

2

Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica desta dissertação abrange os seguintes tópicos:

- Conceitos fundamentais sobre estabilização de solos e características principais dos tipos de estabilização mais utilizados na construção de pavimentos rodoviários, ressaltando a estabilização química de solos;
- O estudo do solo-cinza, as características das cinzas e uma resenha das principais pesquisas com cinzas em base de pavimentos realizadas até o momento;
- Breve descrição sobre utilização de diversos resíduos em camadas de base de pavimentos;
- Dimensionamento de pavimentos com o enfoque mecanístico, através do módulo de resiliência e do programa SisPAV.

2.1.

Estabilização de solos

O solo pode ser considerado como o material de construção civil mais comum e de maior abundância na crosta terrestre. Do ponto de vista da terraplenagem e pavimentação, faz parte do subleito, sub-base, por vezes da base e até do revestimento primário. Quando as características dos solos locais não apresentam, total ou parcialmente, os requisitos exigidos, o engenheiro terá que adotar uma das seguintes atitudes (MEDINA, 1987):

- Evitar ou contornar o terreno ruim;
- Remover o solo ruim e substituí-lo por outro de qualidade superior;
- Projetar a obra para situação de terreno ruim de fundação (conviver com a situação difícil);
- Estabilizar o solo existente.

VOGT (1971) define a estabilização como todo método que visa aumentar, de maneira durável, durante todas as estações do ano, a resistência de um material aos esforços desenvolvidos pelo tráfego e aos efeitos destruidores exercidos pelas intempéries.

A estabilização de um solo pode ser definida como sendo a alteração de qualquer uma de suas propriedades, de forma a melhorar seu comportamento sob o ponto de vista da engenharia. Consiste em um tratamento artificial, por um

processo físico, químico ou físico-químico, tornando o solo estável para os limites de sua utilização, e ainda fazendo com que a estabilização permaneça sob a ação de cargas exteriores e também sob ações climáticas variáveis.

As propriedades de engenharia que se visa modificar na estabilização de um solo, segundo MEDINA e MOTTA (2004), são:

- Resistência ao cisalhamento, tornando-a menos sensível às mudanças ambientais, principalmente à umidade, além de torná-la compatível com as cargas que a estrutura vai absorver;
- Permeabilidade, aumentando-a ou diminuindo-a;
- Compressibilidade, reduzindo-a.

Podem-se destacar três métodos de estabilização de solos: mecânico, físico e químico, podendo ser adaptados e combinados para a solução de um problema.

Com relação ao solo, as seguintes propriedades devem ser consideradas, de modo a escolher o melhor método de estabilização (KÉZDI, 1979):

- Propriedades do solo na condição natural;
- Propriedades esperadas do solo estabilizado;
- Efeitos no solo estabilizado após a estabilização.

Devido à grande variabilidade de solos, nenhum método se aplica genericamente a todos os solos, cada método pode ser aplicado (ou não) para um determinado tipo de solo. Não obstante, a estabilização não só deveria ser pensada em termos de tratamento corretivo, mas também como uma medida preventiva ou de segurança contra condições adversas que se desenvolvem no curso da construção ou ao longo da vida da estrutura (INGLES e METCALF, 1973).

2.1.1.

Estabilização Mecânica

SOLIZ (2007) relata que “Considera-se a estabilização mecânica uma simples compactação dos solos até a estabilização granulométrica dos mesmos.

A estabilização mecânica por compactação refere-se ao processo de tratamento de um solo com a finalidade de minimizar sua porosidade pela aplicação de sucessivas cargas, pressupondo que a redução de volume de vazios é relacionada ao ganho de resistência mecânica. (SANTOS et al, 1995).

Esta densificação é utilizada em todas as camadas do pavimento, sejam estas estabilizadas por outro processo ou não, e é realizada por meio de equipamento mecânico, geralmente um rolo compactador, embora, em alguns casos, como em pequenas valetas, até soquetes manuais possam ser empregados (PINTO E PREUSSLER, 2002).

Por outro lado, a estabilização mecânica por correção granulométrica engloba as melhorias induzidas em um solo pela mistura deste com outro ou outros solos que possibilitem a obtenção de um novo produto com propriedades adequadas para determinados fins de engenharia (SANTOS et al., 1995).

Na estabilização granulométrica procura-se obter um material bem graduado e de percentagem limitado de partículas finas, com a mistura íntima homogeneizada de dois ou mais solos e sua posterior compactação.

2.1.2.

Estabilização física

SOLIZ relata que “A estabilização física mais comumente empregada em pavimentação é a descrita no item anterior, como parte da estabilização mecânica, que consiste na modificação das propriedades do solo atuando na textura, ou seja, misturando solos com diferentes frações granulométricas. Outras técnicas envolvem tratamentos térmicos de secagem ou congelamento, tratamento elétrico e eletro-osmose, que melhoram as características estruturais e de drenagem dos solos (OLIVEIRA apud MACÊDO, 2004).

O tratamento térmico de secagem é citado por INGLES e METCALF (1973) em estradas de terra na Índia; onde se precedeu à queima do solo no local.

Atualmente o emprego da calcinação de argila para gerar agregados para uso em locais onde não se tem agregados naturais, como na Amazônia, por exemplo, pode ser considerada uma forma de estabilização física, onde o uso de calor intenso por queima controlada também provoca intensa alteração nos minerais argílicos presentes no solo (NASCIMENTO, 2005; CABRAL, 2005).

Cabe mencionar que as argilas plintíficas quando escavadas em blocos e secas ao ar constituem blocos que podem ser usados em construção civil, o que foi observado na Índia por BUCHANNAN no século 19, que o fez criar o termo “laterita” – de later – tijolo em latim.

CRISTELO (2001) comenta o tratamento por aquecimento, que consiste em introduzir no solo, a través dum tubo perfurado, uma mistura comprimida de ar muito quente e combustível. O aquecimento pode ser obtido por queima de combustíveis ou por processos elétricos. Outro processo térmico, por resfriamento provoca a estabilização por congelamento artificial da água intersticial originando um material rígido com elevada resistência. Nenhum destes processos no entanto tem tido aplicação na pavimentação.

