

19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

UTILIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO NA PAVIMENTAÇÃO SOB O PONTO DE VISTA DA MECÂNICA DOS PAVIMENTOS

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

Ivana Gomes Maia¹; Vinicius Peraça²; Betânia Queiroz Silva³ & Layza Verbena de S. S. Machado Costa⁴

RESUMO

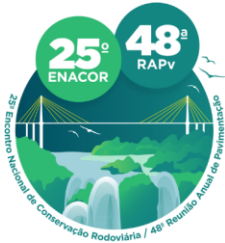
Há décadas os resíduos de mineração têm sido utilizados como fonte alternativa de materiais na construção de pavimentos. Reaproveitar rejeitos de minério na pavimentação minimiza a exploração de recursos naturais, que estão cada vez mais escassos, além de diminuir a quantidade de resíduos dispostos no meio ambiente e possibilitar o emprego de um material tecnicamente competitivo. O presente estudo objetivou avaliar o comportamento mecânico das camadas de base, sub-base e subleito do pavimento existente da Rodovia PE-425, no Lote do Sertão Central, trecho: Entr. BR-232 (Posto Carvalho) – Mirandiba – Carnaubeira da Penha, com extensão de 38,00km, visando a concepção do projeto de restauração da pista, outrossim, corroborar com a viabilidade técnica da aplicação de rejeitos de minério de ferro na pavimentação. Sendo assim, realizou-se a caracterização física e geotécnica do material através de abertura de poços de inspeção. Verificou-se que os ensaios apresentaram valores de CBR e massa específica aparente máxima elevados. Também foi efetuada a avaliação funcional, por meio da obtenção de parâmetros como IGG e IRI, e o levantamento estrutural não destrutivo com equipamento de FWD. Posteriormente, foi executada a retroanálise (software backMeDiNa) da estrutura do pavimento, a qual indicou boa compatibilidade de rigidez entre as camadas constituintes do pavimento e valores de módulo de resiliência acima de 300MPa para as camadas de base em 68% dos segmentos homogêneos analisados. No geral, os resultados encontrados demonstraram que o rejeito e as misturas são viáveis de serem aplicados em camadas de base em substituição aos agregados naturais ou produzidos.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentos; Desempenho Estrutural; Materiais Alternativos; Sustentabilidade.

ABSTRACT

For decades, mining waste has been used as an alternative source of materials in the construction of pavements. Reusing ore waste in paving minimizes the exploration of natural resources, which are increasingly scarce, in addition to reducing the amount of waste disposed of in the environment and enabling the use of a technically competitive material. The present study aimed to evaluate the mechanical behavior of the base, sub-base and subgrade of the existing pavement of Highway PE-425, stretch: Entr. BR-232 (Posto Carvalho) – Mirandiba – Carnaubeira da Penha, with an extension of 38.00km, aiming at the elaboration of the roadway restoration project, as well as confirming the technical viability of the application of ore tailings in the paving. Therefore, the physical and geotechnical characterization of the material was carried out through the opening of inspection wells. It was found that the assays showed high values of CBR and maximum apparent specific mass. A functional assessment was also carried out, by obtaining parameters such as IGG and IRI, and a non-destructive structural survey with FWD equipment. Subsequently, a back analysis was carried out (backMeDiNa software) of the pavement structure, which indicated good stiffness compatibility between the constituent layers of the pavement and resilience modulus values above 300MPa for the base layers in 68% of the homogeneous segments analyzed. In general, the results found demonstrated that the waste and the mixtures are viable to be applied in base layers in substitution of the natural or produced aggregate.

KEY WORDS: Paving; Mining tailings; Sustainability.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



¹ Universidade Federal de Pernambuco, ivana.maia@ufpe.br; betania.queiroz@ufpe.br

² Future Motion Brasil, vinicius.peraca@future-motion.eu; layza.machado@future-motion.eu

INTRODUÇÃO

Atualmente, no meio científico é indiscutível a relevância sobre a elaboração de pesquisas que discursam sobre o reaproveitamento de resíduos industriais, como substitutos de diversos materiais empregados na construção civil. Embora não se trate de um assunto inédito, tais rejeitos, como, por exemplo, os oriundos do beneficiamento do minério de ferro, pelo valor econômico obtido, podem ser empregados em camadas estruturais de pavimentos, oferecendo um destino para estes materiais produzidos pela indústria mineira, sendo uma forma de disposição ambientalmente adequada. Além disso, a utilização dos rejeitos de mineração apresenta bons resultados de desempenho de pavimentos, conforme mostram Grassse *et al.* (2019), Lara *et al.* (2018), Rodrigues (2018), Barbosa *et al.* (2016), Buitrago (2016), dentre outros.

Carneiro (2020) descreve que, devido à grande diminuição das jazidas de exploração próximas aos centros urbanos, diversos estudos geotécnicos vêm sendo realizados para utilização de materiais alternativos no lugar dos naturais, com a finalidade de redução da utilização de material *in natura* e da melhora do desempenho daquele que é utilizado. O aproveitamento de resíduos em misturas com o solo, como material alternativo, objetiva a melhora das propriedades mecânicas dos materiais utilizados nas obras.

A utilização deste rejeito granular, com grande disponibilidade, devido ao aumento da produção mineral nos últimos anos, associada à carência de materiais granulares com alta resistência mecânica para a execução de pavimentos em muitas regiões urbanas corroboram para se estudar a viabilidade técnica da utilização do mesmo em fins rodoviários (Campanha, 2011).

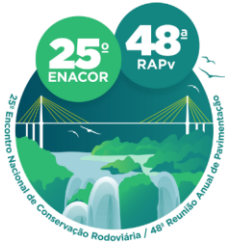
O projeto de restauração da PE-425 teve por desígnio avaliar as características funcionais e estruturais do pavimento/subleito existentes, com vistas à concepção e o dimensionamento de soluções de reabilitação capazes de resistir à ação das cargas cíclicas impostas pelo tráfego dos veículos e restabelecer melhores condições de serventia ao pavimento, segurança e conforto ao usuário.

