

2 Revisão Bibliográfica

2.1. Considerações iniciais

A utilização de resíduos para aplicação em diversos setores construtivos tem sido objeto de estudo em todo o mundo, tornando-se uma solução para a destinação de materiais que, antes, não tinham nenhuma utilidade, já que, na maioria das vezes, eram dispostos incorretamente no meio ambiente.

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

Diversos estudos buscam compreender a influência de cinzas 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 na construção civil.

Segundo Nardi (1975), os chineses usaram a cal e a argila para construir a Grande Muralha da China há aproximadamente 2.000 anos e os romanos, séculos antes da era cristã, utilizaram as cinzas vulcânicas, provenientes do vulcão Versúvio, como aditivo às argamassas, devido às suas características pozolânicas. Originalmente, o termo pozolana era atribuído aos materiais naturais de origem vulcânica que reagem com a cal, em presença de água, a temperatura ambiente. Esse termo provém da terra vulcânica de Pozzouli, cidade situada no sopé do Versúvio. Muitas dessas obras encontram-se intactas e em uso até os dias atuais, o que pode comprovar a durabilidade dos compostos hidráulicos, de pozolanas (Massazza,1998). Outro exemplo do emprego de materiais pozolânicos é o Coliseu, construído em Roma, de 80 a 70 a.C., onde foi utilizado um composto aglomerante com pozolanas de Pozzuoli e da ilha grega de Santorim (Klemm, 1989).

As pesquisas realizadas atualmente com as cinzas de bagaço de cana e com as de casca de arroz têm sido utilizadas como 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 de outros materiais.

De acordo com a norma NBR 10004 (1984), os resíduos sólidos podem ser classificados como perigosos, não-inertes e inertes. Para saber em que classe se enquadram a cinza de bagaço de cana-de-açúcar e a cinza de casca de arroz, é necessário realizar ensaios de solubilização e lixiviação, avaliando se as concentrações dos elementos químicos analisados ultrapassam os valores de referência.

Segundo Mallmann (1996), com a crescente produção de cinzas, nos países que utilizam a queima de carvão como energia, passou a haver uma maior preocupação no sentido de estudar seus efeitos sobre o meio ambiente, à medida que elas apresentam elevado grau de toxicidade. O autor cita, em sua pesquisa, estudos que foram realizados com este objetivo, como os de Smith et al (1979), Kaakinen et al (1985) e Repetto (1988). Também destaca a atuação de pesquisadores brasileiros para essa problemática, como Andrade e Solari (1985), e Martins e Zanella (1990), que realizaram estudos dessa ordem na Termelétrica de Candiota, no Rio Grande do Sul.

A revisão bibliográfica deste trabalho abrange os seguintes temas:

- Cinza de Bagaço de Cana de Açúcar e cinza de casca de arroz – origem e importância de sua utilização;
- Os processos de estabilização de solos;
- Pesquisas realizadas com solo e diversos tipos de cinzas;
- Conceitos sobre o ensaio de resistência ao cisalhamento direto.

2.2.

Cinza de bagaço de cana-de-açúcar

O cultivo da cana-de-açúcar é uma cultura típica de climas tropicais e subtropicais que se adapta, com certa facilidade, a diferentes tipos de solos. É uma atividade agrônômica de alta eficiência no processo de fotossíntese, pois utiliza

entre 2% e 3% da radiação solar incidente na produção de biomassa vegetal (Lora et al., 2001).

Cultivada desde a época da colonização, a cana-de-açúcar é um dos mais tradicionais e importantes produtos agrícolas do Brasil e sempre representou um importante produto comercial destinado à produção, principalmente com o açúcar e o álcool etílico.

De uma forma simplificada, a fabricação de açúcar e álcool compreende as etapas de colheita e transporte da cana até a usina, lavagem e processamento. O processo difere-se a partir da extração do caldo da cana que é tratado para produzir açúcar e/ou fermentado para produzir álcool. As diferentes etapas que envolvem a produção sucroalcooleira estão indicadas na Figura 1.

