2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A utilização de resíduos para aplicação em diversos setores construtivos vem sendo objeto de estudo em todo o mundo, tornando-se uma potencial solução para a destinação de materiais que antigamente não tinham nenhuma utilidade e que na maioria das vezes são dispostos incorretamente no meio ambiente.

Dentre os resíduos gerados atualmente em grande escala, se encontram as cinzas provenientes da queima de diversos materiais, como o carvão mineral em usinas termelétricas, cinzas de resíduos sólidos urbanos em usinas incineradoras, cinzas da queima de casca de arroz, de bagaço de cana de açúcar, dentre outras.

Segundo Mallmann (1996), passou-se a existir uma maior preocupação com o estudo dos efeitos das cinzas sobre o meio ambiente, devido ao seu elevado grau de toxicidade, a partir da crescente produção destes resíduos nos países que utilizam a queima de carvão como energia. Diversos estudos como os apresentados nos trabalhos de Nardi, 1975; Ceratti, 1979; Da Silva, 1982; Zonok & Chies, 1989; Mallmann, 1996; Fogaça & Ceratti, 1995; Carraro, 1997; Rosa, 2009; Vizcarra, 2010; e Lopes (2011), buscam compreender a influência da cinza volante como agente estabilizante de solos, destacando, principalmente, o emprego dos materiais estabilizados em aplicações como bases para pavimentos ou na produção de blocos destinados à utilização em construção civil.

Nardi (1975) apresenta um histórico detalhado do uso de cinzas e da cal desde civilizações antigas. Segundo o autor, os chineses usaram a cal e argila para construir a Grande Muralha da China há aproximadamente 2.000 anos atrás. Os romanos, séculos antes da era cristã, utilizaram às cinzas vulcânicas provenientes do vulcão Versúvio, como aditivo às argamassas devido as suas características pozolânicas (o termo pozolana vem da terra vulcânica de Pozzouli, cidade situada no sopé do Versúvio).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

Segundo Nuñes (2007 *apud* Rosa, 2009), na década de 60 já se utilizavam as cinzas volantes estabilizadas com cal nos Estados Unidos, Inglaterra, França, Alemanha, Polônia, antiga URSS, Tchecoslováquia e Iugoslávia. Na Europa o emprego das cinzas estava relacionado à fabricação de blocos para construções. No Brasil, o primeiro registro da utilização da cinza volante data em 1964, quando esta foi incorporada ao concreto, na construção da hidrelétrica de Jupiá. Desde então, o resíduo tem sido empregado pela indústria de cimento na constituição de argamassas pozolânicas e obras de pavimentação, por exemplo.

Cinzas provenientes da incineração de resíduos sólidos urbanos também vêm sendo estudadas para usos como agentes estabilizantes de solos para camadas de corbetura de rejeitos (Lee *et al*, 1996 *apud* Rosa, 2009). O procedimento de incineração tem sido realizado com o propósito de geração de energia, mas visa, principalmente, reduzir o volume total de lixo disposto em aterros sanitários.

As pesquisas atualmente realizadas mostram que as cinzas de RSU tem se constituído em alternativas tecnicamente viáveis para as aplicações citadas, uma vez que suas características físicas e químicas são semelhantes às cinzas provenientes da queima de carvão e outras.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

2.1.1 Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil

Os resíduos sólidos urbanos (RSU), de acordo com a Lei Federal n° 12.305/10 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) – que estabelece princípios e normas que devem ser adotadas e seguidas pelos municípios para a destinação do lixo - englobam os resíduos domiciliares, isto é, aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas e os resíduos de limpeza urbana (varrição, limpeza de logradouro, vias públicas e outros serviços de limpeza urbana). De acordo com esta lei, na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Esta lei aprova tecnologias que visam a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental, e implantados programas de monitoramento de emissões de gases tóxicos.

De acordo com a Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ALBREPE, 2012), 58% do resíduo sólido urbano gerado no país teve uma destinação final adequada, porém, a quantidade de RSU destinada inadequadamente cresceu em relação ao ano anterior, totalizando 23,7 milhões de toneladas (76 mil toneladas diárias) que seguiram para lixões ou aterros controlados, que do pondo de vista ambiental pouco se diferenciam dos lixões, pois não possuem um conjunto de sistemas necessários para a proteção do meio ambiente e da saúde pública. Mesmo com uma legislação mais restritiva, a destinação inadequada de RSU se faz presente em todas as regiões e estados brasileiros, sendo um total de 60,2% de municípios que ainda fizeram uso de locais impróprios para destinação final dos resíduos coletados em 2012. A Figura 2.1 apresenta a participação porcentual das diversas regiões brasileiras no total de RSU coletado no país em 2012.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

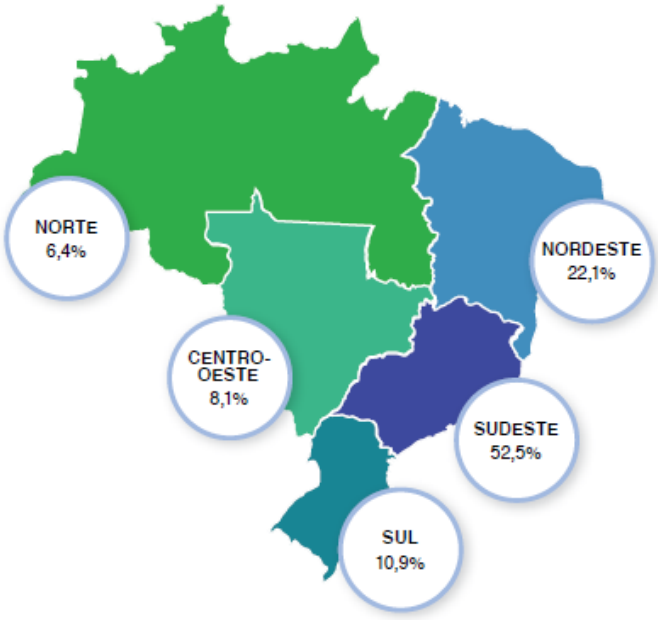

Figura 2.1 – Participação das regiões do país no total de RSU coletado em 2012. (ABRELPE, 2012)

A região Sudeste responde por mais de 50% do RSU coletado e apresenta o maior porcentual de cobertura dos serviços de coleta do país. A pesquisa feita pela ABRELPE (2012) mostra que só no estado do Rio de Janeiro, foram coletadas aproximadamente 20.450 toneladas de RSU por dia (1,303 kg/hab/dia) no ano de

2012. No Brasil, o RSU total coletado em 2012 foi de aproximadamente 181.288 toneladas por dia, sendo o total gerado calculado em 201.058 toneladas por dia.

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos também prevê o fim dos lixões até 2014 em todos os municípios brasileiros, sendo estes acusados por crime ambiental caso não cumpram as exigências. Com isso, novos planos de coleta seletiva, usinas de reciclagem e disposição do lixo têm sido programados, e novas soluções tem sido procuradas a fim de se estabelecer uma destinação ambientalmente correta. A Figura 2.2 apresenta a destinação final dada ao RSU por dia no país.

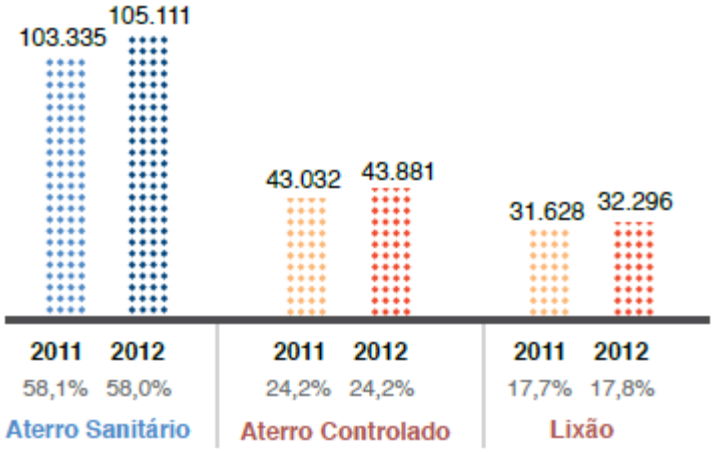

Figura 2.2 – Destinação final de RSU em toneladas por dia (ABRELPE, 2012).

Diante do panorama e histórico apresentados, observa-se o desafio enfrentado para o cumprimento das leis vigentes, e a necessidade de alternativas, que tem sido cada vez mais procuradas. A presente pesquisa apresenta um tipo de tratamento dado ao RSU, que consiste em sua incineração, e uma alternativa para a destinação final do produto desta atividade, que são as cinzas volantes e de fundo de RSU, como agentes estabilizantes de solos para aplicação em obras geotécnicas, como por exemplo, camadas de aterros sanitários, aterros sobre solos moles, aterros temporários e estabilização de taludes.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS

A classificação dos resíduos sólidos é o primeiro passo para se determinar um plano de gestão eficiente. Através de sua classificação, podem-se definir as etapas de coleta, armazenamento, transporte, manipulação e destinação final, de acordo com o tipo de resíduo gerado.

No Brasil, as classificações e definições associadas aos resíduos sólidos são dadas pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004), que define resíduos sólidos como "*resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível"*.

Apesar da definição oficial de resíduos sólidos ser determinada por normatização, alguns autores divergem desta, e diversificam este conceito. Segundo Teixeira *et al* (1997 *apud* Faria, 2002), a definição estabelecida pela norma brasileira é muito ampla e equivoca-se ao incluir líquidos como resíduos sólidos.

De acordo com a Fundação Nacional da Saúde (2007), resíduos sólidos são materiais heterogêneos, resultantes das atividades humanas e da natureza, os quais podem ser parcialmente utilizados, trazendo proteção à saúde pública e economia de recursos naturais. Para Monteiro *et al* (2001) resíduo sólido *"é todo material sólido ou semi-sólido indesejável e que necessita ser removido por ter sido considerado inútil por quem o descarta em qualquer recipiente destinado a este ato".*

Popularmente, refere-se ao resíduo sólido como lixo, e de acordo com o IPT/CEMPRE (2010) "*denomina-se lixo os restos das atividades humanas, considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis.*

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

Normalmente, apresentam-se sob estado sólido, semi-sólido, ou semi-líquido (com conteúdo líquido insuficiente para que possa fluir livremente)".

