

Desenvolvimento de pavimento semirrígido adaptado para região amazônica com cimento, zeólito sintético e solo de subleito

Daniel Jardim Almeida^{a*}, Francisco Heber Lacerda de Oliveira^b, Marcos Valerio Mendonça Baia^c, Nilton de Souza Campelo^c

^a PGED, Instituto Militar de Engenharia, RJ, Brasil,

^b DET, Universidade Federal do Ceará, CE, Brasil,

^c PPGE, Universidade Federal do Amazonas, AM, Brasil,

*danieljardimalmeida@ime.eb.br

RESUMO: Situações atípicas da região amazônica, caracterizadas por solos de baixa capacidade de suporte e pela escassez de agregados graúdos, despertam a necessidade do desenvolvimento de soluções específicas para pavimentação. Somado a isso, o regime intenso de chuvas, as inundações sazonais e o isolamento tecnológico limitam o período útil de execução das obras. Deste modo, são propostos procedimentos executivos de pavimento de rápida execução que consiste em camada única de base semirrígida utilizando-se do próprio solo de subleito estabilizado com cimento e aditivo químico a base de zeólito sintético. Os procedimentos são avaliados por intermédio de estudo de caso localizado em estrada militar, vicinal à AM-010. Desenvolveu-se o dimensionamento do pavimento, a execução e avaliação técnica por inspeção visual e ensaios de resistência. Pode-se concluir que o pavimento de base de solo-cimento-aditivo surge com uma alternativa em regiões com escassez de geomaterial, tempo de execução limitado e risco de inundações.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentação. Zeólito Sintético. Solo-Cimento. Amazonas.

ABSTRACT: The Amazon region is characterized by unusual situations such as low support capacity or scarcity of coarse aggregates that motivate the interest to develop specific paving solutions. In addition, the intense rain regime, seasonal floods and technological isolation reduce the period of work for carrying out the works. Thus, work procedures for fast execution pavement are proposed, which consists of a single layer of semi-rigid base using the subgrade soil stabilized with cement and chemical additive based on synthetic zeolite. Procedures are evaluated through a case study located on a military road, adjacent to AM-010. Pavement dimensioning, execution and technical evaluation by visual inspection and resistance tests were developed. It can be concluded that the soil-cement-additive base pavement appears as an alternative in regions with geomaterial scarcity, limited execution time and risk of flooding.

KEYWORDS: Pavement. Synthetic Zeolite. Soil-cement. Amazon

1. INTRODUÇÃO

O Estado do Amazonas apresenta características singulares no que tange a pavimentação. Como o principal modo de transporte é o hidroviário [1], características únicas perfazem essa região em relação ao desenvolvimento rodoviário, onde apenas 15% das rodovias são consideradas ótimas ou boas [2]. A dificuldade em garantir a qualidade e o prazo de execução em locais onde o regime pluviométrico é intenso e em áreas de várzea que estão sujeitas a inundações, com solos de características geralmente plásticas e de baixa capacidade de suporte devido à sua formação geológica, tornam limitadas as chances de sucesso dos projetos tradicionais de pavimentação [3]. Assim, novas

técnicas executivas de pavimentação, que garantam à obra maior resistência, impermeabilidade, vida útil e redução do custo de manutenção, vem ganhando espaço no cenário amazonense.

Observa-se, segundo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte [4], que as características admissíveis de solo, o potencial de impermeabilização e a influência da água não são considerados e limitam sua aplicabilidade em regiões sem possibilidade de troca de solo ou de realização de melhoramento granulométrico.

A técnica de pavimentação de execução de base semirrígida utilizando-se de solo do subleito com cimento e aditivo de compostos químicos a base de zeólitos sintéticos (ZS), como elemento capaz de absorver as cargas solicitadas, vem sendo alvo de estudos internacionais

quando aplicado em regiões de condições extremas [5] [6]. A minimização das etapas de trabalho, a capacidade do aditivo de estabilizar solos argilosos e a conservação da resistência adquirida, mesmo quando submerso durante chuvas críticas, mostra-se como uma técnica promissora a ser aplicada em zonas isoladas como a região amazônica.

Assim, é proposto procedimentos de execução de obra rápida de pavimentação constituída de camada única de base semirrígida de espessura variável utilizando-se de solo do subleito estabilizado com cimento e ZS. É apresentada metodologia adaptada de projeto de pavimentação que busca superar dificuldades enfrentadas no Amazonas. É considerado o mínimo de informações e dados geotécnicos necessários para desenvolvimento de um projeto de qualidade. Por fim, é avaliada a eficiência da técnica e sua adequabilidade por meio de um estudo de caso constituído da construção de uma seção teste de 70 m.

2. Fundamentação teórica

Localizadas em planícies alagáveis denominadas de terras de várzea da Bacia Amazônica [7], grande parte das estradas no Estado do Amazonas, em determinados períodos do ano, permanecem submersas ou sofrem com a precipitação intensa, prejudicando a sua vida útil substancialmente. Alguns autores Ferreira *et al* [8] utilizaram imagens de radar multitemporal PALSAR L-band combinadas com análise de imagem baseada em objetos, técnicas de data mining e dados de campo para derivar padrões de inundação na Amazônia Central. Para um trecho de várzea baixa distribuída em 37,7% da área total analisada, observou-se que seu regime de inundação é de 120–180 dias por ano alagado, ao passo que a várzea alta (18,7%), permanece alagado ao menos que 40 dias por ano.

