

MARIANA DE JESUS SIQUEIRA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DAS CINZAS
DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM MISTURAS DE
SOLO CIMENTO PARA CAMADAS DE PAVIMENTO**

**SÃO PAULO
2018**

MARIANA DE JESUS SIQUEIRA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DAS CINZAS
DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM MISTURAS DE
SOLO CIMENTO PARA CAMADAS DE PAVIMENTO**

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Tecnólogo em Construção Civil na Modalidade de Movimento de Terra e Pavimentação.

Orientador: Prof. Deise Dias do Nascimento Machado

SÃO PAULO
2018

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Alice e Nivaldo, à minha irmã
Débora e ao Matheus pelo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi desenvolvida no Departamento de Transportes e Obras de Terra da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, tendo a parte experimental sido realizada com o apoio do Laboratório de Mecânica dos Solos, Laboratório de Materiais Asfálticos e do Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais (LPCM). A estas instituições, agradeço a disponibilidade e apoio na realização de todos os ensaios necessários, agradeço especialmente os Auxiliares docentes Rafael Henrique Freire de Godoy e Silvano Leal dos Santos e ao Professor Me. Davinson Mariano da Silva por toda atenção doada.

À Professora Deise Dias do Nascimento Machado, orientadora desta pesquisa, agradeço imensamente por todo tempo de estudo, aprendizagem prestada, pelo acompanhamento constante nos ensaios efetuados, interesse e disponibilidade.

Agradeço a colaboração das Usinas Sucroalcooleiras Iracema do Grupo São Martinho e Usina Pitangueiras pela disponibilização das amostras de cinzas do bagaço da cana de açúcar, fazendo possível a realização da presente pesquisa.

A todos meus professores do curso de Movimento de Terra e Pavimentação, os quais participaram da minha formação com conhecimento e dedicação prestada, especialmente ao Professor Edson de Moura pela ajuda na formação da matriz utilizada no trabalho.

Finalmente, agradeço o apoio, compreensão e aprendizagem que minha família me proporcionou em todas as fases da minha vida, no qual sempre estiveram comigo e foram minha base antes de qualquer coisa.

EPÍGRAFE

*“E aqueles que foram vistos dançando foram
julgados insanos por aqueles que não podiam
escutar a música.”*

Friedrich Nietzsche

RESUMO

A produção de resíduos gerados da fabricação de energia elétrica nas usinas sucroalcooleiras é um fato a se preocupar, principalmente quando estes são descartados incorretamente pela agroindústria. A pesquisa analisa a viabilidade na incorporação de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) em obras de estabilização química de solos com cimento para camadas de pavimento. Inicialmente foram realizados ensaios de caracterização das cinzas e do solo para melhor entendimento do material estudo. Misturas de solo in natura, solo-cimento e solo-cinza-cimento foram submetidas ao ensaio de Mini-Proctor e de Resistência à Compressão Simples com 7 e 28 dias de cura com o propósito de comparar seu comportamento perante cada mistura. Concluiu-se que a mistura-solo-cinza-cimento com teores de cimento e cinza 7% e 16%, respectivamente, obtiveram os melhores resultados quando comparados às outras composições. Notou-se ainda que a mistura citada obteve aumento de 8,2% no ensaio de RCS comparado à mistura equivalente de solo-cimento. Mediante os resultados apresentados, comprovou-se que a introdução de CBC em misturas de solo-cimento utilizadas na estabilização de solo é viável e que esta aplicação pode proporcionar diminuição do consumo de cimentos em obras com esse enfoque.

Palavras-chave: Cinzas do bagaço da cana-de-açúcar. Solo-cimento. Estabilização.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Metodologia	15
Figura 2.1 – Camadas genéricas de um pavimento	17
Figura 2.2 – Classificação TRB.....	19
Figura 2.3 – Teor de cimento considerando a massa específica aparente seca.	28
Figura 2.4 – Teor de cimento considerando a massa específica aparente seca.	29
Figura 2.5 – Sequência de operações: Estabilização solo-cimento.	29
Figura 2.6 – Usina de Solo-Cimento.	30
Figura 2.7 – Mapeamento do plantio de cana-de-açúcar no Brasil.	32
Figura 2.8 – Crescimento da área, produção e produtividade da cana-de-açúcar.	33
Figura 3.1 – Solo estudado.	37
Figura 3.2 – Coleta de Bagaço de Cana-de-Açúcar na Usina Iracema.....	38
Figura 3.3 – CBC – 01 – Iracema e CBC – 02 – Pitangueiras, respectivamente.	38
Figura 3.4 – Ensaio de Fluorescência de Raios X: S2 Ranger	39
Figura 3.5 – Ensaio de determinação de massa específica.	39
Figura 3.6 – <i>Camsizer</i> XT.	40
Figura 3.7 – Matriz experimental.	41
Figura 3.8 – Etapas da mistura Solo-Cinza-Cimento	42
Figura 3.9 – Execução do ensaio Mini-Proctor.	42
Figura 3.10 – Ensaio de Resistência à Compressão Simples.	43
Figura 4.1 – Análise granulométrica CBC-Pitangueiras.	46
Figura 4.2 – Relação entre o menor e maior diâmetro da partícula valores de b/l	47
Figura 4.3 – Análise da Forma das partículas – CBC-Pitangueiras	47
Figura 4.4 – MEAS versus Teor de Umidade – Misturas I, II e II.	49
Figura 4.5 – Deslocamento X Teor de Umidade – Misturas I, II e II.....	49
Figura 4.6 – Resistência à Compressão Simples – Misturas I, II e II.....	50
Figura 4.7 – Relação entre MEAS e RCS.	51
Figura 4.8 – Comparações da MEAS– Misturas III e IV.	51
Figura 4.9 – Comparações do Deslocamento – Misturas III e IV.	52
Figura 4.10 – Comparações da RCS – Misturas III e IV.....	52
Figura 4.11 – Resistência à Compressão Simples – Misturas VII, VIII, IX e X.....	53
Figura 4.12 – Resistência à Compressão Simples – Misturas V, VII, IX e X.....	55
Figura 4.13 – Resumo de ensaios.	56

LISTA DE TABELA

Tabela 2.1 – Terminologia do SUCS	20
Tabela 2.2 – Sistema Unificado de Classificação do Solo	20
Tabela 2.3 – Teor de cimento sugerido para o ensaio de compactação de solo-cimento.	27
Tabela 2.4 – Composição química da CBC de acordo alguns referências.	34
Tabela 4.1 – Caracterização do solo	44
Tabela 4.2 – Resultado da análise química por Fluorescência de Raios X.	45
Tabela 4.3 – Resultados da massa específica real das amostras de CBC.	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
ASTM	American Society for Testing and Materials
CaO	Óxido de cal
CBC	Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CP	Corpo de prova
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
Fe_2O_3	Óxido de Ferro
HRB	Highway Research Board
K_2O	Óxido de potássio
MCT	Miniatura Compactada Tropical
MCV	Moisture Conduction Value
MEAS	Massa Específica Aparente Seca
MgO	Óxido de magnésio
Na_2O	Óxido de sódio
P_2O_5	Pentóxido de fósforo
PCA	Portland Cement Association
PROÁLCOOL	Programa Nacional do Alcool
RCNC	Resistência a Compressão Não Confinada
SINICESP	Sindicato da Indústria da Construção Pesada do Estado de São Paulo
SiO_2	Dióxido de silício
SO_3	Trióxido de Enxofre

SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TiO_2	Dióxido de titânio
TRB	Transportation Research Board
UNICA	União da Indústria de Cana-de-Açúcar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Objetivo	14
1.2	Justificativa	14
1.3	Metodologia	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Pavimento	16
2.1.1	Camadas dos Pavimentos	16
2.1.2	Tipos de pavimentos.....	17
2.2	Origem e Formação dos solos.....	18
2.2.1	Classificação dos solos.....	19
2.3	Estabilização dos solos	22
2.4	Estabilização química com cimento	24
2.4.1	Métodos de Dosagem.....	26
2.4.2	Método de Execução	29
2.4.2.1	Adições ao cimento.....	30
2.5	Cana-de-açúcar	31
2.5.1	Histórico e consolidação	31
2.5.2	Usinas sucroalcooleiras e seus principais insumos	32
2.5.3	Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar.....	33
2.5.3.1	Composição química.....	34
2.5.3.2	Utilização de CBC na construção civil	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	Materiais	37
3.1.1	Solo	37
3.1.2	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar	37
3.1.3	Cimento	38
3.2	Métodos e Procedimentos de Ensaios.....	39
3.2.1	Caracterização das cinzas.....	39
3.2.1.1	Fluorescência de Raios X – CBC.....	39
3.2.1.2	Determinação de Massa Específica Real	39
3.2.1.3	Determinação Granulométrica das Cinzas	40
3.2.2	Caracterização das Misturas.....	40
3.2.2.1	Mini-Proctor.....	40
3.2.2.2	Resistência à compressão simples - RCS.....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1	Caracterização do solo	44
4.2	Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar	44
4.3	Análise das propriedades das misturas	48
4.3.1	Solo in natura versus Solo-Cinza	48
4.3.2	Solo-Cimento versus Solo-Cinza-Cimento	53
5	CONCLUSÃO.....	57
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

A análise da caracterização química e física do solo se torna imprescindível por ser um material extremamente complexo e oscilante, não suprimindo todos os requisitos necessários para aplicação na Construção Civil (VIZCARRA, 2010). Uma das técnicas mais utilizadas para viabilizar a execução de pavimentos sobre solos ruins é a estabilização de solos por ação mecânica, física ou química. Além de adequar o solo aos parâmetros necessários, estes métodos fazem dispensáveis os custos com a logística para substituição do solo existente por outro com características apropriadas.

A estabilização química, feita com cal ou cimento objetiva garantir a melhora das propriedades dos solos finos como o latossolo (PEREIRA, 2012). Neste procedimento, podem ser empregadas cinzas, que ao reagirem quimicamente com os aglomerantes oferecem maior velocidade de hidratação, maior consumo de hidróxido de cálcio e melhor distribuição dos tamanhos dos poros, parâmetros estes, que influenciam positivamente a durabilidade e aumento da resistência da mistura (FREITAS, 2005).

Rosa (2009) ressalta que a busca por diferentes alternativas que assegurem custos reduzidos e preservação do meio ambiente para serem adotadas na estabilização de solos é evidente, uma vez que esta técnica constantemente utiliza materiais que possuem gastos elevados, como a estabilização feita com cimento. Estudos que procuram interpretar a influência das cinzas provenientes de queimas de materiais como casca de arroz, carvão mineral e cana-de-açúcar aplicada na estabilização de solos tem se tornado mais recorrente.

Desde a época colonial, a cana-de-açúcar ocupa uma posição de suma importância para a economia brasileira. Em meados da década de 70, visando a substituição dos derivados de petróleo, devido sua instabilidade econômica e escassez, foi desenvolvido o Proálcool – Programa Nacional do Álcool pelo decreto nº76593 que trouxe um papel de evidência para o cultivo de cana. Este programa propôs impulsionar, oferecendo empréstimos com taxas abaixo do mercado, a produção de carros movidos a álcool e o cultivo de cana-de-açúcar para fabricação deste insumo. Atualmente, as usinas não possuem mais incentivos governamentais, são motivadas por iniciativas privadas que acreditam no potencial do álcool como combustível não só no Brasil, como no mundo (PROÁLCOOL, 2006).

Além da produção de açúcar e biocombustível, nas usinas sucroalcooleiras é realizada a queima do bagaço de cana-de-açúcar responsável pela geração de energia chamada de “cogeração energética” (BEGA, 2014). Neste procedimento são originadas as CBC -

Cinzas do Bagaço da Cana-de-Açúcar, resíduo composto por sílica, álcalis, traços de óxido de ferro, alumínio, cálcio e magnésio (PAULA, 2006). A geração de CBC consiste em cerca de 10% do total de bagaço queimado, que por sua vez, é equivalente a 25 kg a cada tonelada de cana. Analisando os dados obtidos pela CONAB (2017) onde consta que a safra de 2016/2017 obteve cerca de 657,18 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, pode-se estimar que a produção de cinzas de cana-de-açúcar deste período foi de 1.642.500 toneladas.

O destino desse material é um problema recorrente que os administradores das usinas enfrentam. Normalmente, as cinzas são dispostas nos solos dos canaviais como adubo, mesmo tendo em vista que tal resíduo seja pobre em nutrientes, além de conter em sua composição metais pesados, podendo contaminar os lençóis freáticos, a própria plantação e até mesmo afetar o rendimento industrial (CASTRO & MARTINS, 2016).

Diante desta questão, é notória a necessidade de se encontrar soluções de caráter social, econômico e ambiental visando à incorporação deste resíduo. A construção civil vem tentando prestar esse papel nos estudos sobre a viabilidade em introduzir a CBC na:

- Substituição parcial de Cimento Portland (PAULA, 2006);
- Avaliação da atividade pozzolânica deste material em concretos (GOBBI, 2010);
- Substituição parcial de agregados miúdo por CBC em concretos e argamassas (BESSA, 2011);
- Avaliação da incorporação de CBC em tijolos de solo-cimento (AMARAL, 2014);
- Utilização da CBC em latossolo (BEGA, 2014).

Dentro deste contexto, o presente trabalho busca contribuir com a compreensão do comportamento da mistura de solo, CBC e cimento, analisando a viabilidade da utilização desta mistura em obras de pavimentação rodoviária, sobretudo, almeja-se encontrar um destino mais digno a este resíduo.

1.1 Objetivo

O objetivo principal deste estudo é avaliar o potencial da utilização de CBC provenientes das usinas sucroalcooleiras como aditivo mineral na produção de camadas de pavimentos estabilizadas quimicamente com solo-cimento, visando diminuir o volume de resíduos de CBC descartados em locais inadequados e comparar o desempenho de camadas de pavimentos estabilizadas com solo-cimento convencional e solo-cimento acrescido com CBC.

1.2 Justificativa

Sob a perspectiva de ADDIS (2010), para se engatar a utilização de novos materiais na construção civil é preciso superar a deficiência que está intrínseca na população ao se relacionar rejeitos ou reutilização de materiais a técnicas não eficientes, sem se ter embasamento de tal afirmação.

O surgimento de metrópoles acarretadas pelo crescimento populacional, fez com que a construção civil crescesse abundantemente, por conseguinte, o consumo e degradação de recursos naturais aumentaram na mesma proporção. Correspondente a esta alta demanda por agregados, Pereira (2012) afirma que estes materiais provenientes de jazidas estão cada vez mais escassos. Diante deste fato, está em ascensão a busca por soluções favoráveis à preservação dos recursos naturais na construção civil.