2.2.1 Classificação de Resíduos

São diversas as formas possíveis de se classificar o resíduo sólido. De acordo com Faria (2002), esta classificação varia de acordo com os tipos de constituintes presentes na composição física do lixo.

Segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004), a classificação se dá em três categorias, que objetiva avaliar o risco do resíduo ao meio ambiente e à saúde pública para que estes possam ser manuseados e dispostos adequadamente. Esta classificação envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características, comparando-os com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente são conhecidos. As classes previstas são:

a) Resíduo Classe I - Perigoso

São aqueles cujas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas podem oferecer riscos à saúde pública, ocasionando um aumento da mortalidade ou incidência de doenças irreversíveis ou impedir a reversibilidade das demais, e/ou gerar perigo ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada. Esta classe de resíduo deverá, portanto, sofrer tratamento ou acondicionamento adequado no próprio local de produção nas condições estabelecidas pelo órgão estadual de controle da poluição e preservação ambiental. Para um resíduo ser enquadrado nessa classe, ele deve estar contido nos Anexos A ou B da ABNT NBR 10004:2004 ou apresentar uma ou mais das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

b) Resíduo Classe II – Não Perigoso

b.1) Classe II A: Resíduo não inerte

São aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduo Classe I ou resíduos Classe II B. Podem apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

b.2) Classe II B: Resíduo inerte

Quaisquer resíduos que não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme Anexo G da referida norma. Para tal análise, os resíduos devem ser amostrados de forma representativa, segundo a NBR 10007 (ABNT, 2004), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme a ABNT NBR 10006:2004.

De acordo com o IPT/CEMPRE (2010), o lixo pode ser classificado por sua natureza física (seco ou molhado), por sua composição química (matéria orgânica ou inorgânica), quanto à origem (domiciliar, comercial, varrição e feiras livres, serviços de saúde e hospitalar, portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários, industriais, agrícolas e entulhos), e pelos riscos potenciais ao meio ambiente (perigosos, inertes e não-inertes).

De maneira geral, o resíduo sólido urbano (RSU), está inserido na classificação que utiliza a origem ou fonte geradora como critério.

2.2.2 RSU na cidade do Rio de Janeiro

Devido à variedade de critérios estabelecidos e adotados para classificação do resíduo sólido urbano, torna-se difícil ter apenas um conceito para este, pois sua composição varia em função do serviço de coleta realizado em cada região.

Para a cidade do Rio de Janeiro, a Lei n° 3273/2001 que dispõe sobre a Gestão do Sistema de Limpeza Urbana no Município do Rio de Janeiro, divide os

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

resíduos sólidos em dois grupos: *Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e Resíduos Sólidos Especiais (RSE).*

De acordo com a lei citada, os *resíduos sólidos urbanos* abrangem: (a) Lixo domiciliar ou doméstico; (b) Resíduos de poda de manutenção de jardim, pomar ou horta; (c) Entulho de pequenas obras de reforma, de demolição ou de construção em habitações familiares; (d) Lixo público decorrente da limpeza de logradouros (avenidas, ruas, praças e demais espaços públicos); (e) Lixo proveniente de feira livre; (f) Excrementos oriundos da defecação de animais em logradouros; (g) Lixo de estabelecimentos comerciais, industriais ou de unidades de trato de saúde humana ou animal, cuja composição seja similar aos domiciliares. Os *resíduos sólidos especiais* abrangem: (a) Lixo extraordinário; (b) Lixo perigoso produzido em unidades industriais e que apresentam potencial risco à saúde publica e/ou meio ambiente; (c) Lixo infectante resultante de atividades médico-assistenciais; (d) Lixo radioativo; (e) Lodos e lamas oriundos de estações de tratamento de águas ou esgoto sanitário; dentre outros.

Para a presente pesquisa, utilizou-se a cinza proveniente da queima de resíduo sólido urbano da cidade do Rio de Janeiro, cuja composição, em geral, consiste no que foi apresentado anteriormente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

2.3 RESÍDUO SÓLIDO URBANO E SEU IMPACTO AO MEIO AMBIENTE E À SAÚDE HUMANA.

Apesar de o Brasil ser um país com mais de 80% da população vivendo em áreas urbanas, as infraestruturas e os serviços não acompanharam o ritmo de crescimento das cidades. Nas ultimas décadas, com a rápida industrialização e urbanização, a produção de resíduos sólidos apresentou um aumento considerável, que acarretou em sérios problemas ambientais. Os impactos do manejo inadequado de resíduos sólidos e da limpeza urbana deficiente são expressivos, quer seja em relação à saúde pública e à qualidade ambiental, quer seja em relação aos aspectos estéticos e de turismo. Ao mesmo tempo, os resíduos que são corretamente encaminhados e dispostos em aterros sanitários vêm causando

outros problemas, como escassez de espaço devido ao grande volume de material disposto e redução de vida útil dos aterros.

Tanto a geração, como a composição do resíduo sólido depende de fatores culturais, hábitos de vida e consumo, situação socioeconômica, nível educacional, fatores climáticos e sazonais e das características dos grupos populacionais.

A disposição final dos resíduos sólidos é uma preocupação crescente tanto para a administração pública quanto para os órgãos ambientais. A presença de metais pesados na composição de determinados resíduos sólidos, o chorume que é liberado destes por meio de sua degradação, dentre outros fatores, faz com que o RSU possua elevado potencial contaminante, contribuindo para impactos adversos ao meio ambiente e consequentemente à saúde da população, quando depositados de forma inadequada (Fontes, 2008).

A complexidade dos resíduos e a evolução constante dos hábitos de vida sugerem que as propostas de solução para o problema devem ser maleáveis, sempre baseadas em princípios de educação ambiental da população, o que a integrará responsavelmente à construção de medidas técnicas e ambientalmente corretas (Faria, 2002).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

2.3.1 Impactos Ambientais

A proteção do meio ambiente contra as consequências adversas da disposição de resíduos é um importante problema enfrentado atualmente.

Entre os impactos ambientais negativos que podem ser originados a partir do lixo urbano produzido, estão os efeitos decorrentes da disposição inadequada de resíduos sólidos em fundos de vale, às margens de ruas ou cursos d'água. Estas práticas, que já se tornaram habituais, podem provocar, entre outras coisas, contaminação de corpos d'água, assoreamento de rios e lagos, enchentes, e proliferação de vetores transmissores de doenças. Ainda, a poluição visual, o mau cheiro e contaminação do ambiente somam-se a esses impactos.

2.3.2 Impactos à Saúde Humana

Os resíduos sólidos urbanos possuem características biológicas de extrema relevância, uma vez que em sua massa são encontrados agentes patogênicos e microrganismos prejudiciais à saúde humana.

O problema sanitário constituído pelos resíduos sólidos ocorre devido ao seu favorecimento à proliferação de vetores e roedores. Podem ser vetores mecânicos e agentes etiológicos causadores de doenças, tais como: diarréias infecciosas, amebíase, salmoneloses, teníase e outras parasitoses, difteria, entre outros. Estes servem, ainda, de criadouro e esconderijo de ratos, animais esses envolvidos na transmissão de leptospirose e outras doenças. As baratas que pousam e vivem nos resíduos sólidos, têm importância sanitária relacionada à transmissão de doenças por meio de transporte mecânico de bactérias e parasitas do lixo para os alimentos e pela eliminação de fezes infectadas. Podem, ainda, transmitir doenças de contágio direto (Fundação Nacional de Saúde, 2007).

Há também a possibilidade de contaminação do homem pelo contato direto com os resíduos sólidos ou pela massa de água por estes poluídas. Catadores de lixo sofrem constantemente o risco direto de adquirir alguma doença. Por disporem de água e alimento, o acumulo de resíduos sólidos em locais inadequados também serve como ponto de alimentação de animais como cães, aves, bovinos e possibilita, ainda, a proliferação de mosquitos que se desenvolvem em água acumuladas em eventuais latas, vidros ou outros recipientes comumente encontrados. (Fundação Nacional de Saúde, 2007).

Na tentativa de minimizar a quantidade de resíduos sólidos gerados, muitos países vêm adotando diversas técnicas, sendo a mais comum a reciclagem de materiais. Uma outra alternativa que em certos países já é adotada, e em outros está sendo avaliada, é a incineração do resíduo, visto que, além de reduzir a quantidade de material disposto nos aterros sanitários, durante a combustão do RSU ocorre a co-geração de energia, devido ao poder calorífico que o resíduo tem. Através desse processo são geradas as cinzas de resíduo sólido urbano, que podem vir a ser utilizadas como insumo na indústria da construção civil. Atualmente, diversas pesquisas tem sido realizadas visando o aproveitamento das cinzas de RSU.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

2.4 INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A incineração do lixo é um tratamento eficaz para reduzir o seu volume, tornando o resíduo absolutamente inerte em pouco tempo, se realizada de forma adequada. Porém, em geral sua instalação e funcionamento são dispendiosos, devido principalmente à necessidade de filtros e tecnologia sofisticada para diminuir ou eliminar a poluição do ar provocada pelos gases produzidos no processo de queima do lixo (Monteiro *et al*, 2001).

De acordo com a Fundação Nacional de Saúde (2007), o processo de incineração deve ocorrer em instalações bem projetadas e corretamente operadas, para que haja a transformação de materiais e a destruição dos microorganismos dos resíduos sólidos, visando, essencialmente, à redução do seu volume para 5% e, do seu peso, para 10 a 15% dos valores iniciais.

Apesar de a técnica reduzir o volume de resíduo sólido urbano e fornecer energia, esta não é considerada um tipo de disposição final, uma vez que as escórias (cinzas de fundo) e as cinzas volantes geradas no processo devem, subsequentemente, receber cuidados quanto ao acondicionamento, armazenamento, identificação, transporte e destinação, pois apesar dos organismos patogênicos e compostos orgânicos tóxicos serem eliminados, os metais pesados continuam presentes nas cinzas. Uma disposição inadequada pode acarretar lixiviação/solubilização de certos componentes, que podem posteriormente ser absorvido pelo meio ambiente.