O processo de eletro-osmose foi estudado por CASTELLO BRANCO (1978), e consiste em colocar dois eletrodos numa massa de solo e fazer passar uma corrente elétrica entre eles, isto promove a migração da água presente no solo do eletrodo positivo para o negativo diminuindo assim a quantidade de água no solo e permitindo a sua consolidação. Também não tem sido aplicado em pavimentação, mas hoje mostra-se como uma alternativa viável para processo de remediação de solo contaminado.”

2.1.3.

Estabilização Química

SOLIZ (2007) relata que “A estabilização química consiste na adição de uma determinada substância química ao solo, de modo a provocar mudanças que influenciam as propriedades de resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade deste, atingindo-se, então o objetivo de estabilizá-lo (SANTOS et al, 1995).

Na estabilização química, como o nome indica, há uma reação química do aditivo com os minerais do solo (fração coloidal) ou com a constituição de recheio dos poros pelo produto de reação química do aditivo com a água. No solo-cimento e solo-cal existe, inicialmente, uma reação que se caracteriza melhor como físico-química: os cátions Ca^{++} liberados pela hidratação do cimento reagem com a superfície dos argilo-minerais e modificam o pH da solução eletrolítica. Os produtos cimentantes que se formam posteriormente (diz-se reação pozolânica) acrescem a rigidez da mistura (MEDINA,1987).

Segundo o mesmo autor, quando se forma a mistura solo-estabilizador pode ocorrer que o estabilizador forme ou não uma matriz contínua com o solo. Na matriz contínua o agente estabilizador preenche todos os poros e as partículas de solo ficam nela mergulhadas como se fossem um inerte de enchimento. Neste caso as propriedades do sistema são essencialmente as da matriz e as propriedades mecânicas do estabilizador predominam. Tem-se várias reações resultantes da mistura solo-estabilizador: reações físicas - variação de temperatura, hidratação, evaporação e adsorção e reações químicas - troca catiônica, precipitação, polimerização, oxidação, solução e carbonatação.

Na matriz descontínua o estabilizador não preenche todos os poros e então podem ocorrer três modos de ação:

- Modificação das características das superfícies das partículas;
- Vedação inerte dos poros;
- Interconexão entre as partículas de solo (solda por pontos).

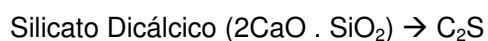
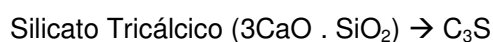
Algumas características sobre os tipos de estabilização química são descritas nos sub-itens a seguir:

2.1.3.1.

Solo-Cimento

SANDRONI E CONSOLI (2010) relatam que diversos tipos de cimentos podem ser utilizados para estabilizar praticamente todos os tipos de solos, com algumas dificuldades particulares para argilas altamente plásticas e orgânicas (contendo mais que 1-2% de matéria orgânica), os quais normalmente exigem altas porcentagens de cimento para a obtenção de significativas mudanças nas propriedades mecânicas das mesmas.

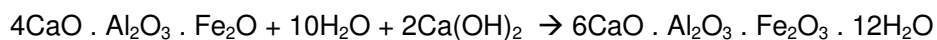
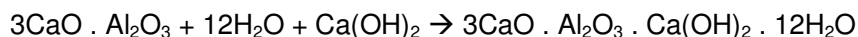
Cimentos Portland são cimentos hidráulicos (ganham resistência através de reações para com a água – hidratação). Os quatro componentes principais do cimento Portland são:



Aluminato Tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) $\rightarrow$ C_3A

Aluminoferrito Tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}$) $\rightarrow$ C_4AF

As reações primárias que ocorrem quando a água é adicionada ao cimento Portland podem ser sumarizadas a seguir:



C_3S enrijece rapidamente e é o responsável primário pela resistência inicial. C_2S enrijece lentamente e contribui para aumento de resistência para idades além de 1 semana. C_3A libera grande quantidade de calor durante os primeiros dias de enrijecimento e contribui pouco para o desenvolvimento da resistência inicial. Em solos finos, a fase argila também pode contribuir para a estabilização através de sua solução em um meio com pH alto e reações com a cal livre do cimento para formar CSH adicional (reações pozolânicas).

De forma geral, a quantidade de cimento necessária para estabilizar um solo aumenta com o aumento da fração de solos finos, com exceção de areias uniformes que requisitam mais cimento que solos arenosos contendo algum tipo de silte e argila.

Pode-se dividir a estabilização por cimento nas seguintes categorias (MEDINA, 1987):

- Solo-cimento: é um material endurecido pela cura de uma mistura íntima compactada mecanicamente com solo pulverizado, cimento portland e água, sendo esse endurecimento avaliado por critérios de durabilidade e resistência à compressão simples de corpos de prova. Normalmente é utilizado como base ou sub-base;

- Solo modificado ou melhorado: é um material não endurecido ou semi-endurecido que é julgado pela alteração dos índices físicos e/ou capacidade de suporte do solo. Utiliza-se um teor baixo de cimento que não deve ser maior que 5%. Pode ser utilizado como base, sub-base ou subleito;
- Solo-cimento plástico: difere do solo cimento definido anteriormente, por ser utilizada uma quantidade maior de água durante a mistura, de forma a produzir uma consistência de argamassa na ocasião da colocação. É utilizado para revestimento de valas, canais e taludes.

Existem dois métodos de dosagem para solo-cimento: O primeiro, estabelecido pela ABNT, e o segundo, chamado método físico-químico, desenvolvido na COPPE pelo Prof. Casanova. Ambos os métodos encontram-se descritos em MACÊDO (2004).

2.1.3.2.