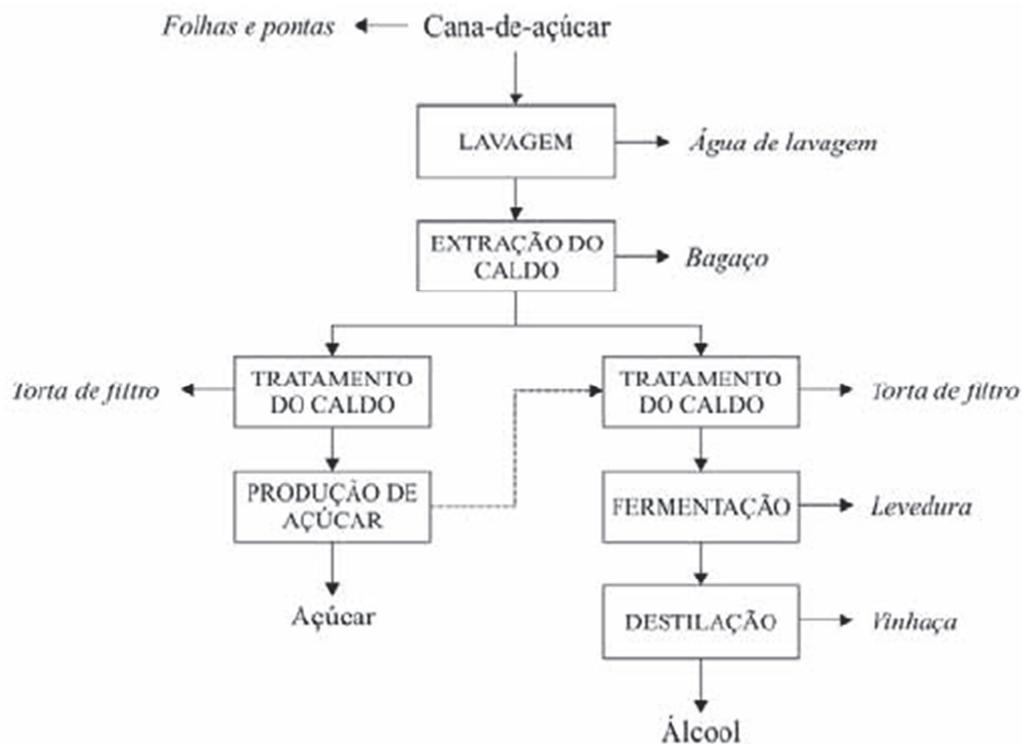


Figura 1 Esquema global do processo de produção de açúcar e álcool (Cordeiro, 2006)

Os principais subprodutos da indústria sucroalcooleira, como mostrado na Figura 1, são folhas e pontas, água de lavagem, bagaço, torta de filtro, leveduras e vinhaça.

A água utilizada na lavagem da cana, antes da moagem, pode ser reaproveitada na produção de biogás. O bagaço é empregado na produção de energia (vapor/eletricidade), hidrólise (rações), polpa de papel, celulose e aglomerados. As folhas e pontas, além das mesmas aplicações do bagaço, podem ser utilizadas como forragem. A vinhaça ou vinhoto é utilizada como fertilizante na adubação dos canaviais. Por fim, a torta de filtro, subproduto do processo de clarificação do caldo, na fabricação do açúcar, e a levedura, obtida após a fermentação do caldo, são, também, empregadas na adubação.

Das utilidades dos subprodutos, merece destaque a geração de energia elétrica, por meio da queima do bagaço (Cordeiro, 2006).

Para cada tonelada de bagaço que alimenta o processo de co-geração de energia, aproximadamente, 25kg de cinza residual são geradas (FIESP/CIESP, 2001). As características da cinza são influenciadas pelas condições de queima do bagaço.

A cinza residual é, geralmente, utilizada como adubo nas próprias lavouras de cana-de-açúcar, apesar de ser um material de difícil degradação e que apresenta poucos nutrientes minerais. Este fato tem motivado a busca por aplicações que possam agregar maior valor ao subproduto, dentre as quais se destaca o emprego como aditivo mineral em sistemas cimentícios. Pesquisas apontam para a viabilidade do uso da cinza em conjunto com o cimento Portland. (Cordeiro, 2006).

2.2.1.

Aplicações de cinza de bagaço de cana-de-açúcar

Freitas (1996) utilizou uma cinza residual de bagaço de cana-de-açúcar para a confecção de tijolos de solo-cimento. Os resultados indicaram que a adição da cinza proporcionou aumento da resistência à compressão.

Mesa Valenciano (1999) estudou o emprego de cinza do bagaço na confecção de pastas com cimento Portland, para a produção de tijolos de solo-cimento. Os resultados mostraram que a incorporação da cinza aumentou o conteúdo de água e reduziu, significativamente, a resistência à compressão.

Singh et al. (2000) avaliaram a atividade pozolânica da cinza do bagaço em pastas com cimento Portland. A resistência à compressão da pasta, composta por

10% de cinza, com relação à massa de cimento, foi 30% maior que a resistência alcançada pela pasta de referência, a de 100% de cimento.

Valenciano e Freire (2004) analisaram algumas características de misturas de solos arenosos e argilosos, cimento e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar para sua possível utilização na fabricação de materiais alternativos de construção. Para tal, amostras de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar foram submetidas a um tratamento prévio que consistia em peneiramento e moagem, antes de serem incorporadas às misturas de solo e cimento. Diferentes combinações de cimento-cinza foram estudadas, determinando-se a consistência normal e a resistência à compressão simples, para cada uma delas, aos 7 e 28 dias. Posteriormente, corpos-de-prova moldados com tais misturas de solo-cimento-cinza foram submetidos a ensaios de compactação, compressão simples e absorção de água. Os resultados indicaram a possibilidade de substituir até 20% do cimento Portland, na mistura, por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, sem prejuízo da resistência à compressão simples. No caso de misturas de solo-cimento-cinza, pode-se afirmar que, de modo geral, os resultados obtidos com solo arenoso foram melhores do que os obtidos com solo argiloso para a massa específica aparente seca máxima, umidade ótima de compactação e absorção de água. Em se tratando da resistência à compressão simples, ambos os solos produziram resultados estatisticamente iguais entre si.

Cordeiro (2006) analisou a viabilidade de utilização de cinzas ultrafinas de bagaço de cana-de-açúcar como aditivo mineral em concreto de resistência convencional (25 MPa) e de alto desempenho entre misturas com cinzas, em teores de substituição de cimento Portland de 10%, 15%, 20% e 40%, e concretos de referência. Os resultados indicaram que é possível a produção de concreto em mistura com teor de cinza de 40%, o que permitiu a manutenção das propriedades reológicas e mecânicas e a melhora da durabilidade dos concretos.

