

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1. Considerações Iniciais

O uso de resíduos constitui uma área de estudo em expansão, em diferentes lugares do mundo, principalmente devido às perspectivas de racionalização e conformidade ambiental que o tema envolve.

Neste contexto é importante destacar diversos tipos de cinzas como, as cinzas obtidas de queima de carvão, queima de resíduos sólidos urbanos ou outros tipos de resíduos, cinzas de bagaço de cana de açúcar, etc, que podem ser usados como material de reforço para o solo pela apresentação de características pozolânicas na sua estrutura de composição, além de promover mecanismos de melhora e otimização de desempenho de solos em qualquer tipo de aplicação (obras rodoviárias, elementos de fundações, camadas de aterros sanitários, etc).

Um caso histórico é apresentado por Cerati (1979, apud Rosa, 2009) onde pode-se destacar o emprego de solo vulcânico para tornar mais resistentes à água as argamassas de cal destinadas ao revestimento de cisternas, na ilha de Santorin, já no século VII a. C. Ainda segundo este autor, pode-se observar que 1936 é a data considerada como marco para a utilização de cinzas volantes provenientes de termoelétricas como agente cimentante no concreto, nos EUA.

Cinzas provenientes de incineração de resíduo sólido urbano têm sido estudadas para usos como agentes estabilizantes de solos e em camadas de cobertura de rejeitos (Lee et al. 1996 apud Rosa, 2009). Misturas contendo esse material vêm se constituindo em alternativas viáveis para essas aplicações, uma vez que suas características físicas, químicas e mecânicas são bastante semelhantes aos das cinzas volantes, por exemplo, a incineração de resíduos sólidos, no Havai, EUA, tem sido realizada com propósitos de geração de energia, esse procedimento visa, principalmente, reduzir o volume total dos resíduos sólidos urbanos.

É importante o conhecimento de diferentes tipos de usos e novas técnicas da engenharia para reaproveitar as cinzas obtidas da queima de resíduo sólido urbano, para contribuir com novas soluções aos problemas da engenharia, com menor custo e preservando o meio ambiente ao mesmo tempo.

## **2.2.**

### **Resíduo Sólido Urbano e seu impacto ao Meio Ambiente**

O resíduo sólido urbano (RSU), vulgarmente denominado por lixo urbano, é resultante da atividade doméstica e comercial da população. A sua composição varia, dependendo da situação sócio-econômica e das condições e hábitos de vida de cada um. Esses resíduos podem ser classificados das seguintes maneiras: matéria orgânica, papel e papelão, plásticos, vidro, metais e outros (roupas, óleos de cozinha e óleos de motor, resíduos eletrônicos).

Existem também alguns tipos de resíduos diferentes dos comumente encontrados e que são denominados tóxicos. Estes necessitam de um destino especial para que não contaminem o ambiente e os seres que nele habitam, como aerossóis vazios, pilhas, baterias, lâmpadas fluorescentes, restos de medicamentos e outros.

Segundo a nova Lei de Resíduos Sólidos (Lei N° 12.305, de 2 de Agosto de 2010), o lixo deixa de ser lixo para virar resíduos sólidos ou rejeitos. O resíduo sólido é um material valioso para ser usado novamente na cadeia produtiva, ser reaproveitado, reciclado e não mais descartado e o rejeito é o resíduo sólido também, mas depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processo tecnológico disponível e economicamente viável.

Então, existe uma responsabilidade compartilhada com o setor público e privado, sociedade civil, cidadãos e catadores de material reciclável para que façam parte de um mesmo objetivo que é a redução ou reaproveitamento dos resíduos sólidos urbanos; dependerá muito da união de todos para o sucesso ou fracasso da lei.

A lei prevê desde Agosto do ano 2012 a entrega, por todos os municípios do país, de seus planos de gestão de resíduos. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA), por volta de 560 municípios, ou 10% do total das cidades brasileiras, concluíram e entregaram esses planos. Os municípios que perderam o

prazo não terão direito a receber recursos federais e renovar novos contratos com a esfera federal para o setor. Essa questão fica, portanto, para as novas administrações que foram eleitas em Outubro do 2012 e assumiram seus cargos em 2013.

Conforme pesquisa da Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2011), em cerca de 400 municípios, que representam o 51% da população urbana total do Brasil, o problema se deve muito à falta de pessoal qualificado para atender aos requisitos previstos na lei. A Tabela 2.1 apresenta a quantidade de municípios pesquisados por Regiões.

Tabela 2.1 – Municípios Pesquisados por Regiões. (ABRELPE, 2011)

<b>Região</b>	<b>Quantidade de Municípios Pesquisados</b>
Norte	50
Nordeste	123
Centro-Oeste	32
Sudeste	132
Sul	63
<b>Total</b>	<b>400</b>

A previsão do fim dos lixões até 2014, em todas as cidades brasileiras, é uma tarefa com enorme dificuldade em se tornar realidade, se a maioria das cidades permanecerem distantes dessa discussão. No lugar dos lixões, os resíduos só poderão ser enviados para aterros sanitários. Mas a realidade atual, segundo o Ministério do Meio Ambiente (2011), é a de que ainda existem mais de 3 mil lixões no Brasil, sendo que nada menos de que 60% dos municípios do país despejam lá seus resíduos.

O Brasil produziu cerca de 178 mil toneladas de lixo domiciliar por dia no ano (ABRELPE, 2011), o que representa mais de um quilo por pessoa. Ao menos 90% de todo esse material pode ser reaproveitado, reutilizado ou reciclado. Apenas 1% acaba sendo aproveitado para ter um destino mais nobre do que o de se degradar e contaminar o nosso ambiente. Os especialistas calculam que o Brasil deixa de ganhar ao menos R\$ 8 bilhões por ano ao não reciclar toda essa grande quantidade de resíduos gerados no país (ABRELPE, 2011). A Tabela 2.2 apresenta a quantidade de RSU coletada e a Figura 2.1 apresenta a destinação final de RSU por dia.