Solo-Cal

SANDRONI E CONSOLI (2010) relatam que a quantidade de cal necessária para o tratamento de solos depende das características do solo e o uso e características mecânicas desejadas da mistura. O tratamento de solos com cal pode ser dividido em duas classes gerais: (a) modificação do solo com cal, a qual reduz a plasticidade do solo, melhora a trabalhabilidade, aumenta a resistência de defloculação e erosão; (b) estabilização do solo com cal, a qual fornece aumento permanente da resistência e rigidez do solo devido a ocorrência de reações pozolânicas.

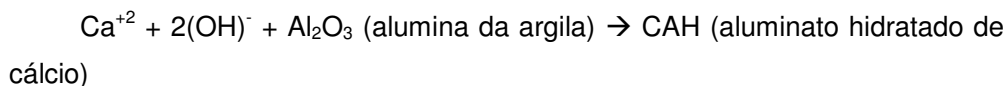
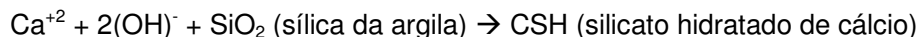
O tratamento de solos com cal não é eficiente em solos com baixo teor de argila, uma vez que o melhoramento das propriedades mecânicas é produzido pelas reações entre a cal e os minerais argílicos. Todos os minerais argílicos reagem com a cal, com a resistência das reações geralmente aumentando na proporção da quantidade de sílica disponível.

Quatro tipos básicos de reações que ocorrem em solos coesivos são tratados com cal: (a) carbonatação, (b) troca catiônica, (c) floculação-aglomeração, e (d) reações pozolânicas.

A carbonatação ocorre quando o dióxido de carbono existente no ar ou em água estagnada entra em contato com a matriz solo-cal e converte a cal novamente em carbonato de cálcio. O carbonato de cálcio é uma cimentação fraca e solubiliza na água ácida. A carbonatação é indesejável uma vez que reduz a quantidade de cal disponível para produzir as reações pozolânicas (cimentícias).

Cal misturada com água resulta em cátions de cálcio livres, os quais podem substituir outros cátions dentro dos complexos de troca catiônica que ocorrem no solo. A troca catiônica é ao menos parcialmente responsável pela floculação e aglomeração de partículas de argila que ocorre em solos tratados com cal. O resultado prático da floculação-aglomeração é a mudança na textura do solo uma vez que as partículas de argila unem-se e formam partículas de dimensões maiores.

As reações pozolânicas são similares aquelas que ocorrem em solos tratados com cimento. É sabido que a cal e a água reagem com sílica e alumina existentes no solo para formar vários componentes cimentícios. Origens típicas de sílica e alumina em solos incluem minerais argílicos, quartzo, feldspato, micas e outros silicatos ou alumino-silicatos similares, com estrutura cristalina ou amorfa. A adição de cal também aumenta o pH do solo, aumentando a solubilidade da sílica e da alumina presentes no solo. Se uma quantidade significativa de cal é adicionada ao solo, o pH pode alcançar 12,4, que é o pH da água saturada com cal. A seguir são apresentadas as reações que ocorrem no solo tratado com cal:



Onde C = CaO, S = SiO₂, A = Al₂O₃ e H = H₂O

Tais reações somente ocorrem na presença de quantidades de água capazes de trazer Ca⁺² e (OH)⁻ para a superfície das partículas de argila.

Conseqüentemente, as reações não ocorrerão em solos secos e cessarão em um solo úmido que vier a secar.

O efeito da cal nas propriedades do solo pode ser visto sob vários aspectos:

- Distribuição granulométrica: há uma modificação da granulometria do solo, devido à ocorrência de floculação-aglomeração e que quanto maior a quantidade de cal maior a floculação;
- Plasticidade: o limite de plasticidade (LP) cresce com o uso da cal e o limite de liquidez (LL) tende a diminuir. O aumento do teor de cal acarreta valores de IP cada vez menores. O índice de plasticidade (IP) varia com o tempo de reação;
- Variação de volume: o tratamento de um solo expansivo com cal reduz as variações de volume do solo quando este absorve água;
- Compactação: a densidade diminui e o teor de umidade ótima aumenta quando se trata um solo com cal;
- Resistência: CONSOLI ET AL (1997) verificaram que o teor de cal e o tempo de cura são fatores que influem no aumento da resistência a compressão simples num solo estabilizado com cal.

Quanto maior o teor de cal maior a troca catiônica e a formação de produtos cimentantes, mas não existe um teor ótimo de cal a ser adotado para todos os solos, sendo a experiência de campo e laboratório, decisiva para a escolha do teor de cal.

2.2.

Solo-Cinza de carvão

Durante o processo de incineração de carvão, a depender do tipo do incinerador, várias cinzas podem ser geradas em diversos pontos de queima do carvão. As duas cinzas principais são a cinza de fundo (*bottom ash*) e cinza volante (*fly ash*).

Segundo ACAA (2003) e WINTERKORN (1990), a Cinza Volante é um subproduto de usinas elétricas alimentadas por carvão. É recuperada de gases de combustão. Tipicamente, o carvão é pulverizado e fundido com ar na câmara

da caldeira de combustão, onde imediatamente inflama, gerando calor e produzindo resíduo de mineral fundido para endurecer e formar as cinzas.

Partículas grossas de cinza, referidas como cinzas de fundo ou escórias, caem para o fundo da câmara de combustão, enquanto que as partículas finas de cinza mais leves, denominadas cinzas volantes, permanecem em suspensão nos gases de combustão. Antes de se esgotar os gases de combustão, a cinza volante é removida por dispositivos de controle das emissões de partículas.

A cinza volante é um agente efetivo para estabilização química e / ou mecânica dos solos, modificando a densidade do solo, teor de umidade, plasticidade, e resistência dos solos. As aplicações típicas incluem: estabilização de solos para aumentar a sua resistência, dessecamento do solo e controle da contração-expansão (ACAA, 2003).

2.2.1.

Aplicações do Solo-Cinza de Carvão

A seguir são listadas algumas aplicações e conseqüências do uso de cinzas no solo (ACAA, 2003):

a) Melhoria da Resistência do Solo:

A cinza volante tem sido utilizada satisfatoriamente em muitos projetos para melhorar as características de resistência dos solos. Ela pode ser usada para estabilizar bases ou sub-bases e aterros, para reduzir o empuxo lateral de terras e para estabilizar taludes.