O projeto está fundamentado pelos métodos DNER PRO 011/79 (Procedimento B) e PRO 269/94, que compreendem a avaliação das características funcionais e estruturais do pavimento, com definição de intervenções de recuperação e restauração e respectivas espessuras de reforço. Para auxiliar nas definições das soluções de restauração também foi realizada a retroanálise dos Módulos de Resiliência das camadas que constituem a estrutura do pavimento, utilizando o software backMeDiNa.

Durante o desenvolvimento dos estudos geotécnicos percebeu-se que o material granular, principalmente da base, apresentou um comportamento superior em termos de capacidade de suporte, medida pelo ensaio do ISC, se comparado a materiais granulares estabilizados granulometricamente destinados a estruturas de pavimento flexíveis. Da mesma forma, observou-se elevados valores de massa específica aparente seca, também mais altos do que os tradicionalmente empregados.

Embora não haja registros de utilização no Projeto de Implantação, atribuiu-se este comportamento considerado superior à presença de minério de ferro nos solos oriundos de jazidas do entorno da região da PE-425, que foram as fontes de materiais utilizados para compor a base do pavimento. Tal consideração somente foi levada em conta, em virtude das diversas áreas demarcadas destinadas à exploração e extração de minério de ferro.

Desta forma, aqui se propõe apresentar e discutir o uso de materiais alternativos para pavimentação de rodovias, neste caso solos com elevada presença de minério ferro, avaliando principalmente o comportamento estrutural e a deformabilidade, possibilitando o uso de soluções mais econômicas,



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



com menor custo de transporte e sustentáveis, com comportamento no mínimo similar aos materiais tradicionalmente empregados.

ESTUDO DE CASO

Caracterização da área

A rodovia PE-425 é perpendicular à BR-232 e se localiza entre dois municípios importantes: Salgueiro e Serra Talhada. O final do trecho encontra-se próximo à rodovia que está sendo implantada e conectará os municípios de Carnaubeira da Penha até Floresta.

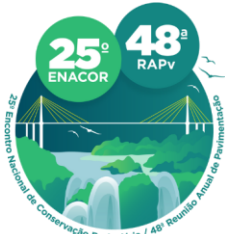
Trata-se de um importante eixo na região de desenvolvimento Sertão Central, pela otimização na rota sertaneja, uma vez que possibilita o acesso aos municípios paraibanos, tornando-se fundamental para o tráfego da área.

Quanto aos aspectos hidrológicos destacam-se os períodos chuvosos e cursos d'água. Os dados históricos de precipitação revelam uma média anual de 636,5mm na região, sendo o período chuvoso compreendido entre os meses de novembro e abril. O único grande curso d'água que cruza a PE-425 é o Riacho dos Picos, além deste foram identificados outros cursos d'água de menor porte como o riacho do Cerrote, riacho da Posse, riacho Croatá e riacho da Carnaubeira.

Segundo CRPM (2005) a rodovia PE-425 é localizada num sistema geológico diversificado com as características apresentadas na Tabela 1, estas apresentam solo sedimentar em todas as Unidades que de ocorrência do minério de ferro.

Tabela 1. Descrição das unidades geológicas. Fonte: CPRM (2005) / DNPM (2023).

UNIDADE	LITOLOGIA	OCORRÊNCIA MINÉRIO DE FERRO	TIPO DE SOLO
Salgueiro - Riacho Gravatá - MP3sg	Xisto carbonático, Xisto, Filito, Formação ferrífera bandada, Rocha metavulcânica félsica, Metagrauvaca, Metarritmito, Metatufo, Metavulcânica intermediária a máfica, Metavulcanoclástica, Metachert	SIM	Sedimentar/transportado
São Caetano - NP1sca	Metabasalto, Metadacito, Metagabro, Metagrauvaca, Metarriodacito, Metavulcanoclástica, Paragnaisse, Metachert	SIM	Sedimentar/transportado
Riacho da Barreira - Unidade 1 - MNrb1 / MNrb2	Clorita xisto, Talco xisto, Rocha metavulcânica	SIM	Sedimentar/transportado
Aliança - J3a	Arenito, Arenito conglomerático, Calcilito, Conglomerado, Folhelho	SIM	Sedimentar/transportado
Tacaratu - SDt	Arenito, Conglomerado	SIM	Sedimentar/transportado
Depósitos aluvionares - Q2a	Areia	SIM	Sedimentar/transportado