Tabela 2.2 – Quantidade de RSU Coletada por regiões e Brasil. (ABRELPE, 2011)

Região	2010	2011	
	RSU Total (t/dia)	Equação	
Norte	10623	RSU = 0,000293(pop urb/1000) + 0,801841	
Nordeste	38118	RSU = 0,000214(pop urb/1000) + 0,875800	
Centro-Oeste	13967	RSU = 0,000266(pop urb/1000) + 0,938780	
Sudeste	92167	RSU = 0,000155(pop urb/1000) + 0,862273	
Sul	18708	RSU = 0,000306(pop urb/1000) + 0,716148	
<b>Total</b>	<b>173583</b>		
		<b>177995</b>	

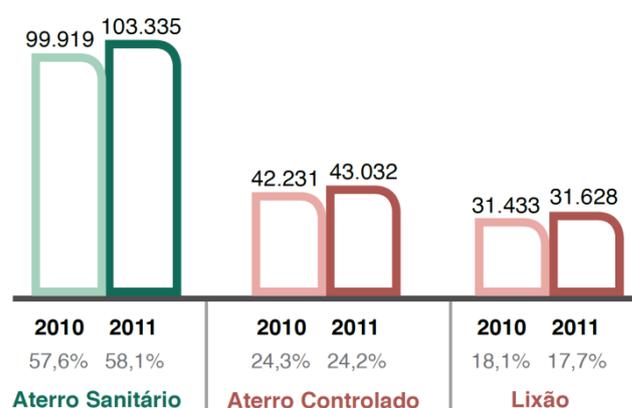


Figura 2.1 – Destinação final de RSU em toneladas por dia. (ABRELPE, 2011)

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, divulgado pela ABRELPE (2011), a quantidade de resíduos sólidos gerados no Brasil totalizou 61,9 milhões de toneladas neste ano, 1,8% a mais do que no ano anterior. O crescimento na “produção” desses resíduos, de 2010 para 2011, foi duas vezes maior do que o aumento da população, que ficou em torno de 0,9% no período. A Figura 2.2 apresenta a geração de RSU nos anos 2010 e 2011.

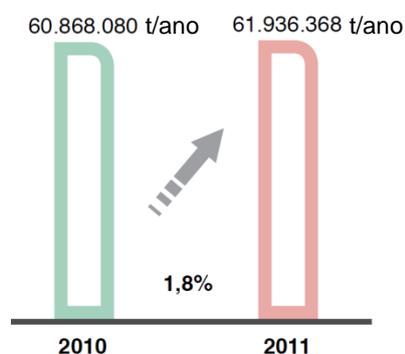


Figura 2.2 – Geração de RSU em toneladas por ano. (ABRELPE, 2011)

O estudo revela também que, em 2011, foram coletados 55,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos, 2,5% a mais que do ano 2010. Sendo que 42% desses resíduos foram parar em locais inadequados como lixões e aterros controlados, 1,4% a mais que do ano 2010. E, ainda pior, cerca de 10% de tudo o que é gerado acaba tendo destino ainda pior em terrenos baldios, córregos, lagos e praças. A Figura 2.3 apresenta a coleta de RSU e sua destinação final.

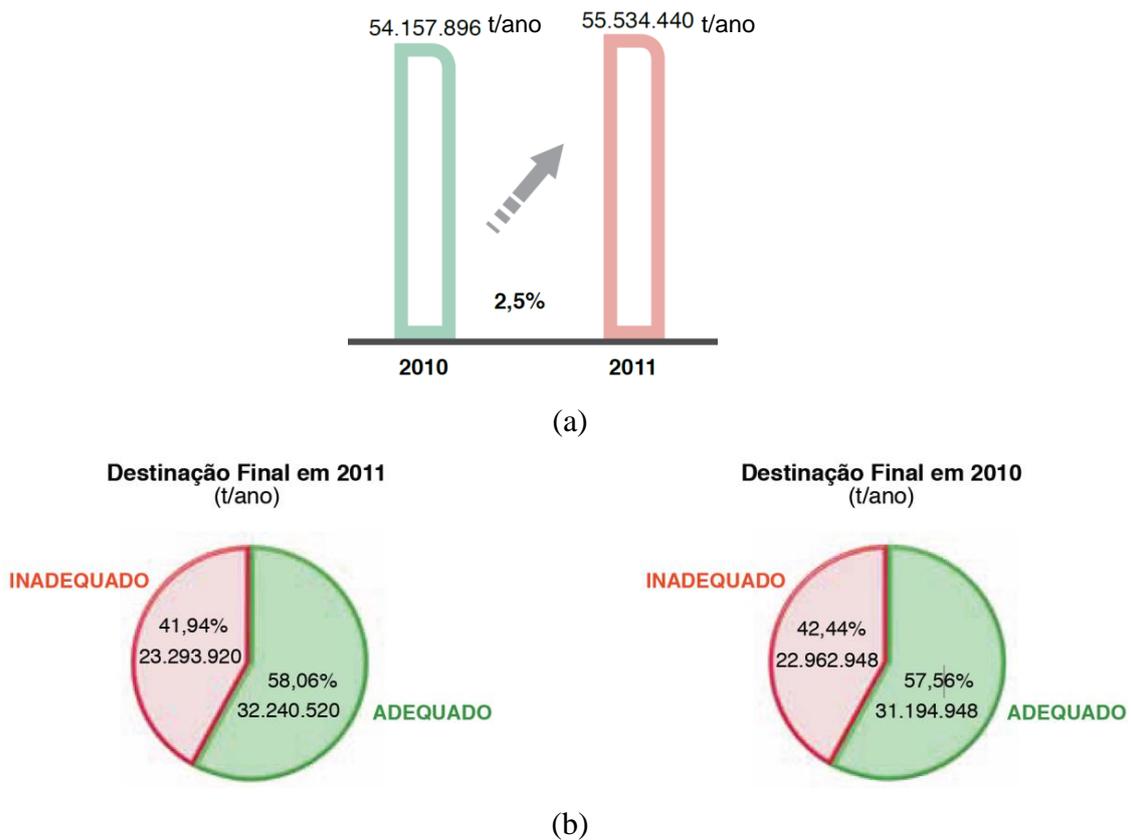


Figura 2.3 – (a) Coleta de RSU em toneladas por ano. (b) Destinação final do RSU (ABRELPE, 2011)

Segundo os dados obtidos pela ABRELPE (2011), nota-se que a geração do RSU tem um aumento significativo com o tempo. O governo do Brasil promulgou uma lei que tem como mandamento fundamental a reutilização deste desperdício. Um tipo de reutilização é apresentado nesta pesquisa, como cinzas de RSU, que pode servir como estabilizante ao misturá-lo com o solo.

A produção deste tipo de cinzas de RSU, volante e de fundo, bem como seu processo de incineração é apresentado no Capítulo 3 desta dissertação.

### 2.3. Aproveitamento das Cinzas de RSU

Segundo Ferreira et al. (2003) para identificar a área potencial para a aplicação das cinzas volantes de RSU e avaliar cada uso individual existem três fatores principais: adequação para o processamento, desempenho da técnica e o impacto ambiental.

O primeiro fator, a adequação para processamento, depende das características físico-químicas das cinzas volantes, tais como o tamanho de partícula e as propriedades químicas, que podem constituir uma limitação para um determinado processo (embora em alguns casos estas características possam ser ajustadas em conformidade com os requisitos de processamento). O desempenho da técnica é o segundo fator considerado. Mesmo que a cinza volante possa ser facilmente processada, o produto final não pode ser usado, a menos que ela apresente boas propriedades técnicas. Por fim, o terceiro fator considerado é o impacto ambiental. A toxicidade não necessariamente desaparece com a valorização da cinza volante. Os riscos impostos sobre o meio ambiente, por cada eventual aplicação, deve ser cuidadosamente pesado contra da criação de novas fontes de poluição em outro lugar. (Ferreira et al. 2003)

Com estes três fatores, Ferreira et al. (2003) apresentam a Tabela 2.3 com nove aplicações potenciais agrupadas em quatro categorias principais.