O principal motivo para utilizar as cinzas volantes em aplicações de estabilização do solo é o de melhorar a resistência à compressão e cisalhamento dos solos.

A resistência à compressão dos solos tratados com cinzas volantes é dependente de:

- Teor de umidade: o teor de umidade da mistura solo-cinza volante afeta a resistência;
- Teor de cinza volante: o teor de cinza volante depende da natureza do solo, das características da cinza volante e da

resistência desejada. o teor deverá ser determinado por ensaios de laboratório para projeto da mistura;

- Propriedades do solo: a plasticidade dos solos tratados com cinza volante é influenciada pelos argilominerais presentes no solo e a água adsorvida. Solos que contenham mais do que 10 % de sulfatos são propensos à expansão excessiva em algumas aplicações. Além disso, solos orgânicos são difíceis para estabilizar utilizando cinza volante.

b) Controle da contração e expansão:

Muitos solos argilosos (solos plásticos) são submetidos a grandes mudanças volumétricas quando sujeito a flutuações de umidade. Estas mudanças volumétricas quando não são controladas conduzem a deslocamentos em estruturas e impõem carregamentos que podem causar rupturas prematuras.

Cinzas volantes reduzem o potencial de um solo plástico submetido à expansão volumétrica por um mecanismo físico de cimentação, que não pode ser avaliado pelo índice de plasticidade. As cinzas volantes controlam a contração-expansão por cimentação dos grãos do solo em conjunto, muito parecido a como o Cimento Portland une os agregados para fazer o concreto. Através da ligação dos grãos do solo em conjunto, os movimentos das partículas do solo são restritos.

c) Diminuição da umidade:

Solos devem ser compactados na sua máxima densidade prática para fornecer uma base para as estruturas sobrejacentes. Para solos a serem compactados, o teor de umidade deve ser controlado por causa de relação entre densidade do solo e o teor de umidade. Se o solo a ser compactado está úmido ou seco, o teor de umidade deve ser ajustado até perto do ótimo para alcançar a densidade máxima. Se o solo está muito seco, umidade é simplesmente aumentada. Se o solo está muito úmido, o teor de umidade deve ser diminuído. Cinzas

volantes têm sido descobertas como agentes de secagem muito efetivos, capazes de reduzir o teor de umidade do solo em 30% ou mais. As cinzas volantes secam o solo por dois mecanismos básicos, reações químicas que consomem umidade no solo e por diluição simples (ACAA, 2003).

2.2.2.

Utilização de Cinzas de Carvão na Pavimentação

A principal utilização das cinzas oriundas da queima do carvão mineral no Brasil acontece na substituição de parte do clínquer portland por cinza volante (*fly ash*) na fabricação do cimento portland pozolânico (FARIAS, 2005).

Além de aplicações em matrizes de concreto, também foram desenvolvidos no Brasil estudos analisando a utilização das cinzas resultantes da queima do carvão mineral em estruturas semi-rígidas e flexíveis de pavimentos, sendo que diversos autores já comprovaram a viabilidade de sua utilização na pavimentação, no que se refere ao desempenho mecânico da utilização de cinzas.

Os estudos desenvolvidos por NARDI (1975) e posteriormente complementados pelas pesquisas realizadas por MARCON (1977), comprovaram a viabilidade da estabilização de areia com cinza volante e cal. Os trabalhos desenvolvidos por NARDI (1975), resultaram na implantação de um trecho experimental localizado às margens da BR-101, no município de Imbituba/SC, onde, sobre o subleito de areia, foi construída uma sub-base de areia estabilizada com cal e cinza volante. Nesse trecho foram instaladas seções de instrumentação e os resultados monitorados foram bastante satisfatórios e aprovaram o desempenho do material.

Com a finalidade de complementar os estudos realizados por NARDI (1975), MARCON (1977) desenvolveu ensaios de durabilidade e módulo de elasticidade em misturas de [areia, cinza volante] e [cal e areia, brita, cinza volante, cal e cimento]. Nos resultados de suas pesquisas os materiais resultantes se mostraram com aptidão para serem empregadas em bases e sub-bases de pavimentos, desde que observadas as condições de cura, as solicitações de tráfego e devendo ser avaliada a rigidez da camada da base, de modo a promover a redução das tensões verticais transmitidas ao subleito e retardando os efeitos de fadiga. Com esse aspecto, um bom processo de cura

torna-se importante à medida que, com aumento da resistência do material com o passar do tempo, também é retardado o desenvolvimento de fissuras no material.

Estudos mais recentes foram desenvolvidos por DIAS (2004), LEANDRO (2005), FARIAS (2005) e ROSA (2009), onde se faz uma análise do desempenho de solo estabilizado com cinzas de carvão e aditivos no laboratório.

2.3.

Solo-Cinza de RSU

A estabilização de solos com cinzas de RSU tem sido menos utilizada e estudada que com as cinzas de carvão, visto que o número de usinas termoeletricas de RSU é menor que as que utilizam carvão. Mas o comportamento relatado sobre os seus efeitos e mecanismos de estabilização é comparável aos das cinzas de carvão, desde que o RSU seja principalmente composto por matéria orgânica.

FERREIRA et al. (2003) relatam que a Cinza Volante de RSU pode ser aplicável a rodovias como material substituto de areia e/ou cimento para bases e sub-bases estabilizadas com cimento. Questões ambientais relativas a esta aplicação são a contaminação de solo subjacente e águas subterrâneas por substâncias lixiviadas da camada de base. Estudos de viabilidade de substituição de areia por cinza volante em camadas de base de areia/cimento foram conduzidos por MULDER (1996) na TNO (Organização Holandesa para Pesquisa Científica Aplicada); nestes estudos, a cinza volante de RSU foi submetida à lavagem com solução de ácido nítrico e posterior filtração obtendo-se uma redução na concentração de metais como apresentado na Tabela 2.1. O produto obtido após uma lavagem da cinza volante seguido por cimentação satisfaz as normas holandesas para materiais de construção, ressaltando que o custo desta lavagem mais aplicação numa base de pavimento é menos caro que dispor a cinza volante como material perigoso.