A geração de dioxinas e furanos, produtos tóxicos gerados durante o processo de incineração de resíduos, devem obedecer aos seus limites de emissões para a atmosfera, que situam-se entre 0,10 ± 0,04 ng/Nm³ (Fundação Nacional de Saúde, 2007). É imprescindível a instalação de equipamentos filtrantes/lavadores, para que os gases e materiais particulados gerados no processo sejam retidos e os padrões de emissão estabelecidos em legislação sejam obedecidos (Secretaria do Meio Ambiente, 2010). Atualmente, a tecnologia utilizada pelas usinas opera e monitora todas as emissões, garantindo os níveis aceitáveis especificados por norma para cada país.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

Além da principal vantagem deste processo, que consiste na redução expressiva do total do volume de material, o que faz com que o tempo de vida útil dos aterros sanitários seja prolongado e a necessidade de áreas municipais diminuída, outros aspectos positivos podem ser observados, como:

- Redução das quantidades de resíduos perigosos, promovendo a concentração de poluentes e metais pesados, permitindo a sua disposição em separado;
- Destruição de organismos patogênicos, de produtos tóxicos com consequente redução do potencial de doenças e de contaminação do meio ambiente;
- Aproveitamento energético do conteúdo do lixo municipal com geração de energia elétrica.

De acordo com Uieda (2009), dados fornecidos pela Usina Verde – empresa brasileira que visa apresentar soluções para a destinação final do lixo através do processo de incineração com recuperação de energia, e a qual forneceu as cinzas para a presente pesquisa – mostram que as cinzas resultantes desse tipo de tratamento térmico representam cerca de 8% do total de lixo tratado em peso.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

2.4.1 Cinzas de RSU

As cinzas são produtos da incineração e constituem-se da porção inorgânica e da matéria não-combustível presente no lixo. Há dois tipos de cinzas: as de fundo que são resultantes da combustão e consistem nos materiais não-combustíveis (denominadas por alguns autores como escória) e as cinzas suspensas retidas pelo sistema de controle das emissões gasosas, denominadas de cinzas volantes. Em geral, a cinza de fundo corresponde de 75 a 90% de toda cinza gerada, dependendo do tipo das instalações e do tipo de resíduo incinerado (Caixeta, 2005).

A cinza volante apresenta-se como um resíduo de granulometria fina, que durante a combustão do resíduo é transportada pelo fluxo de gases. Devido à sua baixa densidade, elas flutuam até as chaminés, onde são coletadas mecanicamente ou por precipitadores. Estas cinzas são capazes de desenvolver reações pozolânicas, e quando misturadas à cal, possuem características propícias à

estabilização de solos (Lopes, 2011). Esta cinza é caracterizada por possuir alto teor de sais solúveis, quantidades significativas de substancias perigosas, como metais pesados e componentes orgânicos, além de poluentes inorgânicos, por ser proveniente do sistema de lavagem dos gases (Fontes, 2008).

Os aspectos citados sobre a cinza volante faz com que sua gestão seja uma das questões ambientais mais importantes relacionadas à incineração de resíduos sólidos urbanos, e por consequência, ao dispor esse material em aterros sanitários, deve-se adotar um sistema de impermeabilização adequado ou fazer um tratamento prévio do material. Cinzas de fundo e volante são muitas vezes misturadas por razões práticas, formando um resíduo denominado "cinza combinada". Essa prática ocorre em alguns países como EUA e Japão (Ferreira, 2003).

Uma vez que a composição do lixo municipal varia no tempo e de país para país, devido às diferenças culturais e processos de reciclagem de cada lugar, a composição das cinzas também irão variar. Geralmente, a caracterização química e física das cinzas irão depender da composição do lixo bruto, condições operacionais, tipo de incinerador e sistema de controle de poluição do ar (He *et al*, 2004 *apud* Lam *et al*, 2010).

A composição química das cinzas de RSU mostra que os elementos principais encontrados nestas são Si, Al, Fe, Mg, Ca, K, Na e CL. Além disso, SiO_2, AL_2O_3, CaO, Fe_2O_3, Na_2O, K_2O são óxidos comumente achados nas cinzas, sendo o CaO o composto mais abundante existente na cinza volante, constituindo mais de 46% desta, e o composto SiO_2 o mais abundante existente na cinza de fundo, constituindo mais de 49% desta (Lam *et al*, 2010).

A cinza de fundo, diferentemente da volante, se apresenta como um material bastante heterogêneo e com uma granulometria mais grossa. De acordo com Forteza (2004), os elementos presentes em sua composição química faz com que o material seja similar a materiais geológicos. A fração metálica presente nesta pode ser recuperada e o restante reutilizado para diversos fins. Alguns autores afirmam que estas cinzas também podem ser definidas como material pozolanico, embora ainda não seja reconhecido como tal pelas normas atuais. A Figura 2.3 apresenta as diferentes frações granulares da cinza de fundo utilizada na presente pesquisa, que se apresenta similar à descrição feita por outros autores (Caixeta, 2005;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

Forteza *et al*, 2004; Becquart *et al*, 2008; Vizcarra, 2010; Quispe, 2013, entre outros).

Figura 2.3 – Frações granulares da cinza de fundo de RSU utilizada na presente pesquisa.

Dentre as vantagens da reutilização destes materiais em obras geotécnicas como aterros sobre solos moles, camadas de aterros sanitários, pavimentação, construção civil, dentre outras, destacam-se (Lopes, 2011):

- Redução da demanda de materiais primários e convencionais;
- Redução dos custos energéticos relacionados com a extração e o transporte de materiais convencionais;
- Redução dos custos ambientais associados com a recuperação dos passivos ambientais gerados pela exploração de jazidas de materiais convencionais;
- Redução dos problemas ambientais e econômicos associados com a estocagem e disposição final de resíduos;

O processo de incineração e produção tanto das cinzas de fundo, como volante utilizadas na presente pesquisa, está descrito no Capítulo 3 do presente trabalho. Ambas as cinzas são provenientes da USINAVERDE, que se localiza no Rio de Janeiro.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

2.5 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Quando as características dos solos locais não atendem, total ou parcialmente, os requisitos de projeto exigidos, são consideradas as seguintes atitudes a serem tomadas (Medina, 1987 *apud* Vizcarra, 2010):

- 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 difícil situação);
- Estabilizar o solo existente.

De acordo com Vendruscolo (1996), a estabilização de solos é uma técnica antiga, desenvolvida principalmente para pavimentação, mas que também tem sido amplamente utilizada em outras áreas, como fundações, contenção de taludes e barragens.

Denomina-se estabilização de solos, a aplicação de processos e técnicas que busquem a melhoria das propriedades mecânicas desses materiais. O aumento da resistência, da rigidez e durabilidade, são algumas das alterações mais importantes nas propriedades mecânicas do solo (Ingles e Metcalf, 1972 *apud* Vendruscolo, 1996). De acordo com o autor, a melhoria das propriedades físicas do solo podem ser obtidas de várias formas, como por exemplo, por compactação, drenagem, estabilização granulométrica, estabilização por processos físico-químicos, estabilização térmica, injeções de materiais, dentre outras.

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

Vargas (1977 *apud* Dourado, 2013), define a estabilização de solos como o processo pelo qual se confere ao solo maior resistência às cargas, ao degaste ou erosão, através de processo de compactação, correção granulométrica e plasticidade ou de adição de substâncias que vão lhe conferir uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos grãos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

As propriedades de um solo podem ser alteradas por métodos mecânicos, físicos e/ou químicos, sendo o tipo de estabilização escolhida dependente das propriedades do solo em seu estado natural, propriedades desejadas para o solo estabilizado e dos efeitos no solo após estabilização. A escolha por um ou outro tipo de estabilização também é influenciada pelo custo e finalidade da obra, podendo ser adaptados e/ou combinados para a solução de um problema (Santos, 2012).

Devido à grande variabilidade de solos, nenhum método de estabilização se aplica genericamente a todos eles, sendo cada método aplicável (ou não) para um determinado tipo de solo.

2.5.1 Estabilização Mecânica

De acordo com Santos (2012) os métodos mecânicos são aqueles que promovem o aumento da densidade do solo, melhorando sua resistência mecânica e durabilidade; envolvem a redução de volume de vazios do solo in situ através da energia imposta; promovem o preenchimento dos vazios, reduzindo-se assim os poros e inibindo a percolação de água e a erosão provocada por esta, aumentando a durabilidade; promovem ou aumentam a compacidade, tendo-se o acréscimo de resistência mecânica.

A estabilização mecânica de solos pode ser descrita por dois processos principais: compactação e estabilização granulométrica. De acordo com Santos *et al*. (1995), 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 engloba as melhorias induzidas em solo pela mistura deste com um ou mais solos e/ou outros materiais, que possibilitem a obtenção de um novo produto com propriedades adequadas aos fins de engenharia requeridos Santos *et al*. (1995).

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

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

2.5.2 Estabilização Física

Na estabilização física as propriedades do solo são alteradas modificando-se, em geral, sua textura e granulometria. Este método consiste basicamente em se misturar dois ou mais materiais, de modo que o produto final se enquadre dentro de uma determinada especificação granulométrica, ou na adição de fibras. Destas combinações de materiais, surge um produto que agrega as propriedades de suas fases constituintes, e que é denominado de material compósito (Sales, 2006 *apud* Pinto, 2008).

A estabilização granulométrica é feita quando se objetiva alterar as propriedades do solo para se atingir um objetivo específico, alterando a distribuição das partículas do mesmo.

Silva (2007) apresenta que a estabilização física do solo também pode ser realizada por processos classificados como elétricos, que consiste na passagem de uma corrente elétrica pelo solo que se pretende estabilizar; e por processos térmicos, que consiste no emprego de energia térmica por meio de congelamento (solução temporária onde se altera a textura do solo), termo osmose (técnica de drenagem onde se promove a difusão de um fluido em um meio poroso pela ação de gradientes de temperatura), e aquecimento (técnica que busca rearranjos na rede cristalina dos minerais constituintes do solo). De acordo com a autora, os processos elétricos em solos arenosos saturados envolvem descargas sucessivas de alta tensão e em solos argilosos são usadas descargas de baixa tensão contínuas provocando fenômenos de eletro-osmose, eletroforese e consolidação eletroquímica.