Tabela 2.3 - Uso potencial de cinza volante de RSU. (Ferreira et al, 2003)

Categoria	Aplicação
Materiais de Construção	Produção de cimento
	Concreto
	Cerâmicas
	Vidro e cerâmicas de vidro
Geotécnica	Pavimento
	Aterro
Agricultura	Condicionador do solo
Diversos	Absorvente
	Condicionamento de lodo

Neste trabalho se apresenta o uso potencial da cinza volante de RSU para a categoria de Geotecnia, como por exemplo, camadas de aterros sanitários, aterros sobre solos moles, estabilização de taludes.

Pesquisas sobre a utilização de cinzas de 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 motivos de reaproveitamento de resíduos e da grande quantidade que é gerada a cada ano no Brasil e no mundo inteiro, procurando um uso não contaminável e de baixo custo.

Segundo Ferreira et al. (2003) a cinza volante de RSU pode ser aplicada no pavimento como um substituto da areia na base ou sub-base de cimento estabilizado, no entanto, tem questões ambientais relacionadas com a contaminação do solo e das águas subterrâneas por substâncias liberadas a partir da base do pavimento. Estudos ambientais feitos na Holanda, do produto obtido após a pré-lavagem seguido pela cimentação têm como resultado satisfazer os padrões para materiais de construção. Os estudos concentram em questões ambientais e também incluem uma estimativa dos custos globais, resultando que a pré-lavagem somada à aplicação é menos cara do que a eliminação da cinza como material perigoso.

Ferreira et al. (2003) comenta que uma aplicação potencial para a cinza volante de RSU está na estabilização do solo, como um substituto de cal ou cimento, aproveitando suas características pozolânicas, os quais são utilizados na prática comum quando o solo de fundação não apresenta as propriedades geotécnicas desejáveis. Ao adicionar cal ou cimento ao solo se reduz a compressibilidade e se aumenta a resistência ao cisalhamento, melhorando assim as propriedades de engenharia. A densidade da cinza volante de RSU é menor do que outros materiais de enchimento usados na construção de aterros, valores típicos de densidade para cinza volante de RSU são 1,7 – 2,4, enquanto a areia é 2,65.

Goh e Tay (1991, apud Ferreira et al. 2003) investigaram a possibilidade de utilizar as cinzas volantes de RSU em aplicações geotécnicas como substituto de material de colocação no aterro e encontraram que a cinza volante de RSU apresentou propriedades pré-requisitos para este tipo de aplicação como alta resistência e livre-drenagem, típicos de material granular, e menor densidade de compactação que os enchimentos de terra convencional. Também avaliaram a possibilidade de utilização da cinza volante de RSU na estabilização do solo (substituindo a cal ou cimento), descobrindo que misturas de solo-cinza volante de

RSU apresentaram melhora da resistência ao cisalhamento e menor compressibilidade em comparação com outros solos não tratados. O principal problema decorrente desta aplicação é o mesmo que na base de estrada, isto é, a possibilidade de contaminação do solo e das águas subterrâneas a partir da construção de aterro. Neste caso Goh e Tay (1991, apud Ferreira et al, 2003) compararam ensaios de lixiviação para cinzas volantes de RSU com lixiviação de cinzas volantes de RSU estabilizadas com cal ou cimento e os resultados foram que as cinzas volantes de RSU não estabilizadas excederam os padrões de qualidade, enquanto, as cinzas volantes de RSU estabilizadas apresentaram valores mais baixos. No entanto, limitaram seu estudo à lixiviação de cinzas volantes de RSU e não observaram o que pode acontecer nas misturas solo-cinza volante, o que poderia dar uma indicação mais precisa do comportamento de lixiviação de aterros construídos com esses materiais.

A Tabela 2.4 apresenta o resumo dos principais aspectos com relação as aplicações da cinza volante de RSU.

Tabela 2.4 - Comparação de diferentes opções para a aplicação de cinza volante de RSU. (Ferreira et al. 2003)

Aplicação	Estado atual	Nível de aplicação	Pré-tratamento	Valorização	Possíveis usos	Comportamento lixiviante	Vantagens principais	Possíveis desvantagens
Pavimento	Provado	Médio	Exigido	Baixo	Enchimento /Cimentoso	Baixo	Rentável (menos caro do que a eliminação)	-
Aterro	Provado	Baixo	Aconselhado	Baixo	Enchimento /Cimentoso	Médio/Alto	Fácil de implementar; compactação de solo baixa	Lixiviação excede os padrões de água

O método usado por Ferreira et al. (2003) para identificar a área potencial para a aplicação das cinzas volantes de RSU, também poderia ser usado para as cinzas de fundo de RSU, com a finalidade de ter um maior conhecimento da aplicabilidade deste tipo de cinza.

Segundo Forteza et al. (2004) desde que começou a incineração de RSU, outras possibilidades além da disposição em aterros de incineração de resíduos têm sido procuradas. A maioria das iniciativas nesse sentido tendem a usar esses resíduos como agregado substituto em pavimentos rodoviários, aterros e outros elementos de construção. Para se ter uma utilização eficaz das cinzas de fundo de RSU, alguns aspectos devem ser considerados:

- As cinzas de fundo provenientes da incineração de RSU são um material tão altamente heterogêneo e variável que os resultados não

podem garantir o comportamento da cinza obtida a qualquer momento e sob qualquer condição. Portanto, um controle contínuo do produto químico principal e propriedades de engenharia (significativamente lixiviados, distribuição de tamanho de partícula, capacidade de carga, etc.) tem de ser realizado, e diferentes planos de amostragem que permitam cobrir uma gama maior de eventualidades, referente ao resíduo da incineração e às condições de operação do incinerador, deve ser realizada;

- Em segundo lugar, a partir de alguns resultados, pode-se deduzir que uma gestão mais rigorosa de coleta seletiva poderia dar origem a uma alteração significativa na composição da cinza de fundo. Assim, uma redução da quantidade de vidro incinerado iria reduzir o volume da cinza de fundo, o qual o vidro é o componente dominante. Isto deveria ser destacado, pois a cinza de fundo resultante se tornará em pó fino e as aplicações a serem consideradas seriam consideravelmente contidas;
- Finalmente, o comportamento da cinza de fundo, em pavimentação e em condições reais pode ser apenas avaliado através da realização de seções experimentais, onde o comportamento a longo prazo tem que ser avaliado. Neste sentido, é importante sublinhar a ordem da Regulação do Governo da Catalunha, Espanha, na avaliação em cinzas de fundo, o que foi tomado como referência e estabelece limitações para o uso de cinzas, que se referem basicamente à sua utilização em zonas de real ou potencial contato com água, a fim de limitar as emissões de lixiviados.

