

APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE ARDÓSIA EM SOLO MELHORADO COM CIMENTO

Slate waste application in soil improved with cement

Raphael Lúcio Reis dos Santos (1); Vinícius Antônio Florentino Camargo (2); Conrado de Souza Rodrigues (3)

(1) *Mestrando em Engenharia Civil no CEFET/MG e servidor público do DER/MG*

(2) *Especialista em Pavimentação e Restauração Rodoviária na FUMEC e servidor público do DER/MG*

(3) *Professor Doutor no Departamento de Engenharia Civil do CEFET/MG*

Rua dos Guaranis, 426, apto 63. Centro. Belo Horizonte/MG. CEP: 30120-040

Resumo

A preocupação com o meio ambiente e a escassez de recursos naturais têm levado à busca por alternativas de desenvolvimento mais sustentável. Diante desta necessidade, a utilização de resíduos se mostra como uma boa alternativa na redução dos impactos causados ao meio ambiente pelo consumo desordenado de matéria-prima e pela redução das áreas de disposição, considerando o crescente volume de resíduos descartados. Os resíduos estudados poderão tornar-se um grande auxiliador na produção de materiais alternativos de menor custo, substituindo em grande parte os agregados naturais empregados em concretos, argamassas, blocos, barreiras de contenção, camadas estruturais para pavimentação e outros. Nesse contexto se inserem os resíduos gerados pelo corte de ardósia. Este trabalho tem como objetivo discutir as propriedades deste resíduo para aplicações em sub-base e base de solo melhorado com cimento em pavimentação. Foram realizados ensaios de acordo com normas estabelecidas por órgãos regulamentadores de engenharia rodoviária e normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para adições de cimento de 0%, 2% e 4% nas misturas de resíduo de ardósia e solo argiloso (SB 50/50 e B 70/30) propostas. Os resultados obtidos indicam que os teores de adição de cimento mais indicados para utilização como sub-base e base de solo melhorado com cimento são de 2%, para ambas as aplicações. Desta forma, este estudo colabora para a aplicação dos resíduos gerados na extração da ardósia como material de solo melhorado com cimento em pavimentação rodoviária, com base na viabilidade técnica e econômica da implantação e recuperação de rodovias estaduais de Minas Gerais; reduzindo assim as áreas de deposição e os impactos ambientais causados.

Palavra-Chave: Ardósia, Materiais alternativos, Pavimentação rodoviária, Solo melhorado com cimento, Resíduos sólidos.

Abstract

The worry about environment and natural resources shortage has led to seek after a sustainable alternative. Faced with this need, the recycling process appears as a good way to minimize this natural resources use and the shortage of proper disposal sites caused by the large amount of waste discarded. The studied waste can become a large helper for the production of lower cost alternative materials, largely replacing natural aggregates used in concrete, mortar, blocks, containment barriers, paving structural layers and others. The slate waste is in this context. Therefore, this research focuses on the study of the properties of this waste in soil improved with cement for applications in subbase and base. Tests were carried out in accordance with standards established by regulatory agencies of road engineering and the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). Three cement's additions - 0%, 2% and 4% - were considered in slate + soil mixture (SB 50/50 and B 70/30) to produce the soil improved with cement. The results indicate that the cement's addition levels most suitable for use as sub-base and base in soil improved with cement are 2%, for both applications. Finally, this study contributes for the application of the waste produced in the extraction of the slate as soil improved with cement to road paving, on basis of the technical and economical viability of the implantation and recovery of Minas Gerais's (a state at the Southeast of Brazil) highways; reducing the areas of deposition and the environmental impacts caused.

Keywords: Slate, Alternative materials, Road paving, soil improved with cement, Solid wastes.

1 Apresentação

1.1 Introdução

Grande parte dos processos que envolvem atividades econômicas atualmente são fontes geradoras de resíduos, causando grande degradação ao meio ambiente; contrariando, portanto, o desenvolvimento sustentável (POPP, 1992; GONÇALVES, 2000). Segundo ALTOÉ et al. (2013), a geração de resíduos nos processos produtivos causa impactos irreversíveis ao meio ambiente, muitos deles provocados pela construção civil. Portanto, um dos problemas mais sérios que a sociedade moderna enfrenta é a deposição dos resíduos industriais e urbanos (CUNHA, 2007).

A utilização de resíduos como material na construção civil auxilia na redução da quantidade de recursos naturais retirados do meio ambiente. Os resíduos estudados poderão tornar-se auxiliares na produção de materiais alternativos de menor custo, substituindo em boa parte os agregados naturais empregados em concretos, argamassas, blocos, barreiras, camadas de pavimentação e outros (FIORITI, 2007).

Sendo assim, de acordo com PAGNUSSAT (2004), diversas pesquisas vêm sendo impulsionadas pelas questões ambientais, sendo que na engenharia civil se destacam, principalmente, as voltadas para o aprimoramento dos materiais e sistemas visando ao gerenciamento e redução dos resíduos gerados.

Neste contexto, devido ao grande volume de resíduos de ardósia disponíveis em Minas Gerais, à responsabilidade ambiental de sua utilização e à possibilidade de aplicação em pavimentação rodoviária, este trabalho pretende aferir a viabilidade técnica de sua utilização nas rodovias como sub-base e base de solo melhorado com cimento.

