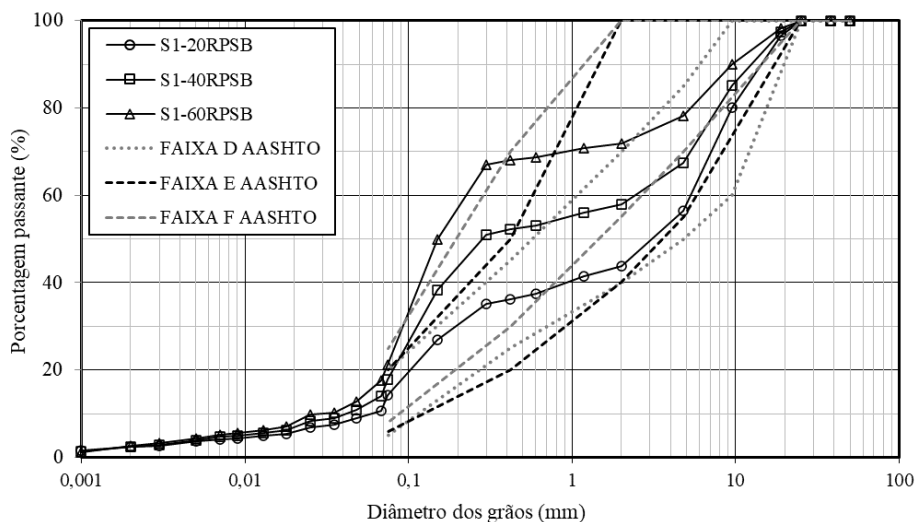


Figura 16 - Composições granulométricas de misturas do Solo 01 com 20%, 40% e 60% de RPSB e Faixas “D”, “E” e “F”



De acordo com as normas da AASHTO, a mistura do Solo 01 com 20% de resíduo de scheelita apresenta enquadramento nas Faixas “D” e “E”, enquanto a mistura do Solo 01 com 40% de resíduo de scheelita apresenta enquadramento na Faixa “F”, conforme detalhes da Figura 16. As misturas com o Solo 02 e o Solo 03 não apresentaram enquadramento em nenhuma das faixas (Figuras 17 e 18).

De acordo com as normas da ASTM, a mistura do Solo 01 com 20% de RPSB apresenta-se nas Faixas “D” e “E”, enquanto a mistura com 40% de RPSB apresenta-se na Faixa “F” (Figura 19). As misturas com o Solo 02 e o Solo 03 não apresentaram nenhum enquadramento (Figuras 20 e 21).

## Conclusões

Este estudo analisou curvas granulométricas de possíveis misturas de solos com resíduo de scheelita visando conformidade com as normas americanas M 147 (AMERICAN..., 2004) e D 1241 (AMERICAN..., 2007) e a norma brasileira ES 141/2010 (DEPARTAMENTO...2010), para aplicação em obras de pavimentação. As misturas analisadas foram compostas com proporções de 20%, 40% e 60% de resíduo.



Figura 17 - Composições granulométricas de misturas do Solo 02 com 20%, 40% e 60% de RPSB e Faixas “D”, “E” e “F”