O processo de eletro-osmose consiste em colocar dois eletrodos numa massa de solo e fazer passar uma corrente elétrica entre eles, promovendo assim a migração da água presente no solo do eletrodo positivo para o negativo, diminuindo assim a quantidade de água no solo e permitindo sua consolidação (Castello Branco, 1978 *apud* Vizcarra, 2010).

O tratamento por aquecimento consiste na introdução de uma mistura comprimida de ar muito quente e combustível no solo, através de um tubo perfurado, sendo o aquecimento obtido por queima de combustíveis ou por processos elétricos. O congelamento se dá por um processo térmico de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

resfriamento, que provoca uma estabilização por congelamento artificial da água intersticial originando um material rígido com elevada resistência (Silva, 2007).

2.5.3 Estabilização Química

A estabilização química dos solos refere-se ao procedimento no qual uma quantidade de material químico qualquer (aditivo) é adicionada ao solo natural, para melhorar uma ou mais de suas propriedades de engenharia. Dentre os estabilizantes mais utilizados têm-se os materiais betuminosos, o cimento Portland, a cal, as pozolanas, e certas resinas (Santos, 2012).

Para se verificar qual aditivo é mais indicado a ser utilizado na estabilização de solos, deve-se levar em consideração a granulometria e plasticidade do solo. Solos com média a alta plasticidade são mais reativos a cal, por exemplo, a qual aumenta a trabalhabilidade, diminui a expansão volumétrica e aumenta a resistência (USACE, 1994).

Segundo Pereira (2012), a estabilização química pode ser definida como a adição de uma ou mais substâncias químicas ao solo, a fim de gerar uma mudança no seu comportamento quanto ao ganho de resistência e estabilidade às intempéries. Tais mudanças podem influenciar também na permeabilidade e deformabilidade, atingindo o objetivo previsto.

De acordo com Sandroni & 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.

Segundo Medina (1987 *apud* Soliz, 2007), na estabilização química, como o nome indica, há uma reação química do aditivo com os minerais do solo (fração coloidal) ou 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.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

Ainda 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. Na matriz descontínua o estabilizador não preenche todos os poros e então podem ocorrer três modos de ação (Soliz, 2007):

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

Quando utilizada para solos granulares, a estabilização química visa melhorar sua resistência ao cisalhamento por meio da adição de pequenas quantidades de ligantes nos pontos de contato dos grãos (Silva, 2007).

A seguir apresentam-se algumas características sobre os tipos de estabilização química.

2.5.3.1 Solo–Cimento

A estabilização solo-cimento ocorre a partir da hidratação do cimento dentro dos vazios do solo, sendo o cimento o principal agente.

Sandroni & 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 (com mais de 1-2% de matéria orgânica), os quais normalmente exigem altas porcentagens de cimento para a obtenção de significativas mudanças nas propriedades mecânicas das mesmas.

Segundo Vendruscolo (2003), a matéria orgânica tem a capacidade de retardar ou impedir a hidratação do cimento. Como esta absorve os íons de cálcio, a adição de cal hidratada pode permitir que o solo seja tratado com o cimento.

Embora qualquer tipo de solo possa ser tratado com cimento, consideram-se os solos granulares mais indicados que os argilosos, pois conseguem atingir

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

resistências mais elevadas, com menores teores de cimento. Já os solos finos requerem maiores quantidades de aglomerantes além de serem de difícil pulverização e mistura (ABPC, 1984 *apud* Silva, 2007). Dessa forma, de maneira 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.

Das (2001) apresenta que o cimento ajuda a diminuir o limite de liquidez e incrementar o índice de plasticidade 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 que 45%-50% e o índice de plasticidade é menor do que 25%, aproximadamente.

A estabilização por cimento pode ser dividida em categorias (Medina, 1987 *apud* Soliz, 2007):

- 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 de pavimentos;
- 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 de pavimentos;
- 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.

Segundo Medina (1987 *apud* Dourado, 2013), durante o processo de estabilização do solo com cimento, ocorrem dois tipos de reações: as reações de hidratação do cimento Portland e as reações entre os argilominerais e a cal

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

liberada na hidratação do cimento. Estas reações podem ser exemplificadas da seguinte forma:

(1) Reações de hidratação do cimento:

$$C_3S + H_2O \rightarrow C_3S_2Hx \text{ (gel hidratado)} + Ca(OH)^2$$
$$Ca(OH)^2 \rightarrow Ca^{++} + 2(OH)^-$$

Se o pH da mistura abaixar: $C_3S_2Hx \rightarrow CSH + Cal$

(2) Reações entre a cal gerada na hidratação e os argilominerais do solo:

$$Ca^{++} + 2(OH)^- + SiO_2 \text{ (Sílica do solo)} \rightarrow CSH$$
$$Ca^{++} + 2(OH)^- + Al_2O_3 \text{ (Alumina do solo)} \rightarrow CAH$$

As ultimas reações são chamadas pozolânicas e ocorrem em velocidade mais lenta. O CSH é um composto cimentante semelhante ao C_3S_2Hx.

Nos solos granulares desenvolvem-se vínculos de coesão nos pontos de contato entre os grãos (semelhante ao concreto, porém o ligante não preenche todos os espaços). Nos solos argilosos a ação da cal gerada sobre a sílica e alumina do solo resulta no aparecimento de fortes pontos de ligação entre as partículas de solo. Os solos granulares respondem melhor à estabilização com cimento porque em solos argilosos a reação da cal gerada na hidratação e os argilominerais ocasionam uma queda no pH da mistura, afetando a hidratação e o endurecimento do cimento. Se o pH abaixar, o composto C_3S_2Hx reage novamente formando CSH e cal. Como o C_3S_2Hx é responsável pela maior parte da resistência da mistura solo-cimento, o aparecimento do CSH é indesejável quando provém deste composto, sendo benéfico apenas quando origina-se das reações da cal com os argilominerais. Portanto as reações de hidratação do cimento são as mais importantes e respondem pela maior parte da resistência final alcançada para a mistura (Dourado, 2013).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

2.5.3.2 Solo–Cal

O uso da cal como aditivo no tratamento de solos é o mais antigo método de estabilização química conhecida, utilizada nas mais variadas aplicações, como a Via Apia, construída pelos Romanos. Atualmente, a cal está entre os dez produtos de origem mineral de maior consumo mundial, e vem ganhando ainda mais expressão devido à quantidade de setores industriais que dela se utilizam, devido às suas características de reagente químico e aglomerante-ligante.

Pode-se definir solo-cal como o produto resultante da mistura íntima compactada de solo (geralmente argila), cal e água, em proporções estabelecidas através de dosagem (USBR, 1998).

De acordo com a USBR (1998), existem diversas denominações para as misturas onde se tem a adição de cal ao solo, sendo os termos solo estabilizado, solo melhorado, solo modificado e solo tratado comumente utilizados. Entretanto, os processos são conceitualmente os mesmos, e o critério para a adoção de uma ou outra denominação é o grau de alteração das propriedades do solo natural em função da quantidade de aglomerante aplicado.

A introdução e mistura de cal ao solo objetiva a obtenção de propriedades como resistência, deformabilidade e permeabilidade adequadas a um determinado uso de engenharia, quando o solo puro não atende às especificações exigidas. A estabilização com cal tem sido comumente empregada na construção de estradas (para uso em base ou sub-base de pavimentos), na proteção de taludes contra a erosão e em obras hidráulicas.

Segundo Dourado (2013), suas principais funções são:

- Melhoria permanente das características do solo;
- Aumento da resistência à ação da água;
- Melhoria do poder de suporte;
- Melhoria da trabalhabilidade de solos argilosos;
- Diminuição da expansão de solo;
- Alteração granulométrica do solo.

De acordo com Medina (1987 *apud* Soliz, 2007), as reações entre o solo e a cal podem ser de duas formas: i) Rápida ou imediata ou ii) Reações lentas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

Danimond e Kinter (1972, *apud* Silvane 2013), apresentam que os dois estágios de reações são bem definidos, sendo o processo rápido ocorrido de minutos a dias, podendo atingir meses, e no qual há uma melhora na plasticidade do material, mas é desenvolvida pouca resistência permanente; e o processo lento ocorrido de minutos a anos, onde se tem o desenvolvimento da resistência com a formação de produtos cimentantes.

Na estabilização de solos com cal, inicialmente ocorre a hidratação da cal, que modifica o pH do solo e provoca a floculação das argilas em função das reações de troca de cátions. Após essa etapa o material sofre uma redução de expansão e retração melhorando sua plasticidade. Com o tempo, há a produção de reações pozolanicas e fenômenos de carbonatação, proporcionando ao material melhores características geo-mecânicas (Silva, 2007).

Sandroni & Consoli (2010) apontam que a carbonatação ocorre quando o dióxico 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. A carbonatação é indesejável, uma vez que reduz a quantidade de cal disponível para a produção de reações pozolânicas (cimentícias).

A cal misturada com água resulta em cátions livres, os quais podem substituir outros cátions dentro dos complexos de troca catiônica que ocorrem no solo. Guimarães (2002 *apud* Lopes, 2011) assegura que a troca catiônica promove, após alguns instantes, mudanças nas propriedades físicas do solo, como a granulometria, Limites de Atterberg, compactação, expansão e capacidade de suporte. O resultado prático da floculação-aglomeração é a mudança da textura do solo, uma vez que as partículas de argila unem-se e formam partículas com maiores dimensões.

Vizcarra (2010) afirma que as reações pozolânicas são similares àquelas que ocorrem em solos tratados com cimento. É sabido que a cal e a água reagem com a 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

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

água saturada com cal. A seguir são apresentadas as reações que ocorrem no solo tratado com cal:

$$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{+2} + 2(OH)^-$$

$Ca^{+2} + 2(OH)^- + SiO_2$ (sílica da argila) → CSH (silicato hidratado de cálcio)

$Ca^{+2} + 2(OH)^- + Al_2O_3$ (alumina da argila) → CAH (aluminato hidratado de cálcio)

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

Segundo Soliz (2007) o efeito da cal nas propriedades do solo pode ser visto sob vários aspectos:

- Distribuição granulométrica: há um aumento do tamanho dos grãos, tanto mais acentuada quanto mais fino o solo natural. A agregação pode se desfazer em parte quando se embebe o solo-cal na água, porém muitos agregados tornam-se hidrofóbicos;
- Plasticidade: o LP cresce com o uso da cal e o LL tende a diminuir. O aumento do teor de cal acarreta valores de IP cada vez menores. O 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: a resistência à compressão simples é o ensaio mais comumente utilizado.