Geologicamente, o Estado do Amazonas é caracterizado por uma extensa cobertura sedimentar fanerozóica, distribuída nas Bacias Acre, Solimões, Amazonas e Alto Tapajós, depositado sobre um substrato rochoso pré-cambriano onde predominam rochas de natureza ígnea, metamórfica e sedimentar [9]. As argilas do Médio Amazonas [10] são encontradas sob a forma de depósitos aluvionares holocênicos relacionados a um sistema

fluvial representado por canais ou barras de meandros e depósitos de planície de inundação. Por meio do Sistema Rodoviário de Classificação (AASHTO) e do Índice de Suporte Califórnia (ISC), 90% das jazidas analisadas no levantamento da Secretaria de Infraestrutura do Estado do Amazonas [11] apresentaram solos do tipo A-4 a A-7, com valor médio de ISC de 26,11%.

Encontrar jazidas de solo com boa qualidade, sem conflitos ambientais e legalmente habilitadas torna-se um grande desafio na maioria dos municípios. A carência de material pétreo na região da Amazônia Central é tratada por Picanço [12], indicando a ocorrência de afloramento de rochas somente a grandes distâncias dos principais centros urbanos. A fim de solucionar a falta de material disponível na região, opta-se pelo uso de materiais alternativos.

A técnica de pavimento com uma camada única de base semirrígida utilizando-se solo do próprio subleito e cimento apresenta-se relevante ao ponderar as condicionantes regionais. Ao utilizar o próprio material do subleito estabilizado com cimento há uma redução no custo da construção e na exploração de jazidas e bota-foras, conduzindo a benefícios ambientais e desenvolvimento sustentável [13] [14].

Antes, durante e depois da inundação, a qualidade da infraestrutura da estrada é fundamental [5]. O problema refere-se ao fato de que os materiais tradicionais não consolidados possuem maior susceptibilidade à erosão enquanto que os materiais consolidados estão propensos à ruptura quando as camadas inferiores sofrem erosão. Estudos sobre transformação *in situ* de subleito em base com cinzas volantes e cimento para tráfego de construção e operação [16] mostraram benefícios mesmo em subleito de baixa capacidade de suporte, com redução na espessura final do revestimento asfáltico.

As propriedades dos materiais estabilizados com cimento são fortemente determinadas pela natureza da matéria-prima utilizada, que pode ser argila, silte, areia ou pedregulho. O tipo de solo influencia na escolha apropriada do estabilizante e controla as propriedades estruturais do produto final estabilizado. Em grande parte, a variabilidade das propriedades do solo é fortemente atribuída à distribuição granulométrica e ao arranjo das partículas, ao formato dos grãos e a sua

composição mineralógica [17].

Estruturas de solo-cimento estão propensas à retração hidráulica principalmente durante a umidade perdida na hidratação do cimento ou pela variação de temperatura. O acúmulo de trincas, provocado pela retração, pode acelerar os danos ao pavimento, processos erosivos e a redução da resistência e durabilidade da camada de base. Já a adição do aditivo ZC conjuntamente com cimento para transformação de solo *in situ* modifica a dinâmica do processo de hidratação cimentícia em uma escala nanométrica, melhorando os processos de formação da microestrutura cristalina, troca iônica, absorção e imobilização de compostos potencialmente nocivos em solos que, em uma abordagem tradicional, precisariam ser removidos ou descartados a um custo significativo, tornando-os materiais relevantes e adequados para serem usados na construção de estradas [18], conforme mostra a **figura 1**.

Assim, os zeólitos sintéticos aumentam a força, rigidez e flexibilidade dos compósitos de solo-cimento e melhoram o desempenho geral das camadas estabilizadas de pavimento [6] [19] [20]. No Estado do Amazonas, testes foram realizados em solos argilosos, identificando ganho de resistência à compressão simples (RCS) quando se utilizou o aditivo ZS em sua composição [21].

Para aplicação em campo, este aditivo é usado em baixa dosagem (de 1,2 a 2,4 kg/m³) [22]. A dosagem do aditivo pode ser aumentada baseando-se nas condições locais como as características do solo, o tempo para abertura do tráfego e as condições climáticas existentes durante a construção.

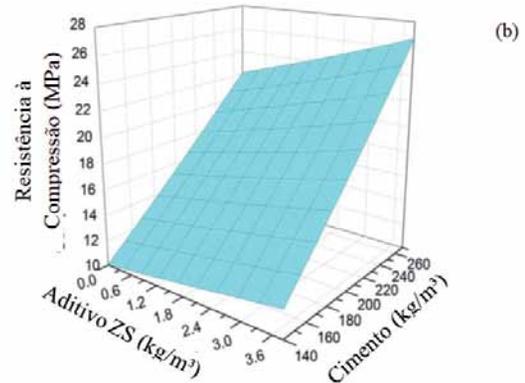
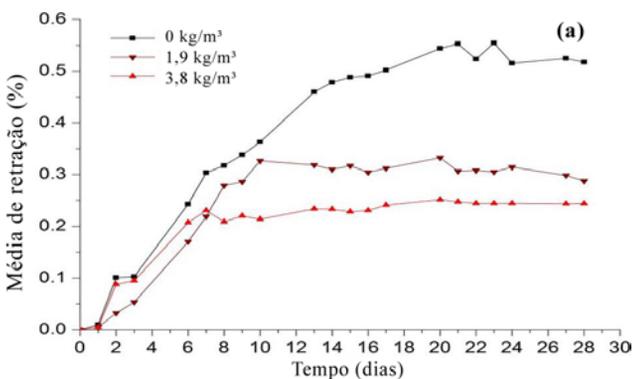


Fig. 1 – Efeito do ZS (a) na redução da retração e (b) no ganho de RCS em função da dosagem (Adaptado de Wu [6]).

