

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Considerações Iniciais

A revisão bibliográfica desta dissertação abrange os seguintes tópicos:

- Conceitos a respeito da estabilização de solos, as principais características dos tipos mais utilizados na construção de pavimentos rodoviários;
- Breve descrição sobre a utilização de algumas cinzas em camadas de base de pavimentos, bem como de enzimas utilizadas para melhoramento de solos;
- Descrição do equipamento LWT (Load Wheel Test).

### 2.2 Estabilização de Solos

O conhecimento das características e propriedades mecânicas do solo existente e disponível no local de execução de um projeto de pavimentação é de suma importância para análise da adequação aos requisitos técnicos. Entretanto, ocorre com certa frequência a existência de solos que não apresentam as propriedades adequadas para suportar as cargas impostas ao pavimento. Nestes casos, normalmente uma das soluções mais comuns é a procura por outros materiais diferentes, que preencham os requisitos técnicos mínimos, o que ocasiona custos adicionais, como por exemplo de transporte, que muitas vezes podem inviabilizar o projeto (Lopes, 2011).

Vogt (1971) definiu 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. 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 mecânico, 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.

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.

Para Guimarães (2002), a estabilização dos solos pode ser obtida por diversas e diferentes técnicas, que podem ser classificadas em dois grupos:

- Estabilização Mecânica: adequação da granulometria e plasticidade, com adição ou subtração de certas quantidades das frações constituintes, além da compactação;
- Estabilização Química: mistura com aditivos orgânicos ou inorgânicos, como materiais betuminosos, resinas, compostos de fósforo, silicatos de sódio, cal, cimento Portland e outros e posterior compactação.

Segundo Medina e Motta (2004) 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 condições 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.

A escolha por um ou outro tipo de estabilização é influenciada pelo custo, finalidade da obra, e em particular, pelas características dos materiais e propriedades do solo que devem ser corrigidas.

### **2.2.1 Estabilização Mecânica**

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 porcentagem limitada de partículas finas, com a mistura íntima homogeneizada de dois ou mais solos e sua posterior compactação (Vizcarra, 2010).

Porém, há um limite na utilização desse tipo de estabilização, pois se tratando de um solo argiloso poderá haver lamaçal antes de se atingir o Índice de Suporte Califórnia e em caso de solos arenosos a compactação poderá ser inútil.

### **2.2.2 Estabilização Física**

Soliz (2007) afirma 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, 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 argilominerais presentes no solo (Nascimento, 2005; Cabral, 2005).

Cabe mencionar que as argilas plintícas quando escavadas em blocos e secas ao ar constituem blocos que podem ser usados em construção civil, o que foi observado na Índia 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, através de um 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.

### **2.2.3 Estabilização Química**

Segundo Medina (1987) na estabilização química, como indicado pelo próprio nome, há ocorrência de reação química do aditivo com os minerais do solo (fração coloidal) ou o preenchimento dos poros pelo produto da reação química do aditivo com a água.

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).

De acordo com Sandroni e Consoli (2010), melhorar ou controlar a estabilidade volumétrica, resistência e propriedades tensão-deformação estão entre os principais objetivos da mistura de aditivos aos solos. As reações químicas mais comuns na estabilização são as de troca catiônica com partículas de argilas, além das reações cimentícias e pozolânicas. Normalmente, os agentes químicos mais utilizados para a estabilização de solos são o cimento Portland, cal, cinza volante e emulsões betuminosas.

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 (Medina, 1987).

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 principais tipos de estabilização química são descritas nos subitens a seguir.

### **2.2.3.1 Solo-Cal**

Sandroni e Consoli (2010) apresentam que a quantidade de cal necessária para o tratamento de solos depende das características do solo, uso e características mecânicas desejadas da mistura e do tipo de cal.

O tratamento de solos com cal pode ser dividido em duas classes gerais:

- Modificação do solo com cal, a qual reduz a plasticidade do solo, melhora a trabalhabilidade, aumenta a resistência de deflocação e erosão;

- 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.