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

Sandroni & Consoli (2010) relatam que a quantidade de cal necessária para o tratamento de solos depende das características dos mesmos, de seu uso e das

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

características mecânicas desejadas da mistura. 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 trabalhabilidade, aumenta a resistência de defloculação e erosão;
- Estabilização do solo com cal, a qual fornece aumento permanente da resistência e rigidez do solo devido à ocorrência de reações pozolânicas.

A cal tem pouco efeito em solos altamente orgânicos e também em solos com pouca ou nenhuma quantidade de argila, uma vez que o melhoramento das propriedades mecânicas é produzido pelas reações entre a cal e os minerais argílicos. Seu efeito é mais eficiente em solos argilosos, podendo ser mais efetivo que o cimento em pedregulhos argilosos (Ingles & Metcalf, 1972 *apud* Lopes Junior, 2011). A Tabela 2.1 apresenta a previsão da quantidade de cal em função dos diferentes tipos de solo.

Tabela 2.1 – Previsão da quantidade de cal em função dos diferentes tipos de solo (Fonte: Ingles & Metcalf, 1972 *apud* Sandroni & Consoli, 2010)

Tipo de Solo	**Teor de Cal para Modificação**	**Teor de Cal para Estabilização**
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
Argila siltosa	1 a 3	2 a 4
Argilas	1 a 3	3 a 8
Solos Orgânicos	não recomendado	não recomendado

Segundo Rosa (2009), argilas expansivas apresentam uma resposta mais rápida à adição de cal. Bell (1996 *apud* Rosa, 2009) 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 o mesmo 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%.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

Ingles e Metcalf (1972 *apud* Rosa, 2009), apresentam um estudo sobre a influência do tempo de cura e da quantidade de cal aplicada em diferentes tipos de solos. Os autores observaram que as taxas de ganho de resistência eram maiores em pedregulhos arenosos, conforme ilustrado na Figura 2.4, e que a resistência a compressão simples aumenta linearmente com a quantidade de cal até determinado nível, e a partir deste ponto, a taxa de acréscimo de resistência diminui com a quantidade de cal, devido à lenta cimentação, conforme ilustrado na Figura 2.5.

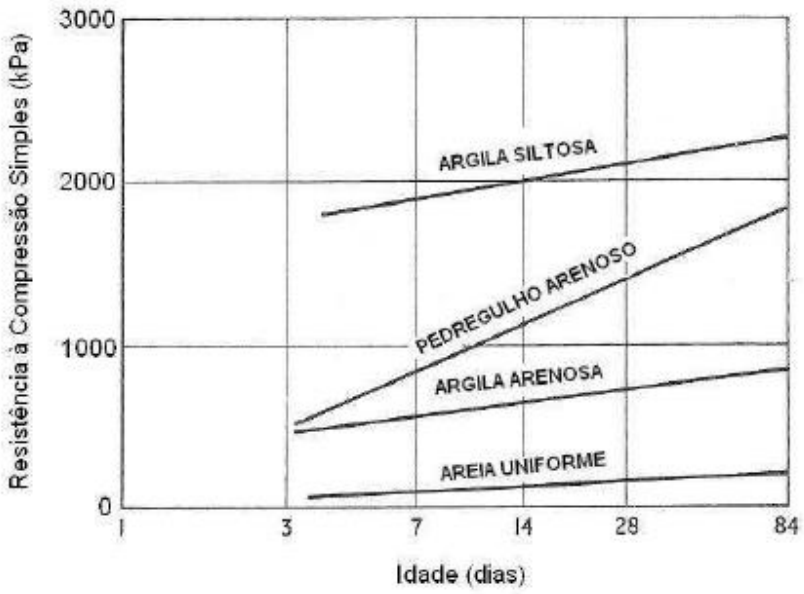

Figura 2.4 – Efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal (Ingles & Metcalf, 1972 *apud* Rosa, 2009).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

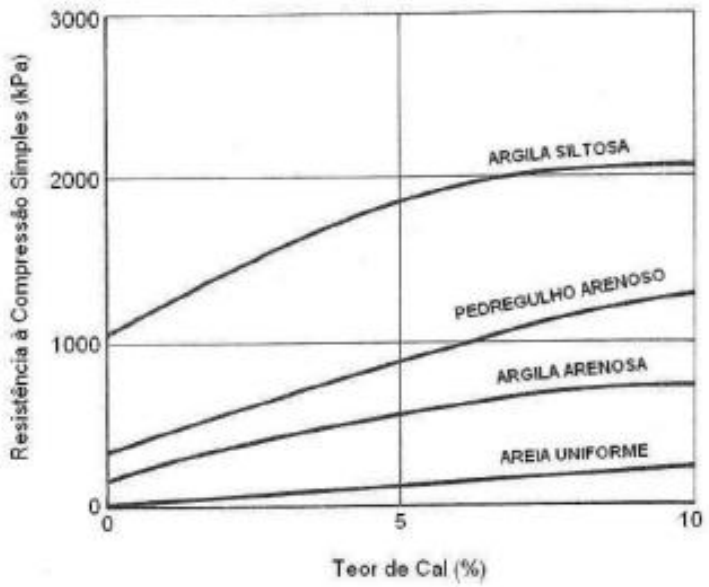

Figura 2.5 – Efeito do teor de cal sobre a resistência a compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias (Fonte: Ingles & Metcalf, 1972 *apud* Quispe, 2013)

Silvane (2013) apresenta que uma forma de potencializar a estabilização com a cal, quando o solo não possui argila suficiente, ou esta não é suficientemente reativa, è através da substituição do solo por materiais pozolânicos, como a cinza volante de carvão mineral, RSU, casca de arroz, entre outras. De acordo com Pinto (1971), o uso de cinza volante misturada com cal, para estabilização de solos arenosos iniciou na década de 40 nos Estados Unidos, onde parte de uma auto-estrada de New Jersey foi executada com este tipo de mistura.

2.5.3.3 Solo-Cinza-Cal

As reações que ocorrem em sistemas constituídos de materiais como solo, cinza volante, cal e água são relativamente complexas, mas sabe-se que a cinza volante desenvolve reações pozolânicas e que sua mistura com a cal possui características semelhantes ao solo-cal. Este tipo de reação ocorre com materiais que contém sílica e alumina, e que, estando finamente divididos, em presença de água reagem com a cal. Para que as reações ocorram é necessário que a sílica e alumina sejam solubilizadas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

Segundo Mateos (1961, *apud* Rosa, 2009), uma idéia geral do fenômeno físico-químico envolvido é que quando a cal e cinza volante são misturadas ao solo, parte desta cal se combina com as partículas do solo e outra parte com o dióxido de carbono presente nas fases ar e água do solo, e a parcela remanescente, combina-se com a cinza volante, em uma reação de natureza pozolânica. Estas reações se processam lentamente, produzindo então ação cimentante.

Materiais com acentuadas características pozolânicas estão, seguramente, entre aqueles mais utilizados para promover mecanismos de melhora e otimização de desempenho de solos, qualquer que seja sua aplicação (construção de barragens, obras rodoviárias, elementos de fundações).

Em princípio, solos arenosos sem fração fina, como o caso do material estudado, não apresentam reações secundárias, não aumentando consideravelmente sua resistência somente com a adição de cal. Dessa forma, para a estabilização desses solos, quando a correção granulométrica não é possível (por falta de outros materiais) ou quando o consumo de cimento é muito elevado (economicamente inviável), a adição da cinza volante juntamente com a cal, permite a ocorrência de reações pozolânicas também neste tipo de solo, pois a cinza disponibiliza sílica amorfa.

Consoli *et al* (2001), estudando um solo arenoso tratado com cinza volante e cal de carbureto, verificaram que para uma mesma tensão confinante, o aumento da quantidade de cal provoca aumento da resistência de pico e diminuição da deformação na qual o pico é atingido.

Rosa (2009) estudou os parâmetros que possuem influência sobre a resistência de misturas solo-cinza-cal. Através de ensaios de compressão simples e medidas de sucção, avaliou-se a influência das variáveis quantidade de cal, quantidade de cinza volante, porosidade e do tempo de cura sobre a resistência de um solo estabilizado com cal e cinza volante. Em seu estudo foi utilizado um arenito da formação Botucatu, com adição de cinza volante (0%, 12,5%, 25%) e cal (3%, 5%, 7%, 9%), e tempos de cura de 28, 60 e 90 dias. Através de seus resultados, a autora concluu que o aumento da quantidade de cal e cinza volante, do peso específico aparente seco e do tempo de cura, provoca o aumento da sua resistência à compressão simples, sendo que esta resistência cresce linearmente com o aumento da quantidade de cal e exponencialmente com a redução da sua

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

porosidade. Assim, verificou-se que, a relação vazios/cal, definida pela razão entre a porosidade da mistura compactada e o teor volumétrico de cal, ajustado por um expoente, demonstra ser um parâmetro adequado na estimativa da resistência à compressão simples das misturas estudadas.

Mateos (1961, *apud* Thomé, 1999) observou que os solos arenosos são os que mais se beneficiam com a adição de cal e cinza volante e que também não existe uma proporção ótima de cal e cinza volante para estabilizar todos os solos. Foram feitos ensaios de resistência à compressão, com amostras utilizando 6% de cal, 76,5% de areia e 17,5% de cinza volante. Observou-se que a mistura areia-cinza volante-cal aumentou sua massa específica aparente seca. O aumento da densidade leva a um aumento na resistência, pois há um contato mais próximo e/ou aumento de contatos entre as partículas da cal e cinza. Foram estudadas dois tipos de cinzas, e também observou-se que os tipos de cinzas com maior superfície específica são mais reativas, levando a um maior aumento da resistência (Mateos, 1961 *apud* Mallmann, 1996).

Mallmann (1996) observou que o aumento da energia de moldagem resulta em um acréscimo de resistência nas misturas solo-cinza-cal. Segundo o autor, grande parte desse aumento ocorre devido, provavelmente, a um maior número de reações pozolânicas que se desenvolveram com a aproximação das partículas devido ao aumento de energia. Estudos mostraram que o tempo de cura é um dos principais fatores influentes na resistência à compressão simples de corpos de prova curados à temperatura ambiente (± 21°C).