3. Proposta de procedimentos executivos

Considerando a execução de pavimento com apenas uma camada semirrígida de espessura variável, utilizando-se do solo estabilizado de subleito a fim de minimizar impactos ambientais e acelerar processos, são propostos procedimentos de projeto divididos em três fases. A primeira fase, denominada de concepção inicial, consiste na apresentação sistemática das atividades antes do início da obra, coletando informações para desenvolvimento do dimensionamento estrutural do pavimento. A segunda fase, denominada de execução de obra, delineou as etapas construtivas que deveriam ser estabelecidas para garantia da qualidade da execução. Por fim, a terceira fase, denominada avaliação e monitoramento pós-obra, apresentou os testes que deveriam ser executados para verificar a qualidade da construção após 28 dias de conclusão. Essas etapas serão mais detalhadas nos subitens a seguir.

3.1 Concepção inicial

Mediante estudo do subleito, cimento e tráfego determina-se o traço dos materiais que serão utilizados no projeto e o desenvolvimento do dimensionamento estrutural.

3.1.1 Caracterização do subleito

É necessário inicialmente identificar as características da camada superior de solo natural, no qual será tratada com cimento e o aditivo ZS e será considerada a camada de base do pavimento, além de determinar a capacidade de suporte na camada inferior (subleito). As propriedades que influenciam as características dos solos, com suas respectivas metodologias, estão definidas na **tabela 1**.

Tab. 1 – Parâmetros de caracterização do subleito.

Parâmetros	Ensaio
Propriedades químicas	Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C [23] Determinação da Composição Química
Distribuição granulométrica	Análise Granulométrica [24] [30]
Consistência	Determinação de limite de liquidez [25] Determinação do limite de plasticidade [26]
Classificação SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos solos
Capacidade de suporte	Ensaio de Compactação na Energia Modificada [27] Ensaio Índice Suporte Califórnia [28] Teste de Placa (Plate test). Deflectômetro de Impacto tipo Falling Weight Deflectometer (FWD) [29]

As propriedades químicas influenciam na composição da mistura enquanto que a quantidade de matéria orgânica determina o traço. A distribuição granulométrica e a consistência do solo auxiliam na sua classificação, obtida pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (*SUCS*). Considerando a dificuldade em elaborar ensaios de módulo de rigidez a **tabela 2** estabelece uma relação entre o Módulo de rigidez com deformações de 50 µm/m e o tipo de solo para dimensionamento [5].

3.1.2 Seleção do tipo de cimento utilizado

O processo de cristalização prolongada muda significativamente ao se usar o ZS. O aditivo pode ser utilizado com qualquer tipo de cimento disponível no mercado. Contudo, a utilização de cimento com altas taxas de cal hidratada em seu conteúdo, na

estabilização de solos argilosos, não é recomendada, visto que, a cal hidratada pode consumir a água ligada quimicamente às partículas de argila, criando retrações e possíveis fissuras.

Tab. 2 – Módulo de rigidez por tipo de solo.

Tipo de solo	Módulo de rigidez
Orgânico	25 MPa
Argiloso	50 MPa
Argilo Arenoso	75 MPa
Arenoso	100 MPa

3.1.3 Determinação da dosagem

Após classificação do tipo de solo do subleito, é realizada a definição do traço, utilizando a **tabela 3** como referência, levando em conta sua classificação *SUCS* [5]. Para cada tipo de solo é definido uma dosagem de ZS e cimento. Essa dosagem é avaliada por meio de ensaios de RCS e ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) ser ensaios simples e acessíveis mesmo em regiões isoladas. Caso os valores esperados sejam atingidos, o módulo de rigidez estimado é definido para fins de dimensionamento de camada.

Tab. 3 – Dosagem de cimento e ZS em função do tipo de solo.

Tipo	Indicativo de quantidade de ZS (kg/m ³) na densidade máxima seca	Indicativo de quantidade de cimento (kg/m ³) na densidade máxima seca	Valor esperado de Resistência compressão Simples 28 dias (MPa)	Módulo de rigidez com 50 µm/m estimado (MPa)
GW	1.0 – 1.4	100 – 140	10-15	10.000
GP	1.2 – 1.6	120 – 160	6-11	6.000
GW-GM	1.2 – 1.6	120 – 160	10-15	10.000
GW-GC	1.4 – 2.0	140 – 200	10-15	10.000
GP-GM	1.4 – 2.0	140 – 200	6-11	6.000
GP-GC	1.4 – 2.0	140 – 200	6-11	6.000
GM	1.5 – 1.8	150 – 180	6-11	6.000
GC	1.6 – 2.0	160 – 200	5-10	5.000
GC-GM	1.6 – 2.0	160 – 200	5-10	5.000
SW	1.2 – 1.6	120 – 160	5-13	8.000
SW-SM	1.2 – 1.6	120 – 160	6-11	6.000
SW-SC	1.4 – 2.0	140 – 200	7-12	7.000
SP	1.2 – 1.8	140 – 200	5-10	5.000
SP-SM	1.2 – 1.6	120 – 160	5-10	5.000
SP-SC	1.4 – 1.8	140 – 180	5-8	5.000

Tipo	Indicativo de quantidade de ZS (kg/m ³) na densidade máxima seca	Indicativo de quantidade de cimento (kg/m ³) na densidade máxima seca	Valor esperado de Resistência compressão Simples 28 dias (MPa)	Módulo de rigidez com 50 µm/m estimado (MPa)
SM	1.4 – 1.8	140 – 180	5-8	5.000
SC	1.6 – 2.0	160 – 200	5-8	4.000
ML	1.6 – 2.0	160 – 200	5-8	5.000
CL	1,7 – 2,0	170 – 200	5-6	3.500
OL	1.5 – 1.9	150 – 190	5-7	3.500
MH	1.6 – 2.0	160 – 200	5-7	3.000
CH	1.8 – 2.2	180 – 220	4-7	3.000
OH	2.0 – 2.4	200 – 240	4-6	3.000
PT	2.2 – 2.8	220 – 280	1-3	1.000