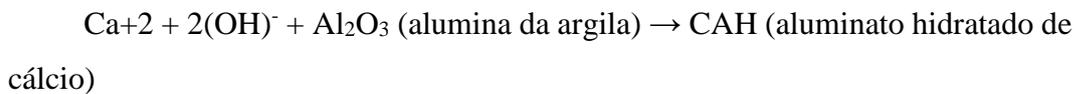
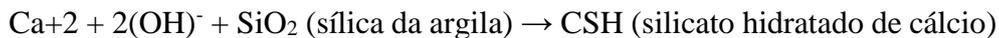
Quatro tipos básicos de reações que ocorrem em solos coesivos tratados com cal:

- Carbonatação;
- Troca catiônica;
- Floculação/aglomeração;
- 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:



Tais reações somente ocorrem na presença de quantidades de água capazes de trazer  $\text{Ca}^{+2}$  e  $(\text{OH})^-$  para a superfície das partículas de argila.

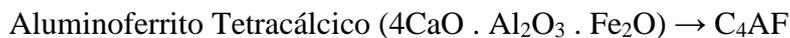
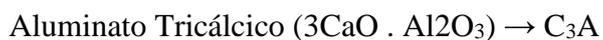
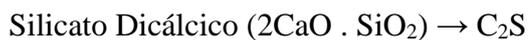
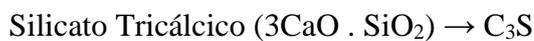
Conseqüentemente, as reações não ocorrerão em solos secos e cessarão em um solo úmido que vier a secar. O efeito da cal nas propriedades do solo pode ser visto sob vários aspectos:

- 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 influenciam no aumento da resistência a compressão simples num solo estabilizado com cal.

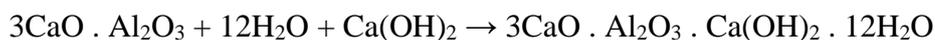
Quanto maior o teor de cal maior a troca catiônica e a formação de produtos cimentantes, mas não existe um teor ótimo de cal a ser adotado para todos os solos, sendo a experiência de campo e laboratório, decisiva para a escolha do teor de cal.

### 2.2.3.2 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), as 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:



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



O  $\text{C}_3\text{S}$  enrijece rapidamente e é o responsável primário pela resistência inicial. O  $\text{C}_2\text{S}$  enrijece lentamente e contribui para aumento de resistência para idades além de 1 semana. O  $\text{C}_3\text{A}$  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, ambos encontram-se descritos em Macêdo (2004).

- O primeiro, estabelecido pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- O segundo, chamado método físico-químico, desenvolvido na COPPE-Universidade Federal do Rio de Janeiro, pelo Professor Francisco José Casanova de Oliveira e Castro.

### 2.2.3.3 Solo-Cinza de Carvão

Nardi (1975) afirmou que processos clássicos de estabilização de solos são normalmente de difícil aplicação a solos mal graduados e uniformes, desprovidos de finos, dado que a uniformidade das partículas do solo dificulta a cimentação, devido ao maior volume de vazios e o menor número de contatos entre os grãos de solo. Rosa (2009), seguindo o mesmo raciocínio, diz que solos arenosos, com escassez de argila coloidal, não reagem satisfatoriamente à cal, e que a adição de cinza volante pode torná-los reativos à esta, substituindo a fração fina do solo, argila.

Kaniraj e Havanji (1996) relatam que com o aumento do teor de cinza volante presente na mistura solo - cinza volante - cal hidratada observa-se redução do peso específico máximo aparente seco e aumento da umidade ótima, para mesma energia de compactação. Corpos de prova compactados na condição de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo apresentam, para determinada energia de compactação, aumento da porosidade e do índice de vazios, para teores crescentes de cinza volante. Na opinião destes estudiosos, isto pode tornar interessante a utilização de cinza volante para processos de estabilização na construção de aterros, principalmente sobre solos moles.

A estabilização de solos com a cinza pesada é mais recente e menos usual que misturas com cinzas volantes. Todavia, recentemente, muitos estudos foram desenvolvidos com a finalidade de analisar as características e propriedades das misturas de solo-cinza pesada com ou sem a adição de cal, como por exemplo: Lopes (2011), Leandro (2005), Farias (2005), Nunes et al. (1996), Schroeder (1994, apud Farias, 2005), dentre outros.