Becquart et al. (2008) realizou ensaios de carga cíclica e ensaios triaxiais na cinza de fundo de RSU pura e com adição de um agente de ligação que é o cimento com a visão de conhecer as características mecânicas desta cinza pura e seus possíveis usos na pavimentação. Os resultados revelam um comportamento mecânico semelhante à materiais densos convencionais (areias, materiais granulares) e uma dependência da pressão média aplicada que é característica do comportamento mecânico de meios granulares. Destaca-se que nas suas características mecânicas da cinza de fundo de RSU pura, os resultados

apresentaram uma elevada rigidez, um índice de compressão baixa e um ângulo de atrito alto o que dá ao material uma utilização potencial semelhante ao cascalho natural classicamente usado na pavimentação. Os ensaios triaxiais drenados realizados na cinza de fundo de RSU tratado com cimento (1% - 5%) apresentaram como resultado um comportamento mais frágil, típico de material de base de cimento (por exemplo, argamassa ou concreto), os ângulos de atrito interno aumentam na resistência de pico, bem como em grandes deformações, estas diferenças parecem aumentar com o teor de cimento.

Vizcarra (2010) destaca que a quantidade de usinas de RSU ainda é bem menor do que as que utilizam carvão mineral. O comportamento relatado das cinzas 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. No Brasil não foram detectados relatórios sobre a utilização do tipo de cinzas de RSU na pavimentação rodoviária, durante sua pesquisa.

Dentro desse contexto, realizou um estudo com o objetivo de avaliar a aplicabilidade das cinzas de RSU em camadas de base de pavimentos rodoviários através da mistura das cinzas a um solo argiloso não-laterítico regional. Foram realizados ensaios de caracterização física, química e mecânica para o solo puro e para o mesmo com adição de diferentes teores de cinzas (20% e 40%), além disso, foram realizados ensaios ambientais de lixiviação e solubilização visando o perigo que poderia causar o uso de cinzas geradas da incineração de RSU.

As misturas com inserção de cinzas apresentaram um comportamento mecânico compatível com as exigências de um pavimento de baixo volume de tráfego. Os parâmetros de compactação são influenciados pelo teor e tipo de cinza adicionado, sendo que para cada teor deve-se obter uma curva de compactação. Conclui que para o ensaio de módulo de resiliência o teor de cinza pode melhorar ou piorar o comportamento do solo e outros fatores que influenciam o comportamento resiliente são: o teor de umidade, o tempo de atraso da compactação após a mistura dos materiais e o tempo de cura, o qual tem influência favorável.

Os ensaios de CBR no solo puro apresentaram que não poderia ser usado em base de pavimentos, mas com adição de cinza os resultados melhoraram e com adição de um teor de 40% de cinza volante conseguiu reduzir a expansibilidade do solo até menos de 0,5%, viabilizando assim seu emprego em base de pavimentos.

Dentro dos ensaios químicos avaliou ensaios de lixiviação e solubilização para as cinzas (volante e de fundo) puras e a mistura com 40% de cinza volante que conseguiu melhor comportamento em comparação com as outras misturas estudadas. Os resultados para o ensaio de lixiviação apresentaram que segundo o anexo F da norma ABNT/NBR 10004:2004, a cinza volante, cinza de fundo e a mistura com 40% de cinza volante de RSU são Classe IIA- Resíduos Não Perigosos e para o ensaio de solubilização segundo o anexo G da norma ABNT/NBR 10004:2004 são Resíduos Não Inertes o que é um aporte ainda mais importante em comparação com o trabalho de Goh e Tay (1991).

Fontes (2008) conclui no seu estudo que a argamassa testada contendo cinza volante do resíduo sólido urbano apresentou resultados mecânicos, físico e de durabilidade superiores à referência. A presença da cinza, provavelmente, promoveu o acréscimo destes parâmetros através da ação física de refinamento dos poros. A distribuição de poros mostrou a redução dos grandes capilares, proporcionando o acréscimo no volume dos médios e pequenos capilares num concreto de alto desempenho.

#### **2.4. Estabilização de solos**

A estabilização de solos é o procedimento que visa a melhoria e estabilidade das propriedades dos solos (resistência, deformabilidade, permeabilidade, etc). O tipo de estabilização pode ser das seguintes formas: Físico-Químico; Mecânico (estabilização granulométrica, compactação).

De acordo com Vendruscolo (1996) a estabilização de solos é uma técnica antiga desenvolvida principalmente para pavimentação, porém, tal conjunto de processos tem sido largamente utilizados, não somente na área de pavimentos, mas em diversas outras áreas, como fundações, contenção de taludes e barragens.

Segundo Baptista (1976), estabilizar o solo é utilizar um processo qualquer de forma a tornar este solo estável para os limites de sua utilização e ainda fazer com que esta estabilidade permaneça sob as ações das cargas exteriores e ações climáticas variáveis.

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.

Segundo Das (2001) o solo em um lugar de construção não é sempre totalmente adequado para suportar estruturas como pontes, aterros, etc, então se escolhe um tipo de estabilização do solo, dependendo dos custos e o tempo, para melhorar a resistência do solo e possa cumprir com as diferentes especificações das estruturas. Por exemplo, em um depósito de solo granular, o solo *in situ* pode estar solto e apresentam um grande recalque elástico, então se recomenda que ele deve ser compactado para incrementar seu peso específico e assim, sua resistência ao cisalhamento. Outro exemplo, o solo pode apresentar camadas superiores de solo não adequado para fundação, então deve se retirar e se substituir com outro tipo de material que apresente melhor comportamento para uma fundação. O solo usado como enchimento deve estar bem compactado para suportar a carga estrutural desejada. Outro tipo de agente estabilizador pode ser a cal, que produz uma alteração considerável em solos expansivos como argilas.

De acordo com Santos et al. (1995, apud Lopes, 2011), a 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. Já a estabilização mecânica por correção granulométrica corresponde à mistura do solo com um ou mais solos e ou outros materiais, que possibilitem a obtenção de um novo “produto” com propriedades adequadas aos requisitos de projeto.

Segundo Horpibulsuk et al. (2012) uma das técnicas utilizadas extensivamente para a melhoria dos solos problemáticos em estados relativamente secos é a compactação do solo *in situ*, misturando-se com a pasta de cimento. Uma vantagem desta técnica é que a resistência adequada pode ser conseguida em um curto espaço de tempo. Os efeitos de alguns fatores de influência (ou seja, teor de água, cimento, tempo de cura e energia de compactação) sobre a microestrutura e característica de engenharia de solos estabilizados com cimento têm sido amplamente pesquisados. Para reduzir o custo da estabilização, a substituição do cimento por resíduos, como cinzas volantes, cinzas de cascas de arroz, e cinzas de biomassa (cinzas de combustão de material orgânico), têm sido amplamente aplicada na prática. Cinzas volantes dispersam os aglomerados de solo-cimento

em aglomerados menores, aumentando assim a superfície ativa para a hidratação e as reações pozolânicas.