Tabela 2.1 - Resultados da lavagem da cinza volante.

Elemento	Concentração original (mg/kg)	Concentração após lavagem (mg/kg) *	Decréscimo em concentração (%) **
Cd	220	32	90
Cu	660	920	3
Mo	17	23	5
Pb	6000	7 800	9
Zn	14 000	6 900	66
Cl ⁻	53 000	5 800	92
SO ₄ ²⁻	64 000	79 000	14

* Medido na massa sólida após lavagem e secagem.

** Após correção para redução da massa de aproximadamente 30*.

Outro uso potencial da Cinza Volante de RSU é em estabilização de solos, como substituto de cal ou cimento, tomando as vantagens das características pozolânicas da Cinza Volante de RSU. A densidade da Cinza Volante de RSU é menor que outros materiais de aterro utilizados em construção de aterros: valores típicos para Cinza Volante de RSU estão entre 1,7 – 2,4 quando para areias é tipicamente 2,65. Em solos moles compressíveis é uma vantagem a substituição de materiais convencionais de aterro por a Cinza Volante, e assim diminuir os carregamentos impostos nas fundações, resultando em menores recalques.

GOH e TAY (1993) pesquisaram a possibilidade de utilizar Cinza Volante de RSU como material de aterro em aplicações geotécnicas. Eles relataram que a Cinza Volante apresenta os pré-requisitos para este tipo de aplicação com alta resistência e permeabilidade, típica de material granular, e densidades quando compactadas menores que os aterros convencionais. Eles também avaliaram a possibilidade de utilização de Cinza Volante em estabilização do solo (em vez de cal ou cimento) achando que as misturas solo-cinza volante apresentaram melhoramento da resistência ao cisalhamento e menor compressibilidade que outros solos não-tratados.

A Figura 2.1 apresenta a mudança na resistência ao cisalhamento não drenado de amostras obtidas de ensaios de compressão não confinada. A resistência ao cisalhamento não drenado incrementou-se com a idade e com o

incremento do teor de cinza volante de RSU para os solos estabilizados. A taxa de endurecimento da mistura com maior teor de cinza volante foi também a mais rápida. Após 80 dias de tempo de cura, a resistência ao cisalhamento não drenado do solo tratado acrescentou-se acima de 1,9, 2,5 e 3 vezes para as misturas com 10%, 20% e 30% de cinza volante, respectivamente.

Maiores ganhos em resistência foram observados para o solo estabilizado com cimento como mostrado na Figura 2.1. Após 80 dias, a mistura com 5% de cinza volante de RSU mais 5% de cimento apresentou uma resistência 4% maior que a resistência do solo estabilizado somente com cimento. Dos resultados dos ensaios, GOH e TAY (1993) sugerem que (1) a cinza volante poderia ser usada para estabilizar solos argilosos com um aumento de duas a três vezes a resistência do solo natural; e (2) a cinza volante poderia ser utilizada em combinação com cimento ou cal, se maiores ganhos de resistência são requeridos.

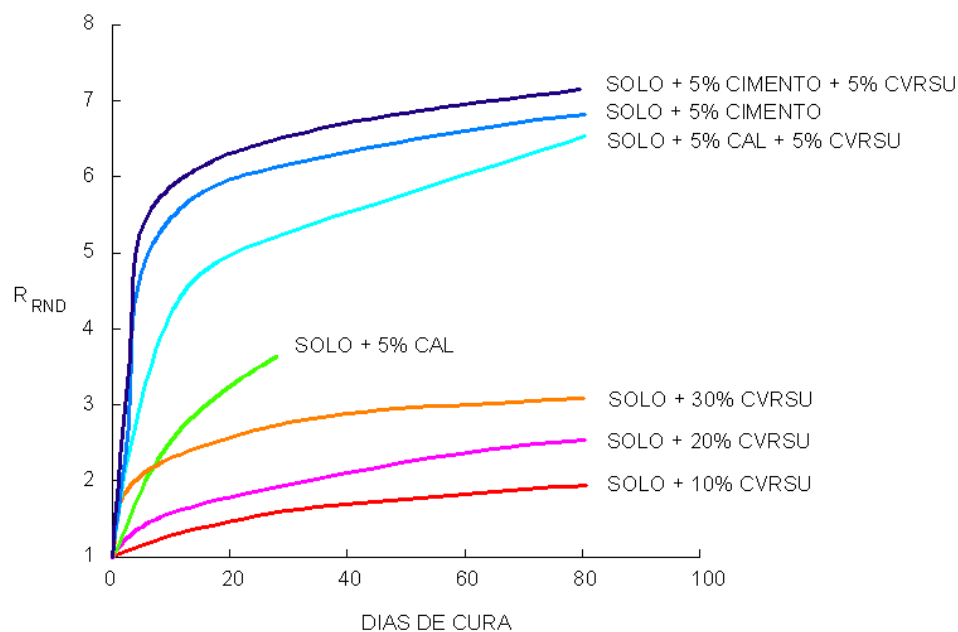


Figura 2.1. Efeito do tempo sobre solo estabilizado com CVRSU, cal e cimento (adaptado de GOH e TAY, 1993).

Onde:

$$R_{RND} = \frac{\text{Resistência ao cisalhamento não drenada do solo estabilizado}}{\text{Resistência ao cisalhamento não drenada do solo natural}}$$

GOH E TAY (1993) compararam o lixiviado de Cinza Volante com lixiviado de Cinza Volante estabilizado com cal ou cimento. Eles relataram que o lixiviado da Cinza Volante não estabilizada não atendeu as normas de qualidade de água potável e que a Cinza Volante estabilizada com cal ou cimento apresentou valores menores de crômio e cádmio, não se detectando concentrações tóxicas. Contudo, eles limitaram seu estudo a lixiviado de Cinza Volante, e não avaliaram o sistema solo/cinza volante, o que poderia dar melhor percepção do comportamento do lixiviado de aterros construídos com esses materiais. Pré-lavagem da cinza poderia ser uma possível solução para o problema da lixiviação de metais pesados.