1.2 Justificativa

O acúmulo de resíduos oriundos de processos industriais, da construção civil, e da extração e tratamento de minérios causa extensos prejuízos econômicos, uma vez que envolvem etapas onerosas de remanejo, transporte e descarte, provocando redução da margem de lucro desta atividade (RODRIGUES et al., 2014). Além disso, grande parte dos resíduos acumulados acabam por provocar desequilíbrios ambientais, exigindo locais e métodos especiais de descarte, significando a utilização excessiva e pouco eficiente dos recursos naturais (DE CARVALHO et al., 2007).

Sendo assim, discussões recentes dos problemas ambientais causados pelos resíduos demonstraram a necessidade do desenvolvimento de projetos de pesquisa que incluam os aspectos ambientais, uma vez que os mesmos vêm sendo amplamente discutidos nos últimos anos, tendo, inclusive, mobilizado a opinião pública e assumido um papel preponderante nas comunidades (FIORITI, 2007).

DEL CARPIO (2006) afirma que há um esforço para a utilização de novas tecnologias e materiais provenientes de resíduos devido aos problemas de desgastes e deformações provocados pelo crescimento do volume de tráfego e a aparição de veículos mais

pesados na malha rodoviária brasileira. A busca por novos materiais, técnicas de projeto e construção é fundamental para um melhor desempenho das rodovias (LEAL e FERREIRA, 2007).

Desta forma, este estudo busca auxiliar na avaliação e normatização para aplicação dos resíduos provenientes do corte de ardósia como material de solo melhorado com cimento em pavimentação, uma vez que eles apresentam baixo custo, disponibilidade e em alguns casos proximidade com trecho a ser aplicado (RETORE, 2005), contribuindo com a tendência mundial de desenvolvimento sustentável que utiliza resíduos minerais em aplicações de engenharia diante de comprovações de vantagens técnicas, econômicas e ambientais (FONSECA, 2010).

2 Revisão bibliográfica

2.1 Exploração e geração de resíduos de ardósia

As atividades de extração mineral, assim como o seu beneficiamento são de grande importância para o desenvolvimento social, mas também são responsáveis por impactos muitas vezes irreversíveis ao meio ambiente (BRANDT, 1998).

Segundo CUNHA (2007), os resíduos gerados criam grandes problemas tecnológicos e ambientais, pois vão se acumulando ao redor do local de exploração, criando grandes montanhas de rejeitos. Para evitar problemas durante a extração da rocha, grande quantidade dos resíduos é transportada para locais próximos às jazidas criando grandes prejuízos à fauna e flora da região onde são depositados.

A partir da produção líquida anual de ardósias, estimada para Minas Gerais em meados da década de 2000, bem como dos índices finais de recuperação na lavra, calculou-se que estariam sendo gerados e acumulados, em pilhas de bota-fora, pelo menos 5 milhões de toneladas por ano de estéril e rejeitos (CHIODI e CHIODI, 2014).

As faltas de pesquisa geológica, planejamento de lavra e pesquisa tecnológica aplicada na extração e corte da ardósia são fatores que contribuem para geração de problemas ambientais, como as grandes cavas abertas para extração, grandes pilhas de estéril e resíduos, cujo descarte é realizado de forma inadequada (FREITAS, 2012).

2.2 Caracterização da ardósia

A ardósia é uma rocha metamórfica, que apresenta baixo grau de metamorfismo, constituída de material extremamente fino, semelhante ao de argila; na qual sua exploração é baseada na lavra de folhelhos nas fases de corte e acabamento (SOUZA e MANSUR, 2000). De acordo com RODRIGUES et al. (2014), as ardósias são formadas por longas placas ao longo de sua superfície planar, fenômeno conhecido como clivagem ardosiana. Há diversos tipos de ardósia, porém a principal variedade produzida é a ardósia cinza, seguida das ardósias verde, ferrugem, grafite, negra e roxa.

Segundo SOUZA e MANSUR (2000), a ardósia é uma das matérias-primas mais utilizadas no setor de construção civil por ter excelentes propriedades físicas como: dureza média, baixa porosidade e alta resistência mecânica, aliadas ao baixo custo.

Em sua composição química, há predominância de Sílica (SiO_2) e Alumina (Al_2O_3). Também há presença de óxidos, como os de magnésio, de ferro, de potássio e dióxido de titânio (OTI et al., 2010).

2.3 Avaliação da utilização dos rejeitos de ardósia

A pavimentação consome 30% do mercado brasileiro de pedras britadas, o que equivaleu a cerca de 96 milhões de toneladas da produção do ano de 2003 (DNPM, 2004). No caso da Europa, de acordo com HILL et al. (2001), o consumo estimado de agregados neste setor é em torno de 1 bilhão de toneladas por ano. Sendo assim, a exploração de jazidas minerais para a produção de agregados naturais é responsável por grandes impactos ambientais, verificando-se entre eles poeira, poluição visual e sonora, tráfego ou ainda poluição de recursos hídricos e assoreamento dos mesmos (DETR, 2000).

NASCIMENTO (2003) cita que os materiais granulares podem ser obtidos através da exploração de novas jazidas de solo, areia e rocha, ocasionando, em geral, alto custo econômico e ambiental. Porém, alternativamente, pode-se estudar a viabilidade da utilização de resíduos e minerais, incluindo os resíduos de ardósia, que são, inevitavelmente, gerados nos processos produtivos de exploração desta rocha.