A grande produção de CBC no estado de São Paulo, acompanhada com a destinação final do mesmo, que desencadeiam uma série de impactos de vertentes ambientais, sociais e econômicas, tem instigado pesquisadores de diversas áreas a buscarem melhores formas de gestão deste resíduo. A seguir, estão listados impactos os quais justificam a importância da presente pesquisa:

- **Impactos Ambientais:** A falta de fiscalização e organização governamental na gestão de resíduos, a escassez de locais apropriados para acomodar estes materiais e os altos custos burocráticos para este fim se convertem em uma grande dificuldade urbana e ambiental (BESSA, 2011). Estes fatos, fazem com que, o descarte de resíduos da agroindústria seja, muitas vezes, inadequado sem nenhum tratamento prévio;
- **Impactos socioeconômicos:** Referindo-se aos dados obtidos pela União da Indústria de Cana-de-Açúcar – UNICA, o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, tendo assim, responsabilidades de suma importância no âmbito social, sob

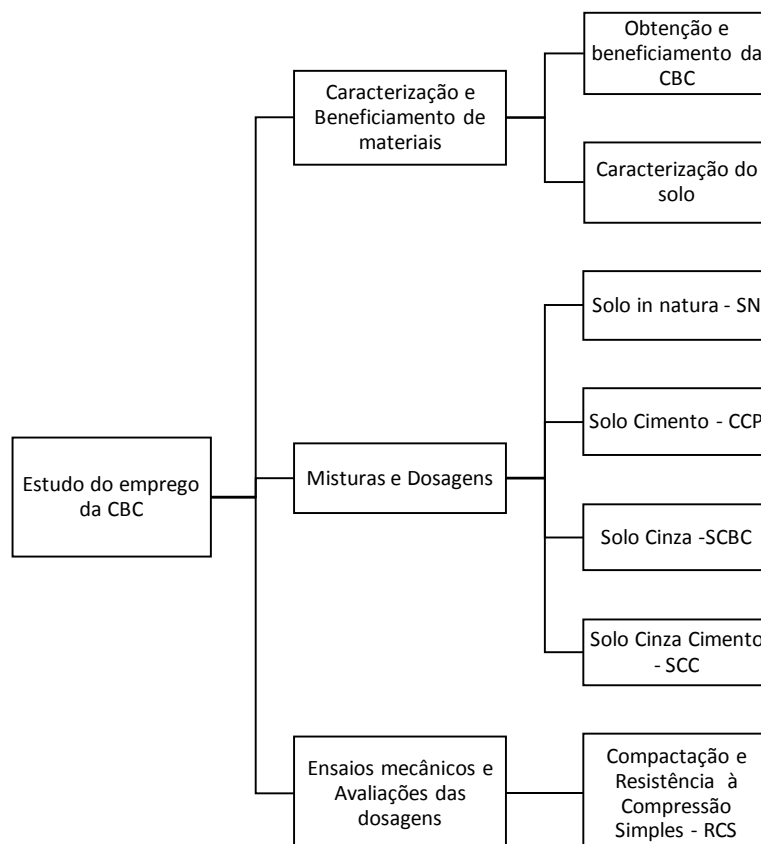
toda comunidade empregatícia (direta e indireta) do setor, e econômica, por ser o maior exportador de insumos da indústria sucroalcooleira.

Através dos dados apresentados, justifica-se a relevância em conhecermos melhor os resíduos de CBC gerados pelas agroindústrias e avaliar sua aplicação nas obras de pavimentação rodoviária.

1.3 Metodologia

A partir da proposta levantada nessa pesquisa: estudo na viabilidade da utilização das CBC em misturas de solo cimento para camadas de pavimentos foram feitos estudos bibliográficos referentes a aplicações anteriores de cinzas na construção civil e sobre a tecnologia que envolve os métodos de estabilização de solos. Desejando obter resultados favoráveis na inserção de CBC em obras de estabilização de solos executadas com cimento, utilizou-se a seguinte diretriz metodológica, subdividida em 10 etapas:

Figura 1.1 – Metodologia



Fonte: PRÓPRIA (2018).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pavimento

O DNIT (2006) define Pavimentação como:

“Estrutura construída após a terraplenagem, destinada a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos dos veículos, a melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança e a resistir aos esforços horizontais tornando mais durável a superfície e rolamento.”

Os registros mais antigos do que hoje chamamos de estrada estão situados na China, país que as inventou (BALBO, 2007). Seguidamente, os romanos aperfeiçoaram as estradas, com materiais, tecnologias e logísticas mais eficientes, tendo como propósito descobrir rotas mais racionais na busca de seus insumos. A partir de então, foi consolidado cada vez mais o conceito de que a construção de rodovias fazia parte de sociedades mais desenvolvidas.

Consoante ao Manual de Pavimentação (2006), em meados da década de 50 as técnicas de pavimentação tiveram avanços graças à permuta entre o Brasil e os Estados Unidos. Deste fato, originizou-se o Manual de Pavimentação em 1960, onde se padronizou as especificações de serviço e construção da Pavimentação.

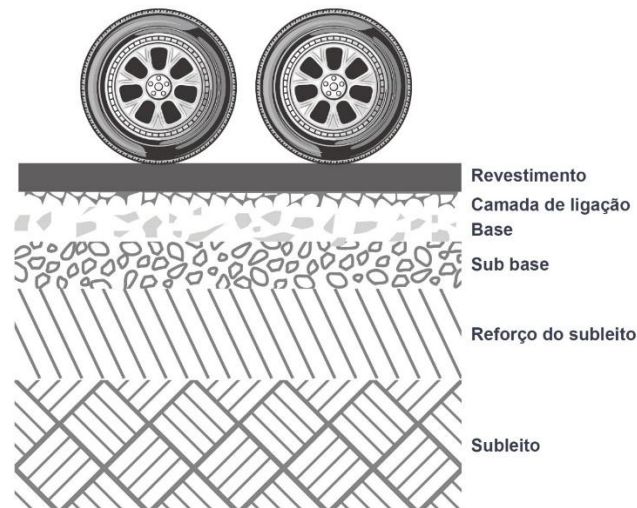
O cenário rodoviário no Brasil, infelizmente, ainda é muito deficiente. Dados do SINICESP (2017) relata que o Brasil possui 1.720.756 km de rodovias, onde apenas 211.468 km são pavimentados, destas o Sindicato afirma que 57,3% não possuem condições devidamente adequadas.

2.1.1 *Camadas dos Pavimentos*

A estrutura de um pavimento tem como objetivo primordial receber e transmitir os esforços solicitados, fazendo com que as camadas mais inferiores, normalmente mais frágeis, não sejam atingidas. Conforme a Figura 2.1 mostra, o pavimento pode ser constituído por diversas camadas, ressaltando que cada camada do pavimento é dimensionada para suportar e se adequar a uma ou mais funções distintas (BALBO, 2007).

A camada responsável por receber as cargas estáticas ou dinâmicas é o revestimento, também chamada de camada de rolamento (SENÇO, 2007). Por fatores como custo ou suporte, a camada de revestimento pode ser dividida em duas camadas composta pela camada de rolamento e o *binder* – também associada como camada de ligação.

Figura 2.1 – Camadas genéricas de um pavimento



Fonte: Adaptado BALBO (2007).

Os esforços verticais originários do tráfego são designados à camada de base. Construída por solos naturais ou estabilizados, brita graduada simples, brita graduada tratada com cimento ou até mesmo por concreto, a base pode ser composta por outra camada chamada “sub-base” que são aplicadas por motivações construtivas ou econômicas (BALBO, 2007).

O subleito é formado por solo natural consolidado e compactado, caso este solo não tenha resistência adequada para suportar os esforços de cisalhamento é construído uma camada de reforço em sua superfície, tendo assim, função complementar à sub-base (SENÇO, 2007).

2.1.2 Tipos de pavimentos

A diferença fundamental entre os tipos de pavimento é em relação ao material empregado em sua constituição. O DNIT (2006) através do Manual de Pavimentação conceitua que os pavimentos são classificados em três modalidades:

- Flexível: Possui camada de revestimento asfáltico, em cada camada as cargas são distribuídas equivalentemente e todas as camadas sofrem deformação elástica;
- Semirrígido: Pavimento que está na condição intermediária entre o pavimento flexível e o pavimento rígido, onde a camada de base ou sub-base é cimentada com ligante hidráulico (BALBO, 2007);
- Rígido: Seu revestimento é executado com cimento Portland e por conta da sua alta rigidez, absorve a maior parte das tensões provenientes do tráfego.

2.2 Origem e Formação dos solos

A palavra solo tem origem do latim *solum*, que significa “superfície do chão”. A formação dos solos, sendo elas imediatas ou remotas, provém do intemperismo. Este processo de alteração pode ter ação física provocando desintegração da rocha matriz, porém permanecendo com suas propriedades; ações químicas entre os minerais constituintes das rochas, onde se modificam suas propriedades fundamentais ou ação biológica, pelo depósito de matéria orgânica através das bactérias, ocorrendo de forma direta ou indireta na geração do solo. O encadeamento do intemperismo garante, para cada tipo de solo, inúmeras características distintas de acordo com o tamanho das partículas e sua composição química (DAS & SOBHAN, 2014).

Além da influência do intemperismo, há outros fatores que afetam as características de cada tipo de solo como o tipo da rocha de origem, o clima, a topografia e vegetação existente no local (SOUZA, 2015). Ainda, vários autores afirmam que os solos tropicais possuem comportamento peculiar comparado a solos de outras regiões, justificável pelo processo geológico ou pedológico que o mesmo sofreu.

A diversidade granulométrica nas partículas do solo é muito grande, sendo possível, na mesma amostra de solo, identificarmos grãos perceptíveis a olho nu, como os pedregulhos, e outros imperceptíveis individualmente que quando úmidos se transformam numa pasta (PINTO, 2013). O DNIT (2006) aponta que realizar apenas a análise granulométrica não é suficiente para caracterizar um solo, necessitando assim, outros ensaios para este fim.

2.2.1 Classificação dos solos

A estrutura de um pavimento pode ser composta por camadas de solo in natura ou estabilizados mecanicamente, granulometricamente e/ou quimicamente, tendo a condição indispensável de atender especificações técnicas estabelecidas pelos órgãos consultadores, como, por exemplo, o reforço do subleito, sub-base e base.

Diante das diferenças comportamentais dos solos, o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) menciona que para termos embasamento ao utilizarmos os solos como fundação e/ou material de construção se faz necessário o desenvolvimento de uma classificação capaz de apontar as propriedades, diferenças e que permita sabermos por antecipação seu comportamento.

O tipo de classificação de solos mais antigo que se tem na história baseou-se na granulometria do material, não considerando o dado que exerce extrema importância em seu desempenho, a plasticidade. Dentre as diferentes formas de classificação dos solos, foram desenvolvidos alguns sistemas de classificação onde, normalmente, são norteados pelos limites de *Atterberg* e granulometria do solo. O HRB – *Highway Research Board* (atual TRB – *Transportation Research Board*) é o sistema mais utilizado quando o assunto é classificação de solos na pavimentação. Nele (Figura 2.2) verifica-se a granulometria, o limite de liquidez, o índice de liquidez e o índice de grupo – atrelando esta classificação com o método de dimensionamento de pavimentos pelo índice de grupo (DNIT, 2006).

O Sistema Unificado de Classificação de Solo (SUCS) teve como fundador o Profº Arthur Casagrande, feito inicialmente para aplicação em obras de aeroportos, porém teve seu emprego generalizado posteriormente. Nele todos os solos são identificados por duas letras – a primeira letra informando o tipo de solo e a segunda sua característica complementar, dados disponíveis na Tabela 2.1 e Tabela 2.2 (PINTO, 2013).

Figura 2.2 – Classificação TRB

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 max.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: DNIT (2006).

Tabela 2.1 – Terminologia do SUCS

SIGLA	SIGNIFICADO
G	Pedregulho
S	Areia
M	Silte
C	Argila
O	Solo orgânico
W	Bem graduado
P	Mal graduado
H	Alta compreensibilidade
L	Baixa compreensibilidade
Pt	Turfas

Fonte: PINTO (2013).

Tabela 2.2 – Sistema Unificado de Classificação do Solo

PROCESSO PARA IDENTIFICAÇÃO NO CAMPO		GRUPO	DESIGNAÇÃO/CARACTERÍSTICA
Solos de graduação grossa: 50% ou mais retido na peneira nº 200	Pedregulhos $\geq 50\%$ da fração graúda retida na peneira nº4	Pedregulho sem finos	GW Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino
		GP	Pedregulho mau graduado ou mistura de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino
		GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de pedregulho, areia e silte
		GC	Pedregulhos argilosos, ou mistura de pedregulho, areia e argila
	Areias: $\leq 50\%$ da fração graúda passando na peneira nº4	Areias sem finos	SW Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino
		SP	Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino
		SM	Areias siltosas - misturas de areia e silte
		SC	Areias argilosas - mistura de areia e argila
Solos de graduação fina: 50% ou mais passando pela peneira nº200	Siltes e Argilas com $LL \leq 50$	ML	Siltes inorgânicos - areias muito finas - areias finas, siltosas e argilas
		CL	Silte inorgânico de baixa e média plasticidade - argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas
		OL	Siltes orgânicos - argila siltosas orgânicas de baixa plasticidade
		MH	Siltes - areias finas ou siltes micáceis - siltes elásticos
	Siltes e Argilas com $LL \geq 50$	CH	Argila inorgânica de alta plasticidade
		OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade
	Solos Altamente Orgânicos	PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos

Fonte: HILÁRIO (2016).

Ao passar dos anos, entendeu-se que os solos tropicais não poderiam continuar sendo caracterizados somente de acordo com as experiências norte-americanas, impulsionando assim, novas formas de caracterização e classificação dos solos. Partindo desta melhora, foi desenvolvida a classificação MCT – Miniatura Compactada Tropical por Nogami e Villibor que aplica princípios do ensaio MCV (*Moisture Conduction Value*) para compreensão dos solos tropicais. Esta classificação consente apresentar peculiaridades dos solos quanto ao comportamento laterítico e saprolítico, mensurando propriedades importantes para o uso rodoviário (DNIT, 2006).

De acordo com a classificação MCT, os solos lateríticos e saprolíticos podem ser vinculados aos seguintes grupos:

- Solos lateríticos

LA: areia laterítica quartzosa

LA': solo arenoso laterítico

LG: solo argiloso laterítico

- Solos saprolíticos

NA: areias, areias siltosas ou siltes com domínio de grãos de quartzo e/ou mica

NA': areias siltosas ou areias argilosas

NS': solo siltosos não lateríticos

NG': solo argiloso não lateríticos.

2.3 Estabilização dos solos

As formas de estabilização dos solos resumem-se em procedimentos que visam alterar algumas características do solo existente de tal maneira que o faça melhorar seu comportamento, tornando-o adequado sob o ponto de vista da engenharia. Ao se escolher estabilizar um solo, tem-se como objetivo controlar as deformações do solo, aumentar sua resistência, sua permeabilidade e durabilidade. Para melhor escolhermos o tipo de estabilização a ser utilizado, devemos primeiramente avaliar os seguintes aspectos (CRUZ, 2004):

- Características que se deseja melhorar;

- Quantidade de solo a ser tratado;
- Propriedades e tipo do solo;
- Empresas, materiais e equipamentos disponíveis para a execução da estabilização;
- Fatores ambientais atribuídos a cada método de estabilização;
- Tempo disponível para execução;
- Custo.