A Cinza de Fundo de RSU tem sido utilizada muito mais que a Cinza Volante de RSU. Sua utilização nos Estados Unidos está limitada a alguns trechos de teste, mas na Europa, é utilizada como material para base de rodovias ou aterros há duas décadas. Na Dinamarca, Alemanha e Holanda mais do que 50% da Cinza de Fundo de RSU produzida é utilizada como material de base para rodovias e aterros (FHWA, 2008).

FORTEZA et al. (2004), IZQUIERDO et al (2001), REIS-BARROS (2006) estudaram o comportamento em laboratório da Cinza de Fundo de RSU puro para aplicação em base de pavimentos, obtendo resultados bons quanto ao comportamento mecânico.

ALMEIDA et al (2009) avaliaram o comportamento em trechos rodoviários em Portugal, onde se utilizou escória de RSU em substituição de agregados naturais; ele conclui que a utilização de escória de RSU obedece as especificações ambientais e que sua utilização é possível em aterros e leitos de pavimento e em camadas de sub-base de pavimentos de baixo tráfego.

2.4.

Utilização de resíduos em Pavimentação

Resíduos são materiais oriundos de diversas origens: indústrias, agricultura, lares e mineração. Leis têm sido elaboradas por várias nações para incentivar o uso de alguns resíduos ou para examinar a viabilidade de seu uso, devido a que seus volumes e custos de eliminação continuam aumentando.

O emprego de resíduos na construção de pavimentos pode ser interessante, principalmente porque obras de pavimentação consomem grandes quantidades de material. Com isto surgiram alguns pontos de interesses específicos de avaliação:

- Aos engenheiros interessa o efeito sobre as propriedades de Engenharia (por exemplo, resistência e durabilidade), impacto sobre a produção e a possibilidade de futura reciclagem de tais materiais;
- Interesses ambientais tais como emissões, fumaças, odores, lixiviação, manutenção e processos de produção;
- Interesses econômicos como custos e carência de incentivos monetários.

Na Tabela 2.2 estão apresentadas combinações material/aplicação em pavimentação para alguns resíduos segundo FHWA (2008).

Na perspectiva da engenharia de pavimentos, o reaproveitamento de materiais deve ser utilizado de tal forma que o desempenho esperado do pavimento não seja comprometido. Resíduos e subprodutos, no entanto, diferem substancialmente nos seus tipos e propriedades e, em consequência, nas suas aplicações em pavimentação. Experiência e conhecimento sobre a utilização desses materiais variam de material a material, como também de local a local. Para recuperar esses materiais para uso potencial, engenheiros, pesquisadores, geradores, e os órgãos reguladores ambientais ou de pavimentação têm de estarem conscientes das propriedades dos materiais, como podem ser usados, e quais as limitações podem ser associados à sua utilização.

ROHDE (2002), CASTELO BRANCO (2004), RAPOSO (2005), OLIVEIRA (2006), FREITAS (2007), PENA (2007), estudaram a aplicação de escória de aciaria para camadas de pavimentos e misturas asfálticas no Brasil.

PINTO (1971), NARDI (1975), MARCON (1977), LEANDRO (2005) e FARIAS (2005) estudaram a aplicação de cinzas de carvão para camadas de pavimentos.

FERNANDES (2004), MOTTA (2005) e LEITE (2007) estudaram a aplicação de Resíduo sólido da construção civil para pavimentação.

Tabela 2.2 – Combinações de Material/Aplicação em pavimentação (FHWA, 2008).

Material	Aplicação					
	Concreto asfáltico	Concreto Cimento Portland	Base Granular	Aterro	Base estabilizada	Aterro hidráulico
Pó de asfalto (<i>Baghouse fines</i>)	x					
Escória de alto forno (<i>Blast furnace slag</i>)	x	x	x	x		
Cinza de fundo/escória de carvão (<i>Coal bottom ash/boiler slag</i>)	x		x	x	x	
Cinza volante de carvão (<i>Coal fly ash</i>)	x	x		x	x	x
Desulfuradores de gases de combustão (<i>FGD scrubber material</i>)					x	x
Areia de fundição (<i>Foundry sand</i>)	x	x		x		x
Fuligem (<i>Kiln dusts</i>)	x				x	
Resíduos de mineração (<i>Mineral processing wastes</i>)	x		x	x		
Cinza de incineração de RSU (<i>MSW combustor ash</i>)	x		x			
Escórias não ferrosas (<i>Nonferrous slags</i>)	x		x	x		
Sub-produtos de pedreira (<i>Quarry byproducts</i>)						x
Revestimento asfáltico reciclado (<i>Reclaimed asphalt pavement</i>)	X (quente e frio)		x	x		
Concreto reciclado (<i>Reclaimed concrete material</i>)			x	x		
Telhas de cobertura (<i>Roofing shingle scrap</i>)	x					
Borracha de pneus (<i>Scrap tires</i>)	x (úmido e seco)			x		
Cinza de lodo de esgoto (<i>Sewage sludge ash</i>)	x					
Escoria de aciaria (<i>Steel slag</i>)	x		x			
Resíduos de sulfatos (<i>Sulfate wastes</i>)					x	
Resíduos de vidro (<i>Waste glass</i>)	x		x			

2.5.

Dimensionamento de pavimentos asfálticos

Segundo FRANCO (2007), é imprescindível no processo de dimensionamento de estruturas de pavimentos asfálticos o conhecimento de variáveis como as características dos materiais a serem utilizados, o comportamento desses materiais em relação à aplicação de cargas e o tipo de carregamento e resposta da estrutura para suportar as cargas sob condições climáticas variáveis, entre outras. A dificuldade de prever e modelar essas variáveis determina o grande desafio de diversas instituições que atualmente pesquisam e tentam desenvolver métodos modernos e analíticos de dimensionamento.

