

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

HELENA BATISTA LEON

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS: UMA ALTERNATIVA PARA OS
RESÍDUOS DE CINZA DA CASCA DE ARROZ**

Alegrete

2015

HELENA BATISTA LEON

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS: UMA ALTERNATIVA PARA OS
RESÍDUOS DE CINZA DA CASCA DE ARROZ**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. M. Sc. Jaelson Budny

Alegrete

2015

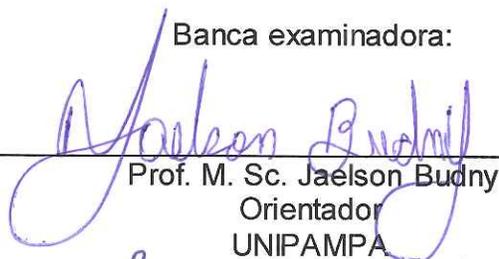
HELENA BATISTA LEON

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS: UMA ALTERNATIVA PARA OS
RESÍDUOS DE CINZA DA CASCA DE ARROZ**

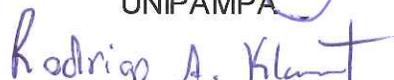
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 30 de novembro de
2015.

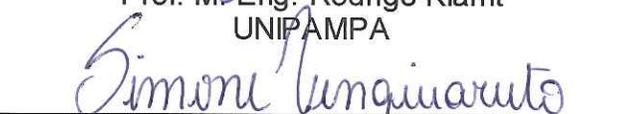
Banca examinadora:



Prof. M. Sc. Jaelson Budny
Orientador
UNIPAMPA



Prof. M. Eng. Rodrigo Klamt
UNIPAMPA



Prof. M. Eng. Simone Dornelles Venquiaruto
UNIPAMPA

Dedico este trabalho aos meus pais, meus
maiores incentivadores.

AGRADECIMENTO

Agradeço a minha anjinha Isadora por interceder por todos aqueles pedidos que encaminhei ao céu.

Aos meus pais, Noel, Sandra e Odair pelo incentivo, apoio, amor e compreensão, durante todos esses anos de graduação. Obrigada por entenderem que eu não poderia estar sempre presente e por me possibilitarem voar alto.

A minha irmã Fernanda, por ser tão amada e companheira, por entender-me, ouvir-me e acreditar em mim, mais do que eu mesma.

A minha amiga e “boadrasta” Ana Rosa, por ter sido um exemplo de mulher batalhadora e independente, por apoiar-me até onde pôde e ajudar-me em tudo que fosse necessário, ao lado do meu pai e da minha irmã.

Agradeço ao meu orientador Jaelson Budny por possibilitar a realização deste trabalho, por toda a sua atenção e paciência. E, juntamente a ele, agradeço a todos os membros da minha banca pela valiosa ajuda. Em especial, ao professor Magnos por acreditar em mim.

A todos os meus professores, que aos poucos foram me ajudando a chegar até aqui - sem vocês nada disso seria possível. Um especial agradecimento aos professores Ricardo, Jaelson, Adriana e Elizabete, que acreditaram em mim e deram-me a oportunidade de trabalhar com eles.

As minhas amigas que me acompanham desde o primeiro semestre da faculdade, Caroline, Evelize, Gabriela e Paula, por serem companheiras, amigas, confidentes e, principalmente, por entenderem os momentos em que precisei me ausentar e dedicar-me aos estudos.

Ao Deividi, por ter sido o meu melhor amigo e companheiro de trabalhos durante toda a faculdade - com certeza fostes o meu presente da engenharia. Ao Vovô (Flávio) por passar a integrar o nosso grupo e se tornar esse amigo querido - já sinto saudade dos nossos tempos juntos.

Ao melhor grupo de trabalhos do Laboratório de Solos e Pavimentação da Unipampa, Bruno e Maurício, sem vocês eu jamais conseguiria. Obrigada pelas tardes divertidas, pela ajuda imprescindível, por compartilharem preocupações e tarefas, foi muito bom trabalhar com vocês. Jamais poderia esquecer das melhores ajudantes, Julia e Paula.

Ao técnico Juliano por divertir-me no laboratório e pela imensa ajuda durante todo o decorrer dos ensaios. Ao Eng. Marcelo por auxiliar-me e estar sempre disponível para trocar ideias e dar-me dicas preciosas.

Enfim, a todos aqueles que, de uma forma ou outra, contribuíram para que este projeto se concretizasse, para os que torceram de perto ou de longe e acreditaram em mim, o meu muito obrigada.