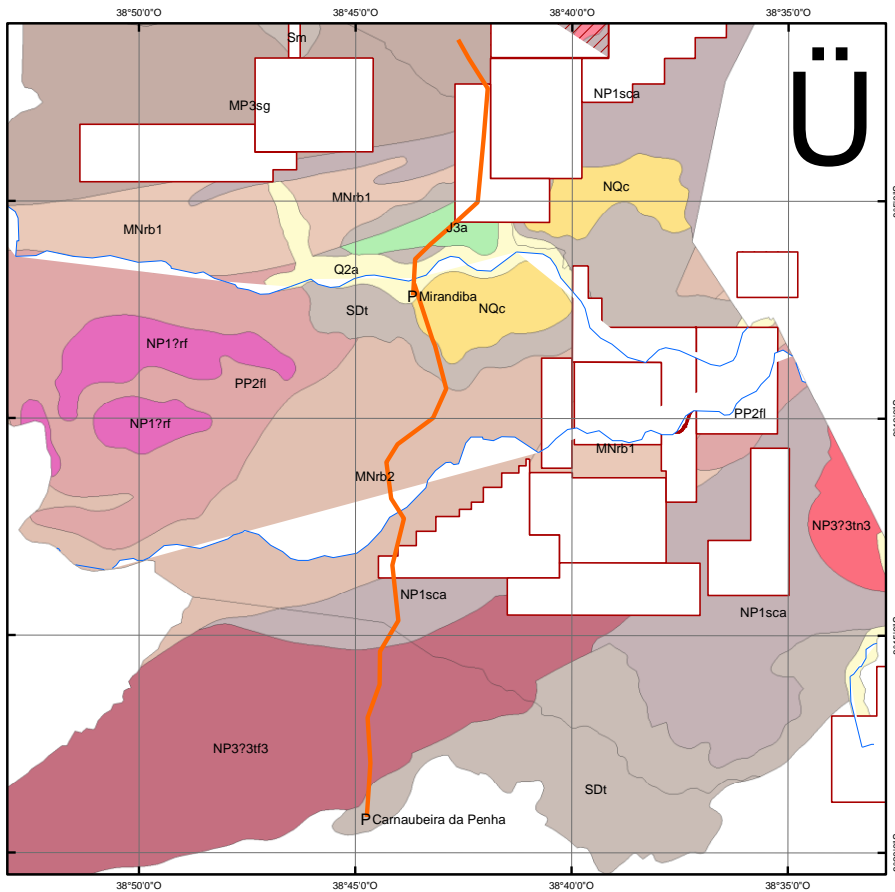


19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



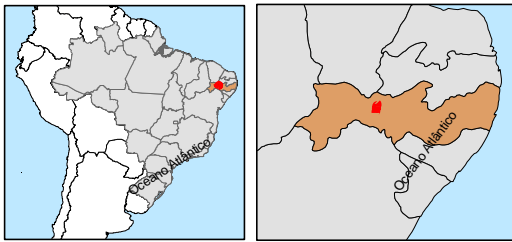
O Minério de Ferro, segundo dados do Sistema de Informação Geográfica da Mineração de Pernambuco (SIGMINE, 2023), no trecho da rodovia PE425 no sentido SUL-NORTE, ocorre nas Unidades de São Caetano (NP1sca), Riacho da Barreira (MNrb2), Aliança (J3a) e Salgueiro - Riacho Gravatá (MP3sg). Esta característica é ratificada no material de silte e argila apresentados no resumo dos ensaios para caracterização do subleito.

O mapa geológico a seguir (Figura 01) demonstra as Unidades Geológicas onde existe mapeamento de Minério de Ferro na rodovia PE-425.



- OCCORRÊNCIA DE MINERAL**
- Minério de Ferro
- UNIDADES LITOLÓGICAS**
- Aliança - J3a
 - Depósitos aluvionares - Q2a
 - Depósitos colúvio-eluviais - NQc
 - Floresta - PP2fl
 - Mauriti - Sm
 - Missão Velha - J3m
 - Plúton Pajeú - NP3y3tn3
 - Plúton Serra do Man - NP3y3tf3
 - Plúton sem denominação - NP3y2c5
 - Recanto - Riacho do Forno - NP1yrf
 - Riacho da Barreira - Unidade 1 - MNrb1
 - Riacho da Barreira - Unidade 2 - MNrb2
 - Salgueiro - Riacho Gravatá - MP3sg
 - Santana dos Garrotes - NP3st
 - Serra do Olho D'água - NP3oa
 - São Caetano - NP1sca
 - Tacaratu - SDt

MAPA DE LOCALIZAÇÃO

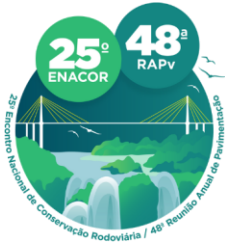


CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

- P Sede Municipal
- Rodovias
- Rios e Riachos

Fonte de Dados Vetoriais: DNIT (2005) CPRM (2005) SIGMINE (2023)
Elaboração: GEGEP/UFPE (2023)

Figura 1. Unidades geológicas. Fonte: UFPE (2023).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Histórico, coleta de dados e cadastro da rodovia

A PE-425 é uma rodovia estadual, sob jurisdição do Departamento de Estradas de Rodagem – DER-PE. Inicia-se no entroncamento com a BR-232 (Posto Carvalho), e se desenvolve nos territórios municipais de Mirandiba (ext. 12,5km), tendo o seu fim no município de Carnaubeira da Penha (ext. 25,5km). Observou-se a existência do projeto de implantação nesta rodovia, concebido no ano 2000, que está materializado no trecho da Avenida Elizeu Campos, na Cidade de Mirandiba e finalizado na Avenida Flekemberg, no município de Carnaubeira da Penha, totalizando 24,96km.

Em termos de estrutura, de forma genérica, esta rodovia possui um revestimento asfáltico em Tratamento Superficial Duplo (TSD) com 2,0cm de espessura, não aplicado em zona urbana, a qual é constituída por Paralelepípedos. A camada de sub-base é composta por solo granular estabilizado granulometricamente e a base por solo proveniente de jazida com adição de areia e/ou rejeitos de minério de ferro (não se obteve a informação de quanto foi adicionado ou utilizado).

Sob os aspectos geométricos a estrada contemplam uma seção de pavimentação, de forma geral, com 8,6m de largura considerando 3,3m por faixa e 1,0m a 0,50m de acostamento em cada sentido.

Atualmente essa rodovia apresenta excesso de irregularidade com valores superiores a 5,5 m/km, desgaste e arrancamento dos agregados com exposição da base em alguns, sendo que estes defeitos comprometem o trânsito local e a segurança dos usuários da rodovia.

Estudo de tráfego

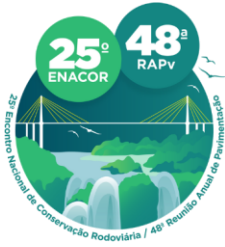
A rodovia PE-425 apresenta diferentes valores de tráfego ao longo do trecho abordado. Os resultados considerados estão listados na Tabela 02.