Devido à semelhança nos termos relacionados à estabilização de solos, existem certas divergências entre alguns autores. Durante a revisão bibliográfica, notou-se que diferentes nomenclaturas para os processos de estabilização, indicando que ainda não há um consenso para a classificação destes processos. Neste trabalho serão tratadas as seguintes estabilizações mais utilizadas na pavimentação rodoviária: mecânica, granulométrica e química.

Estabilização mecânica

O método de estabilização de solos mais antigo na construção de estradas é a estabilização mecânica. Esta metodologia consiste em adequar o rearranjo das partículas por meio da utilização de uma energia externa de compactação imposta nos solos, diminuindo o volume de vazios e a porosidade do solo, contribuindo então com o ganho de resistência (GANDOLFI; CARDOSO, 2013).

Estabilização granulométrica

Outra maneira de se estabilizar um solo mal graduado é recorrer à correção de sua granulometria. O DNIT (2006), estabelece que a estabilização granulométrica pode ser feita com brita, brita graduada ou brita corrida, e lembra também que ela pode ser executada pela compactação dos materiais acima ou pela combinação deles até que se atinja uma graduação normatizada e índices geotécnicos específicos. Pereira (2012), afirma que tal correção traz melhorias ao solo quando se adiciona ou retira um ou mais tipos de partículas de solos, obtendo um novo material com propriedades adequadas para o uso na pavimentação, como a mistura de solo-agregado ou solo-brita. Em seu estudo Nogami e Villibor (1995) apresenta

diferentes tipos de dosagens para estabilização granulométrica com adição de agregados finos e grossos em solos lateríticos e saprolíticos.

Estabilização química

A estabilização química consiste em adicionarmos substâncias químicas capazes de reagirem com as partículas de minerais e/ou com a água presente no solo. O enfoque desse procedimento é obter melhoria na resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade do solo (VIZCARRA, 2010). Normalmente, a estabilização química é muito utilizada na construção de pavimentos rodoviários, pois além de poupar a utilização de agregados naturais, permite a utilização de solos que não seriam adequados para a constituição de bases e sub-bases de pavimentos. Cruz (2004) relaciona as vantagens ao optarmos pela estabilização química, tais como:

- Redução no custo com logística, compra e disposição de agregados;
- Consciência ambiental pela diminuição da utilização de agregados naturais;
- Diminuição da utilização de combustíveis;
- Redução da perda de materiais ocasionada no transporte.

Uma matriz contínua pode ou não ser formada com a estabilização química. Quando a matriz contínua é formada, notamos que o agente estabilizador preenche todos os poros envolvendo as partículas de solo. Já na matriz descontínua a reação química pode ocasionar vedação inerte dos poros, interconexão e variação nas propriedades da superfície das partículas do solo.

Os agentes estabilizantes mais utilizados são os que possuem atuação aglutinante junto às partículas de solo. O cimento e a cal são os materiais que melhor satisfazem os requerimentos necessários na estabilização, por causa da reação pozolânica e sílica ativa capaz de acrescentar rigidez na mistura (VIZCARRA, 2010).

2.4 Estabilização química com cimento

Conforme Perante (2002), os Estados Unidos foi o pioneiro nas pesquisas sobre utilização de solo-cimento em bases e sub-bases, sendo também o primeiro em aplicar este

material na construção de estradas no ano de 1935. No Brasil, a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP iniciou a utilização de solo-cimento na construção da estrada Caxambu-Areias e das pistas de circulação do aeroporto Santos Dumont em 1940 por influencias dos resultados favoráveis obtidos pelos EUA (OLIVEIRA, 2011).

Filho (2008) afirma que o estado de São Paulo apresenta em média 20 mil quilômetros estradas com bases e sub-bases de solo estabilizado com cimento, tendo como exemplo a rodovia Castelo Branco composta por sub-base de solo estabilizado com 8% de cimento e base com 10%.

O DNIT (2010b) define solo-cimento como o material resultante da mistura de solo, cimento e água em proporções pré-estabelecidas em laboratório. A mistura deve apresentar valor mínimo de 2,1 MPa para resistência a compressão aos 7 dias com o enfoque de proporcionar parâmetros adequados de resistência e durabilidade ao solo.

A execução da mistura de solo-cimento pode variar de acordo com o tipo de cimento e com o teor que se deseja trabalhar. Na construção de rodovias geralmente são utilizados teores entre 5% e 9% para estabilizar os solos, pois teores acima destes acabam gerando custos bastante elevados, inviabilizando a estabilização (PEREIRA, 2012). A seguir estão descritas as denominações empregadas para os diferentes tipos de estabilizações feitas com cimento.

- Solo-cimento: mistura de solo, cimento e água (no seu teor ótimo de compactação), com quantidades de aglomerantes suficientes para o processo de cura inicial e posterior enrijecimento. Aplicado em bases – DNIT 143/2010 e sub-bases - de pavimentos (PEREIRA, 2012).
- Solo modificado ou melhorado: seu teor de cimento não ultrapassa 5% em relação à massa do solo, sendo uma alternativa positiva quando necessita-se modificar poucas características do solo e a estabilização com solo-cimento não é economicamente viável (HILÁRIO, 2016). Aplicado em bases – DNIT ES 142/2010, sub-bases – DNIT 140/2010 e subleito de pavimentos (PEREIRA, 2012);
- Solo-cimento plástico: é a mistura que utiliza maior quantidade de água, pois necessitar de uma consistência semelhante a uma argamassa. Aplicada no revestimento de valas, canais e taludes (PEREIRA, 2012).

A utilização de teores de cimento mais elevados proporciona que sua reação com as partículas de solo possua valores de resistência mecânica maiores por conta da ação aglutinante do cimento. Já quando optamos por teores menores, o cimento assume o papel de alterar as partículas da fração argilosa do solo, o que gera uma diminuição na sua plasticidade (CRUZ, 2004).

2.4.1 Métodos de Dosagem

A ABCP (2004) salienta que os métodos de dosagem de solo-cimento utilizados no Brasil são baseados nas primeiras tentativas da *Portland Cement Association* (PCA) de criação de normas para solo-cimento – a Normal Geral (1935) e a Norma Simplificada (1962), que serviram também de base para as normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) – *Test for Moisture-Density Relations of Soil-cement Mixtures* (ASTM D 558 e AASHTO T 134) e *Wetting-and-Drying Test of Compacted Soil-cement Mixtures* (ASTM D 599 e AASHTO T 135).

Em suma, a Norma Geral de Dosagem consiste na execução das seguintes operações (ABCP, 2004):

- a) Identificação e classificação do solo:
 - Ensaio de massa específica dos grãos de solos – NBR 6508, Ensaio de LL – NBR 6459, Ensaio de LP – NBR 7180;
 - Análise da granulometria do solo – NBR 7181, Absorção de água dos grãos de pedregulhos – NBR 6458;
- b) Escolha do teor de cimento para o ensaio de compactação;
- c) Execução do ensaio de compactação do solo-cimento conforme NBR 12023/1992;
- d) Escolha dos teores de cimento para o ensaio de durabilidade;
- e) Moldagem de corpos de prova para ensaio de durabilidade: Método ABCO-SC-02
- f) Execução do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem: Método ABCP-SC-03

A Norma Simplificada possui tempo de execução menor comparada à Norma Geral e é dividida entre Método A – quando a porcentagem retida na peneira 4,8mm é igual à

zero, e Método B – quando a porcentagem retida na peneira 4,8mm é maior que zero. (RAMANINI, 2016). Esta Norma é composta por 4 fases:

- a) Identificação e classificação do solo:
 - Ensaio de massa específica dos grãos de solos – NBR 6508
 - Ensaio de LL – NBR 6459
 - Ensaio de LP – NBR 7180
 - Análise da granulometria do solo – NBR 7181,
 - Absorção de água dos grãos de pedregulhos – NBR 6458;
- b) Determinação do peso específico e realizar o ensaio de compactação para os teores;
- c) Determinação da Resistência a Compressão não Confinada - RCNC aos 7 dias de cura;
- d) Avaliação da média obtida do RCNC e RCNC mínima determinada.

No ano de 1990, a ABNT estabeleceu a norma NBR 12253 (1992) – Solo-Cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento, normatizando os seguintes procedimentos descritos abaixo:

- a) Caracterização do solo conforme classificação HRB – descartando os solos argilosos e siltosos;
- b) Seleção do teor de cimento segundo a Tabela 2.3

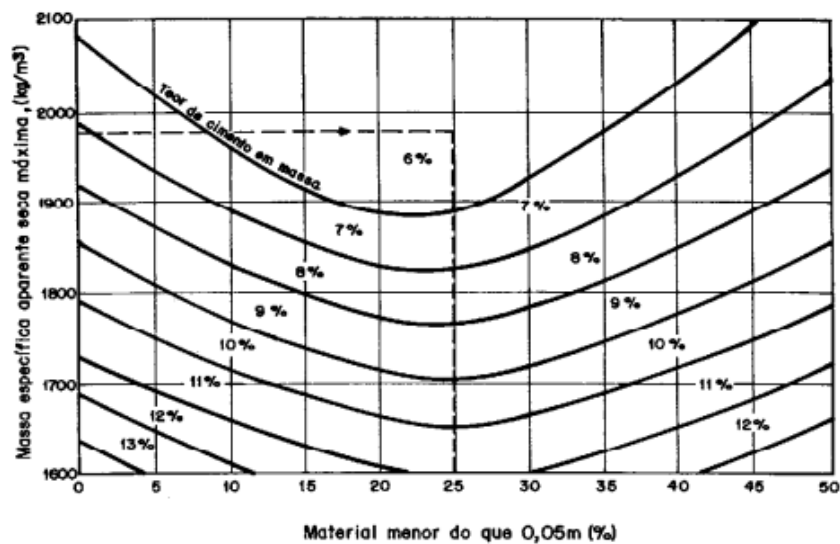
Tabela 2.3 – Teor de cimento sugerido para o ensaio de compactação de solo-cimento.

CLASSIFICAÇÃO DO SOLO	TEOR DE CIMENTO (%)
A1-a	5
A1-b	6
A2	7
A3	9
A4	10

Fonte: ABNT (1992)

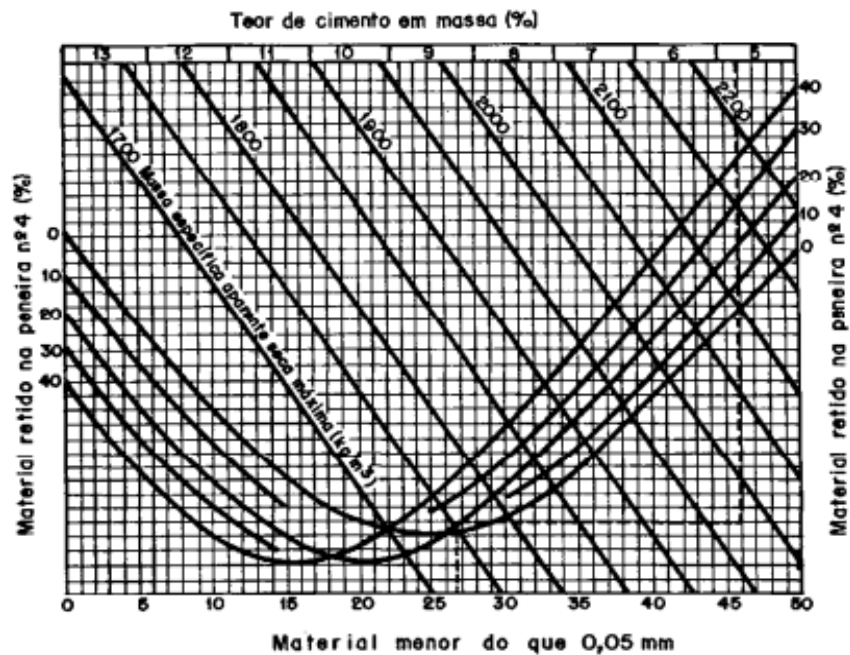
- c) Execução do ensaio de compactação conforme NBR 12023/1992 – Solo-cimento – Ensaio de compactação;
- d) Definição do teor de cimento para ensaio de RCS.
 - Solos passantes 100% na peneira de abertura 4,8mm – Figura 2.3
 - Solos com algum resíduo retido na peneira de abertura 4,8mm – Figura 2.4
- e) Determinação de massa específica máxima e umidade ótima no ensaio de compactação;
- f) Moldagem de corpos-de-prova e após 7 dias de cura execução ensaio de compressão simples (RCS);
- g) Avaliação dos resultados obtidos no ensaio RCS, caso não seja alcançada a resistência estabelecida pode-se variar o teor de cimento.

Figura 2.3 – Teor de cimento considerando a massa específica aparente seca.



Fonte: ABNT (1992).

Figura 2.4 – Teor de cimento considerando a massa específica aparente seca.

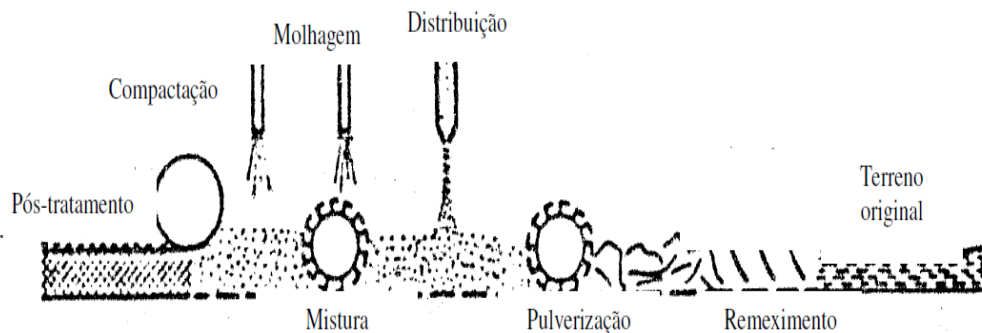


Fonte: ABNT (1992).

2.4.2 Método de Execução

O êxito no processo de estabilização de um solo está atrelado não só em sua dosagem feita em laboratório, mas também na devida execução de cada etapa de construção. Cruz (2004) refere que embora existam métodos diferentes de execução de solo-cimento em obras de pavimentação, todas seguem os mesmos princípios: pulverização do solo, espalhamento, mistura com estabilizador e compactação, assim como demonstra a Figura 2.5.