3.1.4 Modelagem e ruptura dos corpos-de-prova

Com quantidades de aditivo ZS e cimento definido para mistura, realiza-se a avaliação da resistência mecânica do traço através da produção de corpos-de-prova (CP). Para moldagem e ruptura dos corpos-de-prova, seguem-se os preceitos de moldagem de corpo-de-prova [31] [32] [33], adaptado em função da utilização do aditivo ZS [34]:

- A quantidade mínima de ZS é de 50g. Em caso de doses inferiores, nem todas substâncias ativas podem estar contidas na mistura gerando resultados não desejados;
- A homogeneização do material deve ocorrer em equipamento homogeneizador ou argamassadeira com capacidade para 50kg;
- O ZS deve ser homogeneizado ao solo antes de adicionar o cimento. Em caso de solos argilosos ou orgânicos, recomenda-se deixar a mistura solo/ZS por 3 horas antes de aplicar o cimento, homogeneizando a mesma ocasionalmente;
- Após determinação da umidade ótima (wótima) pelo ensaio de compactação [27], realiza-se a homogeneização da mistura com solo na umidade wótima +2% a +4%;
- A homogeneização se dá como concluída após confirmar ausência de diferentes colorações da mistura. As amostras devem ser compactadas em no máximo 2 horas após adição de cimento na mistura. Deve-se agitar a mistura a cada 15 minutos. Durante a compactação das amostras,

deve-se manter o resíduo da mistura vedado para conservação da umidade;

- O molde cilíndrico (100mm x 120mm) deve ser bipartido para auxiliar na desmoldagem sem danificar a amostra. A utilização de parafina ou óleo lubrificante nas paredes internas do molde deve ocorrer antes de iniciar a compactação;
- Finalizado a compactação, o desmolde é aconselhado após 24 horas para solos arenosos ou imediatamente para solos argilosos e as amostras serão armazenadas em câmara úmida (maior que 90%) à temperatura 23°C até o momento da ruptura.

Para avaliar o ganho de resistência inicial e sua resistência característica, realiza-se a ruptura dos corpos-de-prova nas idades 3, 7 e 28 dias, sendo que os valores de resistência com 28 dias devem se enquadrar na faixa definida na **tabela 3**. Em caso de divergência com os limites estabelecidos, aumenta-se taxa de cimento e aditivo ZS para valores inferiores e vice-versa.

3.1.5 Estudo de tráfego

O estudo de tráfego tem como objetivo fornecer elementos necessários para avaliação e desenvolvimento do dimensionamento do pavimento. A expectativa de carregamento e a função do pavimento determina o tipo de construção, tipo de material utilizado, espessura da camada e critérios específicos. O parâmetro de projeto [35] que indica o número total de repetições equivalentes do eixo simples de rodas duplas com 80kN, que ocorrerá em todo o horizonte de projeto, é denominado Número N.

3.1.6 Dimensionamento do pavimento

Para a determinação da espessura da camada única de base formada de solo-cimento-aditivo ZS, considerando as características dos materiais e tráfego, a espessura é definida através de *software* capaz de operar métodos de dimensionamento mecanístico-empírico através de análises elástico linear dos materiais, utilizando-se de parâmetros de

rigidez e viscosidade para interpretação das tensões e identificação das deformações nos pontos críticos da construção da pista.

3.2 Execução da obra

A programação de atividades é proposta seguindo as principais condicionantes e prevendo eventualidades típicas encontradas na região. A expectativa de clima na região amazônica é geralmente de alternância entre períodos de calor intenso e chuva, com canteiro de obras muito úmido. Assim, equipamentos com boa tração são fundamentais. Em relação aos elementos de drenagem, a condução de águas superficiais e o controle de processos erosivos devem ser mantidos sem alteração.

De modo geral, a obra se dá pela adição e mistura do aditivo ZS e cimento, seguido pelo nivelamento, compactação e acabamento da superfície. Neste processo, a adição do aditivo ZS pode ocorrer um dia antes da aplicação do cimento, por meio das seguintes etapas:

Etapa 1 - Abertura de camada de solo in situ: após fechamento da pista, realiza-se a remoção de matéria orgânica remanescente e impurezas da pista. O trecho para receber a mistura de solo-cimento deve estar preparado para a drenagem, nivelamento e seção transversal fixados no projeto. Realiza-se a abertura da camada de solo in situ com auxílio da recicladora. Em seguida, prepara-se a camada para aplicação do aditivo através do nivelamento com motoniveladora e a correção superficial com rolo compactador liso.

Etapa 2 - Distribuição do ZS: para realizar o espalhamento aditivo ZS na pista segundo as taxas definidas em projeto, utiliza-se um distribuidor de agregados ou delimitam-se marcas na pista para alocação manualmente de cada saco com o aditivo (figura 2a). Na sequência, a recicladora mistura o solo e o ZS à 2/3 da espessura da camada final de projeto (figura 2b). Após a completa incorporação do aditivo, a pista é levemente compactada para prevenir infiltração de água em caso de chuva.

Etapa 3 - Adição de cimento e água à mistura: realiza-se a distribuição uniforme do cimento na superfície manualmente ou com auxílio de máquina distribuidora de agregados na dosagem de projeto. Inicia-se a

homogeneização do solo-cimento-aditivo ZS na espessura final de projeto até que seja observado tonalidade uniforme em toda a camada e a correção da umidade progressivamente com auxílio do caminhão pipa.

Etapa 4 - Nivelamento, compactação e acabamento superficial: tendo concluído a homogeneização da mistura, realiza-se a regularização da pista para dar início à compactação utilizando rolo compactador adequado para espessura de projeto (figura 3a). O tempo entre o contato do cimento com solo e a compactação final deve ocorrer em até 3 horas. Após este intervalo, a compactação pode quebrar ligações iniciais realizadas entre o solo e o cimento, reduzindo a resistência da camada. Posteriormente, realiza-se a conformação do trecho ao greide e o abaulamento desejados (figura 3b), para depois, realizar polimento com rolo compactador liso e acabamento final com rolo pneumático leve (figura 3c).