De acordo com Horpibulsuk et al. (2012) o processo de hidratação e da reação pozolânica em argila estabilizada com cimento pode ser explicado da seguinte forma: quando a água entra em contacto com o cimento, a hidratação do cimento ocorre rapidamente. Os produtos de hidratação principais são silicatos de cálcio hidratado (CSH), aluminatos de cálcio hidratado (CAH), silicatos de alumínio hidratado de cálcio (CASH), e cal hidratada  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ . Esta hidratação conduz a um aumento do valor de pH dos poros da água, que é causada pela dissociação de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . As bases fortes dissolvem a sílica e alumina a partir do solo e cinza volante de uma maneira semelhante à reação entre um ácido fraco e uma base forte. A sílica hidratada e alumina gradualmente reagem com os ions de cálcio libertados da hidrólise de cimento a partir de compostos insolúveis (produtos secundários de cimento), e endurecem com o tempo. Consequentemente, do ponto de vista econômico e ambiental, alguns resíduos podem ser utilizados em conjunto com materiais pozolânicos, tais como cinzas volantes, as cinzas de biomassa, e cinzas de cascas de arroz para desenvolver um material de cimento. Resíduo de carboneto de cálcio (CCR) é um produto do processo de produção de acetileno, que contém principalmente hidróxido de cálcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Foi relatado que em 1995-1998, a demanda de carboneto de cálcio para produzir gás acetileno, na Tailândia, foi 74.000 toneladas. Essa demanda é contínua, aumentando a cada ano. Devido à sua elevada basicidade, CCR foi dificilmente utilizado e tudo foi colocado sob a forma de lama. Após ser seco ao sol durante alguns dias, a forma de suspensão torna-se sob a forma seca.

Bleskina (2005) apresenta uma forma de estabilização de solos arenosos com resina de ureia onde os ácidos clorídricos e oxálico se utilizam principalmente como endurecedores. O Instituto de Pesquisa Científica de Fundações e Estruturas Subterrâneas da Rússia tem desenvolvido novas formulas à base de resina de ureia e os seguintes endurecedores complexos:  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4) + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  e  $\text{FeCl}_3 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . É conveniente utilizar a resina de ureia para a estabilização do solo apenas nos casos em que outros métodos utilizados são ineficazes. Por exemplo, ao realizar poços na terra flutuante e quando a carga sobre as fundações de um edifício estão aumentadas ou a capacidade de suporte

do solo é reduzida na base de fundação, bem como, quando surge a necessidade de efetuar a estabilização do solo sem interromper o trabalho em uma loja.

Outro tipo de estabilização de solo é proposto por Lisbona et al. (2012) que utiliza lamas de papel calcinado (LPC) e cimento. Os ensaios foram realizados em duas fases, a primeira foi no laboratório e a segunda foi em campo, envolvidos na estabilização *in situ* de 250 m de base pavimentação utilizando métodos de mistura a seco. A capacidade de carga do solo estabilizado foi determinada em laboratório e a densidade da base de pavimentação foi medido no campo após a compactação e deformações aos 7 dias. A evolução da resistência à compressão simples foi medida ao longo de 90 dias. Os resultados apresentaram que a LPC pode ser utilizada como um ligante para a estabilização de solos com teores superiores a 3% em peso do solo a ser estabilizado. A mistura de cimento Portland com a LPC leva a melhora mecânica da estabilização de solos. Estima-se que, maiores ganhos de resistência a compressão podem ser obtidos com misturas da LPC com teores de cimento de aproximadamente 25:75 (em peso).

#### **2.4.1. Solo-Cal**

A utilização da cal como agente estabilizante de solos é o método de estabilização química mais conhecido e com diferentes tipos de aplicações, como por exemplo, em aterros ou pavimentações. Suas propriedades como aditivo do solo, melhoria na resistência, deformabilidade e permeabilidade, são conhecidas desde a antiguidade.

Utiliza-se solo-cal quando não se dispõe de um material ou combinação de materiais com as características de resistência, deformabilidade e permeabilidade adequada ao projeto.

A estabilização com cal é comumente empregada na construção de estradas, sendo geralmente utilizada como base ou sub-base de pavimentos. Outra importante aplicação do solo-cal tem sido na proteção de taludes contra a erosão em obras hidráulicas. A técnica de melhoramento do solo também pode ser utilizada nas fundações de edificações de pequeno porte, em solos com baixa capacidade de suporte ou que apresentam baixa estabilidade volumétrica. Tais condições são problemáticas na medida em que podem causar severas patologias

na edificação. A cal tem pouco efeito em solos altamente orgânicos e também em solos com pouca ou nenhuma quantidade de argila. Sendo mais eficiente em solos argilosos, podendo ser mais efetivo que o cimento em pedregulhos argilosos (Ingles & Metcalf, 1972).

Segundo Rosa (2009), argilas expansivas apresentam uma resposta mais rápida à adição de cal. Bell (1996) constatou um rápido aumento inicial na resistência à compressão simples de um solo contendo montmorilonita, com pequenos teores de cal (2% a 3%). Além disso, para este solo, 4% de cal foi suficiente para atingir a resistência máxima, enquanto que para um solo rico em caulinita, a resistência máxima foi atingida com teores entre 4 e 6%. Entretanto, o nível de resistência alcançado pela mistura solo caulinítico mais cal foi sensivelmente superior ao da outra.

De acordo com Lopes (2011), as características do solo a ser melhorado e o uso e características mecânicas desejadas da mistura são fatores determinantes para a quantidade de cal necessária ao tratamento de solos e pode ser classificado em duas categorias gerais:

- Modificação do Solo: redução da plasticidade, melhoria da trabalhabilidade e aumento da resistência à deflocação e erosão;
- Estabilização do Solo: aumento definitivo da resistência e rigidez do solo devido a ocorrência de reações pozolânicas.

A Tabela 2.5 apresenta um indicativo da quantidade de cal a ser adicionada para a estabilização de acordo com o tipo de solo.