Tabela 2. Localização dos postos para contagem de tráfego e Número N.

Posto	Trecho*	Número N	
		N USACE	N AASHTO
P1	Entr. BR-232 (Posto Carvalho) – Mirandiba	$1,85 \times 10^6$	$1,14 \times 10^6$
P2	Mirandiba - Carnaubeira da Penha	$8,64 \times 10^5$	$5,59 \times 10^5$

Segmentos homogêneos

De acordo com o comportamento estrutural medido através da determinação de deflexões recuperáveis, geometria e tipo de revestimento, o trecho foi dividido em 26 segmentos homogêneos (SHs) utilizando o Método das diferenças acumuladas da AASHTO/93. Destes, três segmentos são constituídos por paralelepípedos (SH's 12, 13 e 26). Por esta razão, nestes segmentos, os levantamentos deflectométricos não puderam ser executados. A Tabela 03 mostra o resumo dos segmentos homogêneos.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Tabela 3. Resumo dos segmentos homogêneos da PE-425.

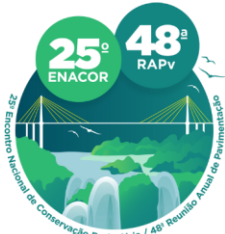
SEGMENTOS	km inicial	km final	Estaca inicial	Estaca Final	Extensão (m)
SH 01	0.005	2.17	0 + 5	109	2168.0
SH 02	2.17	3.39	109	170	1218.0
SH 03	3.39	4.08	170	204	690.0
SH 04	4.08	5.00	204	250	914.0
SH 05	5.00	5.50	250	275	508.0
SH 06	5.50	6.30	275	315	792.0
SH 07	6.30	7.60	315	380	1300.0
SH 08	7.60	10.74	380	537	3147.0
SH 09	10.74	11.21	537	560	467.0
SH 10	11.21	11.96	560	597	751.0
SH 11	11.96	12.14	597	607	180.0
SH 12*	12.14	12,58	607	629	440,0
SH 13*	12,58	12,89	629	644	310,0
SH 14	12.89	14.36	644	718	1467.0
SH 15	14.36	17.67	718	883	3310.0
SH 16	17.67	19.82	883	991	2153.0
SH 17	19.82	21.22	991	1061	1401.0
SH 18	21.22	23.88	1061	1194	2661.0
SH 19	23.88	25.77	1194	1289	1888.0
SH 20	25.77	28.90	1289	1445	3128.0
SH 21	28.90	30.14	1445	1507	1238.0
SH 22	30.14	32.31	1507	1615	2173.0
SH 23	32.31	33.35	1615	1667	1038.0
SH 24	33.35	34.93	1667	1746	1582.0
SH 25	34.93	36.94	1746	1847	2010.0
SH 25*	36.94	37,51	1847	1875+12,9	572,9

* Trechos em paralelepípedo.

Estudos Geotécnicos

Com o intuito de definir as características do pavimento existente, foram executados furos de sondagem, avançando por toda a estrutura do pavimento, atingindo o subleito, ao longo da pista de rolamento, conforme preconizado na Instrução de Serviço - IS-212: Avaliação estrutural e projeto de restauração de pavimentos flexíveis e semirrígidos (Publicação IPR – 726 DNIT). As sondagens foram executadas no acostamento junto ao bordo da pista, utilizando pá e picareta, no mínimo, a cada segmento homogêneo, para coleta de amostras e efetivação das seguintes determinações:

- Medição das espessuras de todas as camadas;
- Determinação da massa específica aparente *in situ* das camadas granulares de base, sub-base e subleito;
- Coleta de amostras camadas granulares identificadas, inclusive subleito, sendo estas submetidas a ensaios de caracterização (limite de liquidez, plasticidade e granulometria) e de resistência (compactação na energia pertinente a função de cada camada granular e ao subleito e de índice suporte California).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



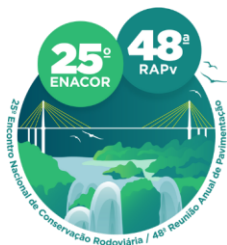
No período das sondagens não foram identificados solos compressíveis e/ou presença d'água em furos executados na rocha, sendo detectada a presença de rocha em vários segmentos. De acordo com a classificação dos solos da Highway Research Board (HRB), os tipos de solo predominantes subleito foram, segundo a classificação da AASHTO: A-2-4, A-4 e A-6. Quanto aos indícios de materiais minerários, ressalta-se a elevada capacidade de suporte ($ISC > 30\%$) obtida nos poços 01, 02 e 11, assim como a elevada massa específica aparente seca (próximas a 2.000 g/cm^3), ambos parâmetros determinados na energia Normal do ensaio de Proctor. A Tabela 04 apresenta o resumo dos ensaios para caracterização do subleito e ilustra o referido anteriormente.

Tabela 4. Resumo dos ensaios de caracterização do subleito.