Ganesan et al. (2007) avaliaram a utilização de cinza de bagaço de cana-de-açúcar como material cimentício complementar. Foram realizados ensaios de compressão simples e de tração para avaliar a variação da resistência de corpos de prova com diferentes teores de cinza. Os resultados mostraram que o teor ótimo de mistura seria de 20% de cinza, pois, com esse teor, os valores de resistência à compressão se mostraram superiores aos valores de referência, sem cinza.

Paula (2008) analisou o potencial da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial do cimento Portland em argamassa. Foram realizados ensaios de compressão simples, com teores até 30% de cinza. Os resultados mostraram que os ensaios realizados com 28 dias de cura indicaram a viabilidade de substituição de 20% de cimento por cinza.

Sales (2010) estudou a viabilidade de substituir parte da areia em concreto por cinza de bagaço de cana-de-açúcar. As amostras de cinza foram submetidas à caracterização química, análise granulométrica, determinação do peso específico, entre outros. Argamassas e concretos com cinza de bagaço de cana-de-açúcar, como substituição de areia, foram produzidos e testes de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade foram realizados. Os resultados indicaram que as amostras de argamassas produzidas com a cinza no lugar de areia apresentaram melhor desempenho mecânico. Os corpos de prova, com teores de cinza entre 20 e 30%, apresentaram valores de resistência à compressão maiores que os valores de referência, sem cinza.

Souza et al. (2011) analisaram a viabilidade da utilização de cinza de bagaço de cana-de-açúcar na produção de materiais de cerâmica. Misturou-se até 60% em peso de cinza com uma matéria-prima argilosa. Os resultados apresentados mostraram que a reutilização do material, na indústria cerâmica, é viável.

Faria et al. (2012) estudaram o uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em substituição de argila na fabricação de tijolos de barro. Inicialmente, caracterizaram a composição química da cinza e realizaram ensaios de resistência à tração. Os resultados mostraram-se eficientes para substituição de até 10% de solo argiloso pela cinza.

Ramírez et al (2012) analisaram a viabilidade do uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e de cal como estabilizantes químicos para bloco de solo argiloso seco e saturado, realizando ensaios de compressão simples. Os estudos mostraram que os blocos com 10% de cinza e 10% de cal apresentaram melhor desempenho do que os blocos feitos com solo puro.

Mendonça et al (2012) estudaram a incorporação de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em formulações para fabricação de tijolos de solo-cimento, com a finalidade de obter um material com elevado desempenho, maior durabilidade e menor custo. Os métodos para avaliar o comportamento desses tijolos foram feitos a partir de ensaios de compressão simples, com misturas com 2, 4 e 6% de cinza e

com 7 e 14 dias de tempo de cura. Os resultados apresentaram como mistura ótima aquela que utilizou 2% de cinza, em 14 dias de cura.

Modani et al (2013) analisaram a viabilidade do uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar como substituta parcial de agregados finos do concreto. Foram realizados ensaios com teores de cinza 10%, 20%, 30% e 40%, em volume de agregado fino em concreto. Foram realizados ensaios para verificar a resistência à compressão, a resistência à tração e ensaios de caracterização da cinza. Os resultados mostraram que a cinza do bagaço pode ser um substituto adequado para agregados finos e que os teores que mais proporcionaram aumento da resistência à compressão foram aqueles contendo 10 e 20% de cinza.

Sua-Iam (2013) analisou a viabilidade de utilizar cinza de bagaço de cana-de-açúcar com cal, na produção de concreto auto-adensável. Foram realizados ensaios de compressão simples, com teores de 10, 20, 40, 60, 80% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal. Para analisar a resistência, foram realizados ensaios de compressão simples. Com 20% de cal, no agregado fino, que incorpora 20% de cinza de bagaço, melhoram, eficazmente, as propriedades do concreto auto-adensável.

2.3. Cinza de casca de arroz

O arroz é plantado em todas as regiões brasileiras e os principais estados produtores são Rio Grande do Sul, Mato Grosso, Santa Catarina, Maranhão e Pará. O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento classifica o arroz em dois grupos gerais: arroz em casca e arroz beneficiado. A produção e beneficiamento do arroz é uma das atividades mais tecnificadas do setor agrícola brasileiro. O beneficiamento, após a colheita do arroz, ilustrado de forma simplificada na Figura 2, consiste em secagem, limpeza, descasque, brunição (polimento), classificação, seleção, empacotamento e expedição. Alguns engenhos fazem, ainda, a parborização dos grãos de arroz (Cordeiro, 2006).

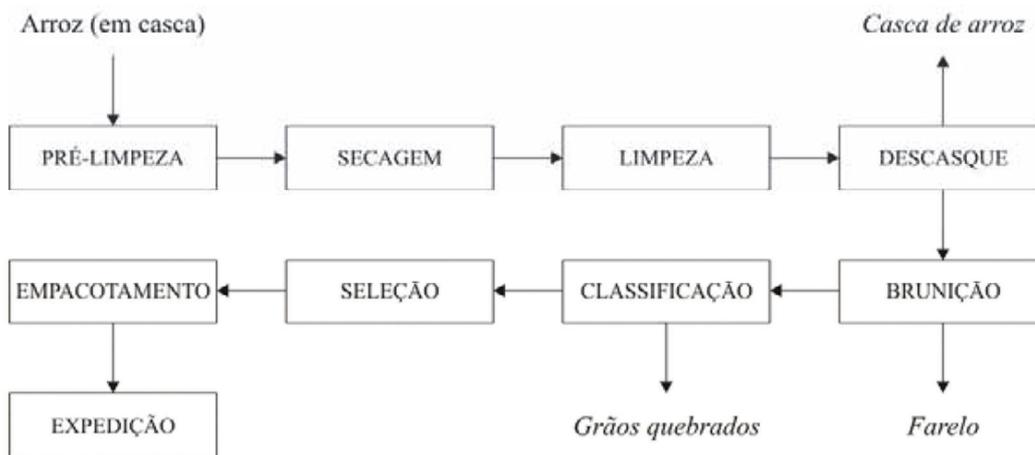


Figura 2 Fluxograma simplificado do beneficiamento industrial do arroz (CORDEIRO, 2006)