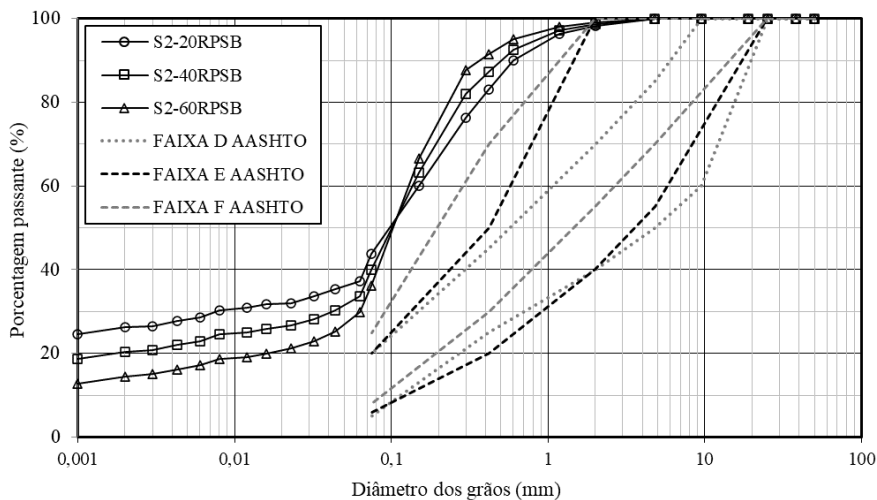


Figura 18 - Composições granulométricas de misturas do Solo 03 com 20%, 40% e 60% de RPSB e Faixas “D”, “E” e “F”

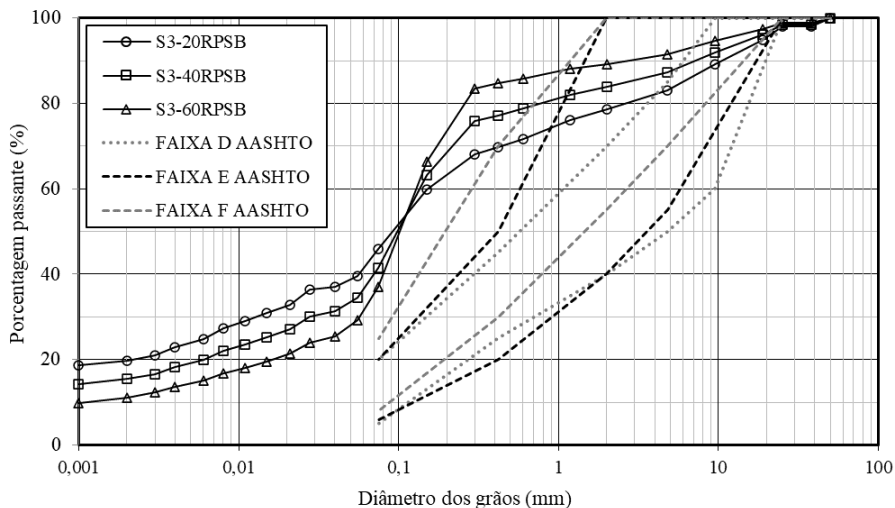


Figura 19 - Composições granulométricas de misturas do Solo 01 com 20%, 40% e 60% de RPSB e Faixas “D”, “E” e “F”

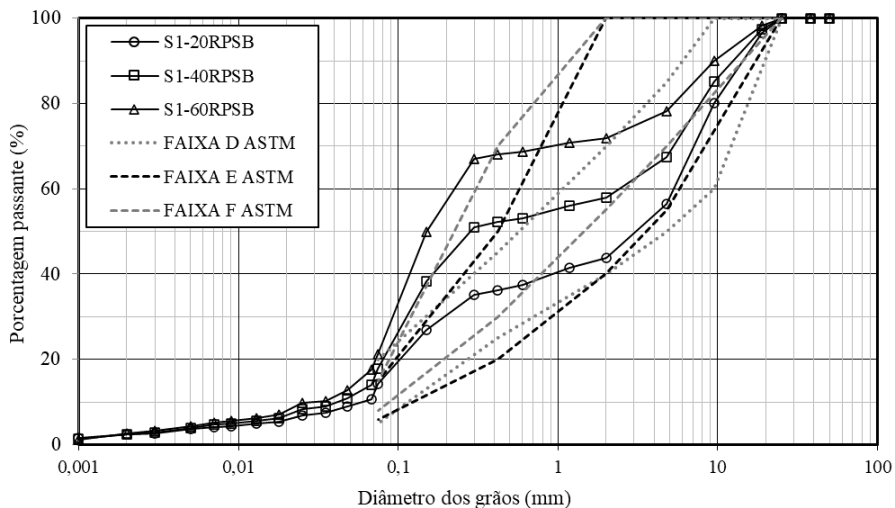


Figura 20 - Composições granulométricas de misturas do Solo 02 com 20%, 40% e 60% de RPSB e Faixas “D”, “E” e “F”