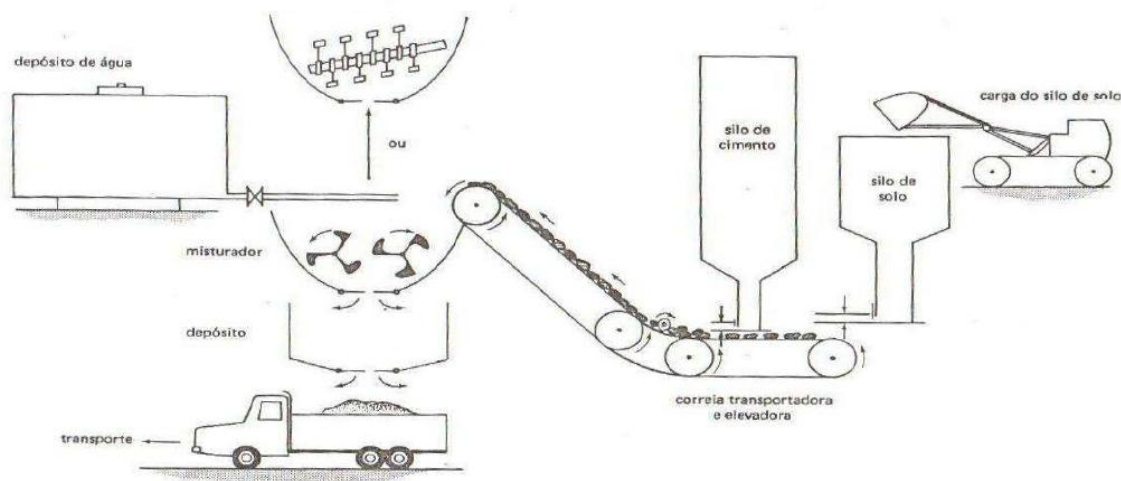
Figura 2.5 – Sequência de operações: Estabilização solo-cimento.



Fonte: CRUZ (2004).

Além da execução in loco, a mistura pode ser feita em usinas estabilizadoras (Figura 2.6) de 200 a 600 toneladas, posteriormente distribuída em caminhões basculante (FILHO, 2008). Este processo possui a vantagem de diminuir o risco de uma homogeneização e compactação não satisfatórias.

Figura 2.6 – Usina de Solo-Cimento.



Fonte: FILHO (2008).

2.4.2.1 Adições ao cimento

A busca por materiais que ocasionam melhora nas misturas utilizadas na construção civil é constante, com o solo-cimento não é diferente. Os aditivos geralmente utilizados são: cal, cloreto de cálcio, outro solo e alguns sais de sódio (CRUZ, 2004). Por sua vez, Pereira (2012) evidencia, sobretudo, as adições de pozolanas que são bastante usuais no concreto por possuírem benefícios de âmbito econômico, ecológicos e para a engenharia.

Os benefícios econômicos citados acima possuem clareza, principalmente porque ao adicionarmos subprodutos industriais às misturas, diminuimos o consumo de cimento – material mais caro do composto, concomitante, reduzimos seu custo. As vantagens voltadas à engenharia estão ligadas ao fato de a adição proporcionar diminuição das fissuras, aumento da velocidade de hidratação do cimento, maior consumo de hidróxido de cálcio e melhora na distribuição dos tamanhos dos poros.

Acima de tudo, adicionarmos este tipo de material ao cimento traz benefícios ecológicos por nos permitir encontrar um destino correto aos resíduos, que geralmente são

dispostos de forma errônea em aterros, acarretando contaminação de solos e lençóis freáticos (PEREIRA, 2012).

2.5 Cana-de-açúcar

2.5.1 Histórico e consolidação

Do latim *Saccharum officinarum* a cana-de-açúcar, é normalmente cultivada em países tropicais e subtropicais. Existem inúmeras vertentes sobre a origem da cana-de-açúcar, porém a teoria mais aceita é que seu cultivo tenha sido iniciado nas ilhas do Arquipélago da Polinésia, em seguida levada ao sul da Ásia. A partir das conquistas territoriais no Ocidente, os árabes começaram a difundir o cultivo da cana-de-açúcar ao redor do mar Mediterrâneo por volta do século VIII (SILVA; SILVA, 2012).

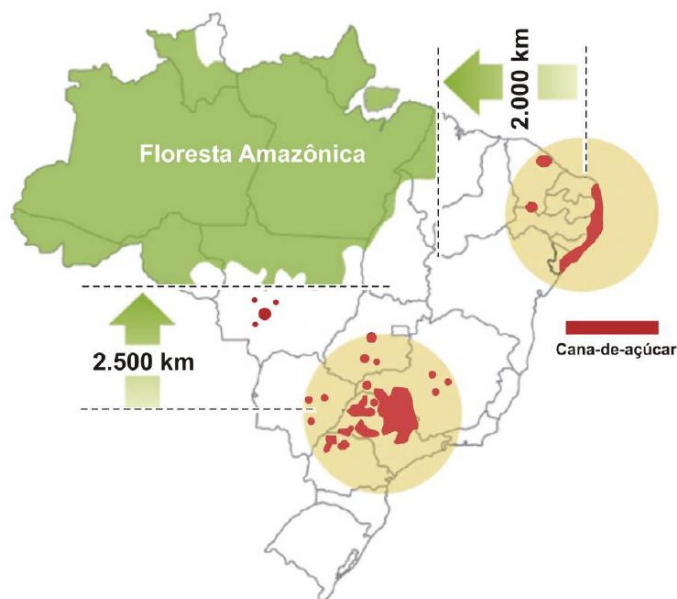
Na América, a cana se instalou a partir das expedições de Cristóvão Colombo (1493) e Martim Afonso de Souza (1502). Dentre as especiarias e mantimentos, as caravelas eram preparadas antes das viagens com mudas de cana-de-açúcar para serem plantadas em novas terras e servirem de suprimentos.

O cultivo de cana-de-açúcar no Brasil está ligado profundamente à história e desenvolvimento do país. Existem alguns registros em Lisboa de entrada de açúcar brasileiro entre os anos de 1520 e 1526, indício de que a iniciação do seu empenho tenha vindo antes desta data (CESNIK, 2007).

Em concordância ao acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar levantado pela CONAB (2017), o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar em decorrência ao aumento de demanda na produção de biocombustíveis oriundos de fontes renováveis. Tal impulso teve início na década de 70 com a elaboração do Proálcool pelo decreto nº76593, dando incentivos aos produtores de cana-de-açúcar e fabricantes automobilísticos que produziam carros movidos a álcool (PROÁLCOOL, 2006).

Em escala nacional, as regiões Centro-Sul e Nordeste concentram maior cultivo de cana-de-açúcar e usinas sucroalcooleiras. Como podemos notar na Figura 2.7, São Paulo se destaca no setor sucroalcooleiro. Silva e Silva (2012) apontam que o Estado é responsável aproximadamente por 60% do cultivo de cana-de-açúcar brasileira.

Figura 2.7 – Mapeamento do plantio de cana-de-açúcar no Brasil.



Fonte: BESSA (2011)

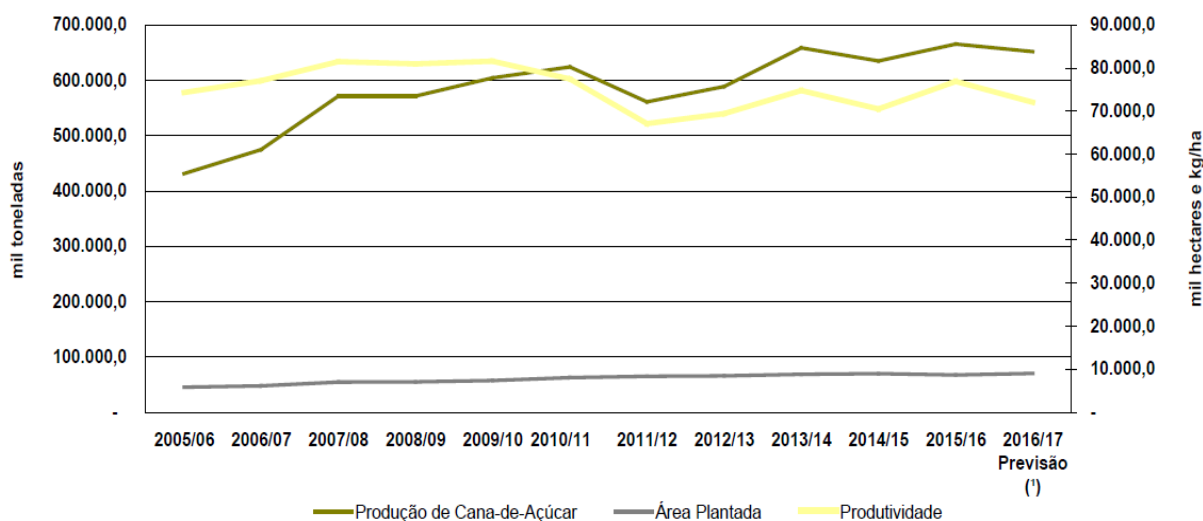
2.5.2 Usinas sucroalcooleiras e seus principais insumos

Ainda na atualidade notamos conflitos movidos à conquista de petróleo no Oriente Médio. Porém considerando a alta de preços e esgotamento nas jazidas de petróleo, a agroindústria sucroalcooleira se faz muito importante na produção de etanol.

Bessa (2011) afirma que o Brasil produz cerca de 53% do álcool etílico e 61% de açúcar empregado no mundo. O acompanhamento de safra brasileira de cana-de-açúcar feito pela CONAB (2017) demonstra um aumento na área, produção e produtividade no setor (Figura 2.8), nesse quesito entende-se que com a crescente demanda interna e externa de etanol e açúcar tornará a agroindústria sucroalcooleira maior do que é hoje.

O processo de produção dos insumos nas usinas começa com a colheita manual ou mecanizada, carregamento e transporte da cana-de-açúcar. Após a chegada e lavagem, os colmos são processados para gerarem açúcar e etanol, onde são separados o caldo e o bagaço. O caldo extraído tem dois destinos: produção de açúcar e produção de álcool. Na produção do álcool, o caldo é fermentado com leveduras e posteriormente destilado. Já na fabricação de açúcar, o caldo é pulverizado, concentrado e cristalizado (BESSA, 2011).

Figura 2.8 – Crescimento da área, produção e produtividade da cana-de-açúcar.



Fonte: CONAB (2017)

Além do açúcar e etanol fabricados, as usinas também utilizam entre 60% e 90% da energia elétrica que ela mesma produz a partir da queima do bagaço de cana-de-açúcar, diminuindo os gastos e contribuindo na sustentabilidade de suas atividades. A cogeração de energia é formada através do vapor d'água da queima que é passado por uma turbina unida a um gerador, transformando o calor em energia elétrica (GOBBI, 2010). Da queima do bagaço é gerada a CBC que corresponde a 10% do bagaço de cana.

2.5.3 Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar

A geração de bioenergia se consolidou como terceiro produto gerado nas indústrias sucroalcooleiras, pois proporcionou às usinas autossuficiência energética, e ainda abriu portas ao comércio de energia excedente (CAMPOS, 2014). Macedo (2009) apresenta que a relevância da cogeração se instaurou nos anos 80, porém anos mais tarde com a visão ampla de um novo mercado competitivo de energia houve uma melhora nas máquinas térmicas, passando os níveis de pressão e temperatura para 4214 KPa e 420°C, nessa ordem.

A incineração do bagaço de cana-de-açúcar gera como subproduto a CBC que podem se distinguir em cinzas pesadas e cinzas volantes. Em seu estudo Martins e Altoé (2015) determinou que a CBC se enquadra como resíduo não perigoso de acordo aos parâmetros designados pela ABNT 10004/04 – ANEXO F e segundo Campos (2014) o resíduo é considerado não inerte de acordo com a ABNT 10004/04 – ANEXO A.

Bessa (2011) aponta que atualmente a queima feita nas usinas possui temperaturas entre 850° C e 920° C, o que pode afetar na propriedade pozzolânica das cinzas ao levarmos em conta alguns estudos que defendem que a queima controlada eleva esta reatividade.

A deficiente gestão de resíduos que se presencia no Brasil proporciona um prejuízo de escala social, econômica e ambiental. O destino dos resíduos de CBC é um problema enfrentado pelas usinas. Geralmente, este material é disposto na própria lavoura de cana-de-açúcar como adubo, apesar de não conter devidos nutrientes minerais e conter elementos que podem contaminar o solo, lençóis freáticos e até mesmo a própria cana, afetando assim, no seu rendimento industrial (CASTRO; MARTINS, 2016). Visando isto, é elementar a busca por novas tecnologias capazes de reutilizar os resíduos gerados pelas agroindústrias.

2.5.3.1 Composição química

Em sua composição química, a CBC apresenta teores elevados de sílica e óxido de silício. Além desses dois elementos, as cinzas podem apresentar traços de óxido de ferro, óxido de alumínio, óxido de cálcio, entre outros. A Tabela 2.4 apresenta a composição química de CBC encontradas na literatura.

Tabela 2.4 – Composição química da CBC de acordo alguns referências.

ELEMENTOS	BESSA (2011)	MACEDO (2009)	RODRIGUES (2012)
SiO_2	96,2	94,11	65,7
Al_2O_3	1,9*	0,74	9,62
Fe_2O_3	1,9*	1,14	4,54
K_2O	0,3**	-	5,37
CaO	0,1	0,35	4,11
P_2O_5	0,1	-	2,5
MgO	<0,1	0,13	2,79
TiO_2	0,2	-	-
SO_3	0,1	0,11	2,64

Nota: * $Fe_2O_3 + Al_2O_3$

** $K_2O + Na_2O$

Fonte: PRÓPRIA (2018).

A grande presença de SiO_2 pode ser proveniente do quartzo encontrado no terreno de plantio da cana ou a partir da absorção das raízes na forma de ácido monossílico (MACEDO, 2009). Porém dentro da composição de sílica e/ou silicato, encontramos de duas formas: cristalina e amorfa. É interessante para a construção civil quando a sílica encontrada está no estado amorfo, porque é nele que se tem a reação formadora de silicatos de cálcio hidratados – composto responsável pela melhora nas propriedades de misturas com cimento (FREITAS, 2005).

2.5.3.2 Utilização de CBC na construção civil

Preocupados com os impactos gerados pela extração de areia natural, muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas com o objetivo de encontrar materiais capazes de serem substitutos desse agregado. Em seu trabalho, Bessa (2011) analisou diversos teores de substituição de areia por CBC em argamassas de cimento e concretos. Como resultado Bessa apresentou que os concretos produzidos com CBC obtiveram melhora mecânica quando comparado com o modelo convencional. Macedo (2009) também realizou estudos sobre a viabilidade da utilização de CBC em argamassas, concluindo que o teor ótimo de incorporação de CBC é de 5%, pois neste teor foram alcançados os melhores resultados em todos os ensaios.

Por sua vez, Martins e Altoé (2015) comprovaram que os *pavers*¹ fabricados com a substituição parcial de agregados miúdos por CBC possuem resistência à compressão, absorção e abrasão melhores do que os fabricados convencionalmente. Para atingir esta conclusão, foram feitos *pavers* com diferentes teores de substituição e determinação das principais características dos mesmos.