A partir do beneficiamento do arroz, derivam, além do arroz polido, três subprodutos, que são os grãos quebrados, o farelo e a casca de arroz.

A casca de arroz, que consiste no principal subproduto da indústria arroseira, corresponde a cerca de 20% do total de arroz (Hwang e Chandra, 2002). É um material abrasivo, de baixo valor nutritivo e, por causa de sua reduzida densidade, seu simples armazenamento e sua eliminação constituem um grave e dispendioso problema. Atualmente, as indústrias beneficiadoras de arroz empregam, praticamente, todo o montante de casca em processos de co-geração de energia.

Um projeto de co-geração que utiliza a casca de arroz como combustível, aliado à produção de energia térmica, possui vários aspectos positivos, como redução de emissão de metano, proveniente da decomposição da casca de arroz, em aterros sanitários; contribuição para a balança comercial, quando se deixa de utilizar lenha e/ou óleo diesel; desenvolvimento tecnológico nacional, com o processo de queima em grelhas; encadeamento de projetos de caldeira, gerador e controle ambiental; e possibilidade de comercialização da cinza da casca de arroz.

É importante ressaltar que o objetivo principal das indústrias de beneficiamento de arroz recai sobre o emprego da casca de arroz como combustível. O monitoramento da queima, quando ocorre, dá-se pelo controle da pressão de vapor gerada e não pela quantidade ou qualidade de cinza residual. Normalmente, o resíduo produzido nas caldeiras é uma cinza escura de elevado teor de carbono, que apresenta uma parte da sílica cristalina (Cordeiro, 2006).

2.3.1. Aplicação de cinza de casca de arroz

O emprego da cinza, como material pozolânico, tem sido pesquisado desde a década de 1970, com destaque para os trabalhos de Metha (1978) e Metha e Pitt (1976).

Rahman (1987) estudou os efeitos da adição de cinza da casca de arroz nas propriedades geotécnicas, como limites de Atterberg, densidade seca, teor de umidade, ótima resistência à compressão simples e ângulo de atrito de solos coesivos e não coesivos, com diferentes porcentagens de cinza de casca de arroz (0, 4, 8, 12, 16, 20 e 24). Os resultados mostraram que, para ambos os solos, a resistência à compressão, aumentou com o aumento da porcentagem de cinza de casca de arroz nas misturas e que a densidade seca máxima diminuiu com o aumento da quantidade de cinza das misturas. O ângulo de atrito, por sua vez, foi obtido por meio de ensaio triaxial UU e aumentou com o aumento da porcentagem de cinza. O teor ótimo de cinza foi definido como sendo igual a 16 %, para ambos os tipos de solos.

No Brasil, o emprego, em concreto, da cinza da casca de arroz tem sido amplamente pesquisado nas duas últimas décadas. Merecem destaque os trabalhos desenvolvidos por Cincotto et al. (1990), com produção de cinza da casca de arroz em forno de leito fluidizado.

No estudo de Zhang e Malhotra (1996), o concreto com cinza da casca de arroz (10%) apresentou resistência à compressão igual a 49,2 MPa, em contrapartida aos 46,3 MPa obtidos para o concreto de referência, após um período de 730 dias de cura.

Silveira (1996) realizou ensaios de resistência à compressão de concretos aos 28 e 148 dias de idade com teores de adição de 0, 5 e 10% de cinza de casca de arroz. Os resultados apresentaram aumentos médios na resistência à compressão acima de 10% para adições de 10% de cinza de casca de arroz.

Sugita et al. (1997) realizaram ensaios para analisar a resistência à compressão com teores de cinza de casca de arroz entre 0 e 50 %. E concluíram que a adição de cinza de casca de arroz aumenta a resistência à compressão aos 28 dias de idade, sendo que com 20% de adição de cinza foram obtidos os maiores valores de resistência à compressão.

Santos (1997) avaliou a potencialidade de utilização da cinza de casca de arroz residual, produzida no sul do estado de Santa Catarina e concluiu que o teor ótimo de substituição de cimento por cinza de casca de arroz, para produção de concreto de alto desempenho, foi 15% em volume absoluto de cimento.

Sensale (2000) estudou a influência da incorporação de cinza de casca de arroz nas propriedades mecânicas de concretos de alta resistência, e de concretos convencionais com vistas a definir algumas propriedades básicas do material como: resistência à compressão, resistência à tração, módulo de deformação, verificando a influência da idade, relação água / (cimento + cinza de casca de arroz) e do percentual de adição. Os principais resultados obtidos na pesquisa mostram que o concreto com cinza de casca de arroz possui excelente comportamento mecânico, melhor resistência à compressão aos 91 dias de idade que os concretos de controle, resistência à tração na compressão diametral e na flexão e módulo de deformação semelhantes aos concretos de controle.