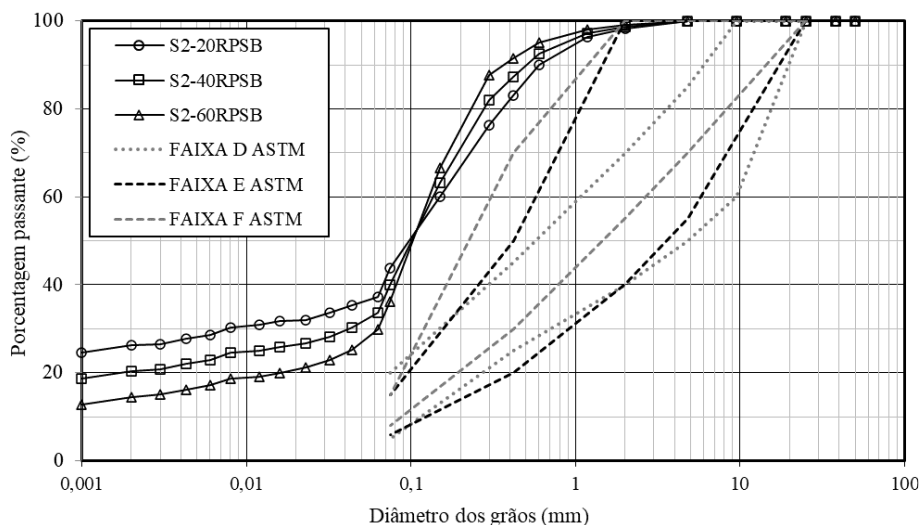


Figura 21 - Composições granulométricas de misturas do Solo 03 com 20%, 40% e 60% de RPSB e Faixas “D”, “E” e “F”

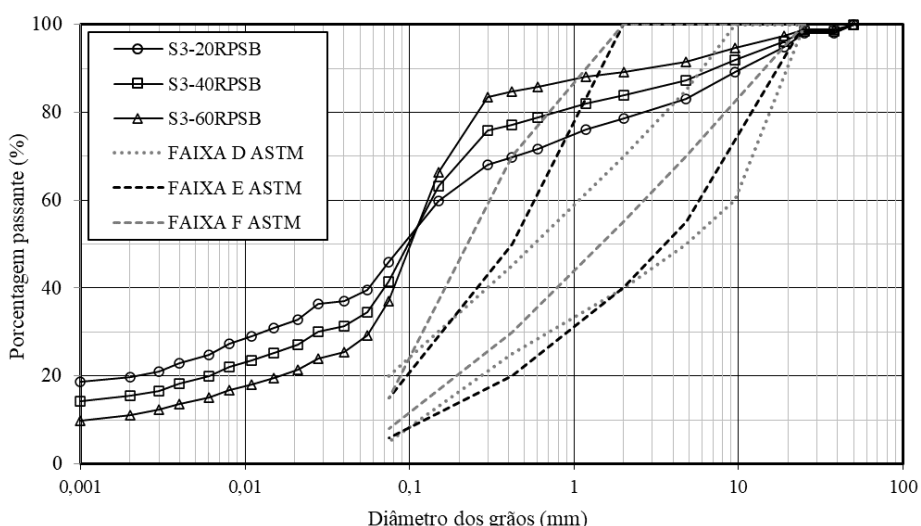


Tabela 9 - Enquadramentos de misturas do Solo 01 com o resíduo de scheelita beneficiado

Normativa	Porcentagem	Faixas
DNIT	20%	D e E
AASHTO	20%	D e E
ASTM	20%	D e E

Apesar da elevada quantidade de materiais finos nesse resíduo, a mistura mais adequada sob o aspecto granulométrico conforme as normas mencionadas é composta pelo Solo 01 com 20% de resíduo, conforme apresentado na Tabela 9. Observou-se que quanto maior é a proporção de resíduo nas misturas, maior é o distanciamento em relação às faixas granulométricas apresentadas nas referidas normativas. O Solo 02 e o Solo 03 não apresentam granulometrias que viabilizem misturas com esses resíduos. Os resultados apresentados estimulam a realização de ensaios laboratoriais para a caracterização física dessas misturas com as proporções analisadas e outras intermediárias de 10, 30 e 50%.