O Cimento Portland constantemente aparece como um dos maiores custos dentro do orçamento de obras da construção civil. Por conta disso, Paula (2006) executou estudos para comprovar o potencial da CBC como material de substituição parcial do Cimento Portland em argamassas. Os ensaios de compressão apontaram a viabilidade na substituição de até 20% de cimento por CBC.

Em outra pesquisa feita por Amaral (2014), a CBC também foi utilizada como substituta parcial do cimento, porém para a incorporação em tijolos de solo-cimento. Diferente dos outros estudos, a adição do resíduo diminuiu a resistência à compressão e a

¹ *Pavers*: peças pré-fabricadas em concreto utilizado para pavimentar áreas externas.

absorção de água da composição. Mesmo com esses resultados, foi verificada a viabilidade da utilização de CBC para este fim, pois proporcionou redução no valor do produto final e, sobretudo, se encontra dentro dos parâmetros da NBR 10834 – Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural.

Ao investigar a atividade pozolânica da CBC na adição em concretos, Gobbi (2010) notou que mesmo o material não se enquadrando nos parâmetros da NBR 5751 – Materiais Pozolânicos possui uma tendência alta em adquirir essa propriedade se produzidas nas seguintes condições: resfriamento rápido, modificação nas temperaturas de calcinação e aumento no grau de finura. O mesmo autor evidencia ainda a necessidade de estudos para aprimorar a produção de cinzas nas indústrias sucroalcooleiras.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Solo

O solo utilizado nos estudos, como ilustra a Figura 3.1, possui 81,8% de sua composição latossolo e é proveniente da Avenida União dos Ferroviários, região de Jundiaí. Os resultados da caracterização deste material são apresentados no Capítulo 4.

Figura 3.1 – Solo estudado.



Fonte: PRÓPRIA (2018).

3.1.2 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

Inicialmente, foram coletadas amostras (1) de bagaço de cana-de-açúcar pela Usina Iracema (Grupo São Martinho) situada na cidade de Iracemápolis - São Paulo e amostras (2) de CBC pela Usina Pitangueiras, localizada na Estrada Vicinal Possidônio de Andrade Neto – Fazenda Santa Rita. Por conta do período de estiagem que as usinas passam entre os meses de dezembro/março, a Usina Iracema não possuía amostras de CBC, sugerindo então, amostras de bagaço de cana-de-açúcar para serem incineradas em laboratório, conforme Figura 3.2.

Utilizando uma mufla, foram feitas as queimas das amostras 1 (para tornar o bagaço de cana-de-açúcar em cinzas) e da amostra 2 (para eliminar os resquícios de matéria orgânica que o material ainda possuía). Ambos os procedimentos foram feitos a uma temperatura controlada de 500°C no Laboratório de Tecnologia de Pavimentos da Universidade de São Paulo - USP. Após o processo, foi feito o peneiramento das amostras na

peneira nº16 (Série normal) – abertura de 1,19 mm. Aqui neste trabalho, as cinzas serão denominadas de CBC - Iracema e CBC – Pitangueiras, de acordo Figura 3.3.

Figura 3.2 – Coleta de Bagaço de Cana-de-Açúcar na Usina Iracema.



Fonte: PRÓPRIA (2018).

Figura 3.3 – CBC – 01 – Iracema e CBC – 02 – Pitangueiras, respectivamente.



Fonte: PRÓPRIA (2018).

3.1.3 Cimento

Para a análise das misturas de solo-cimento e solo-cinza-cimento o cimento utilizado na preparação das misturas descritas a seguir é o CP II Z – Cimento Portland composto com pozolana. A ABCP caracteriza este cimento como mais durável e aplicado normalmente em obras subterrâneas, marítimas e industriais.

3.2 Métodos e Procedimentos de Ensaio

3.2.1 Caracterização das cinzas

3.2.1.1 Fluorescência de Raios X – CBC

A composição química das amostras de CBC foi obtida por meio de análise feita em um Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por energia dispersiva da marca S2 *Ranger* (Figura 3.4). O ensaio foi feito no Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais da Faculdade de Tecnologia de São Paulo.

Figura 3.4 – Ensaio de Fluorescência de Raios X: S2 Ranger



Fonte: PRÓPRIA (2018).

3.2.1.2 Determinação de Massa Específica Real

Para determinarmos a massa específica das amostras 1 e 2 utilizamos o método estabelecido pela norma DNER-ME 085/94 e NM 23 NBR 6474/2001 – Material finamente pulverizado - Determinação de massa específica real, segundo mostra a Figura 3.5.

Figura 3.5 – Ensaio de determinação de massa específica.



Fonte: PRÓPRIA (2018).

3.2.1.3 Determinação Granulométrica das Cinzas

O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo por meio de uma análise da distribuição granulométrica da amostra de cinza-2 foi realizada com o instrumento óptico-eletrônico *Camsizer XT* (Figura 3.6). Este ensaio permite a identificação do tamanho e morfologia das partículas por meio de análise de imagens.

Figura 3.6 – *Camsizer XT*.



Fonte: LCT (20-?).

3.2.2 Caracterização das Misturas

3.2.2.1 Mini-Proctor

Com a finalidade em analisar o comportamento e evolução das melhorias das misturas solo-cinza e solo-cinza-cimento, foram determinadas as matrizes experimentais contidas na Figura 3.7. Após as análises iniciais dos resultados de mini-Proctor feitas com o solo in natura, Solo-Cinza Iracema e Solo- Cinza Pitangueiras, verificou-se que a adição de Cinza-Iracema diminuiu a MEAS – Massa Específica Aparente Seca do solo natural, já a incorporação de Cinza-Pitangueiras apresentou valores superiores aos resultados da condição natural do solo, indicando uma contribuição satisfatória entre esses dois materiais.

Partindo desta análise, a Cinza-Pitangueiras foi escolhida para execução dos ensaios de solo-cinza-cimento descritos no Item 4.2.2. Ademais, outro motivo que levou a escolha da Cinza- Pitangueiras foi a quantidade de material disponível para a realização dos ensaios, pois

para uma maior padronização da pesquisa era imprescindível manter os estudos com a Cinza analisada inicialmente para não ocasionar uma variação de material.

Figura 3.7 – Matriz experimental.

PROGRAMAÇÃO EXPERIMENTAL							
Classificação	Mistura	Descrição		Solo (%)	CINZA (Cinza do Bagaço da Cana-de-acucar)		Cimento (%)
					CBC01 (%)	CBC02 (%)	
Solo In Natura	I	SN	Solo in Natura	100	-	-	-
Solo Cinza	II	SCBC 01	Solo Cinza - Iracema	84	16	-	-
	III	SCBC 02	Solo Cinza - Pitangueiras	84		16	-
	IV	SCBC 03	Solo Cinza - Pitangueiras	90	-	10	-
Solo Cimento	V	SCP 5%	Solo Cimento Portland 5%	90	-	-	5
	VI	SCP 7%	Solo Cimento Portland 7%	90	-	-	7
Solo Cinza Cimento	VII	SCC (10/5)	Solo Cinza Cimento (10% Cinza e 5% Cimento)	85	-	10	5
	VIII	SCC (10/7)	Solo Cinza Cimento (10% Cinza e 7% Cimento)	83	-	10	7
	VIX	SCC (16/5)	Solo Cinza Cimento (16% Cinza e 5% Cimento)	79	-	16	5
	X	SCC (16/7)	Solo Cinza Cimento (16% Cinza e 7% Cimento)	77	-	16	7

Fonte: PRÓPRIA (2018).

A moldagem dos corpos de prova foi baseada pela norma DNIT-ME 228/94 – Solos: Compactação em equipamento miniatura, conforme demonstram as Figuras 3.8 e 3.9. As misturas I, II, III e IV tiveram tempo de cura de 7 dias e para melhor percepção das mudanças de propriedade nas demais misturas os períodos de cura foram de 7 e 28 dias.

Figura 3.8 – Etapas da mistura Solo-Cinza-Cimento



Fonte: PRÓPRIA (2018).

Figura 3.9 – Execução do ensaio Mini-Proctor.



Fonte: PRÓPRIA (2018).

3.2.2.2 Resistência à compressão simples - RCS

O ensaio de RCS – Figura 3.10 foi executado com o objetivo de avaliar o comportamento da mistura e analisar se ela pode ser aplicada como material de camadas de pavimento. O DER-SP-DE-P00/004 (2006) determina que a resistência mínima que a mistura solo-cimento deve obter é de 2,1 MPa.

Figura 3.10 – Ensaio de Resistência à Compressão Simples.



Fonte: PRÓPRIA (2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização do solo

A Tabela 4.1 apresenta os resultados da caracterização do solo utilizado na presente pesquisa, sendo possível classificar este material das seguintes formas:

- Classificação MCT: solo siltosos/argiloso não lateríticos;
- Classificação TRB: solo argiloso;
- Classificação SUCS: argila de baixa compreensibilidade.

Tabela 4.1 – Caracterização do solo

Granulometria	88% passantes na peneira nº40; 57% do solo constituído de material fino (silte e argila).
Limite de Liquidez	35%
Limite de Plasticidade	27%
Classificação MCT	NS'-NG'
Classificação TRB	A-6
Classificação SUCS	CL
CBR	11%

Fonte: PRÓPRIA (2018).

A superficialidade das classificações TRB e SUCS valida ainda mais a importância na utilização de uma classificação desenvolvida especificamente para solos tropicais, como é o caso da classificação MCT.

4.2 Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar

A Tabela 4.2 demonstra os resultados alcançados no ensaio de Fluorescência de Raios X, onde observou-se um alto teor de sílica em ambas as amostras com valores acima de 50%. Além disso, é interessante mencionar a presença do ferro, cal e alumínio nas amostras, que influenciam bastante nas características dos materiais.

Tabela 4.2 – Resultado da análise química por Fluorescência de Raios X.

ELEMENTOS	CBC-IRACEMA	CBC-PITANGUEIRAS
SiO_2	54,6	73,3
Al_2O_3	14,8	4,86
Fe_2O_3	12	8,63
CaO	4,3	2,04
TiO_2	2,89	4,9
SO_3	2,81	0,431
MgO	2,56	2,13
K_2O	2,55	2,07
P_2O_5	1,69	0,804
Na_2O	0,892	-
ZnO	0,232	0,106
MnO	0,181	0,152
ZrO_2	0,119	0,217

Fonte: PRÓPRIA (2018).

Notou-se que as amostras se diferenciaram nas porcentagens de elementos encontrados, que pode ser justificado pela forma de calcinação que cada uma foi submetida – CBC- Iracema em laboratório e CBC Pitangueiras em caldeira- fazendo com que as cinzas pesadas e leves contidas nas amostras sejam distintas, além disso, outro fato que influencia nessa diferença é elas serem de regiões diferentes. A CBC-Iracema apresentou mais que o dobro de cal que a CBC-Pitangueiras, elemento que influencia bastante na diminuição de sua massa específica, contrapondo a CBC-Pitangueiras que possui 34,3% a mais de sílica, composto que aumentando sua massa específica.

No ensaio de determinação de massa específica, resultados na Tabela 4.3, os teores encontrados foram próximos aos constatados em algumas bibliografias, como no estudo de Bessa (2011) onde foram obtidos teores de 2,23 g/cm³ a 2,65 g/cm³.

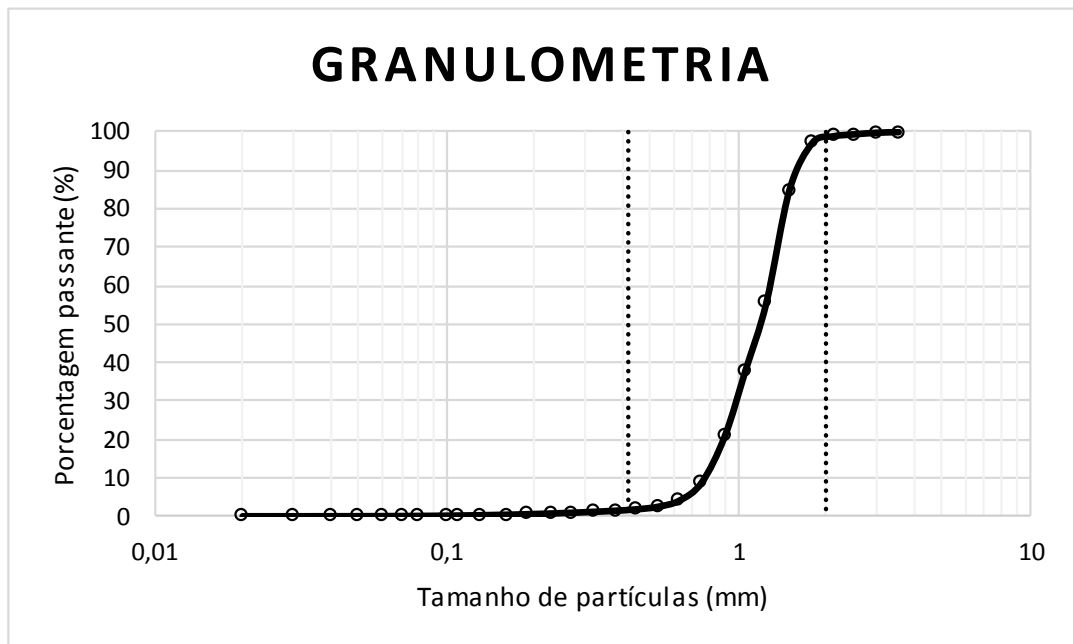
Tabela 4.3 – Resultados da massa específica real das amostras de CBC.

	CBC-IRACEMA	CBC-PITANGUEIRAS
Massa específica real	2,249 g/cm ³	2,789 g/cm ³

Fonte: PRÓPRIA (2018).

Decorrente ao ensaio de determinação de tamanho e morfologia das partículas da CBC-Pitangueiras com o *Camsizer* obtiveram-se os seguintes resultados – Figura 4.1, permitindo classificá-la como areia média de acordo a NBR 6502/95, pois mais de 95% de sua granulometria possui diâmetro entre 0,42 e 2,0mm.