Tabela 2.5 – Previsão da quantidade de cal em função do tipo de solo. (Ingles & Metcalf, 1972)

<b>Tipo de Solo</b>	<b>Teor de Cal para Modificação</b>	<b>Teor de Cal para Estabilização</b>
Pedra finamente britada	2 a 4	Não recomendado
Pedregulho argiloso bem graduado	1 a 3	≥3
Areias	Não recomendado	Não recomendado
Argila arenosa	Não recomendado	≥5
Argilosa siltosa	1 a 3	2 a 4
Argilas	1 a 3	3 a 8
Solos orgânicos	Não recomendado	Não recomendado

Segundo Lopes (2011), O tratamento de solos com cal não é eficiente em solos com baixo ou nenhum teor de argila, uma vez que o melhoramento das propriedades mecânicas é produzido pelas reações entre a cal e os minerais argílicos.

Guimarães (2002, apud Lopes, 2011) descreve os quatro tipos básicos das reações que ocorrem em misturas solo-cal: carbonatação, troca catiônica, floculação-aglomeração e finalmente, reações pozolânicas. A carbonatação, de “ação imediata”, ocorre quando o dióxido de carbono presente nas minúsculas bolhas de ar existentes nos poros do solo e da cal hidratada entra em contato com a matriz solo-cal, refazendo o carbonato de cálcio, gerando o aparecimento de grãos de grandes dimensões, entrelaçando os demais corpos sólidos do solo e compactando o sistema.

Inglês & Metcalf (1972), mostram que a resistência à compressão simples aumenta linearmente com a quantidade de cal até certo nível, e a partir deste ponto, a taxa de acréscimo de resistência diminui com a quantidade de cal, devido à lenta cimentação, dependendo do tipo de solo, como mostrado na Figura 2.4.

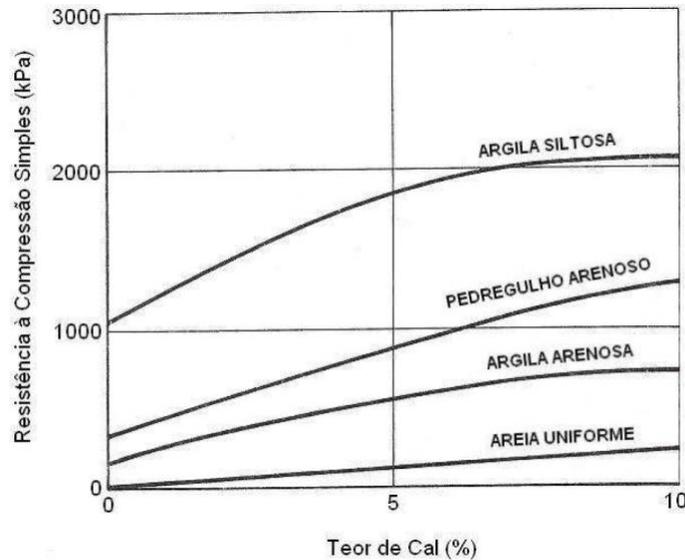


Figura 2.4 – Efeito do teor de cal sobre a resistência a compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias. (Inglês & Metcalf, 1972)

Mateos (1964 apud Rosa, 2009) afirmou que a resistência das misturas é fortemente influenciada pela temperatura de cura, recomendando a construção de camadas de pavimento estabilizadas com cal no início do verão. Carraro (1997,

apud Rosa, 2009) verificou que a energia de compactação influencia e é de fundamental importância na determinação da resistência mecânica de solos tratados com cal de carbureto e cinza volante.

Al-Rawas et al. (2005) estudou a adição de combinações de cal e cimento, Sarooj (que é um termo local para uma pozolana artificial produzido pela queima, calcinação, da argila) e tratamento térmico na estabilização do solos expansivos em Omã que é um país situado na Arábia. Foram realizados ensaios de caracterização física e química para avaliar a expansão do solo com a adição de cal, cimento, Sarooj e tratamento térmico. Os resultados indicaram que o limite de liquidez de todas as amostras tratadas, com exceção das amostras tratadas com 5% de cal mais 3% de cimento, mostraram um aumento inicial, seguidos de uma redução gradual. As amostras tratadas com 3% de cal, 3% de cimento e 3% de Sarooj mostrou um aumento inicial do índice de plasticidade, no entanto, com outras adições o índice de plasticidade diminuiu gradualmente. Todos os estabilizadores (cal, cimento) causaram uma redução na expansão de pressão e expansão percentual. Com a adição de 6% de cal, as expansões de pressão e percentual foram reduzidas à zero. O estudo também apresentou que a calcinação do solo a 740°C e 780°C, durante 30 e 60 minutos resultou na redução do potencial de expansão para zero.

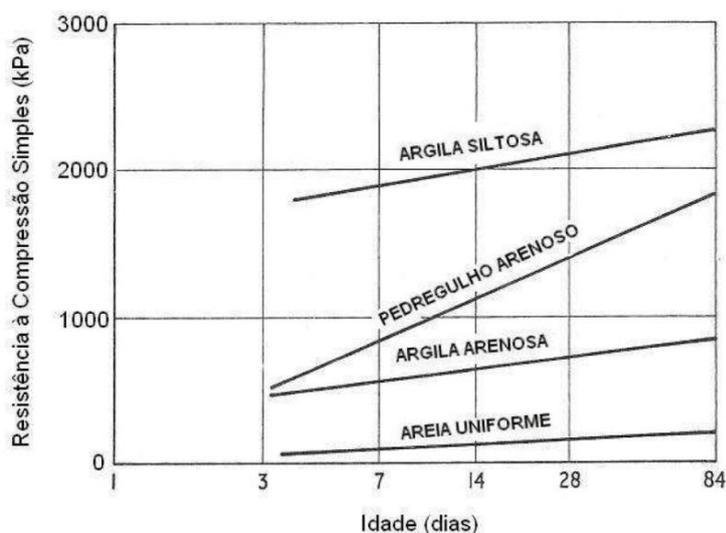


Figura 2.5 – Efeito do tempo de cura sobre a resistência a compressão simples para alguns solos estabilizados com cal. (Inglês & Metcalf, 1972)

Inglês & Metcalf (1972) apresentam um estudo sobre a influência do tempo de cura em diferentes tipos de solos, observaram taxas de ganhos de resistência maiores em pedregulhos arenosos, conforme a Figura 2.5.

O comportamento do solo com diferentes tipos de cal é diverso e é sujeito a diferentes variáveis como: tempo de cura, teor de cal, reações pozolânicas, quantidade de água, temperatura de cura, presença ou não de matéria orgânica.