A teoria da elasticidade é largamente utilizada como ferramenta para cálculo das tensões, deformações e deslocamentos. Modelos de comportamento tensão/deformação distintos são comumente utilizados pelos métodos de cálculo: comportamento elástico-linear e elástico não linear. Na Figura 2.2 é ilustrada a forma mais comum de representar um pavimento sob carregamento de roda e as deformações e deslocamento principais que atuam no interior da estrutura em camadas.

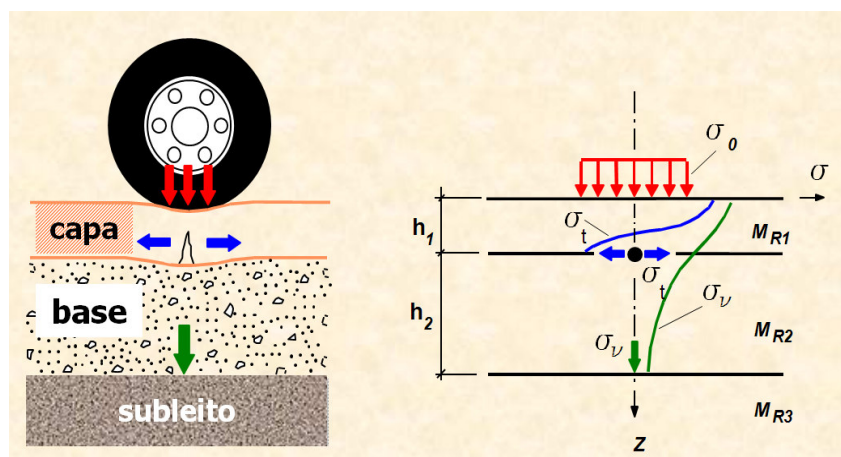


Figura 2.2. Tensões numa estrutura de pavimento (MEDINA e MOTTA, 2005)

É possível estimar a resposta do pavimento por meio do cálculo das tensões, deformações e deslocamento gerados na sua estrutura, a partir da definição das espessuras das camadas, dos módulos de resiliência e coeficientes de Poisson dos diversos materiais a serem utilizados e da composição do tráfego atuante.

A possibilidade de aplicar a teoria da elasticidade à pavimentação, permitindo o cálculo de estruturas de pavimento com várias camadas, é atribuída a Burmister que apresentou em 1943 um método para determinar tensões e deformações em sistemas de duas e três camadas. Esse método se baseia na teoria formulada em 1885 por Boussinesq, que apresentou um conjunto de equações para o cálculo de tensões e deformações em um meio semi-infinito, linear, elástico, homogêneo e isotrópico sob carregamento puntual e distribuído (FRANCO, 2007).

GUIMARÃES (2009) diz: “O fator essencial no projeto de dimensionamento é o conceito de ruptura do pavimento asfáltico e dois tipos de avaliação são possíveis: a estrutural e a funcional. Por ruptura estrutural depreende-se o colapso da estrutura ou de um dos seus componentes, tornando o pavimento incapaz de sustentar carregamentos na sua superfície. A ruptura funcional, que pode ser constatada em casos de ruptura estrutural ou não, é uma condição caracterizada pelo desconforto e insegurança ao rolamento dos veículos. O dimensionamento da estrutura do pavimento visa assegurar que o mesmo não sofra ruptura estrutural dentro de um período de projeto.”

Segundo FRANCO (2007), o procedimento para o dimensionamento mecanístico-empírico consiste basicamente em:

- reunir os dados referentes aos materiais de pavimentação, ao tráfego e às condições ambientais;
- correlacionar os dados de resistência dos materiais e tráfego em função das épocas sazonais e o comportamento dos materiais em função do tipo de carregamento;
- escolher as espessuras das camadas e calcular as tensões e deformações considerando as diversas correlações obtidas;
- relacionar os valores críticos de tensões e deformações com os danos que a repetição das cargas podem causar ao pavimento por meio de modelos de previsão; e
- verificar se as espessuras escolhidas satisfazem as condições impostas no dimensionamento.

2.5.1.

Módulo de Resiliência

Em 1955, Francis Hveem realizou o primeiro estudo sistemático para determinar a deformabilidade de pavimentos, estabelecendo valores máximos

admissíveis de deflexões para a vida de fadiga satisfatória de diferentes tipos de pavimentos. Hveem relacionou o trincamento progressivo dos revestimentos asfálticos à deformação resiliente (elástica) das camadas subjacentes dos pavimentos (MEDINA e MOTTA, 2005).

Em fins de 1977, iniciou-se na COPPE/UFRJ, sob a orientação do Prof. Jacques de Medina, um amplo programa de pesquisas neste setor, cujos marcos iniciais podem ser representados pelas teses de mestrado de PREUSSLER (1978) e SVENSON (1980), que trataram das propriedades resilientes dos solos arenosos e argilosos, respectivamente.

O módulo de resiliência dos solos para fins de pavimentação é determinado através do ensaio triaxial de cargas repetidas e é regido pela norma DNER ME 131/94: “Solos-Determinação do módulo de resiliência”. Nesta determinação a deformação total do corpo de prova ensaiado tem uma componente resiliente (recuperável) e outra permanente (irrecuperável) ou plástica. É a deformabilidade elástica ou resiliente que condiciona a vida de fadiga das camadas superficiais mais rijas dos pavimentos sujeitas a flexões sucessivas (MEDINA e MOTTA, 2005).

Define-se, o módulo resiliente ou de resiliência (MR) do solo, a partir de um ensaio triaxial dinâmico, como a relação entre a tensão-desvio aplicada axial e ciclicamente em um corpo-de-prova e a correspondente deformação específica vertical recuperável, conforme a equação (2.1):

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (2.1)$$

onde:

- σ_d = tensão desvio aplicada repetidamente;
- ϵ_r = deformação específica axial resiliente.