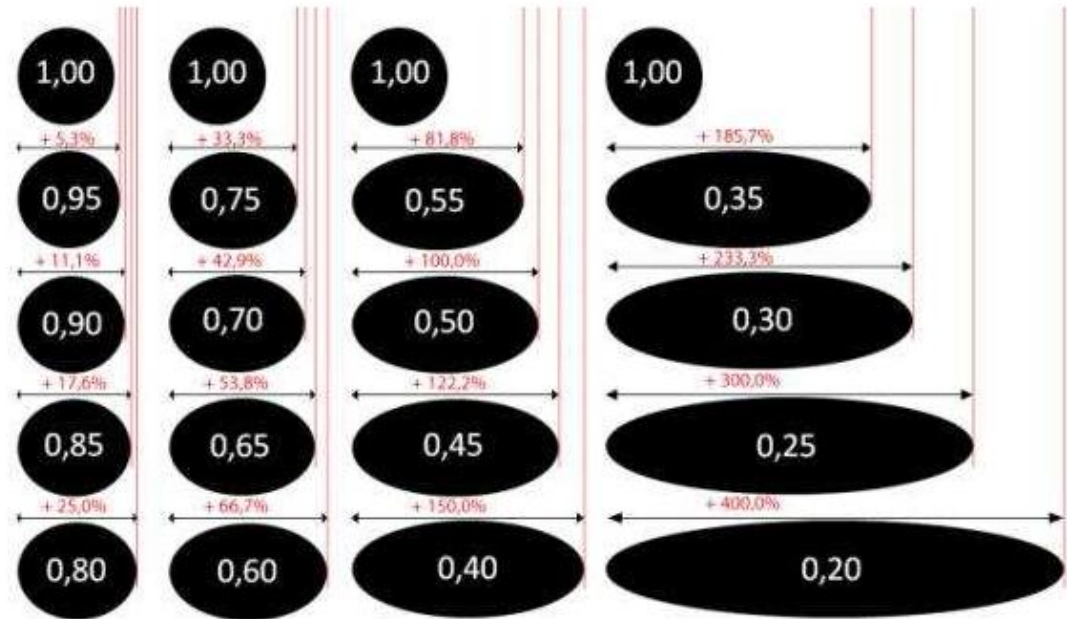
Figura 4.1 – Análise granulométrica CBC-Pitangueiras.



Fonte: PRÓPRIA (2018).

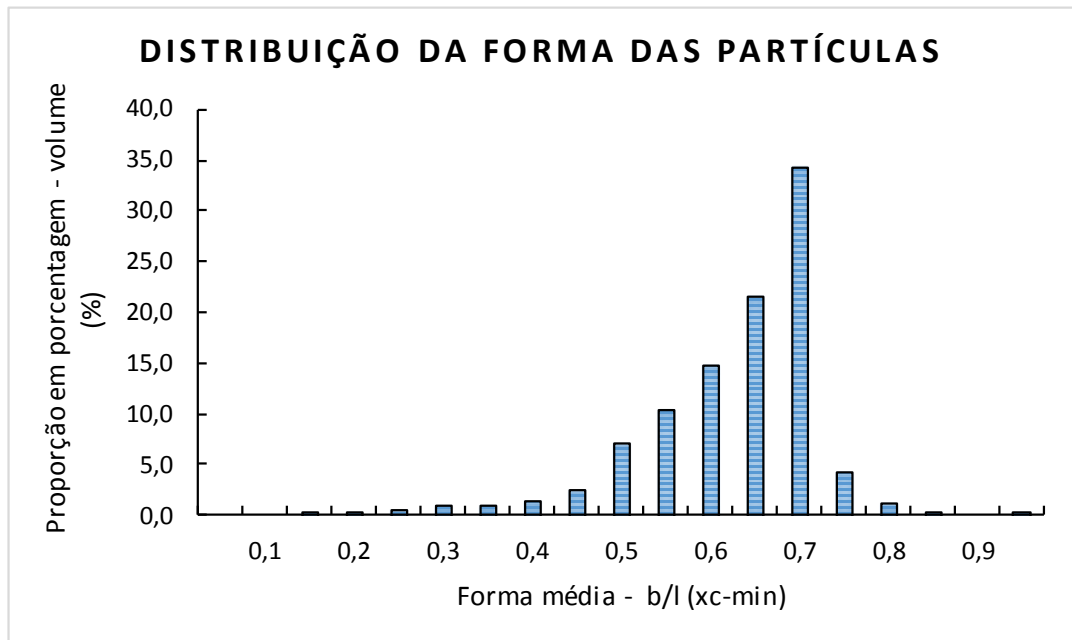
Existem diversos parâmetros que especificam a forma do material. Um dos critérios analisados neste trabalho foi a Relação de Aspecto Médio - b/l , que consiste na razão entre a maior e menor dimensão da partícula. Os valores próximos de 1 indicam um formato mais esférico, ou seja, quanto mais se distancia deste valor unitário, mais se afasta do formato esférico (Figura 4.2). Com o auxílio da Figura 4.3 é possível notar que o material possui uma grande concentração de partículas com forma entre 0,5 e 0,7, valores que indicam que as partículas são mais lamelares.

Figura 4.2 – Relação entre o menor e maior diâmetro da partícula valores de b/l



Fonte: Hawlitschek, (2014).

Figura 4.3 – Análise da Forma das partículas – CBC-Pitangueiras



Fonte: PRÓPRIA (2018).

4.3 Análise das propriedades das misturas

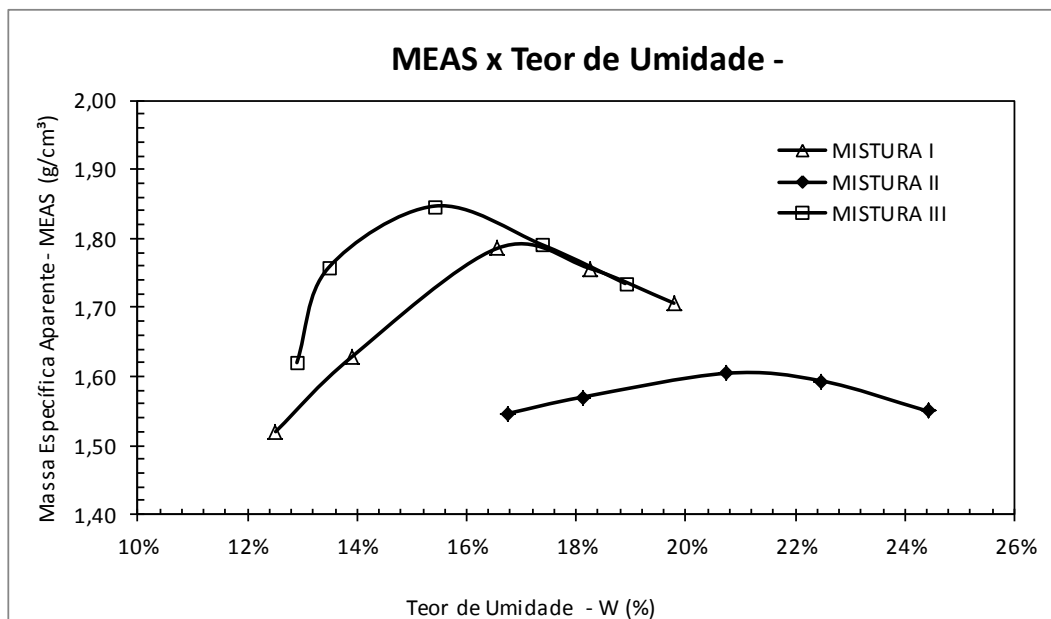
Definidas as propriedades dos materiais utilizados, a fase final da metodologia desde trabalho contemplou a realização de análises das misturas propostas de acordo com os parâmetros dos seguintes ensaios:

- Mini-Proctor – Nesse ensaio foram obtidos os parâmetros da curva de compactação das diferentes combinações, obtendo o MEAS e umidade ótima.
- RCS – Os valores aqui relacionados consistem na pressão (área do CP/carga) correspondente à carga axial que submete um cilindro de solo até seu rompimento e foram demonstrados de duas maneiras: com diferentes teores de umidade e na umidade de ótima de compactação.
- Deslocamento – O deslocamento aqui apresentado é uma medida indireta da compressibilidade do solo e retratou a relação entre a redução de seu volume sob a ação de uma carga, medida obtida durante o ensaio de resistência a compressão simples.

4.3.1 *Solo in natura versus Solo-Cinza*

Como já mencionado anteriormente, os elementos contidos nas CBC influenciam muito em seu comportamento, a respeito disso, o primeiro aspecto a ser evidenciado foi MEAS. A Figura 4.4 demonstra que a Mistura III apresentou o maior valor de MEAS – pois é composta por CBC-Pitangueiras, que contem maior teor de sílica (areia), e a Mistura II – formada por CBC-Iracema, que por possuir maior presença de cal (CaO), apresentou valores de MEAS menores quando comparados com a Mistura III. Pelos valores do ensaio de Mini-Proctor pode-se notar também que a Cinza-Iracema aumentou a umidade do solo in natura, indicando um aumento na superfície específica do material e, consequentemente, um maior número de vazios preenchidos por água.

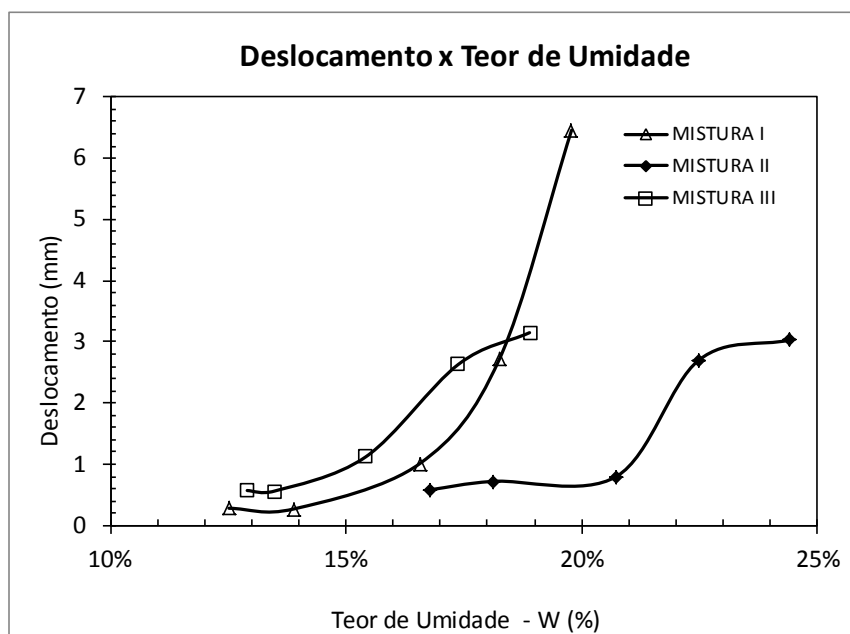
Figura 4.4 – MEAS versus Teor de Umidade – Misturas I, II e II.



Fonte: PRÓPRIA (2018).

A Figura 4.5 refere-se ao deslocamento alcançado no ensaio de RCS das Misturas I, II e III – solo in natura e solo com diferentes cinzas com 16% de adição. Analisando o gráfico evidencia-se que a adição de CBC proporcionou uma diminuição do deslocamento, quando comparado com o solo in natura. As duas cinzas obtiveram deslocamentos aproximados (3,5mm), porém com teores de umidade diferentes.

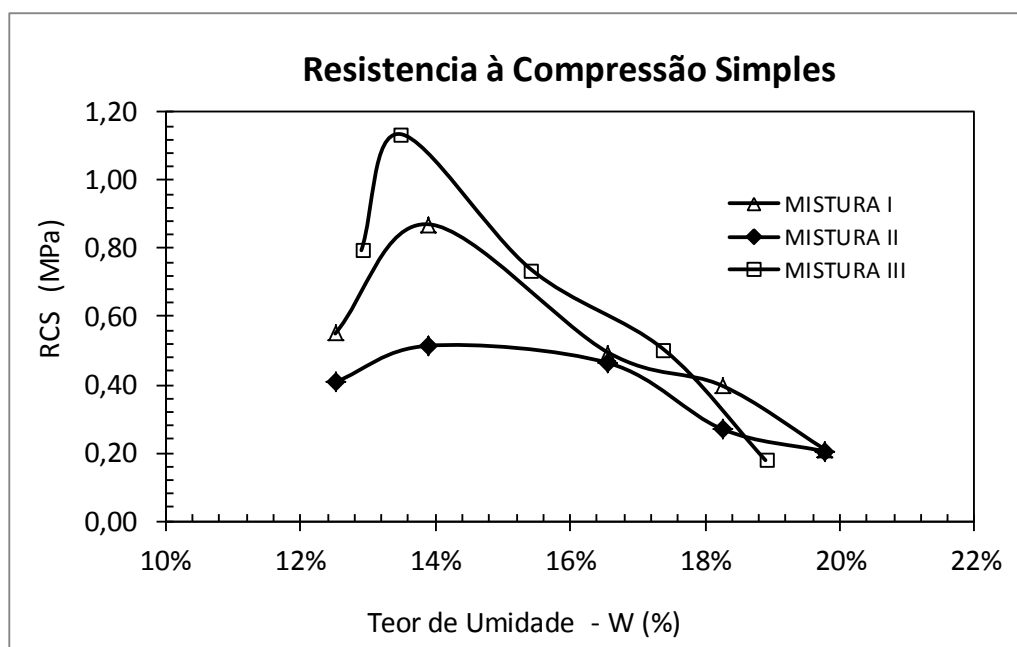
Figura 4.5 – Deslocamento X Teor de Umidade – Misturas I, II e II.



Fonte: PRÓPRIA (2018).

No ensaio de RCS, a Mistura III (SCBC02 - 16) apresentou a melhor resistência quando comparada ao solo in natura - Mistura I e a Mistura II, vide Figura 4.6. O pico de resistência, situado na umidade ótima, da Mistura III teve aumento de 26,44% em relação ao solo natural e apresentou 115% mais resistência do que a Mistura II, que por sua vez, diminuiu em 41,38% a resistência do solo natural – fato também atrelado aos compostos químicos contidos em cada uma das cinzas. Conforme já mencionado, a CBC-Pitangueiras foi escolhida para a realização dos demais ensaios por conta de seu desempenho nas misturas retratadas.

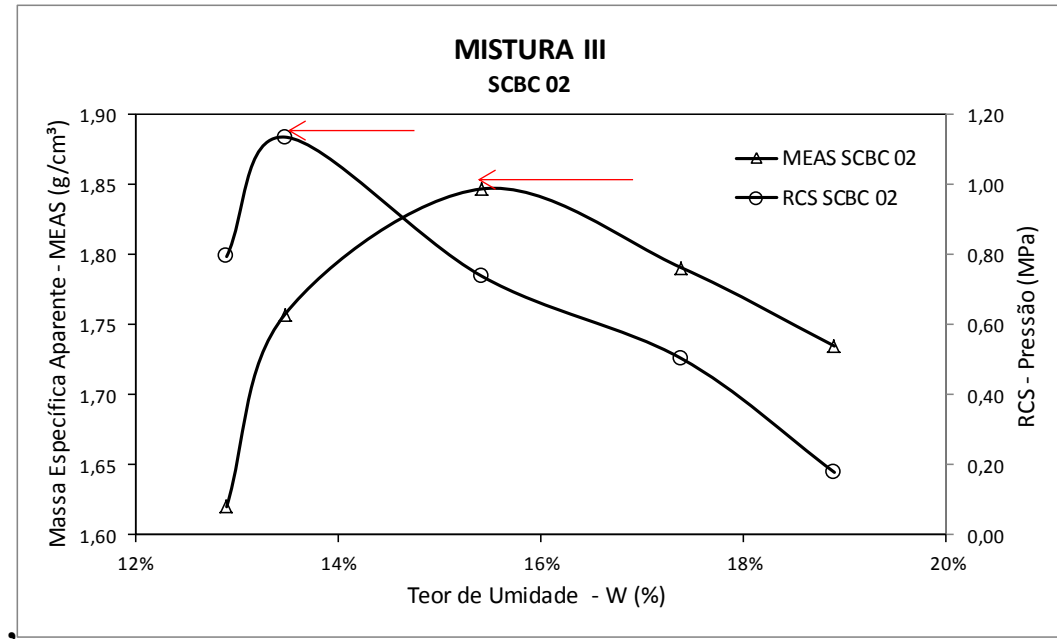
Figura 4.6 – Resistência à Compressão Simples – Misturas I, II e III.