De acordo com Mateos (1961, *apud* Thomé, 1999) os fatores que afetam a estabilização de solos com cinza e cal são: tipo de solo, tipo de cinza, tipo de cal, efeito de diferentes proporções de cal e cinza, períodos de cura, efeito da energia de compactação e efeito da temperatura de cura. A Figura 2.6 apresenta um esquema dos fatores que influenciam nas propriedades dos materiais estabilizados pozolanicamente de acordo com Nardi (1975).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

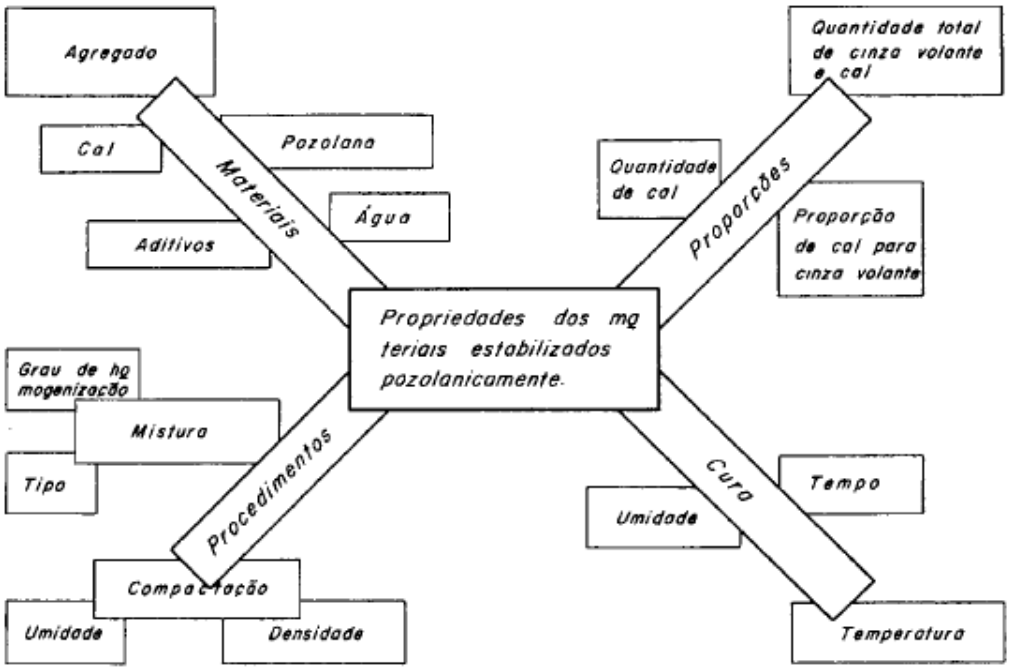

Figura 2.6 – Fatores que influenciam nas propriedades dos materiais estabilizados pozolânicamente (Fonte: Nardi, 1975).

Carraro (1997 *apud* Rosa, 2009) ao estudar um solo silto arenoso tratado com cinza volante e cal de carbureto observou que o teor de cal presente nas misturas não teve tanta influência sobre os valores médios de resistência à compressão simples até a idade de 90 dias de cura. Já para 180 dias, o valor da resistência se mostrou dependente do teor de cal utilizada.

De acordo com Ahlberg & Barenberg (1975 *apud* Mallmann, 1996), um dos fatores que interferem na solubilidade do hidróxido de cálcio ao adicionar-se água no sistema, é a variação da temperatura. Para que ocorra a reação pozolânica, além da presença de íon cálcio na solução, é importante que haja solubilidade da sílica presente no material pozolânico, então se torna importante conhecer os fatores que afetam essa solubilidade.

Silvane (2013) estudou a influência da temperatura de cura no comportamento mecânico de misturas areia-cinza volante-cal. Foram realizados ensaios de compressão simples e de tração por compressão diametral em corpos de prova com 3, 5 e 7% de cal (em massa), com peso especifico aparente seco de 14, 15 e 16 kN/m², curados a 20, 27, 35 e 50°C por 28 dias e com 25% de cinza volante, a fim de se avaliar a resistência das misturas para diferentes temperaturas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

devido à natureza endotérmica das reações de hidratação da cal. Foi observado através dos resultados, que ambas as resistências estudadas aumentam linearmente com o aumento da quantidade de cal e exponencialmente com a redução de porosidade, e que a temperatura mostrou ter grande influencia em ambas as resistências estudadas. Para o ensaio de tração por compressão diametral, observou-se que a resistência amplia-se 1,6 vezes quando a temperatura de cura passa de 20°C para 27°C, 1,4 vezes quando é elevada de 27°C para 35°C, porém não há crescimento relevante de 30 para 50°. Para o ensaio de compressão simples, observa-se que de 20°C para 27°C há um aumento de cerca de 2 vezes na resistência, porém a partir desta temperatura não há mais um crescimento significativo. A autora supõe que a parada no aumento das resistências estudadas é provavelmente devido à extinção das reações entre a cal e a cinza volante

Behak (2007) estudou o comportamento de um solo sedimentar arenoso em mistura com cinza de casca de arroz e cal, constatando que as misturas desenvolveram resistência a tração, demonstrando a ocorrência de reações pozolânicas. Esta cinza, em conjunto com a cal, possibilitou a produção de um material significativamente mais resistente e durável e menos deformável que o solo natural.

Solos estabilizados pozolanicamente, mediante a adição de cinza volante e cal hidratada, constituem-se em um novo material geotécnico artificialmente cimentado. O comportamento mecânico deste novo material, entre outras características, pode diferir daquele que caracteriza o solo natural, sendo necessária sua avaliação para previsão e compreensão do comportamento de engenharia que o novo material passa a apresentar.

A estabilização de solos com cinza pesada é mais recente e menos usual, devido ao fato do material apresentar menor atividade pozolânica quando comparado às cinzas volantes. Porém, atualmente diversos estudos vêm sendo desenvolvidos a fim de se avaliar a aplicabilidade desta cinza.

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, devido aos baixos percentuais de óxido de cálcio, pode-se esperar um desenvolvimento de reações autocimentantes mais limitado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

2.5.3.4 Solo-Cinza de Carvão

A cinza de carvão é gerada durante o processo de incineração do carvão em usinas termelétricas, e os dois principais tipos de cinzas resultantes do processo são a cinza de fundo (*bottom ash*) e a cinza volante (*fly ash*). Tipicamente o carvão é pulverizado e fundido com ar na câmara da caldeira de combustão, onde imediatamente inflama, gerando calor e produzindo resíduo 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 cinzas mais leves, chamadas cinza volante, permanecem em suspensão nos gases de combustão. Antes dos gases se esgotarem, a cinza volante é removida por dispositivos de controle das emissões de partículas.

A cinza volante pode ser definida como resíduo de granulometria fina, e que constitui um agente efetivo para estabilização química e/ou mecânica dos solos, modificando sua densidade, teor de umidade, plasticidade, e resistência. Como grande parte das cinzas volantes no Brasil já possuem reutilização de diversas formas, após processo de geração e coleta, parte destas são separadas para análises de parâmetros físicos e químicos, para que se determinem a variação de suas propriedades e sejam enquadradas aos requisitos aplicáveis (Lopes, 2011).

As cinzas de fundo possuem uma granulometria mais grossa que as cinzas volantes. Suas propriedades também variam com a composição do carvão, grau de moagem do beneficiamento na pré-queima e, do sistema de extração e transporte da cinza após a queima (Goethe, 1990 *apud* Lopes, 2011). A variação da granulometria das cinzas de fundo é grande, apresentando maior parte dos grãos na fração areia e silte e baixos teores de argila, não apresentando plasticidade, nem coesão.

As cinzas pesadas são, reconhecidamente, materiais com menor atividade pozolânica do que as cinzas volantes. 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

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

cinzas volantes, que são vendidas como matéria-prima para outras indústrias (Lopes, 2011).

Segundo a ACAA (2014), a cinza volante proveniente da queima de carvão é praticamente idêntica à composição das cinzas vulcânicas pozolânicas, ideais para o concreto. Nos Estados Unidos, mais que a metade da produção de concreto utiliza as cinzas volantes em alguma quantidade em substituição ao cimento tradicional. São algumas aplicações da cinza volante:

- Matérias primas em produtos de concreto e argamassa;
- Material de enchimento para aplicações estruturais e aterros;
- Ingrediente na estabilização e/ou solidificação de resíduos;
- Ingrediente na modificação e/ou estabilização de solos;
- Componente de bases de estradas, sub-bases e pavimentos.

Ainda de acordo com a ACAA (2014), fisicamente a cinza de fundo é caracterizada pela cor cinza a preto, possui grãos angulares e uma estrutura porosa. A cinza de fundo pode ser usada como substituto a agregados e geralmente é suficientemente bem graduada em tamanho de partículas para evitar a necessidade de uma mistura com outros agregados finos para satisfazer os requisitos. A estrutura porosa da superfície das partículas faz com que esse material seja menos resistente que os agregados convencionais e mais adequado pao uso em camadas de base, ou aplicações de misturas a frio, por exemplo. Sua superfície porosa também faz com que esse material seja mais leve que os agregados convencionais. São algumas aplicações deste:

- Material de enchimento para aplicações estruturais e aterros;
- Agregado para uso em bases de estradas, sub-bases e pavimentos;
- Agregado em produtos de concreto leve.

São diversos os estudos já realizados com cinzas de carvão. Nardi (1975), posteriormente complementado por Marcon (1977), comprovaram a viabilidade da estabilização de areia com cinza volante e cal. Estudos mais recentes foram desenvolvidos por Thomé (1999), Prabakar *et al* (2003), Dias (2004), Farias (2005), Kim *et al* (2005) Rosa (2009), Lopes (2011), Tastan *et al* (2011), dentre

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

outros, onde foi analisado o desempenho de solos estabilizados com cinzas de carvão e aditivos em laboratório.

2.6 APROVEITAMENTO DAS CINZAS DE RSU

O aproveitamento de materiais residuais constitui, atualmente, uma área de estudo em expansão, principalmente devido às questões de sustentabilidade e racionalização de recursos naturais envolvidas no tema.