RESUMO

Obras rodoviárias envolvem grandes quantidades de materiais e movimentações de terra que poderiam ser evitadas com o melhor aproveitamento do material do próprio local de construção da rodovia. Visando um melhor conhecimento e utilização de solos lateríticos, predominantes no Brasil, o estudo objetivou caracterizar e melhorar as propriedades de um solo laterítico de uma jazida localizada no sul do Brasil, através da utilização de cinza da casca de arroz, buscando a sua aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos. Os materiais utilizados no desenvolvimento do estudo foram: um latossolo roxo, de uma jazida localizada na cidade de Cândido Godói – RS; Cal hidratada de classe CH-II Dolomítica; Cinza de casca de arroz (CCA) e água destilada. Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais, ensaio Físico-químico proposto por Casanova para a determinação das dosagens e ensaios de compactação Mini-Proctor para a determinação da massa específica e umidade ótima de moldagem. Foram moldados corpos de prova de solo, solo+cal, solo+cal+CCA e solo+CCA em cilindros de dimensões 5 x 10 cm que permaneceram em cura em ambiente com temperatura controlada durante 7, 28 e 56 dias. A resistência dos corpos de prova foi verificada a partir do ensaio de Compressão Simples. O solo foi classificado como argiloso laterítico pela classificação MCT, pertencendo aos grupos MH da Classificação Unificada e A 7-5 da Classificação Rodoviária. As proporções: 94% de solo e 6% de cal e 94% de solo, 2,4% de cal, 3,6% de CCA foram as alternativas recomendadas pelo ensaio Físico-químico para a estabilização das amostras em análise. Embora não houvesse substancial ganho de resistência nas misturas propostas, para todos os tempos de cura, as adições de cal e cal combinada com CCA elevaram, consideravelmente, o módulo de elasticidade do solo natural. Fato este que se configura como o maior ganho deste estudo, pois a partir do aumento de rigidez evidenciado, pode-se supor que as deformações na camada final de revestimento serão reduzidas. Conclui-se que as propriedades do solo foram realmente melhoradas para todas as misturas, exceto Solo+CCA, pois tais dosagens conferiram uma maior rigidez ao material. Além disso, embora a média das resistências do solo natural seja superior, algumas amostras de solo+cal e solo+cal+CCA estão na mesma faixa de resistência devido a dispersão dos resultados.

Palavras-Chave: estabilização de solos, solos lateríticos, cinza da casca de arroz.

ABSTRACT

Highway constructions involve large amounts of materials and earthworks that it could be avoided with a better use of residual material from the same place of the highway construction. In order to better understand and use the lateritic soils, which are the predominant soils in Brazil, this study aimed to characterize and improve the properties of a laterite soil from a deposit located in southern Brazil, through the addition of rice husk ash, seeking its application in base and sub-base layers of pavements. The materials used in the development of the study were: a latosol from a deposit located in Cândido Godoi - RS; Hydrated lime dolomitic class CH-II; Rice husk ash (RHA) and distilled water. The materials were subjected to characterization tests, Physical-chemical test proposed by Casanova to determinate the dosages, and Mini-Proctor compaction tests to determine the density and optimum moisture molding. It was cast specimens of soil, soil+lime, soil+lime+RHA, and soil+RHA in cylinders with dimensions of 5 x 10 cm that remained healing, in a place with controlled temperature, during 7, 28, and 56 days. The resistance of the specimens was verified by the compression test. The soil was classified as a lateritic clay by the MCT methodology, a MH material by the Unified Soil Classification System, and an A 7-5 by the AASHTO Soil Classification System. The proportion of 94% of soil and 6% of lime, and 94% of soil, 2.4% of lime, and 3.6% of RHA were the recommended alternatives to stabilize the analyzed samples. Although there was no substantial gain in strength in the proposed mixtures for all curing times, the additions of lime and lime combined with RHA considerably increased the soil modulus of elasticity. This fact appears as the biggest gain of this study because as rigidity increases, it can be assumed that the deflections in the final layer will be reduced. It can be concluded that the soil properties were really improved for all mixes, except for the mixture of soil+RHA, because such dosages conferred greater rigidity to the material. Furthermore, although the average of the resistances of the natural soil are higher, some samples of soil+lime and soil+lime+RHA are in the same resistance range because of the dispersion of the results.

Keywords: soil stabilization, lateritic soils, rice rusk ash.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Contextualização.....	11
1.2. Tema da Pesquisa.....	13
1.3. Objetivos.....	14
1.3.1. Objetivo Geral	14
1.3.2. Objetivos Específicos.....	14
1.4. Justificativa.....	14
1.5. Estrutura do Trabalho.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. Definição de Solo.....	16
2.2. Solos Tropicais.....	17
2.2.1. Solos Lateríticos.....	18
2.2.2. Solos Saprolíticos.....	19
2.3. Classificação de Solos	20
2.3.1. Sistema Unificado de Classificação de Solos	20
2.3.2. Sistema Rodoviário de Classificação	21
2.3.3. Sistemática MCT	22
2.3.3.1. Ensaio de Compactação Mini-Proctor.....	23
2.3.3.2. Ensaio Mini-CBR e Expansão	23
2.3.3.3. Ensaio de Contração	25
2.3.3.4. Ensaios de Infiltrabilidade e Permeabilidade	25
2.3.3.5. Ensaio de Compactação Mini-MCV	27
2.3.3.6. Ensaio de Penetração da Imprimadura Betuminosa	27
2.3.3.7. Ensaio Mini-CBR de Campo.....	27