Algumas aplicações dos resíduos em construção civil já são bem difundidas, como a utilização em sub-base e base de pavimentos, produção de concretos sem fins estruturais, produção de blocos de concreto, utilização em projetos de drenagem, entre outros. Entretanto, diversos autores concordam que o mercado dos resíduos de construção ainda deve crescer (HANSEN, 1992; DHIR et al. 1999; PAGNUSSAT, 2004; RETORE, 2005; DEL CARPIO, 2006; OTI et al., 2010).

Desta forma, como pode ser verificado, o estudo da utilização dos resíduos de ardósia como material de solo melhorado com cimento traz várias vantagens para a sociedade. Os principais benefícios são: a eliminação dos rejeitos produzidos, que são lançados e acumulados continuamente no meio ambiente, redução da quantidade de matéria-prima de materiais crus, geração de uma nova atividade econômica (HILL et al., 2001; FARIAS, 2005; HOOD, 2006; FIORITI, 2007; RICCI, 2007; DOS SANTOS et al., 2013); e também a necessidade de ampliar e manter a malha rodoviária (NASCIMENTO, 2003), contribuindo para a melhoria do tráfego, diminuição do custo do frete e ampliação do acesso aos cidadãos (RETORE, 2005).

2.4 Normatização brasileira para utilização de resíduos como solo melhorado com cimento em engenharia rodoviária

O Conselho Nacional do Meio Ambiente estabeleceu as diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil através da Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002).

A publicação das primeiras normas nacionais relacionadas aos agregados reciclados de resíduos de construção só ocorreu em 2004, quando a ABNT lançou 4 especificações que tratam desde a instalação de recebimento do material até a sua aplicação em pavimentação ou em concreto sem função estrutural. Entre elas, pode-se citar a NBR 15116 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

De forma complementar, o DNIT (2010) estabeleceu normas, através de especificações de serviços para execução e controle de qualidade dos materiais a serem empregados como solo melhorado com cimento nas camadas de sub-base e base da pavimentação. Tratam-se das Normas 140/2010a – ES: Pavimentação – Sub-base de solo melhorado com cimento e 142/2010b – ES: Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento.

As camadas de sub-base e base servem para aliviar as pressões sobre as camadas de solo inferiores, e apresentam função estrutural (BALBO, 2015).

A Figura 1 apresenta desenho esquemático das camadas estruturais presentes nos pavimentos flexíveis.

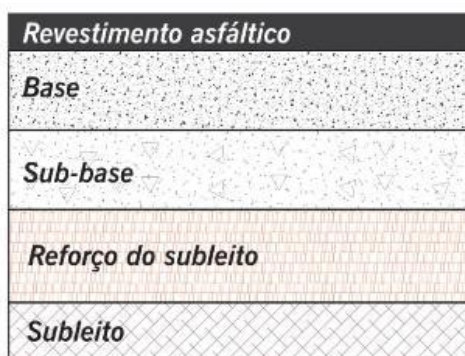


Figura 1: Camadas de pavimento flexível.

A sub-base é a camada de pavimentação, complementar à base e com as mesmas funções desta, executada sobre o subleito ou reforço do subleito, devidamente compactado e regularizado (DNIT, 2010a). Os critérios para utilização do solo melhorado com cimento são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Especificações de serviço para sub-base de solo melhorado com cimento.

Aplicação	Índice de Suporte Califórnia (ISC) %	Expansão %	Índice de grupo (IG)	Energia de compactação
Sub-base de solo melhorado com cimento	≥ 30	≤ 1,0	0	Intermediária
Nota: O material de solo utilizado deve apresentar Limite de Liquidez ≤ 40% e índice de plasticidade ≤ 18%, além de apresentar o material retido na peneira #200 ≤ 50%. O teor de cimento usualmente adotado está entre 2% e 4% do peso total da amostra.				

A base é a camada de pavimentação destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os adequadamente à camada subjacente, executada sobre a sub-base, subleito ou reforço do subleito devidamente regularizado e compactado (DNIT, 2010b). Os critérios normativos para a utilização do solo como material para base de solo melhorado com cimento seguem as especificações para esta aplicação, porém também é necessário verificar a granulometria do material de acordo com a faixa estabelecida. A Tabela 2 indica as possíveis faixas granulométricas a serem adotadas.

Tabela 2: Granulometria do material para aplicação como base.

PENEIRAS	POL	2"	1"	3/8"	Nº 4	Nº 10	Nº 40	Nº 200
	MM	50,8	25,4	9,5	4,8	2,0	0,42	0,074
FAIXAS	A	100	-	30-65	25-55	15-40	8-20	2-8
	B	100	75-90	40-75	50-60	20-45	15-30	5-15
	C	-	100	50-85	35-65	25-50	15-30	5-15
	D	-	100	60-100	50-85	40-70	25-45	5-20

Após definição da faixa é possível verificar o atendimento aos critérios para utilização do solo melhorado com cimento, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Especificações de serviço para base de solo melhorado com cimento.

Aplicação	Índice de Suporte Califórnia (ISC) %	Expansão %	Limite de liquidez (LL) %	Índice de plasticidade (IP) %	Energia de compactação
Base de solo melhorado com cimento	≥ 80	$\leq 0,5$	≤ 25	≤ 6	Modificada
Nota: O material de solo utilizado deve apresentar Limite de Liquidez $\leq 40\%$ e índice de plasticidade $\leq 18\%$. O teor de cimento usualmente adotado está entre 2% e 4% do peso total da amostra.					