Fig. 2 – Distribuição do ZS por (a) espalhamento manual do e (b) homogeneização com solo in situ através da recicladora.



Fig. 3 – Etapas de (a) compactação, (b) abaulamento, (c) acabamento final e (d) cura do solo.

Etapa 5 – Cura: Finaliza-se a atividade com lançamento abundante de água na superfície acabada por meio de caminhão pipa com pneus levemente vazios (50% da sua capacidade total). A base estabilizada permanece sem tráfego até o sétimo dia, aplicando-se sobre ela uma camada de areia, capim ou outro material para a perda rápida de umidade. Realiza-se também a molhagem da base de duas a três vezes por dia durante este período (**figura 3d**). Em casos de abertura da via antes da data prevista, verifica-se resistência à compressão para amostras com três dias de idade.

3.2.1 Controle tecnológico

Para garantia da qualidade da execução, devem-se seguir todas as recomendações e testes necessários durante a obra de solo-cimento [36]. Durante a execução da obra, utiliza-se a mistura da pista, realizada pela recicladora antes da compactação, para moldagem de CP e verificação da sua resistência mecânica futura. Os ensaios de resistência dos CP moldados na obra servem para verificar a qualidade da mistura e preceder resultados rápidos com 3 e 7 dias. Seus resultados devem atingir valores semelhantes aos ensaios realizados com a mistura em laboratório.

3.3 Avaliação e monitoramento

Para avaliação e monitoramento da qualidade da estrutura executada, geralmente, realiza-se inspeção de campo, ensaio de compressão simples para amostras extraídas da pista após 28 dias de conclusão de obra, conforme sugerido na **tabela 4**.

Tab. 4 – Ensaios pós-obra.

Ensaio	Método	Frequência
Inspeção Visual	Verificação de danos e deformações na pista e espessura da camada nos locais onde é extraído amostra de campo.	Todo trecho
Resistência à compressão	Extrai-se CP da pista e analisa sua resistência mecânica através de ensaio de compressão simples	A cada 5 estacas e em pontos críticos

A inspeção visual tem por objetivo identificar a intensidade do processo de retração hidráulica e propagação de trincas, e propor medidas mitigatórias. Os ensaios de resistência dos CP extraídos com 28 dias servem para verificar a qualidade da cura e o seu

comportamento estrutural. Durante a extração da amostra avalia-se a espessura da camada novamente. O CP deve possuir diâmetro mínimo de 150 mm e serem nivelados e capeados para realização de ensaio de compressão simples. Os valores de resistência do CP extraído podem atingir patamar entre 30% e 70% da resistência requerida de projeto [37] [38] [39].

4. Estudo de caso – Ramal militar da AM-010

Para avaliar a eficiência e a velocidade de execução dos procedimentos propostos no Capítulo 3, foi realizado um estudo de caso. Uma seção teste foi construída de camada única de base estabilizada de solo cimento e aditivo ZS em um ramal militar não pavimentado, coadjuvando na identificação das principais características e considerações para futuras aplicações em condições similares. Procedeu-se com inspeção visual, ensaios de RCS antes, durante e após a construção; e ensaios de RTCD para amostras moldadas em laboratório, buscando identificar a qualidade geral da estrutura, dos elementos de drenagem, afundamentos, trincas e fissuras.

4.1 Localização

Foi selecionado um trecho de 70 m de comprimento com 7,5 m de largura de uma estrada militar vicinal não pavimentada da AM-010, KM 53, ao norte de Manaus/AM (**figura 4**) para aplicação dos procedimentos executivos de pavimento de base de cimento e zeólito sintético utilizando o próprio solo de subleito. Elaborou-se dimensionamento estrutural, avaliação do desempenho mecânico *in loco* e levantamento de produção e custo.



Fig. 4 - Localização do trecho experimental.

4.2 Aditivo ZS

O aditivo a base de zeólito sintético utilizado possui nome comercial Roadcem®. É um fino pó de cor acinzentada inodoro, com massa específica de aproximadamente 1.100kg/m³ e pH situado entre 10-12 (em água, a 20 °C) [6]. Sua composição química é composta principalmente por:

- Metais alcalinos e metais alcalino-terrosos (60-80%, em massa), incluindo cloreto de sódio, cloreto de potássio, cloreto de cálcio e cloreto de magnésio;
- Zeólitos sintéticos e óxidos (5-10%, em massa);
- Ativadores (5-10%, em massa).

4.3 Solo

As características geotécnicas do solo estão discriminadas na **tabela 5**. Subleito é caracterizando como solo argilo-arenoso.

Tab. 5 – Propriedades geotécnicas do solo.

Propriedades Geotécnicas	Resultados
Teor orgânico [23] (%)	0,62
Teor de argila [24] (%)	44,11
Teor de silte [24] (%)	6,66
Teor de areia [24] (%)	46,92
LL [25]	34,40
IP [26]	13,74
Classificação do solo (USCS)	SC
Umidade ótima – Energia Modificada [27] (%)	12,4
Densidade máxima seca – Energia Modificada [27] (kg/m ³)	1.954
Índice de Suporte Califórnia [28] (%)	31,13
Expansão [28] (%)	0,03
Massa específica dos grãos [30] (kg/m ³)	2.630
pH H ₂ O milli-q [40]	5,39
Módulo de Rigidez (Tabela 2) (MPa)	75

4.4 Cimento

O cimento utilizado apresentou uma composição de 52% de óxido de cálcio e 26,7% de dióxido de silício, caracterizado pelo maior tempo de cura inicial e uma taxa de desenvolvimento de resistência mais lenta que cimentos Portland tradicionais [41]. O tempo de cura inicial mais longo contribui para garantir tempo suficiente para realização da mistura e compactação das amostras em laboratório.