Sondagens	Estacas de referência	Material do subleito	L.L	L.P	I.P	I.G	Classificação HRB	Massa específica aparente "in situ" (g/cm^3)	Massa específica máx. aparente (g/cm^3)	Umidade ótima (%)	Expansão (%)	I.S.C (%)
POÇO 01	EST - 1844	Pedregulho silto arenoso "vermelho alaranjado"	19	13	6	0	A-1-B	2.05	1.979	12.3	1.0	42.0
POÇO 02	EST - 1744	Silte areno argiloso "laranja amarronzada"	17	12	5	2	A4	1.992	2.012	7.8	0.4	49.0
POÇO 03	EST - 1644	Argila areno siltosa "laranja escuro"	21	13	8	2	A4	1.694	1.937	8.1	0.8	26.0
POÇO 04	EST - 1544	Argila areno siltosa "marrom claro"	21	11	10	3	A4	2.37	1.886	8.6	1.1	10.0
POÇO 05	EST - 1444	Argila areno siltosa "marrom claro"	22	14	8	3	A4	1.805	1.836	9.2	1.8	11.0
POÇO 06	EST - 1344	Silte pedregulhoso arenoso "avermelhado"	26	17	9	3	A4	1.698	1.845	13.6	2.0	16.0
POÇO 07	EST - 1244	Silte areno argiloso "vermelho amarronzado"	NL	NP	NP	0	A4	1.954	1.913	10.4	3.8	3.0
POÇO 08	EST - 1144	Silte areno argiloso "vermelho escuro"	35	22	13	6	A6	1.928	1.884	13.5	2.2	6.0
POÇO 09	EST - 1044	Argila areno pedregulhosa "vermelho escuro"	34	32	11	3	A6	1.810	1.930	11.8	0.7	14.0
POÇO 10	EST - 944	Silte arenoso "marrom acinzentado"	37	25	12	4	A6	1.631	1.885	11.6	1.8	4.0
POÇO 11	EST - 844	Pedregulho arenoso argiloso "vermelho amarronzado"	25	17	8	0	A-2-4	1.907	2.088	8.4	0.2	34.0
POÇO 12	EST - 744	Areia argilosa "marrom claro"	NL	NP	NP	0	A-2-4	1.883	1.900	4.9	0.2	27.0
POÇO 13	EST - 644	Areia argilosa com pouco pedregulho "marrom claro"	17	12	7	0	A-2-4	1.791	1.901	7.4	0.3	12.0
POÇO 14	EST - 607	Areia argilo pedregulhosa "vermelho escuro"	20	12	8	0	A--2-4	1.778	1.869	8.0	1.1	11.0
POÇO 15	EST - 544	Areia pedregulho argilosa "vermelho escuro"	22	15	7	0	A-2-4	1.887	1.954	8.6	1.3	14.0
POÇO 16	EST - 444	Argila "areno avermelhada"	33	16	17	7	A6	1.736	1.845	11.1	2.6	3.0
POÇO 17	EST - 344	Argila arenosa "marrom claro"	20	14	6	0	A4	1.863	2.035	8.7	1.2	12.0
POÇO 18	EST - 244	Areia pedregulhosa argilosa "marrom alaranjado"	19	13	6	0	A-2-4	1.827	2.008	6.8	0.2	10.0
POÇO 19	EST - 144	Argila pedregulhosa arenosa "marrom escuro"	27	17	10	0	A4	1.986	1.983	9.8	1.7	10.0

O mesmo comportamento identificado no subleito pôde ser observado, de forma mais evidente, nos materiais extraídos da base. Exceto nos poços 06 e 14, foram obtidos valores de ISC que superaram os 100% e massas específicas aparente secas acima de 2.100 g/cm^3 . A tabela 5 apresenta o resumo dos ensaios realizados nas amostras extraídas da base e nela pode ser verificada os valores de ISC e demais elementos obtidos. Detalhe para o poço 19 que apresentou $ISC = 178\%$, um comportamento extremamente resistente, ao que se infere, seja de material oriundo de processo minerário.

As Figuras 2 e 3 ilustram a amostra do poço 19 ($ISC = 178\%$) selecionada para o ensaio de resistência e o corpo de prova sendo compactado com o material existente na base do pavimento. Destaca-se o detalhe do material e a extrema dificuldade para retirar o corpo de prova do cilindro devido à sua elevada compactação (cimentação possivelmente).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Figura 2. Seleção da amostra para o ensaio de CBR.



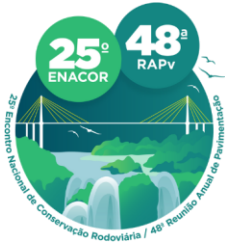
Figura 3. Corpo de prova sendo compactado no cilindro Proctor.



Tabela 5. Resumo dos ensaios de caracterização do material da base.