As cinzas pesadas são, reconhecidamente, materiais com menor atividade pozolânica que as cinzas volantes. Segundo Dawson et al. (1991, apud Farias, 2005) o poder cimentante das cinzas de fundo está relacionado com o tipo e quantidade de carbonatos presentes em sua composição química, sendo que, em virtude dos baixos percentuais de óxido de cálcio pode-se esperar limitações no desenvolvimento de reações autocimentantes. Este fato pode ser interpretado como uma justificativa para as cinzas pesadas ainda não possuírem grande índice de reaproveitamento no Brasil e no mundo. Atualmente, a maioria das cinzas de fundo

produzidas nas usinas termelétricas é depositada nas bacias de decantação, diferentemente das cinzas volantes, que são vendidas como matéria-prima para outras indústrias.

Leandro (2005) relata que para o aproveitamento de cinzas de fundo em base e sub-base de pavimentos, os teores de cinzas, teor da cal, tempo de cura e tipo de solo são principais fatores influentes nas propriedades das misturas. Este autor observou que a adição de cinza pesada a solos não lateríticos é mais benéfica do que em solos lateríticos, além de perceber que o tempo de cura somente teve influência nos parâmetros de resistência quando com cal.

Farias (2005) seguiu as mesmas diretrizes e concluiu que a estabilização de solos com a cinza de fundo, aumenta em até 20% a capacidade de suporte do solo natural com adição da cal. Sugere a utilização da mistura solo-cinza de fundo-cal para rodovias de baixo volume de tráfego, onde a deformabilidade da estrutura não é tão importante para o desempenho do pavimento.

Lopes (2011) adicionou cinzas de carvão mineral (volante e de fundo) em misturas com um solo do Rio de Janeiro e analisou seu comportamento. Analisou diversos teores de aplicação: para a cinza de fundo 30 e 40%, para a cinza volante 10 e 20% e também análises com 3% de cal adicionado às cinzas.

Concluiu que a adição das cinzas, tanto de fundo como volantes, nos solos estudados, com e sem a adição de cal, proporcionaram a melhoria em grande parte das propriedades mecânicas do material, encontrando um teor ótimo de cinza próximo de 7%, comprovando-se que a utilização das cinzas de carvão mineral em misturas com solo para aplicação em base de pavimentos é benéfico, não somente para o Meio Ambiente, como para a Engenharia dos Pavimentos, uma vez que um solo inapropriado para pavimentação passou para a condição de adequado para tal finalidade.

#### **2.2.3.4 Solo-Cinza de Resíduo Sólido Urbano**

Pesquisas sobre a utilização de cinzas de resíduos sólidos urbanos (RSU) em mistura com solos são recentes quando comparadas com os demais resíduos reutilizados como agentes cimentantes, como as cinzas de carvão mineral. Entretanto, pode-se dizer que foram motivadas pelos mesmos princípios, de

reaproveitamento de resíduos, busca por materiais de construção não convencionais e preservação de jazidas de materiais naturais.

Vizcarra (2010) destaca outro motivo pela menor utilização da estabilização de solos com cinzas de RSU, a quantidade de usinas de RSU ainda é bem menor do que as que utilizam carvão mineral. Todavia, 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.

É importante ressaltar que também são geradas cinzas de fundo nas usinas de RSU e que têm sido mais utilizadas a cinza volante assim como as de carvão. Nos Estados Unidos está limitada a alguns trechos de teste, entretanto na Europa, é utilizada como material para base de rodovias ou aterros há duas décadas. Na Dinamarca, Alemanha e Holanda mais do que 50% das cinzas de fundo de RSU produzidas é utilizado como base para rodovias e aterros.

Vizcarra (2010) avaliou o comportamento mecânico de misturas de solo com RSU buscando a viabilidade técnica de uma mistura dessa finalidade ser utilizada na construção de base de pavimentos. Concluindo que a adição desse material ao solo tem uma influência favorável, reduzindo a expansibilidade em até 0,5% quando adicionado um teor de 40% de cinza ao solo, mostrando-se viável para fins de pavimentação.

Bons resultados quanto ao comportamento mecânico das cinzas de fundo de RSU também foram obtidos por Forteza *et al.* (2004), Izquierdo *et al.* (2001) e Reis-Barros (2006). Outra possibilidade para a utilização das cinzas volantes de RSU é destacada por Ferreira *et al.* (2003) como material substituto de areia e/ou cimento para bases e sub-bases de rodovias estabilizadas com cimento.

### **2.2.3.5 Solo-Betume**

A estabilização com solo-betume ocorre quando a um solo qualquer é acrescentado um ligante asfáltico, conferindo à mistura resultante uma melhora em seu comportamento mecânico e um efeito impermeabilizante, tornando-a mais resistente tanto a esforços de tráfego quanto a efeitos de variação de umidade (Miceli Junior, 2006).