Para definição das principais propriedades físicas e químicas do cimento realizaram-se diversos ensaios de caracterização e os resultados estão reunidos na **tabela 6**.

Tab. 6 – Caracterização do cimento.

Propriedades de Engenharia		Principais componentes químicos (%)	
Massa específica (g/cm ³)	3,02	CaO	60,69
Finura método de Blaine (m ² /kg)	4951	Al ₂ O ₃	2,82
Área específica (cm ² /g)	4530	SiO ₂	26,91
Passante na peneira #200 (%)	0,19	CaO Livre	1,73
Resistência compressão 3 dias (MPa)	23,9	MgO	1,15
Resistência à compressão - 7 dias (MPa)	32,5	Fe ₂ O ₃	1,30
Resistência à compressão - 28 dias (MPa)	42,7	SO ₃	2,37
Início de pega (min)	133	Resíduos insolúveis	1,20
Fim de pega (min)	226		
Índice de consistência normal (%)	30,64		
Perda ao fogo (%)	1,90		

4.5 Dimensionamento do estudo de caso

O solo caracterizado define o subleito do trecho experimental. Utilizando-se da **tabela 3**, definiu-se o traço da camada de base para solo de classificação SC em 1,7 kg/m³ de ZS (0,09% em relação ao solo seco) e 160 kg/m³ de cimento (8,20%). Os resultados de RCS dos CP moldados em laboratório antes da obra nesta dosagem encontraram valores em torno a 8 MPa para 28 dias, atendendo a condição mínima estabelecida, e foi definido a resistência característica para o solo-cimento-aditivo com módulo de rigidez com deformações de 50 µm/m de 4500 MPa, em função dos bons resultados de RCS.

A expectativa de crescimento do tráfego é baixa devido a função da estrada ser uma vicinal para utilização do Exército Brasileiro, sendo previsto caminhões e veículos blindados (450kN). Quanto ao tráfego definiu-se:

- Tráfego tipo normativo: veículos blindados

(carga por roda de 75 kN);

- b) Carregamento de eixo padrão de 150 kN;
- c) Pressão nos pneus normativos de veículos de 557kPa;
- d) Máximo carregamento na construção: 75 kN carga por roda;
- e) Vida útil estimada da construção: 5 anos;

A **tabela 7** apresenta os critérios definidos e o cálculo de espessura das camadas através do emprego do *software* BISAR 3.0, da empresa Royal Dutch Shell. Por conseguinte, ficou estabelecido que, para a dosagem e tráfego estabelecidos, a espessura da camada estabilizada deveria possuir 35 cm (4500 MPa).

Tab. 7 – Critérios para desenvolvimento de projeto.

Tráfego	Número de Repetições do Eixo-padrão (N)	2,5 x 104
Camada 2 Base	Material	Solo-Cimento-ZS
	Módulo de rigidez	4500 MPa
	Espessura	35 cm
Camada 1 Subleito	Material	Solo (SC)
	Módulo de rigidez	75 MPa
Propriedades do Solo-cimento-ZS	Número mínimo de repetições de carga para causar falha (Ni)	4,6.106
	Deformação Horizontal limite	150 mm/m
Cálculos software Bisar	Cálculo de deformação Horizontal devido ao carregamento axial Padrão	111 mm/m
	Checkagem de Fadiga (N/Ni < 1)	0,01

4.6 Avaliação em campo

A execução da obra seguiu conforme procedimentos executivos descritos no item 3.6, sendo que no primeiro dia foi preparado o local e incorporado apenas o aditivo ao solo. No segundo dia, incluiu-se o cimento e água na umidade ótima e realizaram-se os

restantes das etapas (**figura 5**). O trecho experimental recebeu identificação com placa e coloração preta na pista.



Fig. 5 - Aspecto final da seção teste com 1 dia de conclusão em 10/16 (a) e após 490 dias em 02/18 (b).

Para verificação da resistência mecânica da obra, realizou-se a moldagem de CP em três etapas. Em laboratório, antes de iniciar obra, são preparados CP com a dosagem estabelecida. A preparação de CP seguiu a metodologia descrita no capítulo 3, sendo avaliado a RCS e RTCD nas idades de ruptura de 3, 7, 14 e 28 dias em cura úmida.

Durante a execução da obra, realizou-se nova moldagem de CPs, coletando mistura homogeneizada de solo-cimento-RC, imediatamente antes de iniciar o procedimento de compactação em campo. Esses CPs podem indicar a qualidade da mistura realizada na obra. Para estas amostras, ensaio de RCS foi realizado, nas idades de ruptura de 3, 7, 14 e 28 dias.

Para uma terceira comparação, com 28 dias de conclusão de obra, realizou-se extração de seis amostras diretamente da pista (**figura 6**). A extratora utilizada possui diâmetro de 200mm e as amostras coletadas possuíam altura de 20cm ± 1cm. A utilização de água durante a extração se faz necessária para minimizar os efeitos da vibração que podem danificar o CP. Para regularização da face das amostras, utilizou-se de lixadeira orbital, removendo sobras grosseiras e capeamento com enxofre. Após a extração, as amostras foram levadas imediatamente para laboratório e verificado sua RCS.



Fig. 6 – Extração de CPs da pista (a) e aspecto final (b).

Na seção teste foram realizadas todas as avaliações e testes estabelecidos. O controle de umidade foi realizado através de teste *Speedy*, o grau de compactação avaliado pelo método de determinação da densidade in situ com frasco de areia e a espessura da camada solta foi garantido pela própria régua embutida da recicladora no ato da abertura das camadas.

Mediante inspeção visual da obra durante as primeiras 48 horas de cura, observou-se surgimento de algumas trincas transversais, superficiais e isoladas com profundidades média de 1 mm, mostrada na figura 7.