Outros ensaios que poderiam ser realizados com essas misturas buscariam determinar parâmetros de compactação, Índice de Suporte Califórnia e expansibilidade, estudar o comportamento mecânico através de

ensaios para determinação do módulo de resiliência, resistência à compressão simples, resistência ao cisalhamento e análise de quebra de grãos. E para classificar as misturas de acordo com a metodologia MCT (NOGAMI; VILLIBOR, 1980), desenvolvida para solos tropicais, seria necessário realizar ensaios de compactação mini-MCV e de perda de massa por imersão (PI). Em pesquisas futuras sugere-se realizar o dimensionamento de um trecho experimental com material de base composto pela mistura otimizada, com base em uma seção transversal típica e de acordo com dados de tráfego nas proximidades do local de coleta do resíduo. Para essa mistura otimizada seria conveniente realizar um estudo de viabilidade econômica para avaliação de custos de coleta e transporte desses resíduos.

## Referências

- AGUS, I. P.; MOHAMED A. S. Use of slag (with cement) for improving the performance of expansive soil of road pavement subgrade. **MATEC Web of Conferences**, v. 276, 2019.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **M-147**: standard specification for materials for aggregate and soil–aggregate subbase, base, and surface courses. Washington, 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D-1241**: standard specification for materials for soil-aggregate subbase, base, and surface courses. Philadelphia, 2007.
- AMORIM, E. F. **Viabilidade técnica econômica de misturas de solo-RCD em camadas de base de pavimentos urbanos**: estudo de caso: município de Campo Verde - MT. Brasília, 2013. 151 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- ARAÚJO, A. G. *et al.* Análise da determinação granulométrica de um latossolo por dois métodos: densímetro e granulômetro a laser. **Revista Mirante**, Anápolis, v. 10, n. 5a, p. 26-41, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115**: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: execução de camadas de pavimentação: procedimentos. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: areia normal para ensaio de cimento: especificação. Rio de Janeiro, 2015.
- AUSTROADS. Guide to pavement technology part 2: pavement structural design da AustRoads. Sidney, 2017.
- BANDARA, N. *et al.* Upcycling potential of industrial waste in soil stabilization: use of kiln dust and fly ash to improve weak pavement subgrades encountered in Michigan, USA. **Sustainability**, v. 12, 7226, 2020.
- BARRETO, A. C. **Desempenho técnico de misturas de diferentes tipos de solos com RCD para uso em obras de pavimentação**. Natal, 2020. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.
- BERNUCCI, L. L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. PETROBRAS - ABEDA. 3. reimp. Rio de Janeiro: Petrobras ABEDA, 2010.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Economia mineral do Brasil**. Brasília, 2009.
- DANTAS, A. A. N. **Avaliação do comportamento mecânico, geoquímico, mineralógico e geoambiental de um rejeito de minério de ferro incorporado a um solo laterítico para fins rodoviários**. Brasília, 2019. 226 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- DANTAS, A. A. N. **Caracterização de resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro para uso em pavimentação**. Natal, 2015. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 301**: sub-base estabilizada granulometricamente: especificação de serviço. Rio de Janeiro, 1997.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 108:** terraplenagem: aterros: especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2009.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 141:** base estabilizada granulometricamente: especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.
- FRANCO, K. L. B. **Caracterização do comportamento geotécnico de mistura de resíduo de pneus e solo laterítico.** Natal, 2012. 139 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental; Meio Ambiente; Recursos Hídricos e Hidráulica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.
- GERAB, A. T. F. S. C. **Utilização do resíduo grosso do beneficiamento da scheelita em aplicações rodoviárias.** Natal, 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- GONDIM, T. F. **Aplicação geotécnica de resíduo de mineração em sistemas de cobertura final de aterros sanitários.** Natal, 2020. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Divisão territorial brasileira.** Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/23701-divisao-territorial-brasileira.html?=&t=downloads>. Acesso em: dez. 2021.
- MEDEIROS, M. **Estudo de argamassas de revestimento com resíduo de scheelita.** Natal, 2016. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Caracterização e classificação gerais de solos para pavimentação: limitações do método tradicional. Apresentação de uma nova sistemática. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 15., Belo Horizonte, 1980. **Anais [...]** Belo Horizonte, 1980.
- PAIVA, E. H. G. **Avaliação do concreto de cimento Portland com resíduo da produção de scheelita em substituição ao agregado miúdo.** Natal, 2013. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.
- PEREIRA, L. A. de F. **Análise comparativa de estruturas de pavimentos utilizando RCD e dimensionadas a partir de parâmetros distintos.** Natal, 2021. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.
- PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- PRAVEEN, G. V.; PANDU, K.; CHANDRABAI, T. Improvement of California Bearing Ratio (CBR) value of Steel Fiber reinforced Cement modified Marginal Soil for pavement subgrade admixed with Fly Ash. **Material Today: Proceedings**, v. 39, p. 639-642, 2020.
- ROZA, A. E. D. **Contribuição para o projeto mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos na região norte do estado do Mato Grosso.** Rio de Janeiro, 2018. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** 2. ed. São Paulo: Pini, 2007. v. 1.
- SILVA, F. B. dos S. **Avaliação de misturas de solo de resíduo de polimento de porcelanato para emprego em obras rodoviárias.** Natal, 2016. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.
- SOUZA, M. M. de. **Desenvolvimento de agregados leves a partir de resíduo de scheelita, lodo de esgoto e cinza da casca do arroz.** Natal, 2019. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.
- STANDARDS AUSTRALIA. **AS 1289:** standard methods of testing soils for engineering purposes. Sydney, 2019.
- TOLEDO, A. L. L. **Comportamento geotécnico de misturas de solo e resíduos de perfuração onshore.** Natal, 2014. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