Hwang e Chandra (2002) enfatizam que a moagem da cinza da casca de arroz, até uma finura adequada, é imprescindível para seu emprego, em conjunto com o cimento Portland. A obtenção de produtos cimentícios, com cinza da casca de arroz, é uma alternativa para solucionar o problema da disposição das cinzas no meio ambiente, além de gerar um material com maior valor agregado.

Basha et al (2005) estudaram a viabilidade de se utilizar cinza de casca de arroz e cimento na estabilização de solo residual. O estudo incluiu a análise de propriedades, como compactação e resistência, em ensaio de compressão simples. Os resultados mostraram que, em relação à compactação, o incremento de cinza diminuiu a densidade seca máxima e aumentou a umidade ótima. Em relação à plasticidade, compactação e resistência misturas de 6-8% de cimento, com 10-15% de cinza, são recomendadas como teores ótimos de misturas.

Cordeiro (2006) analisou a viabilidade de utilização de cinzas ultrafinas de casca de arroz como aditivo mineral em concreto de resistência convencional (25 MPa) e de alto desempenho entre misturas com cinzas, em teores de substituição de cimento Portland de 10%, 15%, 20% e 40%, e concretos de referência. Os resultados indicaram que é possível a produção de concreto em mistura, com teor de cinza de 40%, o que permitiu a manutenção das propriedades reológicas e mecânicas e a melhora da durabilidade dos concretos.

Alhassan (2008) realizou testes de resistência à compressão simples com amostras de solo laterítico este foi estabilizado com teores de cinza de casca de arroz entre 2-12% em peso do solo seco. Os resultados obtidos, indicam uma diminuição geral da densidade seca máxima e aumento do teor de umidade ideal, com aumento do teor de cinza. Também houve ligeira melhora na resistência a compressão simples com aumento do teor de cinza. Os valores máximos de resistência foram registrados, entre 6-8% de cinza.

Brooks (2009) realizou uma pesquisa com o intuito de validar a utilização de um solo expansivo como material de construção. Foram realizados ensaios de compressão simples. Foi considerado como teor ótimo a utilização de 12% de cinza de casca de arroz, pois este propiciou o maior incremento na resistência do solo.

Villena et al. (2010) realizaram um estudo laboratorial de misturas de concreto compactado com rolo (CCR) com adição de cinza de casca de arroz para sua aplicação como base pavimentos compostos. A cinza de casca de arroz foi utilizada para substituir 5% do agregado mineral na dosagem do CCR. As propriedades avaliadas foram a resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade. Os resultados mostram que um incremento nos valores das propriedades mencionadas pode ser atingido com o uso da CA em substituição do agregado mineral. Os resultados obtidos foram usados para dimensionar uma estrutura de pavimento composto com base de CCR e adição de CA. Esta estrutura foi comparada com uma estrutura de pavimento flexível. Segundo o dimensionamento realizado, a estrutura composta resultou em menores espessuras do que a estrutura flexível. Desta forma, a adição de cinza de casca de arroz nas misturas de CCR pode levar a menores consumos de cimento e de agregados minerais em relação a misturas sem adição de CA e menores consumos de agregados se comparando com estruturas de pavimento flexível equivalentes.

Yadu et al (2011) realizaram o estudo experimental de estabilização de um solo argiloso com cinza de casca de arroz. O solo foi estabilizado com diferentes percentagens (3, 6, 9, 11, 13, e 15%). Foram realizados ensaios de caracterização e ensaios de resistência à compressão não confinada. Os resultados indicam que a adição da cinza reduz o índice de plasticidade. As curvas de umidade e densidade indicam que a adição de cinza proporcionam um aumento no teor de

umidade ideal e diminuição da densidade seca máxima. Com base nos testes o teor ótimo de cinza foi considerado como 12% e 9%, respectivamente.

Klamt e al (2013) estudaram a viabilidade técnica de estabilizar-se um solo arenoso de Alegrete/RS com a adição de cal, cimento e cinza de casca de arroz. A metodologia do trabalho consistiu em estudar e desenvolver um programa experimental de ensaios que permitiu o conhecimento e o melhoramento das propriedades do solo proveniente de uma jazida localizada na cidade de Alegrete, RS, com o uso de diferentes porcentagens de cal, cimento e cinza de casca de arroz como agentes estabilizantes. Foram comparados os resultados de ensaios de resistência à compressão simples (RCS) de corpos de prova moldados sem inclusão de nenhum agente estabilizador e amostras com diferentes teores desses materiais e, desta maneira, é comprovado o desempenho dos diferentes traços estudados em diferentes tempos de cura. A estabilização do solo arenoso com cal, cimento e cinza mostrou-se eficaz, permitindo o uso desses materiais nas camadas de base e sub-base de pavimentos, tendo em vista a adição de novos materiais e minimização do problema de deposição da cinza de casca de arroz.

2.4. Estabilização de solos

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

Villibor (1982) define a estabilização de um solo como sendo a alteração de qualquer propriedade que melhore seu comportamento, sob o ponto de vista de aplicação à engenharia.

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

Estabilização de solos é a aplicação de processos e técnicas que buscam a melhoria das propriedades mecânicas desses materiais. O aumento da resistência,

da rigidez e da durabilidade, são algumas das alterações mais importantes nas propriedades mecânicas do solo (Ingles e Metcalf, 1972 apud Vendruscolo, 1996).