Fig. 7 – Regeneração de trincas 1mm (a) 24 horas e (b) 48 horas após a compactação.

Neste período ocorre expansão volumétrica que geram tensões internas de tração no material ainda em estado fresco. A microestrutura em formação, sofre com crescimento secundário da fase impura da etringita. E, como consequência da continuidade da hidratação do C_3S , o silicato de cálcio hidratado começa a se formar no interior da carapaça hidratada [42].

Este efeito fica mais intenso em argilas plásticas com teores elevados de cimento expostas a alta umidade que a floresta exerce durante a noite e ao

calor intenso durante o dia. No entanto, o ganho de resistência contínuo do material interrompeu a propagação das trincas nos dias subsequentes, sendo incorporadas naturalmente por solos finos dando um aspecto de regeneração natural da base. Os resultados de resistência à compressão das amostras moldadas em laboratório, das moldadas com mistura de campo e das extraídas da pista podem ser observadas na figura 8. Todos os testes foram realizados com mesmo solo e taxa de aditivo ZS e cimento, contudo valores de resistência alteraram significativamente.

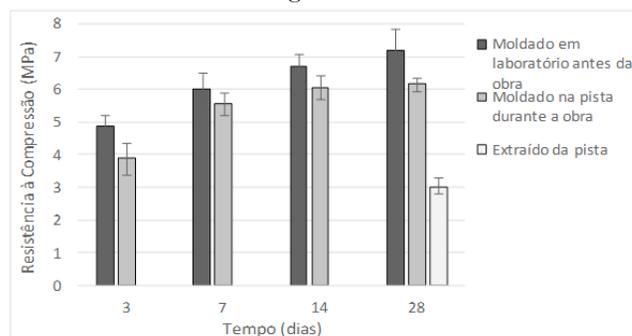


Fig. 8 – Comparativo de RCS para amostras moldadas em laboratório, durante a obra e extraídas diretamente da pista.

Dos CPs moldados com a mistura da pista durante a obra, observou-se resultados de resistência à compressão próximos a valores dos moldados em laboratório. A qualidade da mistura feita pela recicladora e o tempo entre a homogeneização e a compactação são os principais fatores que ilustram a diferença entre a resistência das amostras moldadas em laboratório e moldadas com mistura em campo que foram em torno de 15%.

Já amostras extraídas diretamente da pista resultaram em resistência 41% inferior quando comparada às amostras moldadas em laboratório. A alteração é causada principalmente pelas técnicas de construção, a qualidade da mistura e da compactação pelos equipamentos em campo que possuem dificuldades inerentes inevitáveis, enquanto em laboratório busca-se sempre condições ideais. Durante o processo de extração de amostra, a água utilizada na lâmina durante a operação e a vibração excessiva podem danificar a matriz estrutural do CP reduzindo

a resistência real.

Em relação às tensões de tração que as regiões inferiores do pavimento recebem devido às cargas verticais impostas pelo tráfego, avaliou-se a RTCD do material em CP de 7, 14 e 28 dias. Os resultados indicados na **figura 9** apresentaram valores superior a 1 MPa com 7 dias.

5. Considerações finais

A técnica de estabilização utilizando do próprio solo de subleito com cimento e aditivo produz um pavimento mais resistente às condições encontradas em regiões amazônicas, passíveis de chuvas intensas e inundações, com mitigação da utilização de insumos predatórios e minimiza as dificuldades logísticas. Os procedimentos de obra propostos descreveram de maneira ampla as etapas a fim de obter sucesso na execução de estabilização de solos com cimento e aditivo a base de zeólitos sintéticos.

O trecho experimental apresentou bom aspecto visual após a construção. A ausência de trincas superficiais controla a infiltração por percolação interna ou drenagem superficial gerando uma solução definitiva para obras em locais com solos expansíveis e plásticos com nível d'água elevado.

Referências Bibliográficas

- [1] Carvalho, D.; Santos, J. T. A. N. Pesquisa SINDARMA : Transporte Hidroviário Interior de Passageiros e Cargas. Manaus: 2015.
- [2] Confederação Nacional do Transporte. CNT; SST; SNAT. Pesquisa CNT de Rodovias 2017: Relatório Gerencial, 2017.
- [3] Villibor, D. F. & Nogami, J. S. Pavimentos econômicos - Tecnologia do uso dos solos finos lateríticos, Arte & Ciência. 292 p., São Paulo. 2009.
- [4] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. DNIT 143/2010: Pavimentação – Base de solo-cimento - Especificação de Serviço, 2010.
- [5] Gersonuis, B.; Egyed, C.. Macro-economic Effects of Using the PowerCem Technology on Road Infrastructure in flood risk Areas, UNESCO-IHE, Report. 2012.
- [6] Wu, P. 'Cement stabilized materials with use of roadcem additive', Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2015.
- [7] Prance, G. T.. Notes On The Vegetation Of Amazonia III. The Terminology Of Amazonian Forest Types Subject To Inundation. v. 31, n. 1, p. 26–38, 1979.
- [8] Ferreira-Ferreira, J. S. et al. Combining ALOS/PALSAR derived vegetation structure and inundation patterns to characterize major vegetation types in the Mamiraua Sustainable Development Reserve, Central Amazon

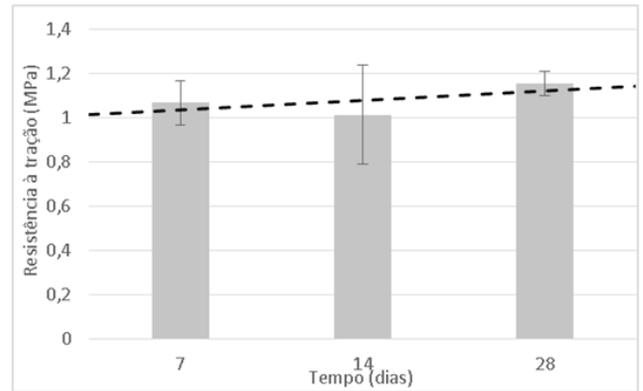


Fig. 9 – Tensão de ruptura do ensaio de RTCD para amostras moldadas em laboratório.