2.3.3.8.	Ensaio da Perda de Massa por Imersão.....	27
2.3.3.9.	Classificação Geotécnica MCT	28
2.3.4.	Ocorrência de Solos Lateríticos.....	29
2.4.	Estabilização de Solos	30
2.4.1.	Estabilização de Solo com Cal	31
2.4.2.	Estabilização de Solo com Cimento Portland	32
2.4.3.	Estabilização de Solo com Emulsões Asfálticas	33
2.4.4.	Estabilização de Solo com Cinza Volante	33
2.4.5.	Estabilização de Solo com Cinza da Casca de Arroz	35
2.5.	Requisitos para utilização de bases de solo laterítico.....	37
3.	METODOLOGIA	40
3.1.	Organização dos Procedimentos.....	40
3.2.	Materiais.....	41
3.2.1.	Solo	41
3.2.2.	Cal	43
3.2.3.	Cinza da Casca de Arroz	43
3.2.4.	Água	43
3.3.	Métodos.....	43
3.3.1.	Coleta e Preparo do Solo	43
3.3.2.	Ensaio de Caracterização.....	44
3.3.2.1.	Classificação Granulométrica.....	44
3.3.2.2.	Massa Específica do Solo	45
3.3.2.3.	Massas Específicas da Cal e da Cinza da Casca de Arroz	46
3.3.2.4.	Limite de Liquidez	47
3.3.2.5.	Limite de Plasticidade.....	48
3.3.2.6.	Sistema Unificado de Classificação de Solos.....	49

3.3.2.7.	Classificação Rodoviária	50
3.3.2.8.	Ensaio de Compactação Mini-MCV	51
3.3.2.9.	Ensaio de Perda de Massa por Imersão.....	53
3.3.2.10.	Classificação MCT	54
3.3.3.	Ensaio Físico-químico.....	55
3.3.4.	Ensaio de Compactação Mini-Proctor	57
3.3.5.	Dosagem e Mistura	58
3.3.6.	Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova.....	58
3.3.7.	Ensaio de Compressão Simples.....	59
4.	RESULTADOS.....	61
4.1.	Caracterização dos Materiais	61
4.1.1.	Granulometria.....	61
4.1.2.	Massa Específica	62
4.1.3.	Limites de Consistência.....	62
4.2.	Classificações do Solo	63
4.3.	Definição dos Teores de Cal.....	64
4.4.	Definição da Umidade Ótima e Massa Específica.....	66
4.5.	Dosagens	67
4.6.	Resistência à Compressão Simples	67
4.7.	Rigidez das Misturas	69
5.	CONCLUSÕES.....	72
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	Error! Bookmark not defined.
	REFERÊNCIAS	74

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Na engenharia, os profissionais estão constantemente em busca de soluções que satisfaçam os requisitos de projeto e que sejam economicamente viáveis. Procuram-se novas técnicas e novos materiais que possam diminuir o tempo de execução da obra, o gasto energético e as emissões atmosféricas. Ainda, procura-se reutilizar materiais e incorporar rejeitos de outros setores, a fim de diminuir o impacto ambiental das obras e o seu custo final.

Obras rodoviárias envolvem grandes quantidades de materiais e movimentações de terra. Estas últimas, muitas vezes, envolvem um custo excessivo em transporte. Tal afirmação vai de encontro com o intuito principal dos engenheiros que é conferir conforto e segurança ao usuário a partir de um dimensionamento que seja o mais econômico possível, conforme Soliz (2007). Segundo a autora, a economia poderia basear-se na máxima utilização de materiais do próprio local de construção da rodovia.

No entanto, é frequente encontrar jazidas que não possuem um solo adequado, ou agregados pétreos, para a execução das camadas do pavimento. Nestes casos, cabe ao engenheiro determinar a solução adequada que pode variar como a substituição do material existente por outro de outro local, adequar o projeto ao solo local, procurar uma região mais adequada para a realização do empreendimento, ou adotar técnicas para melhorar o comportamento do solo, designadas como estabilização de solos (GUIDA, 1971; NUÑES, 1991; SUAREZ, 2008; CRUZ; JALALI, 2010).