3 Metodologia da pesquisa

O interesse de se trabalhar com os resíduos do corte de ardósia surgiu após disponibilidade de um volume grande de resíduos sem nenhum critério de tratamento e disposição, em região próxima a um trecho rodoviário que necessitava de intervenção para melhoria da pista de rolamento. Os resíduos tiveram sua origem nas jazidas, pela quebra e corte de placas de ardósia.

Os estudos para avaliação do comportamento das misturas de solo argiloso e resíduos de ardósia e melhorados com cimento em pavimentação seguiram quatro etapas. As etapas consideradas na pesquisa buscaram o atendimento às Especificações de Serviço 140/2010 e 142/2010 do DNIT, considerando os aspectos de desempenho físico e mecânico, e também as interações ambientais.

Baseada nos conceitos apresentados, esta pesquisa teve como objetivo principal desenvolver um estudo experimental para verificar a viabilidade técnica da utilização de

resíduos gerados pelo corte de ardósia na engenharia rodoviária, como material de solo melhorado com cimento para sub-base e base de pavimentação asfáltica.

Para alcançar este objetivo, o programa experimental foi estruturado de acordo com as etapas ilustradas nas Figuras de 2 a 5.

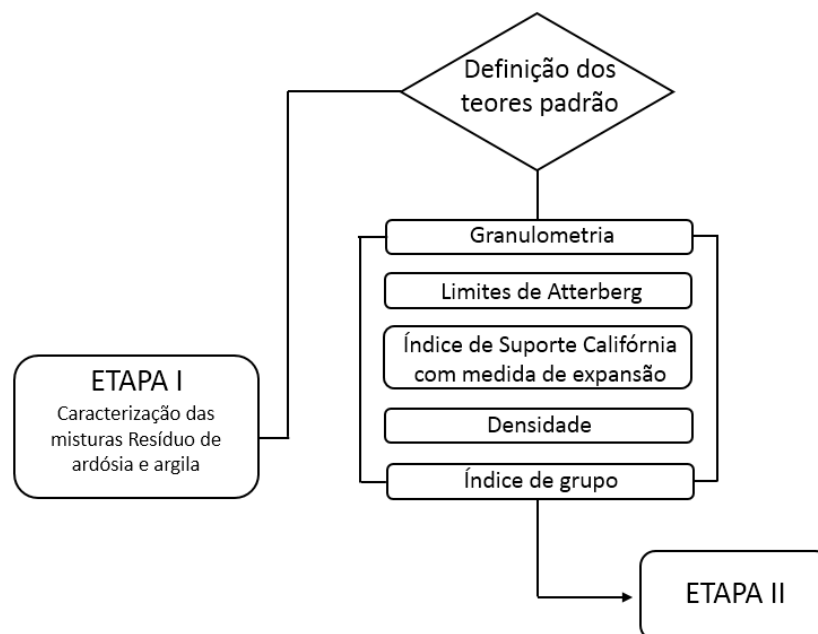


Figura 2: Etapa I - Caracterização das misturas de solo argiloso e resíduo de ardósia.

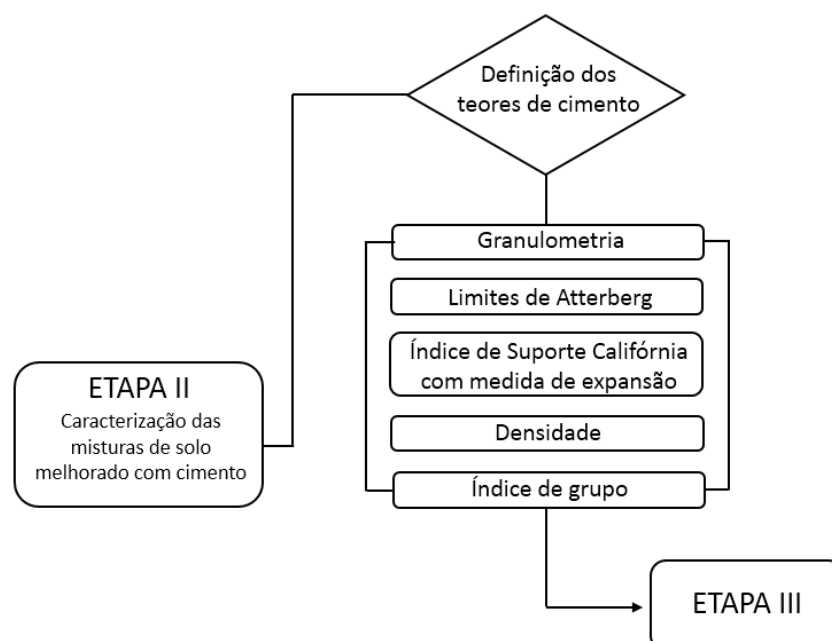


Figura 3: Etapa II – Caracterização das misturas de solo melhorado com cimento.