O ligante asfáltico a ser utilizado depende principalmente do tipo de solo e do tipo de mistura a ser feita, e sua escolha acompanha a evolução da tecnologia de produção de ligantes disponível.

Micelli Junior (2006) estudou a estabilização de solos com emulsão asfáltica através de ensaios de compressão simples, tração direta e modo de resiliência e obteve resultados satisfatórios. Utilizou três tipos de solos, dois tipos de emulsões, 7 e 28 dias de cura e misturas com teores de 4 e 8% de emulsão.

Verificou que para solos granulares a interação solo-emulsão é benéfica aumentando a coesão da mistura promovendo uma melhoria de todos os parâmetros pois forma-se uma espécie de areia-asfalto a frio. Concluiu também que a estabilização ocorre, assim como no solo-cimento em até sete dias, tempo máximo necessário de cura.

## **2.3 Aditivos Orgânicos**

### **2.3.1 Histórico**

Segundo Bergmann (1777 *apud* Brazetti, 1998) no estudo sistemático dos compostos químicos, pela primeira vez separou-os em duas grandes classes as quais chamou de compostos orgânicos e compostos inorgânicos, onde compostos orgânicos eram compostos extraídos dos organismos vivos e compostos inorgânicos eram os compostos minerais.

Lavoisier, entre 1772 e 1777, verificou que todos os compostos extraídos dos organismos vivos produziam dióxido de carbono e água como subproduto da combustão, com isto Lavoisier concluiu que os compostos orgânicos apresentavam carbono e hidrogênio em sua composição e foi o primeiro a verificar que a grande maioria dos compostos orgânicos são constituídos de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio (Brazetti, 1998).

Intensas pesquisas para o desenvolvimento de novas técnicas de estabilização de solos foram desenvolvidas antes, durante e após a 2ª Grande Guerra, com o objetivo de atender às necessidades militares e ao progresso e expansão das cidades. Incentivaram a pesquisa os problemas militares relacionados com tráfego temporário e emergencial e os programas de expansão rodoviária, que encontraram

nos solos problemáticos e nos altos custos e escassez dos materiais convencionais, um empecilho. Muitos produtos químicos foram desenvolvidos, porém uma grande maioria tinha desvantagens como dificuldades de mistura, sensibilidade ao tipo de solo, ou alto custo (Davidson e Handy, 1960 *apud* Brazetti, 1998).

Já o progresso necessitava da expansão da malha rodoviária e das cidades para o transporte e troca de mercadorias e encontrou na lama, poeira e instabilidade do solo, um grande problema. Uma solução em termos de novos materiais se requeria (Kézdi, 1979).

Antes do início da 2ª Grande Guerra, utilizava-se para tratar os solos produtos químicos como o cimento portland, cloreto de cálcio, cloreto de sódio, ligninas, alcatrões e asfaltos. O cimento era usado para proporcionar resistência e durabilidade, da mesma forma o betume, porém em menor quantidade. Já os cloretos e a lignina eram utilizados para atenuar problemas com o pó, lama, e muitas vezes para controlar a umidade durante a compactação de materiais granulares. O uso da cal e misturas cal-pozolana, apesar de serem utilizados já desde antes do Império Romano, era localizado e restrito (Johnson, 1960).

A problemática gerou a formulação de um plano de pesquisa e subsequentemente um programa intensivo para aplicá-lo. Várias universidades, instituições de pesquisa, e indústrias químicas foram envolvidas. O plano incluiu todos os métodos possíveis e com potencial para atingir o objetivo, isto é, tornar os solos adequados como material de construção rodoviária de baixo custo (Brazetti, 1998).

Em 1950, pesquisadores com base em publicações datadas de 1903, sobre o uso do açúcar na Índia para melhorar a resistência da cal, e de experimentos rodoviários em 1910 usando o melaço da cana de açúcar como ligante de solo, desenvolvem um aditivo estabilizante de solo. Os fundos para a pesquisa originaram-se da U S Marine Corps, que necessitava desenvolver um processo rápido de estabilização de areias de praia para propósitos militares. O aditivo derivava de matérias primas do melaço e carvão que, polimerizadas, geram uma resina sintética do grupo dos adesivos (Brazetti, 1998).