A estabilização de solos visa alterar as características e propriedades do solo, melhorando o seu comportamento mecânico e possibilitando que este seja capaz de responder de forma satisfatória às solicitações previstas em projeto (GUIDA, 1971; CRISTELO, 2001; SOLIZ, 2007; CRUZ; JALALI, 2010).

A principal aplicação da estabilização de solos sempre foi, de acordo com Cristelo (2001), na execução de bases, sub-bases e camadas de desgaste de pavimentos. A exigência de pavimentos com qualidade e longa duração é cada vez maior e aspectos econômicos inviabilizam grandes gastos com transporte de material granular mais

resistente e deposição do material local menos resistente (CRISTELO, 2001; SOLIZ, 2007; CONSOLI et al., 2009).

Devido a sua ampla ocorrência em países tropicais, como o Brasil, pode-se considerar fundamental o aproveitamento de solos lateríticos para fins rodoviários. Os solos finos, com a presença de argila, são coesivos quando secos, porém perdem sua capacidade de suporte na presença de água. Devido a tal característica, seu emprego não era recomendado (GUIDA, 1971).

Graças às pesquisas realizadas, principalmente, por Nogami e Villibor, permitiu-se mudar este conceito, já que comprovaram que os solos lateríticos podem ser utilizados e possuem grande eficácia para a construção de pavimentos econômicos. Tais pesquisas ainda permitiram o desenvolvimento de uma série de ensaios, denominados Sistemática MCT (Miniatura, Compactação, Tropical), que são adequados para a classificação e caracterização de solos tropicais (NOGAMI; VILLIBOR, 1995; NOGAMI; VILLIBOR, 2009; VILLIBOR et al., 2009).

Soliz (2007) encoraja a utilização de solos lateríticos para a execução de pavimentos econômicos, especificamente para áreas de tráfego muito leve a médio, e sugere, também, atenção especial às técnicas de estabilização de solos. Segundo a autora, além de melhorar as características do solo natural e permitir o seu emprego nas camadas do pavimento, a estabilização pode proporcionar reduções nos tempos de execução, viabilizar a industrialização do processo construtivo e, conseqüentemente, propiciar uma considerável economia para o empreendimento.

A estabilização de solos com cimento tem sido amplamente utilizada e, em geral, garante bons resultados. No entanto, possui grandes desvantagens no que se refere ao meio ambiente, devido à matéria-prima utilizada e ao grande consumo energético despendido para sua fabricação (TEIXEIRA, 2010).

A cal, por sua vez, é o estabilizante mais econômico e vem sendo utilizado pelo homem para a estabilização de solos coesivos há mais de 2000 anos (LOVATO, 2004; ROSA, 2009). Sua utilização em rodovias teve início na década de 20, nos Estados Unidos (BEHAK, 2007). Lovato (2004) relatou a utilização de base e sub-base de solo laterítico estabilizado com cal na BR-377/RS, construída no fim dos anos 60 e início dos anos 70, que apresentara uma boa capacidade estrutural mesmo após 35 anos de utilização e praticamente sem manutenção ou restauração.

Com a constante busca de soluções que propiciem redução de custos aliada à preservação ambiental, o aproveitamento de resíduos pode ser considerado uma

alternativa para a estabilização de solos em combinação com a cal. Os resíduos podem substituir fração da cal necessária para a estabilização, reduzindo ainda mais o custo final da obra e passam a ter uma destinação muito mais nobre e, ecologicamente, correta.

A cinza da casca de arroz é um resíduo abundante na região sul do país, que se destaca pela grande produção orizícola (IRGA, 2014). A mesma mostra-se eficiente na estabilização de solos em combinação com a cal.

Estudos realizados por Mateos (1961), Cerrati (1979), Rahman (1986; 1987), Ali, Adnan e Choy (1992), Kaniraj e Havanji (1996), Mallmann (1996), Carraro (1997), Muntohar e Hantoro (2000), Consoli et al. (2001), Basha, Hashim e Muntohar (2003), Behak (2007), Rosa (2009), Klamt (2012) e Fernandes (2014), entre outros, constataram que a mistura de solo com cimento ou cal e cinzas diminuem a plasticidade e o peso específico máximo aparente seco das misturas, enquanto aumentam a umidade ótima, o valor de CBR (California Bearing Ratio), da resistência mecânica, do ângulo de atrito e a coesão para solos argilosos.

Embora a estabilização de solos em geral seja um assunto de grande interesse da geotecnia e a estabilização de solos lateríticos seja de extrema importância para o Brasil e outros países tropicais, ainda são poucos os estudos utilizando a cinza da casca de arroz como agente estabilizador para este tipo de solo.