Uma das técnicas de aproveitamento, tanto das cinzas de RSU, como outros resíduos industriais, é a aplicação destes como estabilização de solos, proporcionando a melhoria de um material já existente.

A estabilização de solos com cinzas de RSU ainda vem sendo tema de pesquisas e menos utilizadas na prática quando comparadas, por exemplo, às cinzas de carvão, devido ao menor número de usinas termoelétricas de RSU. Contudo, o comportamento relatado sobre seus efeitos e mecanismos de estabilização é comparável aos das cinzas de carvão, desde que o RSU seja principalmente composto por matéria orgânica (Vizcarra, 2010).

De acordo com Mangialarde (2001), o reuso do resíduo como agregado reciclado para a produção de concreto pode ser muito interessante, pois reduz o consumo de agregados naturais. Por outro lado, suas propriedades químicas e de lixiviação requerem uma caracterização rigorosa, para que não haja potencialidade de impactos negativos ao meio ambiente.

De acordo com Ferreira *et al* (2003), a cinza volante é rica em alguns elementos e compostos (como metais e sais) e, portanto, tem potencialidade para ser usada como material bruto. Cada potencial aplicação para a cinza volante resulta em três vantagens principais: o uso de um material bruto sem nenhum custo, conservação de recursos naturais e a eliminação de resíduo. Os autores consideram a existência de três fatores relevantes para se avaliar a potencialidade da cinza volante em cada aplicação: (1) adequação para o processamento; (2) desempenho técnico; (3) impacto ambiental.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

(1) O primeiro fator depende das características físico-químicas das cinzas volantes, tais como o tamanho das partículas e propriedades químicas, que podem constituir uma limitação para determinado processo (embora em alguns casos estas características possam ser ajustadas em conformidade com os requisitos de processamento);

(2) O segundo fator considera que, mesmo que a cinza volante possa ser facilmente processada, o produto final não pode ser usado, a menos que este apresente boas propriedades técnicas;

(3) 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 considerado, para que não sejam criadas novas fontes de poluição.

Considerando estes três fatores e as características das cinzas volantes, Ferreira *et al*. (2003) apresentam nove potenciais aplicações para o resíduo, agrupando-as em quatro categorias principais. A Tabela 2.2 apresenta as possíveis aplicações.

Tabela 2.2 - Uso potencial da cinza volante de RSU. (Ferreira *et al*, 2003).

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

Para fins de obras geotécnicas como a pavimentação, a cinza volante de RSU pode ser aplicável 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 do solo subjacente e águas subterrâneas por substâncias lixiviadas da camada de base (Ferreira *et al*, 2003). Segundo Vizcarra

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

(2010), estudos de viabilidade para substituição de areia por cinza volante em camadas de base de areia/cimento foram conduzidos por Mulder (1996) e, 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. Observou-se que 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 a aplicação numa base de pavimento, é ainda mais barato que dispor a cinza volante como material perigoso.

Vizcarra (2010) comenta que uma potencial aplicação da cinza volante de RSU em estabilização de solos, ocorre como sua substituição à cal ou cimento, aproveitando-se suas características pozolânicas. Materiais com características pozolânicas estão entre os mais utilizados para promover mecanismos de melhora e otimização de desempenho de solos, qualquer que seja sua aplicação (construções de barragens, obras rodoviárias, elementos de fundações, etc.) (Rosa, 2009). A compreensão das reações é difícil, mas se sabe que a cinza volante desenvolve reações pozolânicas e que sua mistura com cal tem as mesmas características de solo-cal.

Lopes (2011) estudou a aplicabilidade das cinzas volantes e de fundo provenientes da queima de carvão mineral em termoelétricas. De acordo com Pinto (1971 *apud* Lopes, 2011), a cinza volante (*fly ash*) é considerada como uma pozolâna artificial. Sua definição, dada pela norma americana ASTM C618 é: material silicoso ou silico-aluminoso, que por si só possui pouca ou nenhuma capacidade de cimentação, porém em forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxidos alcalinos e alcalinos terrosos, a temperatura ambiente para formar ou ajudar na formação de compostos com propriedades cimentantes.

O processo de hidratação e reação pozolânica em estabilização de solos pode ser explicado da seguinte forma: quando a água entra em contato com o cimento, a hidratação do mesmo ocorre rapidamente. Os principais produtos da hidratação são os silicatos de cálcio hidratados (CSH), aluminatos de cálcio hidratado (CAH), silicatos de alumínio de cálcio hidratado (CASH), e cal hidratada [$Ca(OH)_2$]. Esta hidratação leva ao aumento do valor do pH da água presente nos poros do material, que é resultado da dissociação do $Ca(OH)_2$. As

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

bases fortes dissolvem a sílica e alumina do solo e cinza volante de maneira similar à reação entre um ácido fraco e uma base forte. (Saitoh *et al*, 1985 *apud* Horpibulsuk et al, 2012). A sílica e alumina hidratadas em seguida irão reagir gradualmente com o cálcio e íons liberados a partir da hidrólise do cimento, a partir de compostos insolúveis (produtos de cimento secundários) e endurecer com o tempo. Consequentemente, do ponto de vista econômico e ambiental, alguns resíduos podem ser utilizados juntamente com materiais pozolânicos, como a cinza volante, para desenvolver um material cimentante (Horpibulsuk *et al*, 2012).

Segundo Quispe (2013), ao se adicionar cal ou cimento ao solo tem-se a redução da compressibilidade e aumento da resistência ao cisalhamento do material, melhorando- se assim suas propriedades de engenharia. A densidade da cinza volante de RSU é menor que a de outros materiais utilizados convencionalmente em construções de aterros. Valores típicos de densidade para a cinza volante de RSU estão na faixa de 1,7 – 2,4, enquanto que pra areia esse valor é aproximadamente 2,65. Para aplicação como aterro sobre solos moles, por exemplo, o uso da cinza se torna vantajoso, uma vez que o carregamento imposto é diminuído, obtendo-se menores recalques.

Em obras geotécnicas como construção de aterros, em geral se utilizam solo ou pedras como materiais de construção, e faz-se um sistema de drenagem apropriado. Quando os solos não apresentam as propriedades geotécnicas desejáveis, é comum se utilizar da prática de estabilização.

Goh e Tay (1993, *apud* Vizcarra, 2010) investigaram a possibilidade da utilização da cinza volante de RSU em aplicações geotécnicas, como material de aterro. Os autores relatam que o material apresenta os pré-requisitos necessários para este tipo de aplicação, possuindo alta resistência e permeabilidade, característica típica de materiais granulares, e menor densidade quando comparado com os materiais convencionais. Também avaliou-se a possibilidade de utilização da cinza volante em estabilização do solo, observando-se que as misturas solo-cinza volante apresentaram menor compressibilidade e aumento da resistência ao cisalhamento quando comparado com outros solos não tratados. Através de ensaios de compressão não confinada, observou-se mudança na resistência ao cisalhamento não drenada, que sofreu acréscimo com o tempo e

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

com o aumento no teor de cinza volante de RSU. Dos resultados de seus ensaios, os autores sugerem que: (1) a cinza volante poderia ser utilizada 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, a fim de se adquirir resistências maiores.

O principal problema referente ao uso da cinza de resíduo sólido urbano em aterros é o mesmo citado anteriormente para aplicação em camadas de pavimentos, que consiste na possibilidade de contaminação do solo e das águas subterrâneas. Para avaliar a periculosidade deste material, Goh e Tay (1991, apud Ferreira *et al*, 2003) compararam ensaios de lixiviação realizados para a cinza volante de RSU pura e estabilizada com cal/cimento. Eles observaram que o produto lixiviado da cinza volante pura não atendeu às normas de qualidade de água potável e que a cinza volante estabilizada com cal/cimento apresentou valores menores, não se detectando concentrações tóxicas. Porém, eles limitaram seu estudo à análise somente da cinza volante pura de RSU, não observando o que aconteceria com misturas solo-cinza volante, o que poderia dar uma indicação mais precisa do comportamento de lixiviados de aterros construídos com esses materiais. Uma das soluções que diversos autores propõem para o problema da lixiviação de metais pesados é o tratamento prévio da cinza, através de lavagem.

Mangialardi (2001) utilizou a cinza volante de RSU não para fins geotécnicos, mas também avaliou resultados da cinza com e sem pré-tratamento. O autor aplicou a cinza volante como agregado para a produção de concreto, e em seu estudo obteve como resultado que a cinza volante sem pré-tratamento não foi adequada para ser utilizada como agregado, já a cinza que recebeu o tratamento apresentou bons resultados e potencialidade de uso em concretos. De acordo com o autor, a modificação da composição química da cinza volante de RSU através de um tratamento de lavagem preliminar, representa um modo efetivo de melhorar as características químicas e mecânicas do material.

Lam *et al* (2010) apresenta três métodos de tratamento que podem ser utilizados com o objetivo de adequar os resíduos à reutilização e reduzir os impactos ambientais, estes são: processo de separação, solidificação/estabilização e métodos térmicos. Na prática, é comum se iniciar o tratamento das cinzas por técnicas de separação, que consistem em melhorar a qualidade do resíduo através

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

de técnicas que incluem sua lavagem, processo de lixiviação e técnicas eletroquímicas, seguindo-se seu beneficiamento com o tratamento térmico e finalizando com a solidificação/estabilização. Este último se refere aos processos que utilizam algum aditivo para imobilizar química e/ou fisicamente o conteúdo perigoso presente nas cinzas.

Tastan *et al* (2011) estudaram a efetividade e os fatores que afetam o grau de estabilização de solos orgânicos estabilizados com cinza volante. De acordo com os autores, a construção de rodovias sob solos orgânicos pode ser problemática, uma vez que estes em geral apresentam baixa resistência ao cisalhamento e alta compressibilidade. Uma das soluções adotadas nestes casos, é a remoção do solo e substituição deste por outro material, o que constitui um procedimento dispendioso. Uma alternativa que se apresenta é a estabilização química deste tipo de material. Dentre os ensaios realizados, os autores apresentam resultados de ensaios de compressão não confinada realizados em diversas misturas de solo-cinza. Foram utilizados três tipos de solos orgânicos e seis tipos de cinza volante, e para todas as misturas estabilizadas com cada tipo de cinza volante, os resultados de resistência se apresentaram significativamente melhores que para o solo orgânico puro.