Sondagens	Estacas de referência	Material da base	L.L.	L.P.	I.P.	I.G.	Classificação HRB	Massa específica aparente "in situ" (g/cm ³)	Massa específica máx. aparente (g/cm ³)	Umidade ótima (%)	Expansão (%)	I.S.C (%)
POÇO 01	EST - 1844	Areia pedregulho siltosa "laranja avermelhada"	19	5	4	0	A-2-4	1.992	2.161	7.1	0.1	169.0
POÇO 02	EST - 1744	Pedregulho areno siltoso "marrom"	18	12	6	0	A-1-B	2.043	2.173	6.4	0.1	174.0
POÇO 03	EST - 1644	Areia pedregulho siltosa "laranja amarelada"	18	13	5	0	A-2-4	2.063	2.172	6.2	0.1	160.0
POÇO 04	EST - 1544	Pedregulho areno siltoso "marrom escuro"	22	15	7	0	A-2-4	2.154	2.076	7.4	0.2	115.0
POÇO 05	EST - 1444	Pedregulho areno siltoso "vermelho alaranjado"	22	14	8	0	A-2-4	2.104	2.169	7.6	0.1	108.0
POÇO 06	EST - 1344	Pedregulho areno siltoso "vermelho alaranjado"	23	14	9	0	A-2-4	1.993	2.170	7.5	0.2	86.0
POÇO 07	EST - 1244	Pedregulho areno siltoso "vermelho acizentado"	23	17	6	0	A-1-B	2.203	2.201	7.0	0.3	132.0
POÇO 08	EST - 1144	Pedregulho areno siltoso "vermelho alaranjado"	23	14	9	0	A-2-4	2.166	2.240	7.3	0.1	140.0
POÇO 09	EST - 1044	Pedregulho areno siltoso "avermelhado"	23	15	8	0	A-2-4	2.149	2.214	7.5	0.1	100.0
POÇO 10	EST - 944	Pedregulho areno siltoso "marrom claro"	22	14	8	0	A-2-4	2.143	2.155	7.5	0.2	122.0
POÇO 11	EST - 844	Pedregulho areno siltoso "laranja amarronzado"	22	14	8	0	A-2-4	2.233	2.203	6.5	0.1	135.0
POÇO 12	EST - 744	Areia pedregulho siltosa "vermelho claro"	NL	NP	NP	0	A-1-B	2.152	2.179	6.6	0.1	126.0
POÇO 13	EST - 644	Areia pedregulho siltosa "vermelho claro"	23	14	9	0	A-2-4	2.158	2.187	7.0	0.6	129.0
POÇO 14	EST - 607	Areia siltosa "marrom escuro"	NL	NP	NP	0	A-3	1.887	1.926			
POÇO 15	EST - 544	Pedregulho areno siltoso "laranja escuro"	25	16	9	0	A-2-4	2.171	2.195	6.8	0.2	129.0
POÇO 16	EST - 444	Areia pedregulho siltosa "vermelho alaranjado"	20	14	6	0	A-1-B	2.212	2.186	6.5	0.1	152.0
POÇO 17	EST - 344	Pedregulho areno siltoso "marrom alaranjado"	23	14	9	0	A-2-4	2.148	2.201	6.9	0.3	145.0
POÇO 18	EST - 244	Pedregulho areno siltoso "marrom alaranjado"	20	14	16	0	A-1-B	2.133	2.151	7,1	0.2	130.0
POÇO 19	EST - 144	Areia silto pedregulhosa "marrom claro"	NL	NP	NP	0	A-2-4	2.132	2.210	6.0	0.1	178.0

No entanto, o mesmo comportamento considerado excelente em termo de resistência não se repetiu em alguns segmentos (poços de referência 13, 15, 18 e 19) quando analisados sob a ótica da deformabilidade, conforme será apresentado nos itens adiante. Tal fato pode estar associado à



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



ausência dos referidos materiais de mineração, pois não se obteve informações precisas das fontes de materiais utilizadas na obra, tão pouco a localização onde seus materiais foram alocados na estrutura da rodovia. Esta questão apresentada associada à deficiência granulométrica (nenhuma amostra atendeu as faixas granulométricas preconizadas pelo DNIT) e o excesso de plasticidade ($IP > 6\%$) em 50% das amostras ensaiadas da base, podem ter contribuído para o comportamento deformável (resiliente) não adequado para este material em alguns pontos, conforme citado.

Levantamento das condições de superfície

Analisando os dados de irregularidade longitudinal através do IRI, verificou-se que a PE-425 apresenta um elevado nível de desníveis verticais com valores que superam os parâmetros considerados aceitáveis para este parâmetro (superior a 3,0 m/km). Cerca de 25% da extensão da rodovia encontra-se com conceito péssimo em termo de irregularidade, de modo que os valores superam 5,5 m/km.

Quanto aos defeitos de superfície destaca-se que praticamente 50% da extensão do trecho foi classificada com conceito regular e 40% com conceito ruim, de acordo com o IGG calculado. Em virtude do tipo do revestimento em TSD (penetração invertida), não foram observados grande níveis de trincamento, tampouco deformações plásticas (em função basicamente do elevado ISC da camada de base, conforme apresentado na Tabela 05). Foi verificada a maior incidência de desagregação da camada de tratamento superficial junto com a patologia de remendo. No geral, o defeito de desgaste é bastante recorrente em camadas de penetração invertida.

Retroanálise das bacias de deflexão – Software BackMeDiNa

A retroanálise possui a finalidade de calcular os Módulos de Resiliência das camadas que constituem a estrutura do pavimento de acordo com as bacias de deformação levantadas em campo. Neste estudo as deflexões obtidas pelo FWD foram normalizadas para 41kN. Então, foi realizado o tratamento estatístico das bacias médias representativas para cada segmento homogêneo.

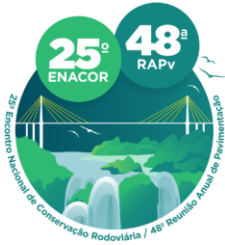
Para retroanálise foi utilizado o programa computacional backMeDiNa. Foram consideradas as estruturas de pavimento determinadas pelos ensaios geotécnicos na estrutura da rodovia existente, conforme consta na Tabela 06 – Estruturas médias dos segmentos homogêneos.

Para fins de análise, a camada de revestimento foi considerada como estrutura e incorporada à base, tendo em vista a pequena contribuição estrutural do TSD devido à sua baixa rigidez.

Na retroanálise foram considerados os seguintes Coeficientes de Poisson das respectivas camadas:

- Revestimento antigo de TSD – 0,30;
- Base de camada granular – 0,35;
- Sub-base de material natural estabilizado granulometricamente – 0,40;
- Subleito – 0,45.

Na Tabela 06 – módulos de resiliência, constam os resultados das retroanálises realizadas para as condições de TSD como revestimento e este incorporado à base. Na retroanálise considerando o TSD como camada revestimento, houve a necessidade de fixar o módulo de resiliência desta estrutura (1000 MPa), tendo em vista que se obtiveram módulos incompatíveis para este tipo de material nas simulações realizadas a variação livre deste parâmetro (módulo resiliente) para o TSD.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



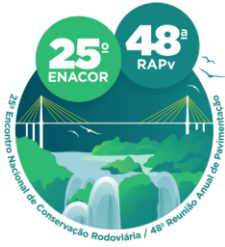
Revestimentos delgados como aqui utilizados, pela sua elevada flexibilidade e baixa rigidez, tendem a apresentar seu comportamento deformável acompanhando desempenho da camada adjacente, que neste caso é granular.