A ligação cimentícia modificada com aditivo ZS apresentou-se satisfatoriamente nos testes mecânicos aplicados, com resultados adequados de resistência a compressão para corpo de provas moldados em laboratório. Os CPs extraídos em campo e o ensaio de tração por compressão diametral apresentaram valores dentro da faixa de resultado da literatura revisada, contudo não há normas nacionais que definam valores mínimo de resistência.

Agradecimentos

Agradecimentos à CAPES, à empresa POWERCEM TECHNOLOGIES e ao Exército Brasileiro.

- floodplain, Brazil. *Wetlands Ecology and Management*, v. 23, n. 1, p. 41–59, 2014.
- [9] Reis, N. J. et al. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas*. Manaus, 2006.
- [10] Riker S.R.L., Reis N.J., D'antona R.J.G., Brito I.A. Projeto materiais de construção no domínio médio Amazona. : Informe de Recursos Minerais, Série Rochas e Minerais Industriais. Manaus, Serviço Geológico do Brasil-CPRM, 168 p. 2008.
- [11] Secretaria de Infraestrutura do Estado do Amazonas. *Catálogo de Jazidas no Estado do Amazonas*, 2014.
- [12] Picanço, H. et al. Refletividade, Radiação Solar e temperatura em diferentes tipos de revestimentos das vias urbanas no município de Manaus (Am). In: CONINFRA 2011 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. 5a ed., São Paulo, 2011.
- [13] Vorobieff, G. Performance and Design of Insitu Stabilised Local Government Roads. *Technology Transfer Seminar*, 1998.
- [14] Michener, J. E. Effects of Environmental Factors on Construction of Soil-Cement Pavement Layers. Brigham Young University, 2008.
- [15] Guthrie, W. & Michener, John & Wilson, Bryan & Eggett, Dennis. Effects of Environmental Factors on Construction of Soil-Cement Pavement Layers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2009.
- [16] Koliass, S.; Kasselouri-Rigopoulou, V.; KARAHALIOS, A. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. *Cement and Concrete Composites*, v. 27, n. 2, p. 301–313, 2005.
- [17] Molenaar, A. Cohesive and non-cohesive soils and unbound granular materials for bases and sub-bases in roads, *Lecture Notes*, Delft University of Technology. 2010.
- [18] Nogueira, L. D. Crisóstomo, P. Silva, M E Frota, C. Avaliação do Comportamento Geotécnico de solos provenientes de Áreas de floresta no Amazonas Misturados Com Cimento Portland E Roadcem®. Foz Do Iguaçu, Pr44a Rapv – Reunião Anual De Pavimentação, 2015.
- [19] Marjanovic, P. et al. *The Road to the Future - Manual for working with RoadCem*, 2009.
- [20] Mutepfa, W. A. T. Laboratory Evaluation of the Effect of Cement Concentration, Water Salinity and the Roadcem Additive on Kalahari Soil Strength. *Dissertação de Mestrado*. University of Botswana, África do Sul, 2010.
- [21] Nogueira, L. D. et al. Avaliação do comportamento geotécnico de solos provenientes de áreas de floresta no Amazonas misturados com cimento Portland e Roadcem®. Foz Do Iguaçu, Pr44a Rapv – Reunião Anual De Pavimentação, 2015.
- [22] Vu, Thao & Ngo, Huong & Nguyen, Quoc & Ngo, Anh & Lanh, Ho. Study on Cement-Treated Soil with RoadCem Additive in Construction of Rural Roads: A Case Study in Viet Nam. 2019.
- [23] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13600: Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C. Rio de Janeiro, 1996.
- [24] _____. NBR 7181: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro. 2016a
- [25] _____. NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro. 2016b
- [26] _____. NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro. 2016c.
- [27] _____. NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro. 2016d.
- [28] _____. NBR 9895: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro. 2016e.
- [29] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER-PRO 273: Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”. 1996.
- [30] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro. 2016f
- [31] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER. DNER-ME 202-94: Solo - cimento - moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos, 1994a.
- [32] _____. DNER-ME 201/94: Solo - cimento - compressão axial de corpos de prova cilíndricos, 1994b.
- [33] Associação Brasileira de Normas Técnicas Argamassas e concretos – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: NBR 7222. Rio de Janeiro, 1993, 3p.
- [34] Powercem. *Manual for laboratory research RoadCemTM*. p. 1–39, 2015.
- [35] Balbo, J. T. *Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- [36] Departamento de Infraestrutura de Transporte. DNIT 143/2010: Pavimentação – Base de solo-cimento - Espe-

cificação de Serviço, 2010.

- [37] Gaspard, K. J. In-place Cement Stabilized Base Reconstruction Techniques Interim Report: "Construction and Two Year Evaluation", 2002.
- [38] Wu, P.; Houben, L. J. M.; Egyed, C. Study of The Variables in Laboratory Testing of Cement Stabilized. International Journal of Pavements Conference, 2013.
- [39] Vorobieff, G. Performance and Design of Insitu Stabilised Local Government Roads. Technology Transfer Seminar, 1998.
- [40] Centro Nacional de Pesquisa de Solos. EMBRAPA. Manual de métodos de análise do solo. Brasília. 212p.1997.
- [41] Tobergte, D. R.; CURTIS, S. TRH13: Cementitious stabilizers in road construction. Journal of Chemical Information and Modeling, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 1986.
- [42] Scrivener, K. L. The Microstructure of Concrete. em SKALNY, J. P. Materials Science of Concrete I. Westerville: American Ceramic Society, 1989. 473p.