Vargas (1977) define a estabilização de solos como o processo que confere, ao solo, maior resistência às cargas, ao degaste ou erosão, por meio de processo de compactação, correção granulométrica ou de adição de substâncias que lhe vão conferir uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos grãos.

Quando as características dos solos locais não atendem, total ou parcialmente, aos requisitos exigidos pelo projeto de engenharia, as seguintes medidas devem ser tomadas (Medina, 1987):

- Evitar ou contornar o terreno desfavorável;
- Remover o solo e substituí-lo por outro de qualidade superior;
- Projetar a obra para a situação desfavorável do terreno;
- Estabilizar o solo existente.

Segundo Medina e Motta (2004) as propriedades do solo, que o processo de estabilização visa modificar, são:

- A resistência ao cisalhamento, tornando o solo menos susceptível às mudanças ambientais, tais como, a umidade, e tornando-o mais compatível com as cargas a que a estrutura estará submetida;
- O aumento ou a diminuição da permeabilidade;
- A redução da compressibilidade.

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, das 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 pela 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 aplica-se, genericamente, a todos eles, sendo cada método aplicável – ou não –

para um determinado tipo de solo a escolha do melhor método a ser adotado deve ser feita considerando as propriedades do solo em sua condição natural, as propriedades esperadas do solo estabilizado e os efeitos, no solo, após a estabilização.

Para Guimarães (2002), a estabilização de solos pode ser dividida em estabilização mecânica, que abrange a correção da granulometria e plasticidade, com adição ou subtração de certas quantidades das frações constituintes, além da etapa de compactação e estabilização química, que consiste na mistura do solo com aditivos orgânicos ou inorgânicos – materiais betuminosos, resinas, compostos de fósforo, silicatos de sódio, cal, cimento Portland, dentre outros – seguido do processo de compactação.

Santanna (1998) afirma que a combinação de materiais, utilizada na mistura, deve ser feita de modo que o produto final possua maior resistência às cargas, ao desgaste e à erosão, estando adequado para aplicações de engenharia.

De acordo com Medina (1987), o processo de estabilização química consiste na adição de uma determinada substância química ao solo, desencadeando uma reação química do aditivo com os minerais do solo – fração coloidal – ou o preenchimento dos poros pelo produto da reação química do aditivo com a água.

Nas misturas constituídas por solo e cimento bem como em solo e cal, ocorre, inicialmente, uma reação físico-química, em que os cátions Ca^{++} , liberados pela hidratação do cimento, reagem com a superfície dos argilominerais, modificando o pH da solução eletrolítica. Posteriormente, a rigidez da mistura sofre um acréscimo, devido aos produtos cimentantes, oriundos da reação pozolânica.

Ainda de acordo com estes autores, após a mistura do solo com o agente estabilizador, pode ou não ocorrer a formação da 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. Nesse caso, as propriedades do sistema são, essencialmente, as da matriz, havendo predominância das propriedades mecânicas do estabilizador. Da mistura entre o solo e o agente estabilizador, as reações resultantes podem ser físicas, como variação de temperatura, hidratação, evaporação, adsorção, ou químicas, tais como, troca catiônica, precipitação, polimerização, oxidação, solução e carbonatação.

Sandroni & Consoli (2010) concluíram que não só a quantidade de material cimentante regula o grau de cimentação de um solo estabilizado quimicamente, atribuindo-lhe resistência, mas também fatores como a forma, a densidade, as condições de umidade e as quantidades existentes dos produtos reagentes, como a cal, desempenham papel relevante nesse processo.

2.4.1. Estabilização mecânica

A estabilização mecânica de solos pode ser descrita por dois processos principais: compactação e estabilização granulométrica.

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

Para 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, partindo do pressuposto de que a redução de volume de vazios está relacionada ao aumento da resistência. Já a estabilização mecânica, por correção granulométrica, está relacionada às melhorias induzidas no solo pela mistura deste com um ou mais solos e/ou outros materiais, que possibilitam a obtenção de um novo produto com propriedades adequadas aos fins de engenharia requeridos.

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

2.4.2. Estabilização física

No processo de estabilização física, as propriedades do solo são alteradas e, em geral, sua textura e granulometria são modificadas. Este método consiste,

basicamente, na realização de uma mistura de 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).

2.4.3. Estabilização química

A estabilização química dos solos é um procedimento no qual uma quantidade de material químico aditivo é adicionada ao solo natural, para melhorar uma ou mais de suas propriedades, relacionadas às aplicações requeridas pela engenharia. Dentre os estabilizantes mais utilizados, estão os materiais betuminosos, o cimento Portland, a cal, as pozolanas e certos tipos de resinas (Santos, 2012).

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.

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

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).

Na sequência apresentam-se algumas características dos diferentes tipos de estabilização química.

2.4.3.1. 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) concluíram 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, pois estas, normalmente, exigem altas porcentagens de cimento para a obtenção de significativas mudanças em suas propriedades mecânicas.

Embora qualquer tipo de solo possa ser tratado com cimento, os solos granulares são considerados mais indicados que os argilosos, pois conseguem atingir 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* Szeliga, 2014). 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.

Segundo Das (2001), o cimento ajuda a diminuir o limite de liquidez e incrementa 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.