1.2. Tema da Pesquisa

Caracterização e melhoria das propriedades de um solo laterítico de uma jazida localizada no noroeste do estado do Rio Grande do Sul, através da utilização de cinza da casca de arroz, visando o seu emprego em camadas de base ou sub-base de pavimentos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Estudar as características mecânicas de um solo laterítico e avaliar o comportamento deste quando acrescidas porcentagens de cal e cinza da casca de arroz, visando seu uso em camadas de base ou sub-base de pavimentos, ou ainda, como camada final para estradas vicinais.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar um solo laterítico da região noroeste do estado do Rio Grande do Sul (jazida no município de Cândido Godói);
- Determinar as porcentagens de cal e cinza da casca de arroz necessárias para que atenda aos requisitos técnicos mínimos para sua utilização em camadas de pavimentos;
- Estudar o ganho de resistência mecânica com a inclusão de diferentes porcentagens de cal e cinza de casca de arroz;
- Avaliar a influência do tempo de cura nas misturas de solo+cal+cinza de casca de arroz;
- Verificar a possibilidade de estabilização do solo apenas com a utilização das cinzas, sem a presença de cal;
- Verificar, no caso de resultados positivos quanto às propriedades mecânicas, a viabilidade técnica da utilização destes resíduos para camadas de pavimentos.

1.4. Justificativa

O presente estudo é justificado pela enorme contribuição, tanto econômica, como ambiental, que a utilização de solos lateríticos estabilizados com resíduos pode trazer para a área de pavimentação. A cinza utilizada no estudo não possui valor agregado e seria descartada no meio ambiente. Os solos lateríticos, por sua vez, são os solos predominantes no Brasil e em outros países tropicais, os quais muitas vezes não

atendem aos requisitos mínimos para serem utilizados em camadas de pavimentos. Como se procura o desenvolvimento de uma metodologia de estabilização econômica e ambientalmente correta, opta-se pela utilização da cal, por ter custo mais acessível que o cimento Portland e por sua eficácia em misturas de solo e cinzas ser comprovada em estudos anteriores. Dessa forma, acredita-se que a estabilização de solos lateríticos com a cal e cinza da casca de arroz possa ser uma alternativa promissora, ambientalmente correta e de baixo custo.

1.5. Estrutura do Trabalho

Capítulo 1 – Apresenta a introdução, contextualização e apresentação do tema. Define os objetivos gerais e específicos e justifica a realização do trabalho, além de expor a estrutura na qual o trabalho está organizado.

Capítulo 2 – Contém a revisão de literatura acerca de aspectos relevantes de estabilização de solos em geral. Apresenta ainda estudos realizados anteriormente e particularidades relacionadas com a utilização de cinza da casca de arroz na estabilização de solos.

Capítulo 3 – Apresenta os materiais utilizados e a descrição completa do programa experimental utilizado no desenvolvimento da pesquisa.

Capítulo 4 – Apresenta os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais das misturas solo com cal e cinzas. São realizadas comparações entre as diferentes misturas e uma breve análise dos resultados obtidos.

Capítulo 5 – São apresentadas as conclusões da pesquisa.

Capítulo 6 – São apresentadas as sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