Tabela 6. Estruturas médias por segmento homogêneo e os módulos de resiliência determinados por retroanálise.

MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DETERMINADOS POR RETROANÁLISE												
Segmentos homogêneos	Estruturas médias dos segmentos homogêneos			TSD	Base	Sub-base	Subleito	ERRO (%)	TSD + Base	Sub-base	Subleito	ERRO (%)
	TSD (cm)	Base (cm)	Sub-base (cm)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)	
SH 01	2,0	28,0	30,0	1000,0	314,0	300,0	179,0	7,3	300,0	286,0	181,0	7,6
SH 02	2,0	28,0	30,0	1000,0	551,0	143,0	281,0	9,8	508,0	136,0	288,0	9,9
SH 03	2,0	25,5	35,0	1000,0	170,0	260,0	191,0	6,0	166,0	267,0	191,0	6,8
SH 04	2,0	23,0	40,0	1000,0	476,0	277,0	338,0	5,5	434,0	277,0	342,0	5,9
SH 05	2,0	28,0	37,5	1000,0	245,0	240,0	324,0	9,8	245,0	234,0	325,0	10,4
SH 06	2,0	28,0	37,5	1000,0	618,0	507,0	315,0	5,5	549,0	513,0	315,0	5,6
SH 07	2,0	33,0	35,0	1000,0	267,0	117,0	132,0	4,6	252,0	112,0	134,0	5,0
SH 08	2,0	33,0	25,0	1000,0	291,0	457,0	161,0	4,8	280,0	450,0	161,0	5,0
SH 09	2,0	37,0	25,0	1000,0	587,0	303,0	334,0	10,8	548,0	314,0	334,0	10,9
SH 10	3,0	37,0	20,0	1000,0	284,0	590,0	198,0	9,3	277,0	512,0	200,0	9,6
SH 11	3,0	37,0	20,0	1000,0	169,0	169,0	274,0	9,5	165,0	173,0	277,0	9,8
SH 14	2,0	28,0	40,0	1000,0	738,0	640,0	408,0	6,4	682,0	640,0	413,0	6,4
SH 15	2,0	24,0	22,0	1000,0	691,0	827,0	418,0	9,1	630,0	900,0	418,0	9,1
SH 16	2,0	48,0	25,0	1000,0	433,0	609,0	358,0	9,9	422,0	563,0	363,0	9,9
SH 17	2,0	33,0	25,0	1000,0	650,0	431,0	297,0	8,2	600,0	446,0	297,0	8,1
SH 18	2,0	40,0	20,0	1000,0	531,0	141,0	314,0	7,5	497,0	137,0	318,0	7,5
SH 19	2,0	20,0	28,0	1000,0	801,0	409,0	325,0	7,3	695,0	414,0	325,0	7,5
SH 20	2,0	30,0	48,0	1000,0	481,0	277,0	351,0	8,1	450,0	274,0	355,0	8,3
SH 21	2,0	28,0	30,0	1000,0	342,0	716,0	301,0	5,7	330,0	744,0	301,0	6,1
SH 22	2,0	28,0	30,0	1000,0	498,0	1105,0	363,0	8,5	474,0	1178,0	363,0	8,5
SH 23	2,0	26,0	52,0	1000,0	399,0	495,0	443,0	8,3	380,0	521,0	443,0	8,4
SH 24	2,0	22,0	26,0	1000,0	350,0	541,0	321,0	7,4	333,0	555,0	325,0	7,3
SH 25	2,0	20,0	43,0	1000,0	534,0	730,0	242,0	5,1	496,0	748,0	242,0	5,3

Analisando os resultados percebeu-se a boa aderência entre as bacias de deflexão determinadas e os módulos resilientes das camadas estruturais retroanalizados, vide erro inferior a 10% determinado pelo software BackMeDiNa. Ao mesmo tempo, não foi identificada sensível diferença entre os resultados considerando o TSD como revestimento e o incorporando à base, de forma que podemos corroborar com a baixa a nenhuma contribuição estrutural de revestimentos delgados.

Através dos resultados dos ensaios geotécnicos obtidos e da geologia da região, se inferiu que possivelmente os materiais seriam oriundos de processos minerários. A Tabela 06 (módulos de resiliência) ilustra a boa qualidade dos materiais originários de mineração sob o ponto vista da deformabilidade, onde, como se pode observar de forma geral, os módulos resilientes foram superiores a 300 MPa em mais de 60% dos segmentos homogêneos, considerando as camadas de base, sub-base e o subleito. Este é um valor referencial geralmente utilizado para caracterizar materiais granulares britados em dimensionamentos mecânicos considerando a teoria elástica linear. Considerando os 23 segmentos homogêneos analisados em 15 (mais de 65%) apresentaram MR superior a 300 MPa em pelo duas camadas, sendo que nestes casos a camada de base sempre apresentou esta característica. A priori, destacaram-se os seguintes segmentos onde, de acordo com



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



o último critério descrito, apresentaram comportamento decorrente da presença de materiais de mineração: SHs 04, 09, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 e 25.

Não obstante, apenas dois segmentos (SHs 03 e 11) apresentaram desempenho insatisfatório (vide Tabela 06 – módulos de resiliência), devido ao reduzido conjunto modular determinado na retroanálise. Estes segmentos apresentaram elevadas deflexões características (superiores a 100×10^{-2} mm), provavelmente decorrente da excessiva deformabilidade das camadas de base. Nestes locais, o excesso de deformabilidade se atribuiu a sua deficiência granulométrica, com a inexistência da fração pedregulho na composição, assim como o ligeiro excesso de plasticidade que aumenta a retenção de umidade e conseqüentemente torna o material mais deformável para o mesmo carregamento (menor módulo). Um detalhe importante é que estes segmentos mostram boa capacidade de suporte com $ISC > 130\%$ (vide ensaios realizados); isso mostra, como relatado exaustivamente na literatura, que não há aderência na relação entre os ensaios de ISC e o módulo resiliente dos materiais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A mineração é um dos setores básicos da economia do Brasil, sendo capaz de contribuir de forma relevante para a melhoria da qualidade de vida da população no presente, mas mantendo também o bem-estar das futuras gerações, fundamental para o desenvolvimento de uma sociedade. Considerada como uma das formas mais profícuas e inteligentes de se promover este desenvolvimento sustentável, o reaproveitamento de resíduos pode também ser um importante gerador de emprego e renda.