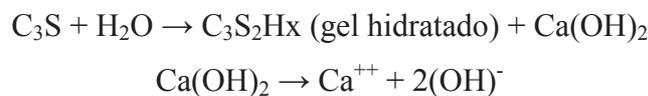
A estabilização por cimento pode ser dividida em categorias (Medina, 1987):

- 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.

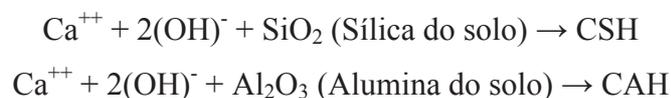
De acordo com Medina (1987) durante o processo de estabilização do solo com cimento, ocorrem dois tipos de reações: as de hidratação do cimento Portland e as entre os argilominerais e a cal, liberada na hidratação do cimento. Estas reações podem ser exemplificadas da seguinte forma:

(1) Reações de hidratação do cimento:



Se o pH da mistura abaixar: $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_x \rightarrow \text{CSH}$

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



As últimas reações são chamadas pozolânicas e ocorrem em velocidade mais lenta. O CSH é um composto cimentante, semelhante ao $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_x$.

Nos solos granulares, vínculos de coesão são desenvolvidos nos pontos de contato entre os grãos, semelhante ao que ocorre com o 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 baixar, o composto $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_x$ reage, novamente, formando CSH e cal. Como o $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_x$ 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 (Szeliga, 2014).

2.4.3.2.

Solo-cinza de carvão mineral

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*).

De acordo com Lopes (2011), a cinza volante pode ser definida como resíduo de granulometria fina, 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 possui reutilização de diversas formas, após processo de geração e coleta, partes destas são separadas para análises de parâmetros físicos e químicos, a fim de que se determinem a variação de suas propriedades e sejam enquadradas aos requisitos aplicáveis.

Segundo Rohde et al (2006), a estabilização de solos com cinza volante, em misturas solo-cinza-cal, teve suas primeiras aplicações nas décadas de 1920 e 1930.

Nardi (1975) afirmou que os processos clássicos de estabilização de solos costumam ser de difícil aplicação a solos mal graduados e uniformes, desprovidos de finos, como os solos arenosos. Isto se deve ao fato de que a uniformidade das partículas destes solos dificulta a cimentação, devido ao maior volume de vazios e ao menor número de contatos entre os grãos de solo.

Quispe (2013) reafirma que solos arenosos, com escassez de argila coloidal, não reagem satisfatoriamente à cal. Assim sendo, uma das alternativas é utilizar cimento, mas, como este pode ser uma solução muito cara, costuma-se utilizar a cinza volante, que possui a função de substituir a fração fina – argila – do solo, reagindo com a cal por meio das reações pozolânicas.

As cinzas de fundo possuem uma granulometria mais grossa que as 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.

De acordo com Lopes (2011), as cinzas pesadas são, reconhecidamente, materiais com menor atividade pozolânica do que as 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 cinzas volantes, que são vendidas como matéria-prima para outras indústrias.

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 da metade da produção de concreto utiliza as cinzas volantes em alguma quantidade, em substituição ao cimento tradicional. Seguem 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, que varia de cinza a preto, possui grãos angulares e uma estrutura porosa. A cinza de fundo pode ser usada como substituto de 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 para 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 (Pinto, 1971). Seguem algumas aplicações:

- 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;

Mateos (1961) *apud* Pinto (1971), ensaiou e descreveu fatores que afetam a estabilização dos solos representativos do Estado de Iowa, nos EUA, com cinzas volantes da região. Dentre estes fatores, podem-se citar tipos de cal, cinza e solo; efeito de diferentes proporções de cal e cinza; relações entre umidade, densidade e resistência; efeitos da energia de compactação e da temperatura de cura; influência da adição de aditivos químicos e da demora na compactação, depois de a mistura ser umedecida; testes de congelamento e degelo, dentre outros. O autor utilizou, em sua pesquisa, misturas de areia com cinza volante (10%, 17,5%, 25%) e cal dolomítica hidratada (6%). Os ensaios de resistência à compressão simples mostraram que os teores ótimos de cinza volante, necessários para a obtenção de resistências elevadas, estariam entre 15% e 25%, ou 30%. Além disso, foi observado um aumento da resistência com a energia de compactação e com o prolongamento do tempo de cura para as misturas.

Nardi (1975) realizou um estudo, em laboratório, da estabilização de um solo arenoso misturado à cinza volante (13%) e cal hidratada cálcica (4%) e verificou o efeito da adição de cimento Portland (1%) e de brita (30%), na resistência da mistura. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e à compressão diametral, por meio dos quais foi constatado um crescimento linear da resistência com o tempo, que não só depende do esforço de compactação, mas também das dosagens das misturas.

Consoli et al (2001) realizaram ensaios de compressão não confinada e ensaios de compressão triaxial drenados de um solo arenoso melhorado com cal carbonática e cinza volante, no intuito de avaliar seu comportamento de tensão-deformação. As mudanças no comportamento da mistura foram observadas imediatamente após a mistura e a compactação e após 28 dias de cura.

Lopes (2011) estudou a aplicabilidade das cinzas volante e de fundo em camadas de base de pavimentos rodoviários, por meio da mistura destas cinzas a um solo areno-siltoso não laterítico. Foram realizados ensaios de caracterização física, química, mecânica e ensaios de solubilização e lixiviação. Os teores de cinza de fundo foram 30% e 40% e da cinza volante foram 10% e 20%, relacionados ao peso do solo seco. 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.