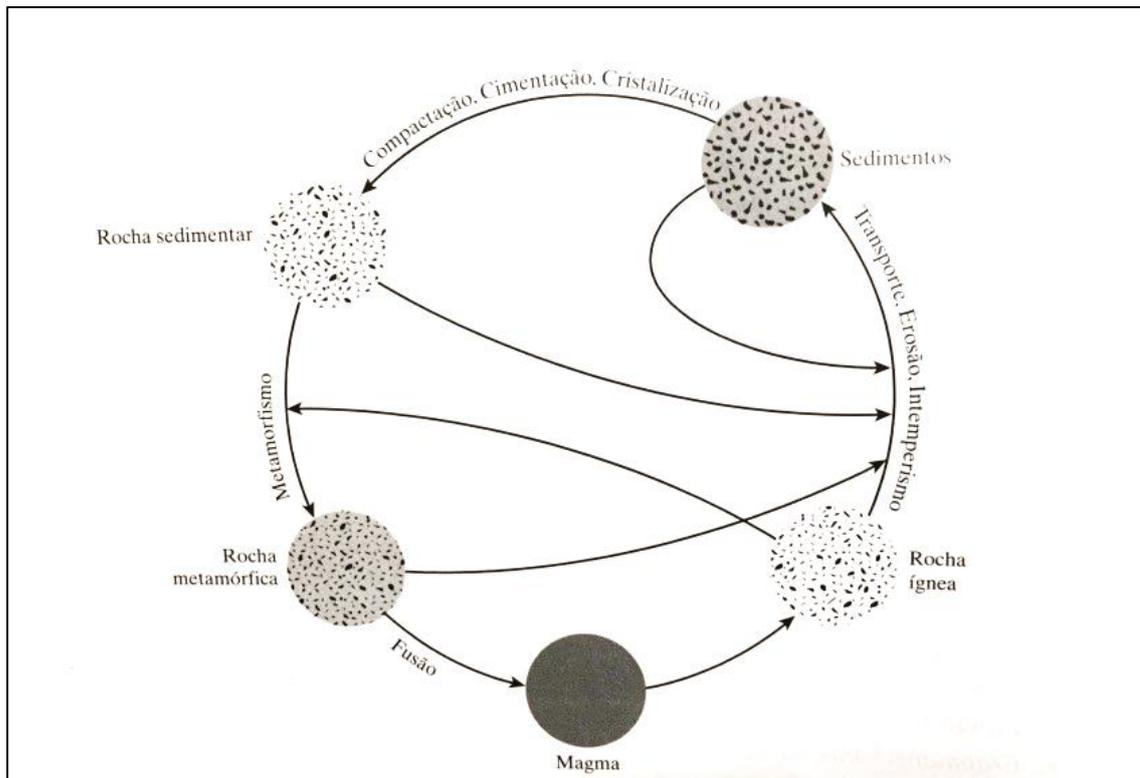
2.1. Definição de Solo

Os solos são originados da decomposição de rochas decorrentes da ação do intemperismo químico e físico. Agentes físicos, como as variações de temperatura, correntes de água e vento, ondas marítimas, ciclos de congelamento e derretimento, causam a desintegração das rochas dando origem a partículas menores, mas sem alterar sua composição original. Os agentes químicos, por sua vez, proporcionam a decomposição da rocha matriz, processo este que envolve sua modificação mineralógica. Os principais agentes do intemperismo químico são os processos de hidratação, hidrólise, oxidação, lixiviação, troca de cátions, carbonatação, etc., que em conjunto dão origem aos solos. Os solos podem ser considerados como um sistema trifásico, constituído de pequenas partículas minerais que se diferenciam pelo tamanho, forma e composição química, juntamente com moléculas de água e ar (LAMBE; WHITMAN, 1969; PINTO, 2006; DAS, 2006; ORTIGÃO, 2007).

Segundo Mitchell e Soga (2005), inúmeros tipos de solos podem ser encontrados em uma área muito próxima e isto está relacionado com os processos de intemperismo, erosão, transporte dos materiais sedimentados, processos de deposição e também pós-deposição. Observando a Figura 1 é possível compreender o ciclo de transformação das rochas, as quais, posteriormente, devido aos seus minerais constituintes, darão origem a fase sólida e as características dos solos.

Lambe e Whitman (1969) consideram o solo como o material de construção mais abundante no mundo e ressaltam que, muitas vezes, este é o único material disponível localmente. Desde a antiguidade, o emprego do solo em obras civis sempre foi essencial para o desenvolvimento das sociedades. Da mesma forma, atualmente, os engenheiros continuam a estudar as propriedades e as melhores técnicas de utilização do solo, principalmente, para sua utilização em obras de fundações, contenções, barragens de terra e estradas.

Figura 1 – Ciclo das rochas



Fonte: DAS (2007, p.14)