Destaca-se a necessidade urgente de se contribuir para a sustentabilidade do planeta, incentivando a redução do consumo de agregados não renováveis (rochas, areias e outros materiais primários), assim como, minimizando os impactos socioambientais pelas suas extrações.

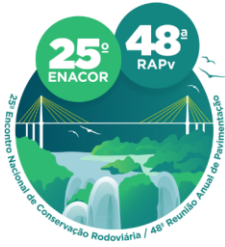
O histórico de pesquisas nacionais e internacionais ratificam o bom desempenho dos agregados oriundos de áreas de exploração de minérios como material alternativo para compor as camadas do pavimento rodoviário. O estudo de caso aqui detalhado compõe como mais uma peça para corroborar com a possibilidade técnica viável de ampliar a utilização deste tipo de material, principalmente em regiões tráfego médio e boa disponibilidade, conforme é demonstrado na geologia deste local.

Os resultados dos ensaios geotécnicos e levantamentos de campo evidenciaram a qualidade superior dos materiais empregados nas camadas estruturais e inclusive o subleito da PR-425, quando comparados com materiais britados tradicionalmente utilizados em obras de pavimentação. Em mais de 60% dos segmentos, as camadas apresentaram módulo resiliente superior a 300 MPa, o que pode ser considerado como uma excelente relação tensão versus deformação resiliente para uma camada granular. Um detalhe não menos importante é que o levantamento deflectométrico foi realizado em pavimento cuja condição superficial já se encontrava em estado regular a ruim, conforme os valores de IGG determinados, o que acentua ainda mais a qualidade dos materiais empregados na PE-425.

Conjuntamente ao mencionado no parágrafo anterior foi demonstrado que valores elevados de ISC não garantem um comportamento adequado em termos de deformabilidade, fato que ficou comprovado nos locais que apresentaram elevado ISC, porém reduzido módulo resiliente.

Um ponto relevante que é preciso ressaltar é a importância da utilização do software nacional BackMeDiNa, que possibilitou a realização de todas as análises desenvolvidas no âmbito da Mecânica dos Pavimentos. O maior uso auxilia na solidificação da implantação do novo método de dimensionamento que está sendo implantado no País.

Os materiais ditos alternativos, oriundos de processos de mineração, muitas vezes são classificados como rejeitos. No entanto, cabe destacar que eles podem apresentar comportamento similar ou até



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



mesmo superior (como os encontrados na rodovia PE-425) aos tradicionalmente utilizados em obras de pavimentação. Cabe somente o correto e adequado desenvolvimento de estudos e caracterização destes materiais, de forma a se obter as melhores formas de utilização, com custos menores, gerando menos impactos ambientais e propiciando o maior desenvolvimento social e econômico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barbosa, V. H. R. et al. Aproveitamento do resíduo da mineração para uso em pavimentação. 2016. 13p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia - IME. Rio de Janeiro - RJ, 2016.
- Buitrago, N. D. T. Aplicabilidade do agregado siderúrgico açobrita misturado com solo em camadas de pavimentos rodoviários. 2016. xviii, 85 f., il. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- Campanha, A. Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação. 2011. 106p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Viçosa – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Viçosa - MG, 2011.
- Carneiro, A. A. Comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro estabilizado com polímero e do compósito rejeito-polímero reforçado com fibras de polipropileno. 2020.164p. Tese de doutorado - Universidade de Brasília – Departamento de Engenharia. Brasília - DF, 2020.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de São José do Belmonte, estado de Pernambuco / Organizado [por] João de Castro Mascarenhas, Breno Augusto Beltrão, Luiz Carlos de Souza Junior, Manoel Julio da Trindade G. Galvão, Simeones Neri Pereira, Jorge Luiz Fortunato de Miranda. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.
- Dantas, A. A. N. Caracterização de resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro para uso em pavimentação. 2015.109p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Centro de Tecnologia. Natal - RN, 2015.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-PRO 11/79: Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis - Procedimento B. Brasília, DF, 1979.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-PRO 269/94: Projeto de restauração de pavimentos flexíveis - TECNAPAV. Brasília, DF, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTES. DNIT 006/2003 – PRO. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos. Brasília, DF, 2003.
- Grasse, B. P. et al. Avaliação do comportamento geotécnico de um solo laterítico estabilizado com cal e rejeito de flotação de minério de ferro. In: 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 2019. Anais... Balneário Camboriú, SC, p. 1902-1913.
- Lara, L. L. D. et al. Estudo do comportamento de um solo com adição de rejeito de flotação de minério de ferro para utilização em camadas de pavimentos. In: 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET Gramado. 2018. Gramado – RS. Infraestrutura - Materiais granulares e Concreto I. Gramado: anpet, 2018. p.1966- 1977.
- Medina, J. de et al. Utilização de Ensaios Defletométricos e de Laboratório para a Avaliação Estrutural de Pavimentos. 28a Reunião Anual de Pavimentação, v. 1, p. 595-625, 1994.
- Rodrigues, K. H. P. Estudo de estabilização granulométrica de solos utilizando rejeito de mineração. 2018. 108p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia – Núcleo de Geotecnia. Ouro Preto - MG, 2018.