Em 1954, o FHWA iniciou um programa de estudo da estabilização química de solos em parceria com a indústria química, com o objetivo de pesquisar aditivos eficientes. Cerca de dezenove firmas formalizaram o acordo, e outras cooperaram informalmente. O órgão rodoviário federal americano participou como consultor e

instrutor, no desenvolvimento dos ensaios adequados à avaliação laboratorial, e revisão e análise dos resultados dos ensaios realizados pelos próprios cooperantes. Tanto os órgãos rodoviários estaduais quanto as indústrias químicas estavam bastante interessados no desenvolvimento de produtos químicos para o tratamento de solos. O interesse derivou principalmente da grande expansão da rede rodoviária e da economia gerada com o tratamento de grandes volumes de solos. Com base nesses estudos, muitos produtos ou métodos de estabilização de solos foram patenteados (Brazetti, 1998).

### **2.3.2 Enzimas Patenteadas**

De acordo com um dos fabricantes, a enzima é um biocatalizador de partículas de solos, apresenta-se na forma de um composto orgânico superconcentrado, formulado para melhorar as propriedades de engenharia de materiais terrosos como o solo, aumentando a densidade, cimentação entre suas partículas, resistência à umidade e, conseqüentemente, conferindo maior estabilidade e capacidade de sua massa suportar maiores cargas (EMC, 2014).

As enzimas foram concebidas para atuarem como agentes de liberação de compostos os quais promovem a cimentação e impermeabilização de partículas de solos, em substituição aos produtos convencionais tais como cal e cimento. Quando adicionadas com água, no solo, essas enzimas catalisam reações químicas que geram produtos químicos que se entrosam nas partículas minerais (Figura 2-1), "emaranhado e soldando" todos os componentes da massa terrosa. Ações secundárias envolvem a lubrificação das partículas e a diminuição da tensão superficial da água, permitindo obter-se maiores densidades na compactação, oferecendo portanto maior resistência a cargas (EMC, 2014).

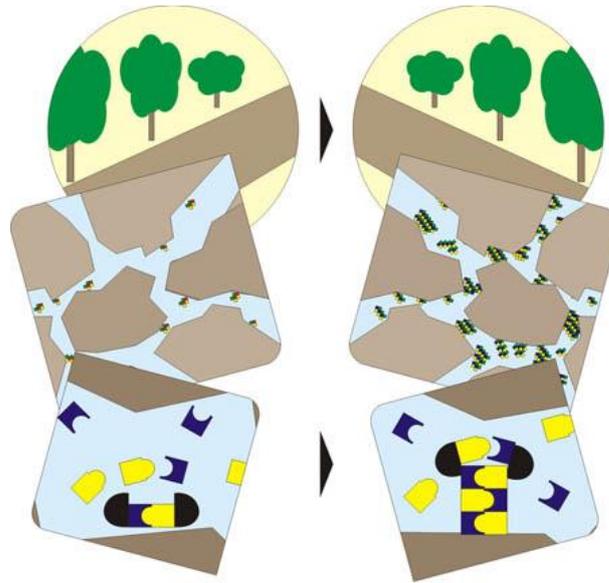


Figura 2-1 – Ilustração da reação gerada com a adição de enzima ao solo (EMC, 2014)

Outro fabricante apresenta a seguinte descrição da utilização dos aditivos em solos: “a enzima tem a capacidade de alterar a matriz do solo, depois da compactação e o solo perde sua capacidade de reabsorção de água e os benefícios mecânicos de compactação não são sequer perdidos depois que a água é reaplicada ao solo compactado. O estabilizador pode ser aplicado como sub-base de melhoramento antes da pavimentação com asfalto, estradas de terra, mineração, áreas agrícolas, estradas vicinais, áreas de controle à erosão, ruas e rodovias, pátios de estacionamento, campos de aviação, áreas de proteção ecológica, parques, trilhas e caminhos, conserto e vedação de buracos em estradas de terra” (Terrazyme, 2014).

Por se tratar de produtos patenteados, as informações a respeito da sua fabricação e ingredientes da sua composição não são divulgadas. Sabe-se que sua matéria prima é proveniente da cana-de-açúcar, mais precisamente do bagaço da cana, e que no processo de fabricação há etapas de fermentação para se chegar ao produto final.