Junior (2011) realizou um estudo com o objetivo de validar a relação volume de vazios/volume de cal na estimativa da resistência à compressão simples e triaxial, comportamento tensão-dilatância e rigidez inicial de um solo tratado com cal curado por períodos longos e quantificar a influência da adição de resíduos de diferentes potenciais de reatividade no comportamento mecânico do solo-cal. Foram realizados ensaios de compressão simples e triaxial, medidas de sucção matricial e medidas de  $G_0$  através da técnica de *bender elements*. Os resultados mostram que a adição de cal, mesmo em pequenas quantidades, promoveu ganhos de resistência nos compósitos estudados. Na faixa de teores estudados (3% até 11%), a resistência à compressão simples aumentou não-linearmente com o aumento da quantidade de cal e aumentou potencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada, efeito observado em todos os tempos de cura estudados (7, 15, 28, 90 e 180 dias). A variação do teor de umidade de moldagem não influenciou consideravelmente a resistência à compressão simples do solo-cal com resíduo de britagem, independentemente do tempo de cura. Quanto maior a cimentação, tensão confinante efetiva de ensaio, tempo de cura e menor valor da relação vazios/cal das amostras, maior a tensão desvio atingida, para todos os compósitos estudados.

#### **2.4.2. Solo-Cimento**

Segundo Das (2001) o cimento é cada vez mais utilizado como estabilizador para solos, principalmente na construção de pavimentos e aterros. A primeira construção controlada com solo-cimento em EUA foi realizada perto de Johnsonville, Carolina do Sul, em 1935. O cimento é utilizado para estabilizar solos arenosos e argilosos. O cimento ajuda a diminuir o limite de liquidez e incrementar o índice de plasticidade e gerenciamento de solos argilosos da mesma

forma que a cal. Em solos argilosos, a estabilização com cimento é efetiva quando o limite de liquidez é menor do que 45-50 e o índice de plasticidade é menor do que 25, aproximadamente. Os solos granulares e argilosos com baixa plasticidade são os mais adequados para a estabilização com cimento. As argilas cálcicas são estabilizadas mais facilmente com adição de cimento, entretanto, as argilas com sódio e hidrogenadas de natureza expansiva, apresentam melhor comportamento com cal. Por estas razões se deve ter muita atenção na seleção do material estabilizador.

A Tabela 2.6 apresenta as ótimas porcentagens de cimento por volume para a estabilização efetiva de vários tipos de solo.

Tabela 2.6 – Cimento requerido por volume para estabilização efetivo de diferentes solos. (Michelli & Freitag, 1959 apud Das, 2001)

Tipo de Solo		Porcentagem de cimento por Volume
Classificação AASHTO	Classificação SUCS	
A-2 e A-3	GP, SP e SW	6-10
A-4 e A-5	CL, ML e MH	8-12
A-6 e A-7	CL, CH	10-14

Pode-se dividir a estabilização por cimento nas seguintes categorias (Medina, 1987 apud Vizcarra, 2010):

- 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 semiendurecido 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.

Basha et al. (2004) realizou ensaios de caracterização física e mecânica como compactação, CBR, compressão simples e ensaios de difração de raios X para a estabilização de solos residuais com adição de cimento e cinzas de casca de arroz. Os resultados apresentam que a adição de cimento e cinzas de casca de arroz reduzem a plasticidade do solo residual. A maior redução apresentou a mistura do solo estabilizado com cimento. Em geral, 6% - 8% de cimento e cinzas de casca de arroz de 15% - 20% mostram a quantidade ótima de melhorar as propriedades dos solos. A cinza de casca de arroz pode estabilizar potencialmente o solo residual, sozinha ou misturada com cimento, o que poderia reduzir os custos de construção, em particular na área rural de países em desenvolvimento.

Consoli et al. (2009) fizeram a ampliação de um estudo realizado pelo mesmo autor no ano 2007, através da quantificação da influência da relação de vazios/cimento sobre o módulo de cisalhamento inicial  $G_0$  e parâmetros de resistência efetivos ( $c'$  e  $\phi'$ ) de uma areia artificialmente cimentada. Foram realizados ensaios de compressão simples e ensaios de compressão triaxial com medições de *bender elements*. Os resultados mostram que a relação de índice de vazios/ cimento definida como razão entre o volume de vazios da mistura compactada e o volume de cimento ( $V_v/V_{ce}$ ) é um parâmetro adequado para avaliar tanto a rigidez inicial e a resistência efetiva da mistura de areia com cimento estudado. Com este parâmetro se pode escolher a quantidade de cimento e de energia de compactação adequado para fornecer uma mistura que reúne a resistência e a rigidez exigida pelo projeto com um custo otimizado.

### **2.4.3. Solo-Cinza de Carvão**

Segundo Siqueira (2011) os produtos da combustão do carvão são os subprodutos gerados a partir da queima do carvão mineral nos processos de combustão pulverizada ou leito fluidizado. Estes resíduos são denominados de cinzas. No processo de queima, são gerados os seguintes tipos de cinzas: escórias, cinzas de fundo (pesadas) e cinzas volantes (leves). A utilização das cinzas de carvão como subproduto resulta em numerosos benefícios, entre os quais podem

ser citados: uma diminuição significativa da necessidade de áreas destinadas aos aterros, a conservação de recursos naturais, um ambiente mais limpo e seguro, a redução de emissão de dióxido de carbono, impulsão no desenvolvimento econômico e a redução geral do custo de geração de eletricidade. A norma americana ASTM C 618 classifica as cinzas volantes em dois tipos: classe F e classe C. As cinzas volantes da classe F apresentam baixo teor de cálcio (menos de 10% de CaO) e é obtida da queima de antracito ou carvão betuminoso e apresentam propriedades pozolânicas, mas não cimentícias. As cinzas volantes da classe C apresentam alto teor de cálcio (entre 10 e 30% de CaO) e são produtos da queima de lignito ou carvão sub-betuminoso e tem propriedades pozolânicas e cimentícias.

Os solos arenosos, com escassez de argila coloidal, não reagem satisfatoriamente à cal, para esse caso se pode usar cimento, mas este pode acabar sendo uma solução muito cara, então a função da cinza volante é substituir a fração fina (argila) do solo, uma vez que pode reagir com a cal, embora o tamanho da cinza seja diferente do da argila.

Segundo Consoli et al. (2001), a adição de carbonato de cal melhorou significativamente a resistência e as propriedades de rigidez do solo, no entanto, a presença da cinza volante é fundamental para melhorar ainda mais o comportamento do material, devido, essencialmente, à ocorrência de um maior tempo dependente das reações pozolânicas. Neste caso a mistura que alcançou melhor comportamento foi do solo com 25% de cinza volante e 4% de cal.

De acordo com Tastan et al. (2011), a adição de cinza volante nos solos orgânicos pode incrementar a resistência a compressão não confinada, mas este incremento depende do tipo do solo e das características da cinza volante. O módulo de resiliência dos solos ligeiramente orgânicos ou orgânicos também pode ser significativamente melhorado. O aumento de resistência e rigidez são atribuídos principalmente à cimentação causada por reações pozolânicas, embora a diminuição do teor de água, resultante da adição de cinza volante contribui para o ganho de resistência. O conteúdo orgânico do solo é uma característica prejudicial para a estabilização de solos. O aumento de teor de matéria orgânica do solo indica que a resistência da mistura de solo-cinza volante decresce exponencialmente. Para a maioria das misturas solo-cinza volante testadas a

resistência à compressão simples e o módulo de resiliência aumentam quando o teor de cinza volante aumenta.