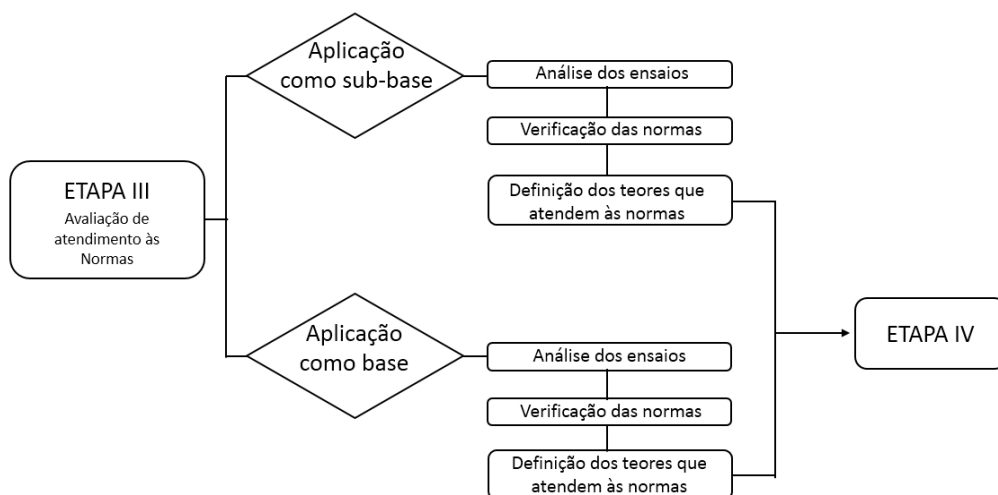


Figura 4: Etapa III – Avaliação do solo melhorado com cimento como material de sub-base e base.

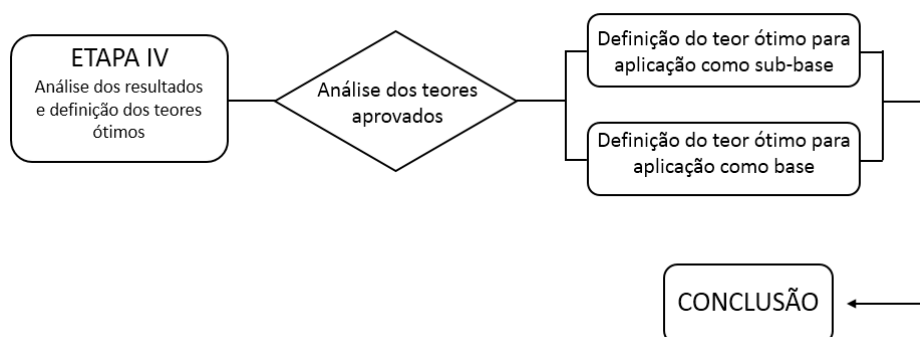


Figura 5: Etapa IV - Análise dos resultados e definição dos teores de cimento ótimos.

4 Materiais utilizados

4.1 Cimento

Foi utilizado cimento Portland CII-E-32 comercial ensacado de 50 quilogramas nas misturas de solo melhorado com cimento.

4.2 Mistura padrão: Resíduo de ardósia + solo argiloso

Foram utilizados nas misturas padrões resíduos oriundos do corte de ardósia e solo argiloso sem a adição de cimento. As misturas padrões foram utilizadas como referências para a verificação das melhorias das propriedades físicas obtidas através da inclusão de cimento nas misturas de solo.

O solo utilizado na pesquisa foi coletado em área de empréstimo concentrado utilizado como material de aterro na cidade de Papagaios, do estado de Minas Gerais. A escolha foi definida com base na análise de cinco áreas de empréstimo exploradas, nas quais

definiu-se por adotar o empréstimo concentrado que apresentou maior facilidade para a coleta dos materiais e também possuía volume compatível para utilização nesta pesquisa.

Já o resíduo de ardósia utilizado na pesquisa foi coletado em uma pedreira exploradora de ardósia, também no município de Papagaios. Após a coleta, o resíduo foi enviado para um britador, onde o material foi transformado para a forma de bica corrida (material passante na peneira de 2" ou 50mm).

Após a etapa de coleta dos materiais utilizados na pesquisa, foram definidos os teores das misturas de resíduo de ardósia e solo, com base no histórico de estudos realizados no DER/MG. A Tabela 4 apresenta os teores utilizados na pesquisa.

Tabela 4: Teores da mistura padrão adotada.

Misturas	% de ardósia	% de solo	Representação	Aplicação
1	50	50	SB 50/50	Sub-base
2	70	30	B 70/30	Base

Os percentuais das misturas são em relação ao peso de cada material constituinte. Sendo assim, por exemplo, a mistura contendo 70% de resíduo de ardósia e 30% de solo argiloso, em peso, é representada pela notação 70/30.

Foram moldados corpos de prova para energias de compactação intermediária (26 golpes) e modificada (55 golpes), visando apresentar parâmetro comparativo em relação à capacidade de suporte do material, para aplicações como sub-base e base.

4.3 Solo melhorado com cimento

Após a etapa de caracterização da mistura padrão, contendo resíduo de ardósia e solo argiloso, foram definidos os teores de cimento a serem adicionados nas mesmas, com base nos teores usuais indicados pelas normas DNIT 140/2010 e 142/2010. Foram estudadas sub-base e base de solo melhorado com cimento nos seguintes teores: 2% e 4% de adição de cimento.

As misturas estudadas sem adição de cimento e de solo melhorado com cimento foram dosadas em peso e seguiram os percentuais indicados na Tabela 5.

Tabela 5: Teores e aplicações das misturas de solo melhorado com cimento estudadas.