A enzima quando adicionada ao solo atua como um catalizador, acelerando as reações que iriam demorar muito tempo para acontecer. Essa aceleração é proveniente dos processos de fermentação ao reagirem com substratos do solo. Esse substrato é formado principalmente por agentes orgânicos, ou seja, enzimas reagem muito melhor em solos com um certo teor de matéria orgânica.

Tratando-se de fermentação, uma parte muito importante do estudo é verificar as características biológicas das enzimas e das misturas estudadas. Quaisquer que sejam as condições de se trabalhar com enzimas, devem se tomar um grande cuidado, pois toda e qualquer modificação de umidade ou temperatura ambiente por exemplo, podem modificar as condições de reações das enzimas. Até mesmo as bactérias contidas no ar ou em um simples espirro no momento em que se estão trabalhando com enzimas, podem alterar o produto e estes podem não apresentar resultados satisfatórios.

Portanto enzimas são compostos que deve-se ter um cuidado especial ao manuseá-los, apesar de serem líquidos, são extremamente propensos a alterações devido ao local de trabalho e aplicação.

### 2.3.3 Pesquisas Realizadas

As poucas pesquisas encontradas, apresentam resultados da aplicação de enzimas em laboratório utilizando de ensaios convencionais de solos. Essas não mostram resultados satisfatórios devido ao fato desses ensaios serem executados em confinamentos, como é o caso do ISC (Índice de Suporte Califórnia), visto como um dos principais ensaios para determinar a capacidade de suporte de um solo.

A não eficiência desses resultados, deve-se ao fato da enzima precisar de superfície livre ao ar para que suas reações ocorram, o que se torna impossível em um ensaio confinado. Isso explica o porquê dos resultados em campo, ou em pistas de testes já executadas apresentarem bons desempenhos.

Murphy e Brazetti (2000) aplicaram um aditivo em alguns trechos experimentais de estradas de terra não pavimentadas na cidade de Curitiba-PR, com uma camada de 15cm de solo tratado aproximadamente com as recomendações do fabricante para a dosagem e monitoraram por um período de 165 dias. Os locais estudados possuíam um nível de tráfego médio de 100 a 200 veículos por dia. Após as análises concluíram o seguinte:

- Houve um aumento do valor de ISC (Índice de Suporte Califórnia);
- Aumento da capacidade de suporte de tráfego em mais de 15 vezes;
- Preserva a integridade estrutural da superfície;
- Conserva a seção natural evitando erosões;
- Elimina o aparecimento de ondulações;

- Elimina a ocorrência de marcas de pneus;
- Entre outras melhorias.

Já Amaral *et al.* (1998) executaram um trecho experimental no norte do país, na região amazônica, utilizando o mesmo produto enzimático utilizado por Murphy e Brazetti (2000) e concluíram que o produto não correspondeu significativamente às expectativas, afirmando que o maior valor obtido de ISC foi de 28%, não sendo compatível com o mínimo exigido para base (60% a 40% em regiões onde existia extrema carência de materiais).

Porém, segundo o mesmo estudo, em um dos trechos executados ocorreu uma variação percentual significativa de ISC, neste trecho foi utilizada uma concentração de 2x, portanto, duas vezes mais produto que nos demais trechos analisados. Mesmo os valores ficando razoavelmente longe dos especificados, ocorreu uma variação significativa na capacidade de suporte daqueles trechos, fato este comprovado visualmente no terreno, o qual permaneceu inalterado apesar das chuvas seguidas de tráfego pesado. Embora este mesmo acréscimo tenha sido observado no trecho adjacente, executado com o mesmo solo, sem a adição da enzima.

Portanto, no Brasil, existem relatos positivos da utilização das enzimas em campo. Os fabricantes enumeram diversas obras utilizadas positivamente, porém quando os ensaios são realizados em laboratório, os resultados ficam aquém dos apresentados em campo, não apresentando valores compatíveis quando executados em ensaios comuns de mecânica dos solos e pavimentação.

## 2.4 Considerações sobre a Revisão Bibliográfica

Por se tratar de um assunto pouco explorado por pesquisadores do mundo todo, carecendo de publicações a respeito do tema pesquisado, a revisão bibliográfica se manteve principalmente na estabilização de solos com outros materiais que são importantes para se entender esse estudo e em uma breve descrição a respeito das enzimas patenteadas a fim de se esclarecer qual o tipo de produto que está sendo aplicado ao solo para obter o seu melhoramento.