Junior (2011) estudou a aplicabilidade da relação volume de vazios/volume de cal na estimativa da resistência à compressão simples e triaxial para um solo areno-argiloso, misturado com cal e cinza volante. Para isso, foram realizados ensaios de compressão simples e triaxial. Quanto à resistência à compressão triaxial, constatou-se que, quanto maior a cimentação, maior a tensão confinante efetiva de ensaio e o tempo de cura e, quanto menor a relação vazios/cal, maior a resistência obtida.

Meliande (2014) realizou estudo sobre o comportamento de misturas de areia e solo argiloso com teores variados de cinza volante, proveniente do processo de queima de carvão mineral. Para tal foram realizados ensaios de cisalhamento direto em amostras de solo argiloso compactadas na umidade ótima e no peso específico seco máximo correspondente, com teores de cinza volante de 15% e 30% em relação ao peso seco do solo e ensaios em amostras de areia realizados para uma densidade relativa de 50% e umidade ótima de 10%, com teores de cinza volante de 15, 30 e 40% em relação ao peso seco do solo. Para as misturas solo-cinza-cal, adicionou-se 3% de cal em substituição ao peso seco da cinza. Foi analisada a influência do tipo de solo, teor de cinza, adição de cal e tempo de cura (0, 30, 100, 125 e 140 dias) para as misturas, sendo a cura adotada somente para as misturas com areia. Os resultados mostraram-se mais satisfatórios para as misturas com solo argiloso, sendo a adição de cal mais eficiente para a mistura com menor teor de cinza. Na ausência de cal, o melhor comportamento obtido foi para a mistura com 15% de cinza. Quanto às misturas com areia e sem cal, os resultados foram inferiores à areia; já no caso das misturas areia-cinza-cal, não foi possível definir um padrão do comportamento com relação ao tempo de cura, pois ainda que tenha havido um aumento da coesão a determinados dias, este ganho veio acompanhado de uma redução no ângulo de atrito, fazendo com que a areia mantivesse um comportamento melhor. Contudo, o teor de 27% de cinza, sob 140 dias de cura, proporcionou ao solo um aumento de ambos os parâmetros, sendo, portanto, o teor ótimo a ser utilizado.

2.4.3.3. Solo-cinza de resíduo sólido urbano (RSU)

A estabilização de solos com cinzas de RSU ainda vem sendo tema de pesquisas e estas cinzas são 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 ao das cinzas de carvão, desde que o RSU seja, principalmente, composto por matéria orgânica (Vizcarra, 2010).

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 à esta aplicação são a contaminação do solo subjacente e águas subterrâneas por substâncias lixiviadas da camada de base (Quispe, 2013 e Ferreira et al, 2003).

Goh e Tay (1993) 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 – características típicas de materiais granulares – e menor densidade, quando comparado aos materiais convencionais. Também se avaliou a possibilidade de utilização da cinza volante em estabilização do solo, observando-se que as misturas solo-cinza volante apresentam menor compressibilidade e aumento da resistência ao cisalhamento, quando comparado a outros solos não tratados.

Mangialardi (2001) utilizou a cinza volante de RSU não para fins geotécnicos, mas avaliou resultados da cinza com e sem pré-tratamento. O autor aplicou a cinza volante como agregado para a produção de concreto. Em seu estudo, obteve, como resultado, o fato de 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, por meio de um tratamento de lavagem preliminar, representa um modo efetivo de melhorar as características químicas e mecânicas do material.

Segundo 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 Rosa (2009), 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, como construções de barragens, obras rodoviárias, elementos de fundações etc.

Vizcarra (2010) relata 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.

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, os quais 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 na melhora da qualidade do resíduo; por meio de técnicas, que incluem sua lavagem, processo de lixiviação; e por meio de técnicas eletroquímicas, seguindo-se seu beneficiamento com o tratamento térmico e finalizando com a solidificação/estabilização. Este último refere-se 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.

Szeliga (2014) realizou ensaios triaxiais em misturas com solo arenoso, cal e teores de 30% e 40% de cinza volante e de fundo, a diferentes períodos de cura, a fim de avaliar a sua aplicação para obras geotécnicas. Para ambos os tipos de cinza, verificou-se que os melhores resultados obtidos ocorreram para 40% de cinza. Para as misturas com cal, não foi possível se estabelecer um padrão com relação aos períodos de cura estudados, sendo o melhor resultado obtido para a mistura com 27% de cinza, a 60 dias de cura. A execução de ensaios com corpos de prova pré-moldados para esta mesma porcentagem, no mesmo tempo de cura, permitiu concluir que a técnica de moldagem interfere na resistência do material,

uma vez que, ao utilizar corpos de prova pré-moldados, os resultados obtidos tendem a ser melhores do que os com corpos de prova sem ser moldados.

2.5. Considerações finais

Na revisão bibliográfica do presente estudo, foi dada ênfase às pesquisas e possíveis aplicações das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e de cinza de casca de arroz e aos diferentes métodos de estabilização de solos, onde se podem aplicar as cinzas, comparando-as com outros aditivos estabilizadores, como cal, cimento, cinzas de carvão e cinza de RSU.

Por meio das pesquisas já realizadas, a utilização de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e de cinza de casca de arroz, em substituição ao cimento Portland, tem-se mostrado viável, contribuindo para um menor custo das obras e uma destinação ambientalmente correta para os resíduos.