2.2. Solos Tropicais

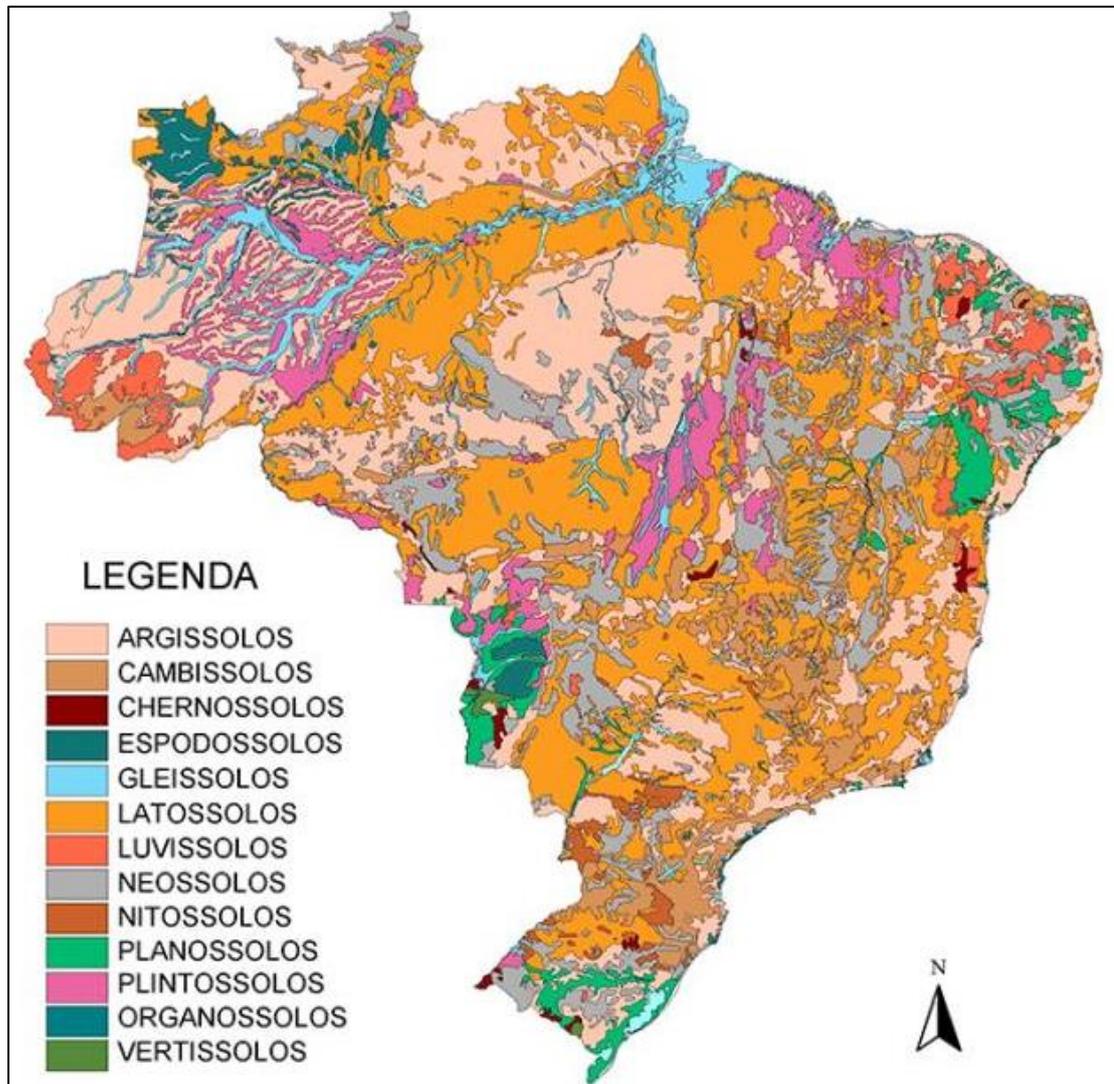
O Brasil é um país de grande extensão territorial e localizado, predominantemente, em região tropical. De acordo com Melfi e Pedro (1977), 56% dos solos brasileiros são ferrasols e 12,5% são acrisols. Estes dois termos referem-se a dois dos 30 grupos de solos do sistema de classificação de solos da Food and Agriculture Organization (FAO-UNESCO, 1992).

Acrisols, que correspondem aos Argilossolos do atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, são de profundidade variável e de cores predominantemente avermelhadas ou amareladas. Variam de forte a moderadamente ácidos e são predominantemente caulíníticos (EMBRAPA, 2006).

Ferrasols são caracterizados como sendo correspondentes aos Latossolos do atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, são solos bastante evoluídos e em avançado estágio de intemperização. Em geral, possuem grande profundidade e cores que variam desde amarelas até vermelho-escuro-acinzentadas. São solos fortemente ácidos e típicos de regiões equatoriais e tropicais, variando desde solos, predominantemente, caulíníticos até solos oxídicos (EMBRAPA, 2006).

A Figura 2 apresenta o mapa do Brasil com os solos predominantes em seu território, onde pode-se verificar a predominância dos Latossolos representados pela cor laranja.

Figura 2 – Mapa de Solos Brasileiros



Fonte: EMBRAPA (2014, não paginado)

2.2.1. Solos Lateríticos

A denominação de lateríticos incorporou-se à terminologia dos engenheiros, embora não seja mais usada nas classificações pedológicas (PINTO, 2006).

A correspondência entre a pedologia e as características geomecânicas do solo é complexa, pois, segundo Nogami e Villibor (1991), um solo pode ter comportamento laterítico, apesar de não pertencer a uma classificação pedológica laterítica, assim

como ser considerado laterítico, pedologicamente, e não possuir comportamento geotécnico laterítico. Em geral, os solos considerados lateríticos, do ponto de vista da engenharia, englobam tanto os ferrasols como parte dos acrisols do sistema de classificação FAO-UNESCO (NOGAMI; VILLIBOR,1991).