Fonte: PRÓPRIA (2018).

É notório que em todo o estudo os maiores resultados de RCS encontram-se no ramo seco, ponto anterior à umidade ótima obtido no ensaio de Mini-Proctor, exemplo demonstrado na Figura 4.7.

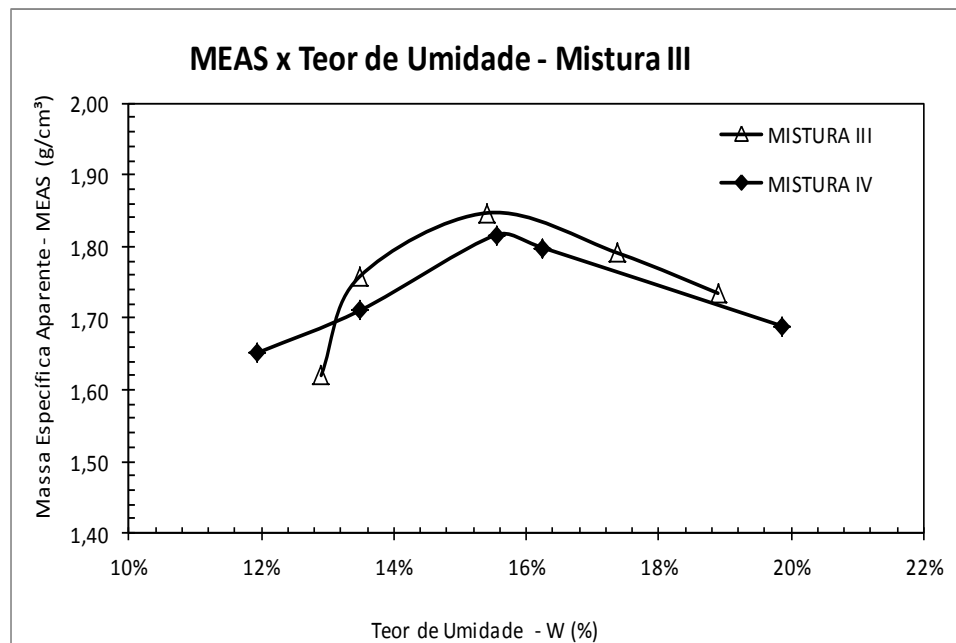
Figura 4.7 – Relação entre MEAS e RCS.



Fonte: PRÓPRIA (2018).

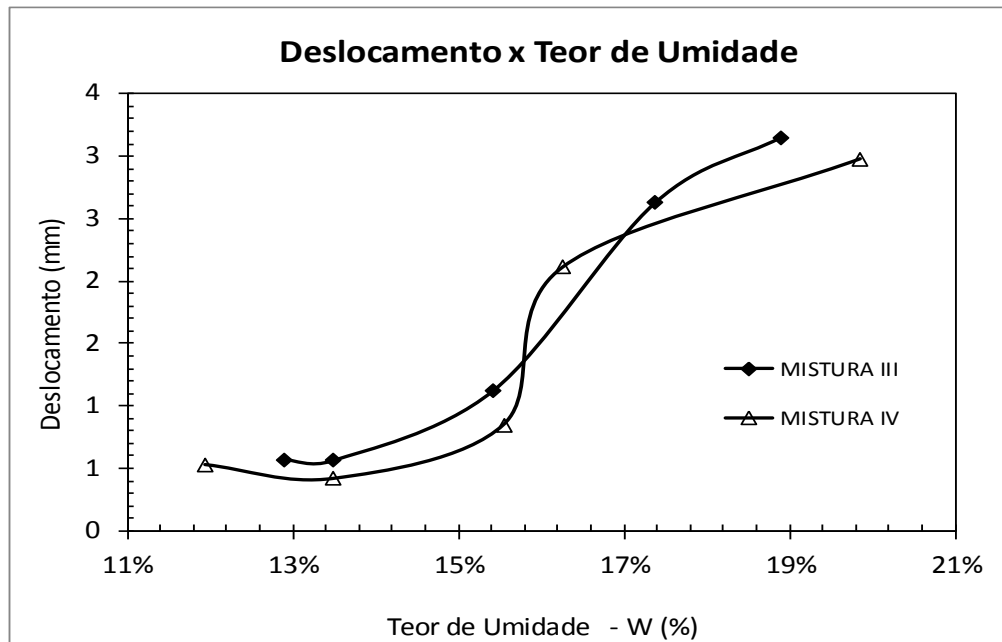
A fim de analisar o melhor teor de cinza aplicável na mistura solo-cinza, também foi feito o ensaio de RCS com adição de 10% de CBC-Pitangueiras, permitindo a realização das comparações entre o teor de 10 e 16% presentes nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10.

Figura 4.8 – Comparações da MEAS– Misturas III e IV.



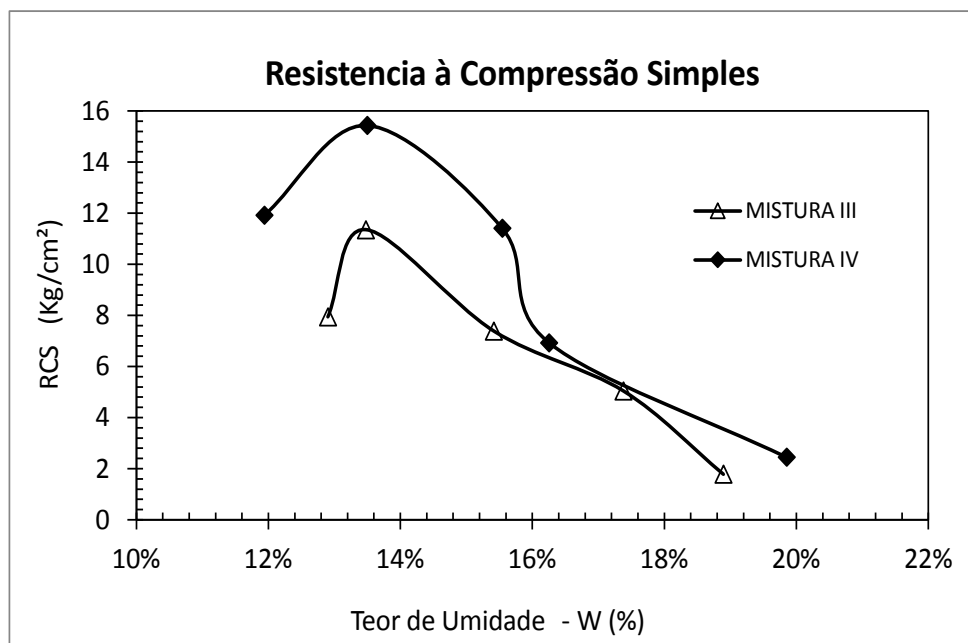
Fonte: PRÓPRIA (2018).

Figura 4.9 – Comparações do Deslocamento – Misturas III e IV.



Fonte: PRÓPRIA (2018).

Figura 4.10 – Comparações da RCS – Misturas III e IV.



Fonte: PRÓPRIA (2018).

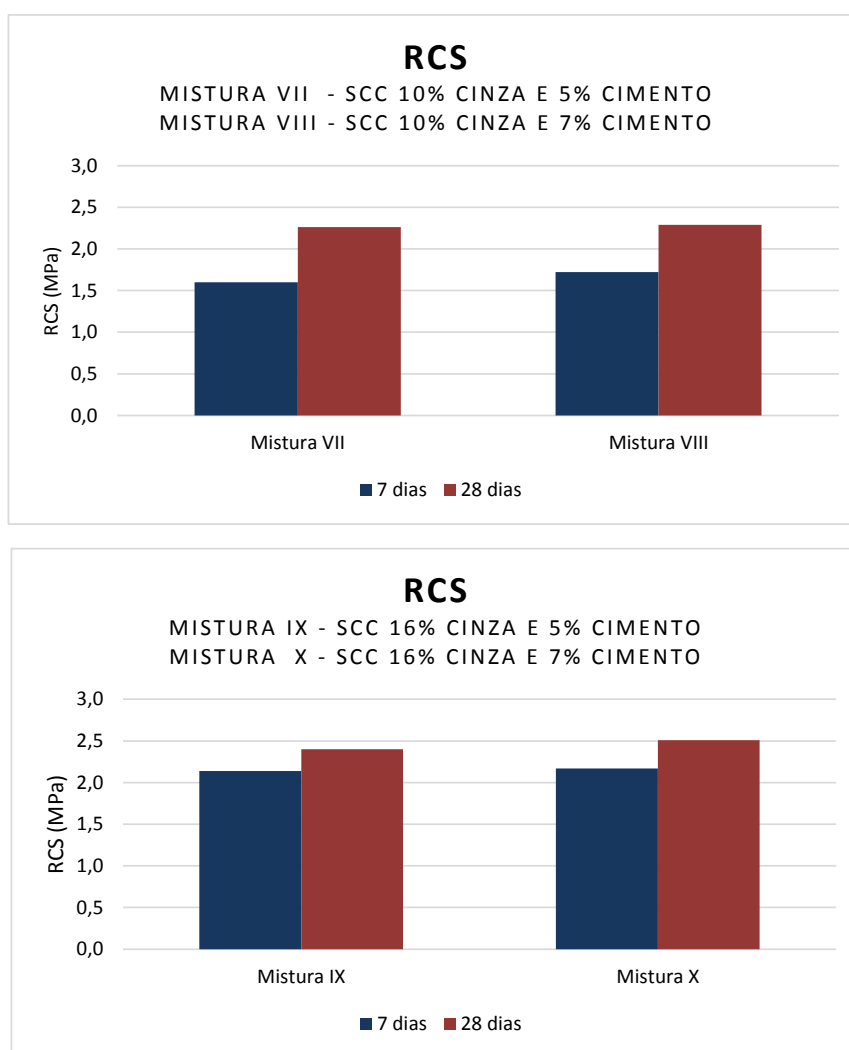
As Misturas III e IV se diferenciam apenas devido ao teor de cinza, com 16% e 10% respectivamente. A resistência à compressão simples foi maior na mistura que contém

10% de cinza. Já a curva de deslocamento e o valor de MEAS da Mistura III – com 16% de cinza demonstrou mais estabilidade, apontando necessidade de mais estudos, pois induz que é possível a existência de uma proporção ideal de cinza-solo. Esta variação dependerá da granulometria e características físico-químicas da cinza com o respectivo solo.

4.3.2 Solo-Cimento versus Solo-Cinza-Cimento

Feitas as análises de solo-cinza, iniciou-se os ensaios de Mini-Proctor e, conseguinte, RCS das Misturas V, VI, VII, VIII, IX e X, onde foram alcançados os seguintes resultados apresentados na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Resistência à Compressão Simples – Misturas VII, VIII, IX e X.

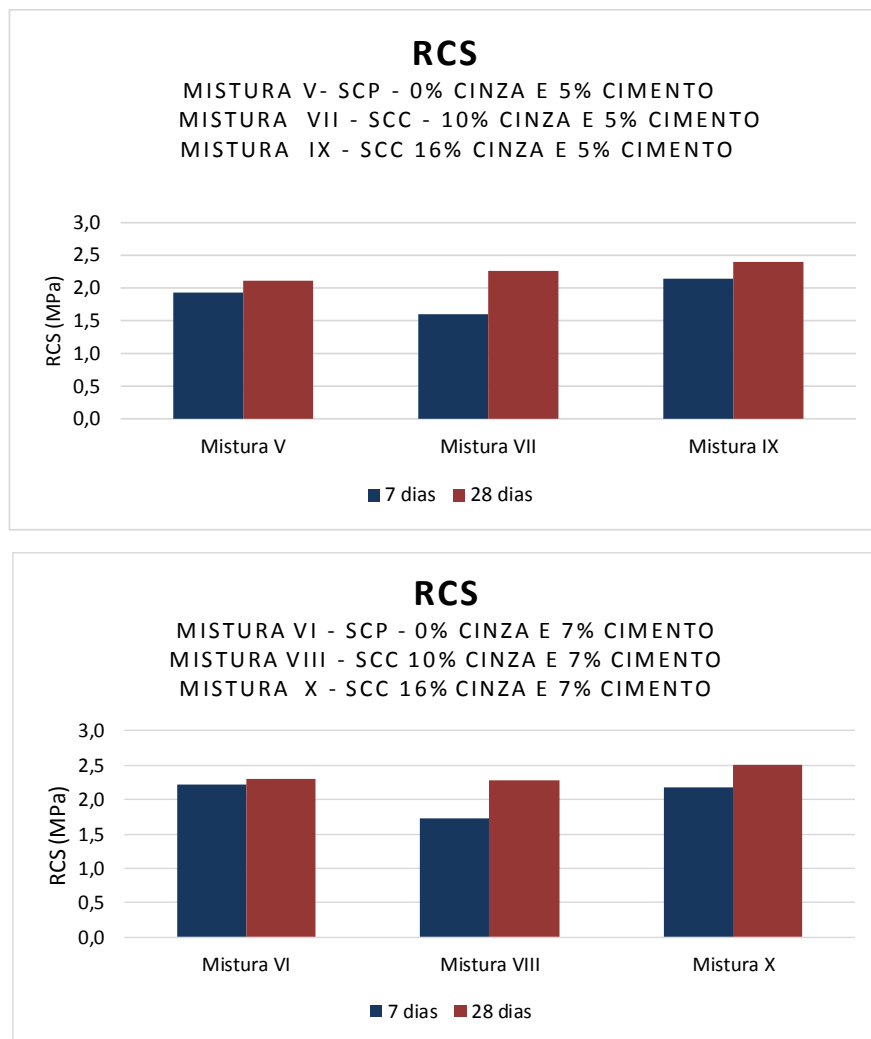


Fonte: PRÓPRIA (2018).