Misturas de solo melhorado com cimento	Teor de cimento %	Representação	Aplicação
1	0	SB 0	Sub-base
2	2	SB 2	Sub-base
3	4	SB 4	Sub-base
4	0	B 0	Base
5	2	B 2	Base
6	4	B 4	Base

Os teores de adição de cimento às misturas levam em conta a mesma proporção adotada para misturas sem adição de cimento, sendo 50/50 para a sub-base e 70/30 para a base, de resíduo de ardósia e solo argiloso, respectivamente. Sendo assim, por exemplo, a mistura notada por SB 4 possui aplicação como sub-base, contendo 96% da mistura de resíduo de ardósia + solo argiloso e 4% de adição de cimento, ambos em peso. Os corpos de prova foram moldados individualmente e com observação ao atendimento dos percentuais dos materiais relacionados, sendo ensaiados após 72 horas, conforme estabelecem as normas.

4.4 Caracterização das misturas sem adição de cimento e de solo melhorado com cimento

Os ensaios foram conduzidos com o objetivo de verificar as alterações provocadas no comportamento da mistura de resíduo de ardósia e solo argiloso, para aplicação como sub-base e base, quando adicionados percentuais de cimento.

A caracterização das misturas foi realizada através dos ensaios descritos nas Etapas I e II, presente na metodologia da pesquisa, observando os normativos vigentes, utilizando o número de amostras especificado para cada ensaio, de acordo com o estabelecido no Manual de procedimentos para elaboração de estudos e projetos de engenharia rodoviária – Volume IV – Estudos geológicos e geotécnicos do DER/MG.

Foram moldados corpos de prova para compactação imediata, nas energias intermediária (26 golpes), visando à caracterização das misturas com aplicação em sub-base; e modificada (55 golpes), para caracterização das misturas com aplicação em base. Os ensaios foram realizados com auxílio dos técnicos do DER/MG e os seus resultados, após a compactação, podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6: Caracterização das misturas sem adição de cimento e de solo melhorado com cimento.

FOLHA RESUMO															
AMOSTRA	ENERGIA	LL %	IP %	GRANULOMETRIA (% QUE PASSA)						IG					
				2"	1"	3/8"	Nº 4	Nº 10	Nº 40		Nº 200	DENSID. g/cm³	H. ótima %	EXP. %	ISC %
SB 0	Intermediária	26,1	8,1	100,0	100,0	81,8	68,2	58,7	51,2	31,5	0	2,020	9,9	0,03	31,5
SB 2	Intermediária	24,8	7,5	100,0	100,0	79,4	61,6	48,8	38,9	23,2	0	2,060	8,6	0,02	47,4
SB 4	Intermediária	23,9	6,7	100,0	100,0	81,3	65,8	53,8	45,0	27,3	0	2,100	8,2	0,01	79,6
B 0	Modificada	23,1	7,4	100,0	100,0	77,1	59,2	45,7	28,3	14,7	0	2,188	6,6	0,08	72,5
B 2	Modificada	22,5	5,8	100,0	100,0	76,2	57,2	40,1	29,3	18,9	0	2,200	6,1	0,01	103,4
B 4	Modificada	20,3	5,4	100,0	100,0	77,1	59,2	45,7	35,0	20,7	0	2,250	5,4	0,00	181,7

5 Resultados obtidos

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados para as misturas de resíduos de ardósia e solo argiloso sem adição de cimento e de solo melhorado com cimento, separados pela área de aplicação, uma vez que as exigências normativas são diferenciadas para aplicações como sub-base e base.

Para avaliação da aplicação do resíduo como material de sub-base e base, foram comparados os resultados dos ensaios de caracterização das misturas com os índices estabelecidos nas normas 140/2010a – ES: Pavimentação – Sub-base de solo melhorado com cimento e 142/2010b – ES: Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento.

5.1 Avaliação da granulometria

5.1.1 Aplicação como sub-base

O percentual de material do solo utilizado como solo melhorado passado na peneira de #200 deve ser inferior ou igual a 50%.

5.1.2 Aplicação como base

Para aplicação do material como base é necessária a verificação do enquadramento em faixas granulométricas. As faixas são distribuídas entre A e D, conforme apresentado neste artigo. Uma vez que o material se trata de bica corrida, era esperado ele não se enquadrasse necessariamente em uma faixa granulométrica especificada. Sendo assim, para o material estudado, verificou-se o enquadramento na faixa C.

5.1.3. Atendimento à normatização – granulometria

Verifica-se que os solos empregados como solo melhorado com cimento atendem aos requisitos normativos para aplicações como sub-base e base.

5.2. Avaliação dos limites de Atterberg

5.2.1 Aplicação como sub-base

Há apenas requisitos para o solo empregado como material do solo melhorado com cimento. Ele deve apresentar no máximo 40% e 18% de limite de liquidez e de índice de plasticidade, respectivamente.

5.2.2 Aplicação como base

Atende aos mesmos requisitos da aplicação como sub-base. Porém, também é necessário que a mistura de solo melhorado com cimento atenda aos seguintes requisitos: limite de liquidez inferior ou igual a 25% e índice de plasticidade inferior ou igual a 6%.

5.2.3. Atendimento à normatização – limites de Atterberg

Verifica-se que os solos empregados (SB 0 e B 0) atenderam aos limites de 40% e 18%, para limite de liquidez e índice de plasticidade, respectivamente. As amostras de solo melhorado com cimento, B 2 e B4, também atenderam aos requisitos normativos.