VASCONCELOS, S. D.; BARROSO, S. H. A.; VIEIRA, F. A. F. Avaliação do uso de cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica na construção de pavimentos. **Revista Transportes**, v. 27, p. 73-88, 2019.

YIN, Z.; LEKALPURE, R. L.; NDIEMA, K. M. Experimental study of black cotton soil stabilization with natural lime and pozzolans in pavement subgrade construction. **Coatings**, v. 12, p. 103, 2022.

**Gian Melo de Souza**

Conceitualização, Análise de dados, Metodologia, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição, Design da apresentação de dados.

Diretoria Acadêmica de Construção Civil | Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte | Av. Senador Salgado Filho, 1559, Tirol, Campus Natal-Central | Natal - RN - Brasil | CEP 59015-000 | Tel.: (84) 4005-9800 | E-mail: gianmelodesouza@gmail.com

**Enio Fernandes Amorim**

Conceitualização, Análise de dados, Metodologia, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição, Design da apresentação de dados.

Diretoria Acadêmica de Construção Civil | Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte | E-mail: enio.amorim@ifrn.edu.br

**Marcos Alyssandro Soares dos Anjos**

Análise de dados, Validação de dados e experimentos.

Coordenação de Engenharia Civil | Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba | Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, Campus João Pessoa | João Pessoa - PB - Brasil | CEP 58015-435 | Tel.: (83) 988400607  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental | Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais | Universidade Federal da Paraíba | Cidade Universitária | João Pessoa - PB - Brasil | CEP 58051-900 | E-mail: marcos.anjos@ifpb.edu.br

**Fagner Alexandre Nunes de França**

Análise de dados, Validação de dados e experimentos.

Departamento de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia | Universidade Federal do Rio Grande do Norte | Av. Senador Salgado Filho, 300, Lagoa Nova | Natal - RN - Brasil | CEP 59078-970 | Tel.: (84) 3215-3724 | E-mail: fagnerfranca@ufrn.edu.br

**Ambiente Construído**

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.