Neste estudo – Figura 4.11, optou-se por fixar o teor de cinza para avaliar a mudança na adição de cimento. Pode-se observar que a Mistura VIII apresentou valores mais elevados de RCS quando comparados com a Mistura VII, a quantidade de cinza entre as misturas é a mesma, logo, o que as diferencia é a quantidade de cimento adicionado, dado igualmente observado entre as misturas IX e X. O composto com maior porcentagem de cimento apresenta melhores resultados para todas as idades, com 7 e 28 dias, o que já era intuitivo. Porém, comparando as Misturas VII, VIII, IX e X comprovamos que a adição de cinza tem uma ação positiva na mistura. Isolando os dados da mistura com maior teor de cimento/menor teor de cinza e a mistura com maior teor de cinza/menor teor de cimento (Mistura VIII e IX, respectivamente) observamos que a mistura IX possui cerca de 5% de resistência a mais que a mistura VIII.

Os gráficos contidos na Figura 4.12 estão separados conforme o teor de cimento aplicado, para melhor visualização das alterações ao se adicionar CBC na mistura. Fixando tanto o teor de 5% de cimento, como o de 7% de cimento, tem-se que a Mistura IX e X são as mais resistentes visto às demais misturas, dado que mostra que a introdução de cinza trouxe melhoria ao composto. No que diz respeito ao ganho de resistência entre 7 e 28 dias a mistura VII apresentou melhores resultados (41,25% de aumento), isto já foi evidenciado por Valenciano (2004), ao notar o ganho de resistência da mistura solo-cinza-cimento aos 60 dias, por conta da atividade pozolânica que a CBC possui ao associar-se com o cimento, tendo maior crescimento de resistência ao longo do tempo em relação ao CP convencional – Misturas V e VI.

Figura 4.12 – Resistência à Compressão Simples – Misturas V, VII, IX e X.



Fonte: PRÓPRIA (2018).

A Especificação de Serviço 143/2010 – Bases de solo-cimento do DNIT, adota o valor de 2,1 MPa para a resistência à compressão aos 7 dias como o mínimo necessário para a aplicação de solo-cimento em bases de pavimentos. Consoante a esta especificação, pode-se destacar que entre as composições estudadas de solo-cimento e solo-cinza-cimento, a única mistura composta de 5% de cimento que atingiu valor maior do que o especificado foi a Mistura IX (5% de cimento e 16% de cinza), já com o teor de 7% as Misturas VI (7% cimento 0% cinza) e X (7% cimento e 16% cinza) obtiveram valores acima do que determina a norma.

Visando a praticidade no entendimento dos resultados obtidos, a Figura 4.13 apresenta o resumo dos ensaios realizado nessa pesquisa.

Figura 4.13 – Resumo de ensaios.

Classificação	Mistura	Descrição		Resultados					
				MEAS ótimo (g/cm³)	W ótimo Proctor (%)	Resistência Compressão Simples - RCS (MPa)		Deslocamento máx. 7 dias (mm)	Deslocamento máx. 28 dias (mm)
						7 dias	28 dias		
Solo In Natura	I	SN	Solo in Natura	1,79	16,56%	0,87	-	6,46	-
Solo Cinza	II	SCBC 01	Solo Cinza - Iracema	1,60	20,74%	0,51	-	3,03	-
	III	SCBC 02	Solo Cinza - Pitangueiras	1,85	15,42%	1,14	-	3,15	-
	IV	SCBC 03	Solo cinza - Pitangueiras	1,82	15,54%	1,54	-	2,98	-
Solo Cimento	V	SCP5	Solo Cimento Portland 5%	1,96	14,88%	1,93	2,11	0,38	0,37
	VI	SCP7	Solo Cimento Portland 7%	1,97	15,06%	2,22	2,31	0,42	0,55
Solo Cinza Cimento	VII	SCC (10/5)	Solo Cinza Cimento (10% Cinza e 5% Cimento)	1,70	13,56%	1,60	2,26	0,27	0,40
	VIII	SCC (10/7)	Solo Cinza Cimento (10% Cinza e 7% Cimento)	1,91	13,20%	1,72	2,30	0,42	0,47
	IX	SCC (16/5)	Solo Cinza Cimento (16% Cinza e 5% Cimento)	1,69	12,26%	2,14	2,31	0,50	0,40
	X	SCC (16/7)	Solo Cinza Cimento (16% Cinza e 7% Cimento)	1,70	12,42%	2,17	2,51	0,40	0,48

Fonte: PRÓPRIA (2018).

5 CONCLUSÃO

A utilização de CBC na construção civil tem se mostrado cada vez mais promissora. Os resultados e discussões realizadas na presente pesquisa vieram de encontro com esta questão e mostram que, avaliando o ganho de resistência, a aplicação de CBC provenientes das usinas sucroalcooleiras como aditivo mineral na produção de camadas de pavimentos estabilizadas quimicamente com solo-cimento é viável e pode contribuir na diminuição do volume de resíduos de CBC descartados em locais inadequados.

A metodologia composta de ensaios de caracterização da CBC e caracterização da matriz experimental satisfaz o objetivo proposto, possibilitando a realização de análises e comparações das misturas de solo-cimento convencionais e solo-cinza-cimento. O ponto de início proposto na pesquisa foi a obtenção das amostras de CBC, onde surgiram algumas dificuldades, por conta do período de estiagem da cana-de-açúcar no Brasil e pela assimetria na obtenção deste material. Os dois tipos de cinza apresentaram teores significativos de sílica, porém a CBC-Pitangueiras possui destaque por conter mais sílicas e menores teores de cal, elementos que influenciam significativamente nas propriedades do material.

Posteriormente, ao confrontar os resultados obtidos em todos os ensaios das misturas de solo-cinza-cimento e solo-cimento, pode-se concluir que a adição de cinza proporcionou uma melhora expressiva na composição, sendo a Mistura X àquela que compreendeu melhor resultado de RCS. Já na análise do ganho de resistência ao longo do tempo, é possível atrelar a atividade pozolânica como grande contribuinte, elencando a mistura VII como destaque pelo seu ganho de resistência entre o período de 7 a 28 dias.

Referindo-se a norma de 143/2010 – Bases de Solo-cimento do DNIT, os estudos levaram a conclusão de que as composições que atenderam o mínimo exigido foram as Misturas VI, IX e X. Esses resultados permitiram a abertura de uma discussão de viés econômico, pois entre as misturas de solo-cimento apenas a composta com 7% de cimento atingiu o valor necessário, já no grupo solo-cinza-cimento, tanto as composições com 5% como 7% de cimento alcançaram este parâmetro, concluindo assim que a adição de CBC além de ser utilizada como aditivo mineral, pode reduzir o consumo de cimento.

As questões levantadas nesta pesquisa desdobraram em muitas variáveis, fazendo-se necessário a realização de mais estudos sobre a aplicação da CBC na construção de pavimentos, tais como:

- Análise por Difratometria de Raios X da CBC;
- Determinação do teor ótimo de CBC aplicável ao solo em questão;
- Definição de valores de absorção e abrasão da mistura aqui estudada;
- Estudo da temperatura ideal de calcinação do bagaço de cana-de-açúcar para atingir a cinza na fase amorfa – com maior atividade pozolânica;
- Determinação do Índice de Pozalanidade na mistura Solo-Cinza-Cimento, conforme NBR 5752/92;
- Avaliação do potencial econômico na aplicação de CBC em misturas de solo-cimento destinada à pavimentação;
- Ensaio de módulo de resiliência da mistura solo-cinza-cimento para o dimensionamento empírico mecanicista de pavimentos.

Por fim, os resultados expostos na presente pesquisa indicam que a CBC pode ser utilizada como aditivo em camadas de pavimentos estabilizadas com solo-cimento. Pois, além de sugerir uma alternativa para a solução do problema dos administradores das usinas sucroalcooleiras em relação ao descarte deste material, possibilitando um destino adequado à CBC, a incorporação resulta em vantagens técnicas que concorda com o padrão normatizado pelo DNIT. É necessário enfatizar que todos os resultados apresentados são correspondentes às cinzas definidas neste estudo, não sendo possível a homogeneização das análises para cinzas provenientes de outras usinas. Desta forma, é notória a importância da realização de pesquisas sobre a implementação de materiais reaproveitados em obras da construção civil.

REFERÊNCIAS

ADDIS, Bill. **Reuso de materiais e elementos de construção**. 1. ed. [S.l.]: Oficina de Textos, 2010.

AMARAL, Mateus Carvalho. **Avaliação da incorporação de resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em tijolo solo-cimento**. 2014. 85 p. Dissertação (Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem das misturas de solo-cimento normas de dosagem e métodos de ensaios**. São Paulo, 2004. 63 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 6502**: Rochas e solos – Terminologia. Rio de Janeiro, 1995

_____. **NBR 10834**: Bloco vazado de solo-cimento – Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 12253**: Solo-cimento – Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento. Rio de Janeiro, 1992.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BEGA, Rodrigo Merighi. **Aplicação de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em latossolo cultivado com cana-de-açúcar**. 2014. 55 p. Tese (Doutor em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 3^a. ed. Rio de Janeiro: Petrobras, 2006. 488 p.

BESSA, Sofia A. Lima. **Utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo em concretos para artefatos de infraestrutura urbana**. 2011. 182 p. Tese (Doutora em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

CAMPOS, Liliane Pereira. **Aplicação de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar nos atributos químicos e biológicos do solo**. 2014. 88 p. Tese (Doutora em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.

CASTRO, Tainara Rigotti de; MARTINS, Carlos Humberto. **Caracterização das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como material alternativo para a redução de impactos ambientais**. Anais da Mostra de Extensão, Inovação e Pesquisa. Paraná, v.3, p.13-15, 2016.

CESNIK, Roberto. **Melhoramento da cana-de-açúcar: marco sucro-alcooleiro no Brasil**. 2007. Disponível em: <www.comciencia.br/comciencia/handler.php?section=8&edicao=23&id=256>. Acesso em: 18.abr.2018.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar** – Safra 2016/2017 n.4. Brasília, 2017.

CRUZ, Maria de Lourdes S. da. **Novas Tecnologias da aplicação de Solo-Cimento**. 2004. 212 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2004.

DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. **Fundamentos da Engenharia Geotécnica** – Tradução da 8ª edição norte-americana. 8ª ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 612 p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM – DER. **ET-DE-P00/004** - Sub-base ou base de solo-cimento. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER-ME-085/94** – Material finamente pulverizado-determinação de massa específica real. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT. **Manual de Pavimentação IPR-719**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006.

_____. **140/2010. Pavimentação – Sub-base de solo melhorado com cimento – Especificações de serviço**. Rio de Janeiro, 2010a.

_____. **142/2010. Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento – Especificações de serviço**. Rio de Janeiro, 2010b.

_____. **143/2010. Pavimentação – Base de solo-cimento – Especificações de serviço**. Rio de Janeiro, 2010c.

FREITAS, Elaine de Souza. **Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil**. 2005. 81 p.

Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes, 2009.

FILHO, Wilson B. de A. **Emprego da mistura solo-cimento em bases e sub-bases de pavimentos**. 2008. 27 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade São Francisco, Itatiba, 2008.

GANDOLFI, Guilherme G.; CARDOSO, Letícia S. **Estudo da estabilização química do tipo solo-emulsão em solo tropical laterítico granular utilizado em obras de pavimentação**. 2013. 80 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

GOBBI, Andressa. **Cinza do bagaço de cana-de-açúcar como adição para concreto: Investigação sobre a atividade pozolânica**. 2010. 64 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

Hawlitsek, Gustavo. **Caracterização das propriedades dos agregados miúdos reciclados e a influencia no comportamento reológico de argamassas**. Dissertação de (Mestre em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014

HILÁRIO, Ronderson Queiroz. **Uso de pavimento reciclado adicionado com cimento para uso como reforço de base para rodovias – Estudo de caso: BR-120**. 2016. Dissertação (Mestre em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

LABORATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA – LCD. **Princípio de funcionamento do sistema automatizado de análise de tamanho e morfologia de partículas Camsizer**. São Paulo: Escola Politécnica – USP, 20-?.

MACEDO, Pamela Camargo. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2009. 116 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

MARTINS, Carlos H.; ALTOÉ, Silvia P. S. **Avaliação da utilização de bagaço de cana-de-açúcar na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, Maringá, v.8, p.39-54, jan.2015. Disponível em: <<http://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/3102>>. Acesso em: 23 abr. 2018.

NOGAMI, Job S.; VILLIBOR, Douglas F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 1995.

OLIVEIRA, Rodrigo F. V. de. **Análise de dois solos modificados com cimento para dimensionamento de pavimentos**. 2011. 148 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

PAULA, Marcos Oliveira de. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. 2006. 77 p. Dissertação (*Magister Scientiae*) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

PERANTE, Everton Bezerra. **Avaliação do comportamento mecânico das misturas de solo-cimento e fosfogesso e cimento para uso na construção rodoviária**. 2002. 136 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

PEREIRA, Kiev Luiz de A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. 2012. 102 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil)- Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3ª ed. São Paulo: Oficina de textos, 2013. 367 p.

PROÁLCOOL. (Brasil). **Programa Brasileiro de Álcool**. 2006. Disponível em: <www.biodieselbr.com/proalcool/pro-alcool/programa-etanol.htm>. Acesso em: 08 mar. 2018.

RODRIGUES, Michelle Santos. **Avaliação de cinzas de palha de cana-de-açúcar e sua utilização como adição mineral em matrizes cimentícias**. 2012. 152 p. Tese (Doutora em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2012.

ROMANINI, Augusto. **Solo Cimento**. 2016. Disponível em: <sinop.unemat.br/site_antigo/prof/foto_p_downloads/fot_14020aula_04_-_pdf_Aula_04_-.pdf>. Acesso em: 22 abr .2018

ROSA, Amanda Dalla. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. 2009. 198 p. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SENÇO, Wlastemiler de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1 ed. São Paulo: Pini, 2007.

SILVA, João Paulo N.; SILVA, Maria Regina N. **Noções da Cultura da Cana-de-Açúcar**. Inhumas: IFG, 2012. 106 p.

SINICESP – Sindicato da Indústria da Construção Pesada do Estado de São Paulo. **Estudo da CNT mostra que Brasil tem 59 mil km de rodovias federais em estado crítico**. 2017. Disponível em: <www.sinicesp.org.br/materias/2017/ultimas103.htm>. Acesso em: 05/04/2018.

SOUZA, Jéssica Siqueira. Origem, formação e classificação dos solos. In: _____. **Mecânica dos Solos**. Brasília: NT, 2015. p. 9-27. v. 1. Disponível em: <<http://avant.grupont.com.br/dir>

VirtualLMS/portais/livros/pdfs_demo/Mecanica_dos_Solos_demo.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2018.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR – ÚNICA. **Usina aposta em sustentabilidade para aumentar produção de cana.** Disponível em: < <http://www.unica.com.br/na-midia/765729992036840550/usina-aposta-em-sustentabilidade-para-aumentar-producao-de-cana/>>. Acesso em: 30 mar. 2018.

VIZCARRA, Gino O. Calderón. **Aplicabilidade de cinzas de resíduo sólido urbano para base de pavimentos.** 2010. 118 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2010.