5.3. Avaliação do Índice de Suporte Califórnia e expansão

5.3.1 Aplicação como sub-base

Do ponto de vista de capacidade estrutural, todas as misturas propostas como camada de sub-base devem apresentar Índice de Suporte Califórnia superior a 30% e expansão

inferior a 1,0% na umidade ótima, como recomenda a norma DNIT 140/2010 – ES Pavimentação – Sub-base de solo melhorado com cimento.

5.3.2 Aplicação como base

A norma DNIT 142/2010 estabelece que os valores de Índice de Suporte Califórnia sejam superiores a 80% e de expansão inferiores a 0,5%.

5.3.3. Atendimento à normatização – Expansão e Índice de Suporte Califórnia

Tendo como base a avaliação dos resultados de expansão e Índice de Suporte Califórnia para aplicação como sub-base e base, verifica-se que apenas a amostra B 0 não atende a norma, uma vez que não atingiu capacidade de suporte igual a 80%.

5.4. Avaliação do Índice de Grupo

5.4.1 Aplicação como sub-base

O Índice de Grupo (IG) é um número inteiro que fornece subsídios para o dimensionamento de pavimentos. Ele baseia-se na granulometria e limites de Atterberg das amostras. O valor do índice de grupo deve ser zero para aplicação como sub-base.

5.4.2 Aplicação como base

Não há requisitos específicos relacionados ao Índice de Grupo para aplicação do resíduo como material para a base.

5.4.3. Atendimento à normatização – Índice de Grupo

Verifica-se que todos os teores estudados para aplicação como sub-base atendem aos requisitos normativos.

5.5. Avaliação de atendimento às normas

A partir da análise dos resultados apresentados e quadros resumo gerados em relação ao atendimento das normas 140/2010a – ES: Pavimentação – Sub-base de solo melhorado com cimento e 142/2010b – ES: Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento, foram geradas as Tabelas 7 e 8, indicando as misturas de solo melhorado com cimento que estão de acordo com as normas para uso como material de sub-base e base.

Tabela 7: Resumo sobre o atendimento à normatização para aplicação das misturas como sub-base.

Normatização para aplicação como sub-base			Legenda: X - Atende à aplicação		
REQUISITOS	Limite de Liquidez (LL) %	Índice de Plasticidade (IP) %	Índice de Suporte Califórnia (ISC) %	Expansão %	Índice de grupo (IG)
	≤ 40	≤ 18	≥ 30	≤ 1,0	0
SB 0	X	X	NA	NA	NA
SB 2	NA	NA	X	X	X
SB 4	NA	NA	X	X	X

Tabela 8: Resumo sobre o atendimento à normatização para aplicação das misturas como base.

Normatização para aplicação como base					Legenda: X - Atende à aplicação		
REQUISITOS	Granulometria	Limite de liquidez (LL) % P/ solo empregado	Índice de plasticidade (IP) % P/ solo empregado	Índice de Suporte Califórnia (ISC) %	Limite de liquidez (LL) %	Índice de plasticidade de (IP) %	Expansão %
		≤ 40	≤ 18	≥ 80	≤ 25	≤ 6	≤ 0,5
B 0	Faixa C	X	X	NA	NA	NA	NA
B 2	NA	NA	NA	X	X	X	X
B 4	NA	NA	NA	X	X	X	X

5.6. Análise dos resultados e definição dos teores ótimos

Com base nas tabelas resumo geradas, nas quais é possível constatar os teores permitidos para a aplicação como sub-base e base de pavimento como solo melhorado com cimento, foram definidos os teores ótimos, ou seja, com menor percentual possível de cimento, para melhoramento da mistura padrão, de modo a contribuir para a utilização de resíduo de ardósia e viabilidade técnica e econômica.

Desta forma, embora todos os teores propostos de 2% e 4% sejam possíveis para a aplicação como material de sub-base e base, recomenda-se como teor ótimo a adição de 2%, em peso, de cimento para ambas as aplicações. Porém para a aplicação como base, o material utilizado como solo se enquadrava na faixa C.

6 Conclusão

A pesquisa foi desenvolvida utilizando material residual e argiloso do município de Papagaios, no estado de Minas Gerais; em região onde se encontra a grande maioria das frentes de exploração de ardósia, ampliando as possibilidades de aplicabilidade dos resultados positivos obtidos na pesquisa. O cimento utilizado foi o CPII-E-32 comercial em sacos de 50 quilogramas nas misturas de solo melhorado com cimento.

As misturas padrões de solo argiloso e resíduo de ardósia apresentaram capacidade de suporte (ISC) de 31,5 e 72,5% e expansão de 0,03 e 0,08%, respectivamente para SB 0 e B 0. Além disto, atenderam aos requisitos normativos relacionados aos limites de Atterberg para os solos empregados em misturas de solo melhorados com cimento.

Nas avaliações das misturas de solo melhorado com cimento, notou-se que nas proporções estudadas ocorreu uma melhoria significativa no comportamento geotécnico. Foram obtidos valores de ISC de 47,4% (SB 2) e 79,6% (SB 4) para teores propostos para aplicação como sub-base, e de 103,4% (B 2) e 181,7% (B 4) para base. Nota-se que os valores de ISC aumentam conforme é adicionado cimento na mistura, para uma determinada energia de compactação. Já para expansão, embora não seja possível relacionar o valor da mesma com os percentuais de cimento das misturas, todos os teores atenderam as normas estabelecidas pelo DNIT para aplicações como sub-base e base.