Os módulos de resiliência dos solos dependem do estado de tensões atuante – as decorrentes do peso próprio mais as tensões causadas pelas cargas dos veículos. O que se procura determinar nos ensaios triaxiais é a relação experimental:

$$MR = f(\sigma_1, \sigma_3) \quad (2.2)$$

para as condições de densidade, umidade e grau de saturação que o solo apresenta *in situ*.

Num solo, o módulo depende da natureza do material (constituição mineralógica, textura, plasticidade da fração fina), umidade, densidade e estado de tensões, além das características do próprio ensaio (frequência e tempo de carregamento, forma de onda, etc.). O ensaio faz-se com solos não saturados quase sempre em condições de drenagem livre (MEDINA e MOTTA, 2005).

Mantendo-se os outros parâmetros sob especificação, para cada solo o módulo de resiliência poderá ser expresso como uma função do estado de tensões aplicado durante o ensaio por modelos matemáticos com constantes experimentais. Os primeiros modelos de módulo em função ao estado de tensões que foram observados no Brasil estão mostrados na Tabela 2.3 (MEDINA e MOTTA, 2005).

Tabela 2.3 – Modelos de comportamento tensão-deformação de solos observados no Brasil (MEDINA e MOTTA, 2005).

Equação	Modelo
$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2}$	Arenoso
$M_R = k_2 + k_3(k_1 - \sigma_d)$, para $\sigma_d < k_1$ $M_R = k_2 + k_4(\sigma_d - k_1)$, para $\sigma_d > k_1$	Argiloso
$M_R = k_2 + k_3(k_1 - \sigma_d)\sigma_3^{k_3}$, para $\sigma_d < k_1$ $M_R = k_2 + k_4(\sigma_d - k_1)\sigma_3^{k_3}$, para $\sigma_d > k_1$	Combinado
$M_R = k_1 \theta^{k_2}$, para $k_2 > 0$	Areno-argiloso
$M_R = k_1 \sigma_d^{k_2}$, para $k_2 < 0$	Areno-Argiloso
$M_R = k_1$	Constante
$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$	Composto

2.5.2.

Sistema computacional SisPav

O método de dimensionamento, contido no programa SisPav, proposto por FRANCO (2007) visa considerar características brasileiras de ensaios de

laboratório, clima, materiais de pavimentação e tráfego. Este método considera a variação lateral para os diversos eixos na análise de tráfego, assim como a variação sazonal das características dos materiais do revestimento ao longo do período de projeto.

Considera ainda: a utilização de materiais com comportamento elástico linear e não linear; base de dados de resultados de ensaios brasileiros para desenvolvimento do modelo de previsão de danos; parâmetros dos materiais e bacias de deformação calculadas para propiciar o controle de execução no campo e análise de confiabilidade.

No referido sistema, para efeito de dimensionamento das espessuras das camadas do pavimento, são considerados os seguintes critérios de aceitação:

- deformação permanente limite no topo do subleito;
- deflexão máxima na superfície do pavimento;
- dano de fadiga da camada asfáltica ou cimentada.

O projetista pode considerar ações climáticas para o local onde existe ou será construída a estrutura do pavimento. Ao selecionar o local, as informações sobre as temperaturas médias mensais do ar são apresentadas na tabela e no gráfico da tela. Caso o local do projeto não se encontre disponível no banco de dados interno do programa SisPav, as informações poderão ser inseridas manualmente. O banco de dados interno foi obtido das Normais Climatológicas (BRASIL, 1992). O detalhamento de tráfego é feito por eixo e por volume de tráfego no mês.

2.6.

Solos expansivos

Determinados solos sofrem fenômeno de expansão com magnitude considerável ao aumentar sua umidade. O processo de expansão se produz quando um solo não saturado se umedece absorvendo água entre suas partículas, havendo aumento de volume, sendo esse volume constituído por uma componente devida ao relaxamento das tensões intergranulares ou sucção ao aumentar o grau de saturação.

Os solos que contém os minerais argilosos como ilita e montmorilonita, possuem uma tendência de expandir-se na presença de água, sendo esta última com maior potencial de expansão. LAMBE e WHITMAN (1976) se referem a esses minerais e consideram que o potencial de expansão dos minerais

argilosos expansivos depende da estrutura dos cristais, da estrutura dos grupos de cristais e da capacidade de troca catiônica.

O mecanismo que envolve a expansão dos solos está relacionado, entre outros fatores, com a hidratação das partículas de argila e de cátions, que atraem as moléculas de água causando um aumento de volume. Esse mecanismo é afetado por uma série de fatores que condicionam sua evolução e magnitude.

De acordo com BUCIO (2002), são eles:

- Tipo de minerais e quantidade dos mesmos: quanto maior a expansibilidade dos minerais presentes no solo, maior será sua capacidade de expandir-se com o aumento da umidade;
- Densidade: para um mesmo solo com a mesma umidade inicial, a expansão será maior quanto maior for a densidade seca do mesmo;
- Estrutura dos solos: os solos que possuem cimentações possuem menor tendência de expansão. As estruturas floculadas têm maior tendência a expandir que as dispersas, sendo a retração menor para o primeiro caso;
- Umidade: a umidade influi na magnitude da expansão dos solos. Quanto menor for a umidade, maior será a expansibilidade potencial, pois o solo ainda é capaz de absorver maior quantidade de água.

2.7.

Considerações sobre a revisão bibliográfica

Na revisão bibliográfica do presente estudo foram mencionados os diferentes métodos de estabilização, dando ênfase na estabilização com cinzas de carvão e as cinzas de RSU. O estudo do mecanismo de estabilização mediante cinzas de carvão poderia fornecer uma idéia do que acontece com as cinzas de RSU, já que estas ainda não têm sido muito estudadas, nacional e internacionalmente. É mencionado um resumo das aplicações de resíduos na pavimentação assinalando as suas vantagens. É apresentado o programa computacional SisPav que é utilizado neste estudo e um resumo sobre solos expansivos. Os conceitos expostos são principalmente concernentes à Mecânica dos Pavimentos e Estabilização de Solos.