Prabakar et al. (2003) estudaram o comportamento dos solos misturados com cinza volante de carvão para melhorar a capacidade de suporte de carga do solo. Foram considerados três tipos de solo e porcentagens de cinza de 9% até 46%, foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica como compactação, CBR, cisalhamento direto e expansão livre. Os resultados indicaram que a adição de cinzas reduz a densidade seca do solo devido a baixo peso específico e seu peso unitário da cinza. A redução da densidade seca pode ser da ordem de 15% até 20%. O índice de vazios e porosidade variam de acordo com o aumento da quantidade de cinzas no solo, pela adição de cinza volante até 46%, as taxas de vazios do solo podem ser aumentadas em 25%. A resistência ao cisalhamento das misturas do solo com cinza volante melhora. O aumento de cinza faz com a mistura que aumente o parâmetro de coesão em solos que não são altamente plásticos. Pelos ensaios realizados se notou que a resistência ao cisalhamento e o ângulo de atrito do solo misturado com cinza aumentam quando comparados com o solo puro, além disso, apresenta uma redução na expansão, isto é devido à característica não expansiva das cinzas volantes e seu tamanho e formas das partículas. O que pode levar a conclusão que o comportamento de expansão do solo pode ser controlado efetivamente com adição de cinzas volantes.

A estabilização de solos com a cinza de fundo é mais recente e menos usual que misturas com cinzas volantes.

As cinzas pesadas são, reconhecidamente, materiais com menor atividade pozolânica do 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. 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 (Lopes, 2011).

Segundo Canpolat et al. (2003), baseado nos resultados do seu estudo, a produção de cimento Portland com um grau de 5% de zeólito mais 5% de cinza de fundo de carvão fornece uma adequada resistência requerida pelas normas turcas, essa produção seria uma alternativa econômica para o cimento Portland convencional, bem como uma solução ambiental mais adequada.

Rosa (2009) quantificou a influência das variáveis da quantidade de cal, quantidade de cinza volante de carvão, porosidade e do tempo de cura sobre a resistência de um solo arenoso artificialmente cimentado, verificando a adequação do uso da relação vazios-cal na estimativa da resistência a compressão simples destas misturas. Os ensaios realizados foram de compressão simples e medidas de sucção matricial. Os resultados demonstraram que o aumento da quantidade de cal e cinza volante, do peso específico aparente seco e do tempo de cura provocou o aumento da sua resistência à compressão simples. A resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento da quantidade da cal (3% até 9%) e exponencialmente com a redução da sua porosidade nas misturas do solo com cinza volante de carvão. A taxa de ganho de resistência aumentou com o aumento da massa específica aparente seca do material compactado e com o aumento do teor de cinza volante, indicando que a efetividade da cimentação é maior nas misturas mais compactas e com maior porcentagem de cinza volante (0% até 25%), isto ocorre pelo fato da cinza volante ser um material que possui propriedades pozolânicas.

Lopes (2011) estudou a aplicabilidade das cinzas de carvão (volante e de fundo) em camadas de pavimentos rodoviários. Utilizou-se um solo arenoso-siltoso não laterítico. Foram realizados ensaios de caracterização física, química, mecânica e ambientais de solubilização e lixiviação. Os teores de cinza de fundo foram 30% e 40% e da cinza volante foi 10% e 20% relacionados ao peso do solo seco. Também se realizaram ensaios com adição de 3% de cal. Os resultados dos ensaios ambientais indicaram que a cinza volante foi classificada como resíduo de Classe II B- Resíduo Inerte e a cinza de fundo Classe II A- Resíduo não Inerte. A adição de cinzas ao solo gera aumento na umidade ótima do material e diminuição na massa específica aparente máxima, em diferentes proporções. As análises mecanísticas-empíricas com os valores de módulo resiliente mostraram que é viável a utilização de cinzas como aditivo ao solo para utilização em base de pavimentos de baixo volume de tráfego. Os ensaios triaxiais de cargas repetidas

demonstraram que a tensão confinante é mais influente no solo estudado e o comportamento não muda com a adição das cinzas. As análises dos resultados de módulo de resiliência comprovaram que o tempo de cura, o tipo e teor de cinza melhoram o comportamento da mistura, apresentando melhores resultados nas misturas com cinza volante e cal.

Kim et al. (2005) estudaram os usos em aterros de pavimentação para as cinzas volantes e de fundo de carvão e realizaram ensaios de caracterização mecânica como compactação, resistência, compressibilidade e permeabilidade. Os resultados apresentaram que a permeabilidade das misturas com cinzas compactadas foi diminuindo ligeiramente com o aumento do teor de cinza volante. Isto é principalmente devido ao aumento do peso específico com o aumento do teor de finos, o que gera mais resistência ao fluxo de água através do preenchimento de espaços vazios entre partículas. Os valores foram semelhantes a de uma mistura de areia com cal. Os resultados dos ensaios mecânicos indicaram que as misturas com cinza volante e cinza de fundo podem ser mais compressíveis do que as areias típicas compactadas nos mesmos níveis de compactação.

## **2.5. Considerações Finais**

De acordo com a revisão bibliográfica do presente estudo, foi mencionada a problemática atual no Brasil sobre a geração e disposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) na atualidade, para se ter um conhecimento geral das quantidades de RSU que poderiam ser aproveitados se fossem criadas as usinas projetadas para geração de energia pela incineração de RSU. Além disso, a principal ênfase desta revisão foram os diferentes métodos de estabilização de solos com cinzas de RSU e sua comparação com outros aditivos estabilizadores, como cal, cimento e cinzas de carvão. A maioria dos estudos com utilização de cinza de RSU, já realizados, tem como foco a pavimentação, mas existe também um campo grande a ser estudado, que são os estudos com foco aos solos de fundação ou camadas de aterros sanitários, aterros sobre solos moles ou estabilização de taludes. Nesta revisão bibliográfica foram relatados diversos trabalhos, de autores de diferentes países, sobre a adição de cinza de RSU (volante ou de fundo) ao solo para utilização em geotecnia. Os trabalhos apresentam um comportamento muito

favorável da utilização das cinzas de RSU e de outros tipos de cinzas misturadas com o solo e, na maioria dos casos, a adição de uma pequena porcentagem de cal ou cimento é um aporte importante na resistência, que o solo estabilizado pode ganhar. Destaca-se que para a utilização de cinzas é imprescindível fazer ensaios de caráter ambiental, como lixiviação e solubilização, para se ter a certeza de que não terão agentes contaminantes para o solo ou para águas subterrâneas. A utilização das cinzas de RSU em geotecnia pode gerar custos mais baixos na construção e comportamentos melhores em comparação ao solo puro.