Os valores de expansão para os teores cuja aplicação era para sub-base foram de 0,02% (SB 2) e 0,01% (SB 4), e para base de 0,01% (B 2) e 0,00% (B 4).

Com base nos resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica das misturas, é possível constatar que todos os teores estudados atenderam às normas exigidas para aplicações como sub-base e base. Desta forma, embora todos os teores propostos sejam possíveis para a aplicação, recomenda-se como teor ótimo as misturas SB 2 e B 2, ou seja, com menor utilização possível de cimento. Sendo assim, pode-se concluir que é possível utilizar as misturas de solo argiloso e resíduo de ardósia como solo melhorado com cimento em pavimentação rodoviária, de modo a contribuir para a redução do estoque deste passivo ambiental.

7 Referências

ALTOÉ, S. P. S. *et al.* **Estudo da potencialidade da utilização da mistura de cinza de bagaço de cana de açúcar e resíduos de pneus na confecção de concretos e pavers para pavimentação.** 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116:** agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto, e restauração.** 2015.

BRANDT, W. **Avaliação de cenários em planos de fechamentos de minas.** Recuperação de áreas degradadas. Universidade Federal de Viçosa, 1998.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução 307, de 05 de julho de 2002.** Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, nº 136, 17 de julho de 2002.

CHIODI, C. F; CHIODI, D. K. **Plano de ação para sustentabilidade do setor de rochas ornamentais – ardósia em papagaios.** 2014.

CUNHA, J. P. **Desenvolvimento de um novo material a partir da composição dos resíduos da mineração de varvito e da produção de cal.** Universidade Federal do Paraná, 2007.

DE CARVALHO, G. M. *et al.* **Obtenção de compósitos de resíduos de ardósia e polipropileno.** Polímeros Ciência e Tecnologia, 2007.

DEL CARPIO, J. A. V. **Estudo da influência da adição da cinza de casca de arroz nas propriedades do CCR (Concreto Compactado com Rolo) para seu uso em pavimentos compostos.** 2006.

DEPARTMENT OF THE ENVIROMENT, TRANSPORT AND THE REGIONS (DETR). **Mineral planning guidance note 11 – Controlling and mitigating the environmental effects of mineral extraction in England.** 2000.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS (DER/MG). **Manual de procedimentos para elaboração de estudos e projetos de engenharia rodoviária.** Volume IV – Estudos geológicos e geotécnicos. 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Norma DNIT 140/2010 – ES: Pavimentação – Sub-base de solo melhorado com cimento.** Rio de Janeiro/RJ, 2010a.

_____. **Norma DNIT 142/2010 – ES: Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento.** Rio de Janeiro/RJ, 2010b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral 2004.** Brasília. 2004. Disponível em: <[http://www.dnpm.gov.br/portal/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2004/AGREGA DOS%20PARA%20CONSTRU%C7%C3O%20CIVIL%202004.pdf](http://www.dnpm.gov.br/portal/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2004/AGREGA%20DOS%20PARA%20CONSTRU%C7%C3O%20CIVIL%202004.pdf)>, Acesso em: 2 de novembro de 2015.

DHIR, R. K. *et al.* Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes. **Jornal of Institution of Civil Engineering, Structures and Buildings.** 1999.

DOS SANTOS, C. G. *et al.* **Adição de rejeitos de extração de ardósia em concreto.** 2013.

FARIAS, E. R. D. **A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação.** 2005.

FIORITI, C. F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo.** Universidade de São Paulo, 2007.

FONSECA, G. C. D. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica.** Belo horizonte, 2010.

FREITAS, V. L. O. **Restauração de áreas degradadas pela extração de Ardósia, utilizando seus rejeitos no município de Papagaio,** Minas Gerais. Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos.** 2000.

HANSEN, T. C. **Recycled of demolished concrete and mansory.** Recycled aggregates and recucled aggregates concrete. 1992.

HILL, A. R. *et al.* Utilization of aggregate materials in road construction and bulk fill. **Jornal of Resouces, Conservation & Recycling**. 2001.

HOOD, S. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. 2006.

LEAL, C. L. D.; FERREIRA, P. **Aproveitamento da cinza do bagaço de cana-de açúcar como fíler em concreto asfáltico**. Vértices, 2007.

NASCIMENTO, J. F. **Estudo da Redução da Expansibilidade em Escória de Aciaria para Uso em Pavimentação Rodoviária**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

OTI, J. E. *et al.* **Engineering properties of concrete made with slate waste**. Proceedings of the ICE - Construction Materials, 2010.

PAGNUSSAT, D. T. **Utilização de escória granulada de fundição (EGF) em blocos de concreto para pavimentação**. 2004.

POPP, J. H. **Mineração e proteção ambiental: o único caminho possível**. Simpósio nacional de recuperação de áreas degradadas, Curitiba. 1992.

RETORE, T. S. **Comportamento mecânico de agregados de basaltos alterados para pavimentação**, rejeitos de garimpo de ametista. 2005.

RICCI, G. **Estudo de características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados reciclados de construção e de demolição para pavimentação**. Universidade de São Paulo, 2007.

RODRIGUES, W. C. *et al.* **Estudo sobre a viabilidade técnica e econômica da utilização de resíduo industrial de ardósia em mistura asfáltica do tipo pré misturado a frio**. 2014.

SOUZA, L. D. F.; MANSUR, H. **Caracterização de pó de ardósia proveniente de rejeitos quanto à cristalinidade e comportamento térmico**. 2000.