Em relação à cinza de fundo, sua maior aplicação tem sido em base de rodovias ou aterros. Na Europa, este resíduo já é amplamente utilizado como substituto de agregados, consequentemente, atualmente já existe uma base de dados maior sobre suas propriedades físicas e químicas (Chandler *et al* 1997). Na Alemanha, Dinamarca e Holanda, mais que 50% da cinza de fundo de RSU gerada, é utilizada como material de base para rodovias e aterro. Nos Estados Unidos sua utilização ainda não foi bem estabelecida, contudo, projetos experimentais significativos têm sido desenvolvidos, nos quais as cinzas de fundo são utilizadas como substitutos de agregados em misturas asfálticas, material de sub-base para construção de estradas, aterros e aplicações marinhas (erosão costeira) (Forteza *et al*, 2004).

Chandler *et al* (1997) destacam a importância de se avaliar a composição da cinza de fundo bruta, pois dessa forma as comparações entre o resíduo, e outros materiais utilizados como agregados, pode ser realizada. A determinação da composição bruta geralmente envolve sua classificação visual, medição do teor de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

água, avaliação da concentração de materiais ferrosos, dentre outros aspectos, que são considerados como descrição da cinza de fundo bruta, e indica a qualidade física e ambiental geral da cinza

Forteza *et al* (2004) realizaram uma análise física e química detalhada das cinzas de fundo de RSU visando avaliar seu potencial de reuso. Seus resultados indicaram que o uso deste resíduo para construção de estradas é praticável tanto do ponto de vista ambiental como das propriedades estruturais do material. Eles apresentam que em qualquer caso de efetiva utilização do material, alguns aspectos devem ser considerados. Primeiramente, a cinza de fundo de RSU apresenta tanto uma alta heterogeneidade, como variabilidade, que seus resultados não podem garantir o comportamento da cinza em qualquer momento e sob qualquer condição, sendo necessário, portanto, um contínuo controle das principais propriedades químicas e de engenharia do material. Em segundo lugar, a partir de alguns resultados eles puderam 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, a qual possui o vidro como componente dominante. Eles destacam que com esse maior controle a cinza de fundo resultante se tornaria um pó fino e as aplicações a serem consideradas seriam moderadas. Por fim, os autores afirmam que 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 também considerado.

Com o objetivo de descrever mais detalhadamente o comportamento mecânico de cinzas de fundo de RSU para aplicação em camadas de pavimentos, Becquart *et al* (2008) realizaram uma larga campanha experimental, que incluiu ensaios e carga cíclica, oedométricos, e de cisalhamento triaxial. A cinza de fundo foi estudada individualmente, sem e com um tratamento específico a base de utilização de um agente ligante específico. Os resultados revelaram um comportamento mecânico similar à materiais densos convencionais (areias, materiais granulares não cimentados) e dependente da pressão média aplicada, característica do comportamento mecânico de meios granulares. Os autores destacam algumas características mecânicas observadas, como: elevada rigidez,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

baixo índice de compressibilidade, e elevado ângulo de atrito, que está relacionado principalmente ao embricamento dos grãos. Todas essas características dão ao material uma aplicação semelhante ao cascalho natural, classicamente utilizado em pavimentação. Os resultados para o material tratado com teores de cimento variando de 1 a 5% seguiram as mesmas tendências observadas em materiais que possuem uma base cimentante, cujo comportamento se apresenta mais frágil. Os ângulos de atrito interno aumentaram tanto para resistência de pico, como para grandes deformações, sendo estes parâmetros dependentes do teor de cimento. Os autores destacam que a realização de ensaios laboratoriais, como triaxiais, em cinzas de fundo representa um procedimento delicado, devido à grande presença de pedaços de vidro angulares no material, que podem levar a perfuração da membrana durante o ensaio.

Vizcarra (2010) utilizou cinzas volantes e de fundo de RSU provenientes da mesma usina incineradora de resíduos do presente estudo (USINAVERDE). Seu estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade das cinzas de RSU para uso em base de pavimentos rodoviários, através de misturas destas com um solo não-laterítico regional. Foram realizados ensaios de caracterização física, química e mecânica para o solo puro e para o mesmo com a adição de diferentes teores de cinzas (20 e 40%). Ensaios ambientais de lixiviação e solubilização também foram realizados, visando avaliar sua aplicabilidade do ponto de vista ambiental, de forma a garantir a não periculosidade do material. Através destes, o autor classifica ambas as cinzas como Resíduo Classe IIA – Não Inerte, o que as classifica como resíduo não perigoso, mas devido ao fato de serem não inertes, seria necessário um acompanhamento quando aplicadas em campo. As misturas com inserção de cinzas apresentaram um comportamento mecânico compatível com as exigências de um pavimento típico de baixo volume de tráfego. Através de ensaios de módulo de resiliência o autor conclui que os resultados são dependentes do teor de cinza, e esta pode melhorar ou piorar o comportamento do solo. A adição da cinza ao solo influenciou favoravelmente em seu comportamento, diminuindo sua expansibilidade, sendo que a adição de 40% de cinza chegou a diminuir esta característica em até 0,5%. Os melhores resultados obtidos foram em misturas com a cinza volante.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

Fontes (2008) avaliou a potencialidade de aplicação da cinza volante de RSU como aditivo mineral em concretos de alto desempenho e argamassas. Em seus resultados, observou-se que a utilização deste resíduo proporciona melhoria a todas as propriedades dos concretos, e além disso, os metais pesados presentes nestes ficaram retidos nas matrizes cimentícias. A argamassa testada contendo a cinza volante apresentou resultados mecânicos, físicos e de durabilidade superiores à referência, o que poderia estar relacionado à ação física de refinamento dos poros pela cinza. Assim como Vizcarra (2010), Fontes (2008) realizou ensaios de lixiviação e solubilização na cinza utilizada, classificando-a como Resíduo Classe II A – não inerte.

Ubaldo *et al* (2012) analisou a adição das cinzas volantes de RSU para estabilização química de um solo residual com baixa capacidade de suporte. Os autores relatam que, por apresentar teores médios de SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3, elevado teor de CaO e baixo teor de matéria orgânica, a cinza influencia favoravelmente o mecanismo de estabilização química. Avaliou-se a influência da cinza na resistência mecânica das misturas sobre dois aspectos: i) variando-se o tempo de cura da mistura após a compactação e ii) variando-se o intervalo de tempo entre a homogeneização da mistura e sua compactação. Segundo os autores, a qualidade na estabilização da mistura solo-cinza volante depende muito das características da cinza e do tipo de solo. Em relação à influência do tempo de cura do corpo de prova moldado com solo-cinza volante de RSU, observou-se que a cinza funciona como agente químico para estabilização do solo, aumentando a resistência mecânica da mistura realizada tanto com solo argiloso, como com solo arenoso.

Quispe (2013) avaliou o comportamento de um solo argiloso estabilizado com cinzas de RSU também provenientes da mesma usina do presente estudo. Foram realizados ensaios de caracterização física, química e mecânica. Através de ensaios triaxiais estáticos, analisou-se a influência dos dois tipos de cinzas, do teor utilizado (20, 30 e 40%) e do tempo de cura (0, 30 e 60 dias) nos parâmetros de resistência do material. Através de seus resultados, o autor conclui que todas as misturas solo-cinza apresentam melhoria nos parâmetros de resistência, quando comparados com o solo puro, sendo que as misturas solo-cinza volante apresentam os melhores resultados. As misturas com 40% de cinza volante e 30% de cinza de fundo apresentaram as melhores características de resistência e

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

poderiam ser utilizadas como estabilizante no solo estudado, cumprindo exigências geotécnicas e ambientais. Com relação ao tempo de cura, o autor observou que na maioria dos casos houve uma melhora do comportamento das misturas solo-cinza em comparação ao obtido sem cura. O teor de cinza (volante ou de fundo), tempo de cura e a tensão de confinamento influenciam na deformação volumétrica das misturas solo-cinza, apresentando menores deformações volumétricas para maiores teores de cinza e maiores tempos de cura.

Através da realização de ensaios físicos, químicos e mecânicos, Dourado (2013) estudou as cinzas de fundo de RSU para aplicação em obras de pavimentação. Para tal, foram testadas misturas da cinza de fundo a um solo granular inadequado para uso como material de fundação em pavimentos. Foram analisados o solo puro, misturas solo-cinza de fundo (20 e 40%) e solo-cinza de fundo-cal (20% de CF e 3% de cal). Observou-se que as misturas de solo-cinza de fundo apresentaram comportamento semelhante ao do solo puro, o que pode estar relacionado ao baixo grau de pozolanicidade das cinzas de fundo, atuando, então, somente como melhoria granulométrica. A adição de cal mostrou um aumento considerável nos parâmetros estudados, quando comparado ao solo puro e outras misturas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na revisão bibliográfica do presente estudo, foi mencionada a problemática atual sobre a geração e disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil, bem como seus impactos quando não há se tem o gerenciamento correto do mesmo. Além disso, apresentou-se uma das soluções adotadas atualmente para o tratamento do RSU, que consiste em sua incineração, e os produtos resultantes desse processo, que são as cinzas volante e de fundo de RSU. É dada ênfase às pesquisas e possíveis aplicações das cinzas de RSU e aos diferentes métodos de estabilização de solos, onde pode-se aplicar as cinzas, comparando-as com outros aditivos estabilizadores, como cal, cimento e cinzas de carvão. A maioria dos estudos já realizados com cinzas de RSU visam sua utilização para obras de

pavimentação, mas existem também outras aplicabilidades a serem estudadas, como o uso destes materiais para uso em aterros sobre solos moles, camadas de aterros sanitários, estabilização de taludes, dentre outras. Nesta revisão relataram-se também pesquisas de diversos autores que vêm sendo realizadas, e em diversos países. Através das pesquisas já realizadas, a utilização de cinzas de RSU em obras geotécnicas tem se mostrado viável, contribuindo para um menor custo das obras e uma destinação ambientalmente correta para o resíduo. Vale ressaltar que por se tratar de um resíduo que possui variações em sua constituição, é imprescindível a realização de ensaios de caráter ambiental, para se garantir a aplicabilidade do mesmo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213344/CA