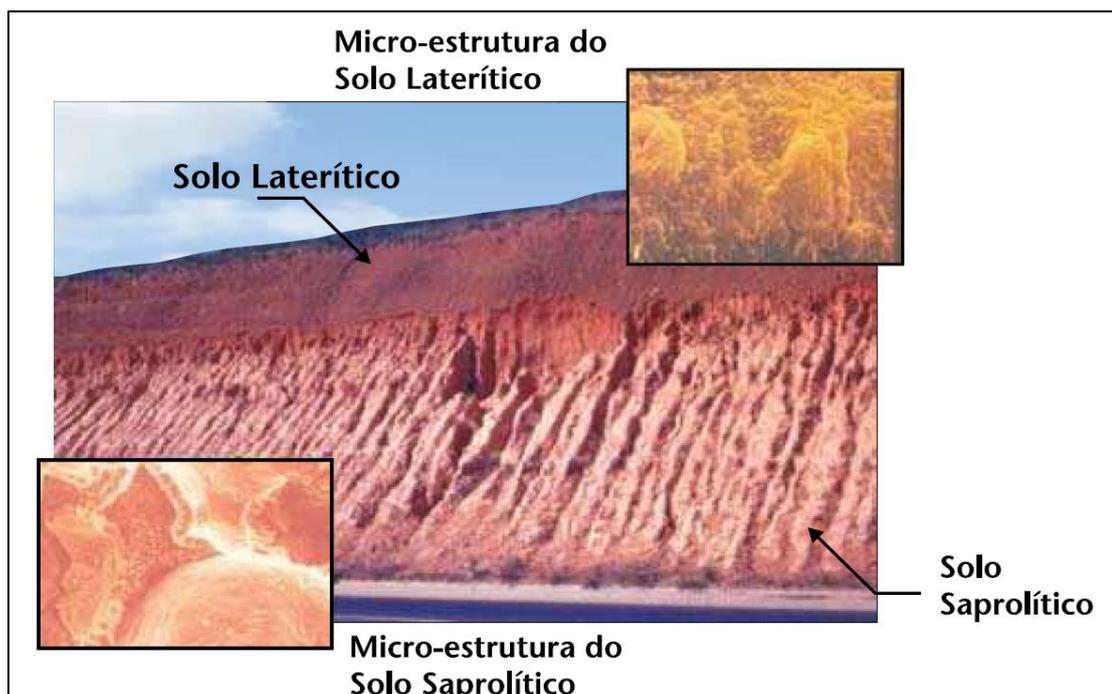
Medina e Guida (1995) põem em evidência que, atualmente, mais de 65% da crosta intemperizada brasileira já sofreu o processo de laterização e, a depender da intensidade desse processo, gibbsita e hidróxido de ferro ou caulinita e hidróxido de ferro são os produtos finais.

2.2.2. Solos Saprólíticos

São solos residuais jovens originados da decomposição *in situ* de uma rocha consolidada. Em condições naturais, estão localizados em camadas subjacentes às lateríticas e mantêm as características da rocha que lhes deu origem. Em geral, solos saprólíticos apresentam comportamento não laterítico (NOGAMI; VILLIBOR, 2009).

A Figura 3 mostra o perfil de um corte rodoviário, onde podem ser observadas uma camada de solo laterítico sobrejacente a uma camada de solo saprólítico. Tais camadas são o resultado da ação do intemperismo sobre a rocha matriz.

Figura 3 – Corte rodoviário apresentando camada saprólítica e laterítica



Fonte: Nogami e Villibor (2009, p.205)

2.3. Classificação de Solos

A classificação dos solos tem por objetivo estimar os prováveis comportamentos dos diferentes tipos de solos, uma vez que os sistemas de classificação procuram agrupar os solos com características semelhantes (PINTO, 2006). O conhecimento do tipo de solo é determinante para projetos de fundações, escavações, estradas e obras de terra em geral.

2.3.1. Sistema Unificado de Classificação de Solos

O Sistema Unificado de Classificação foi elaborado originalmente pelo prof. Casagrande para obras de aeroportos. Nesse sistema, os solos são identificados a partir de uma combinação de duas letras que podem ser observadas no Quadro 1 (PINTO, 2006).

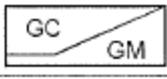
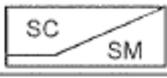
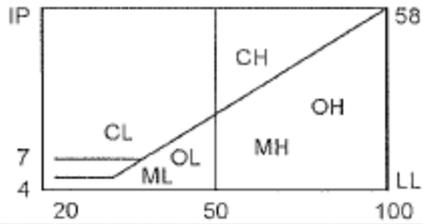
Quadro 1 – Terminologia do Sistema Unificado de Classificação

G	Pedregulho
S	Areia
M	Silte
C	argila
O	solo orgânico
W	bem graduado
P	mal graduado
H	alta compressibilidade
L	baixa compressibilidade
Pt	turfas

Fonte: Pinto (2006, p.52)

A classificação baseia-se na composição granulométrica, nos índices de consistência (Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade) e nos coeficientes de não uniformidade (CNU) e de curvatura (CC). Após a obtenção dos dados necessários, a partir dos ensaios específicos, pode-se classificar o solo conforme o Quadro 2 (PINTO, 2006).

Quadro 2 – Sistema Unificado de Classificação

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3	
			GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3	
		% P #200 > 12	GC 	
		GM		
			5 < #200 < 12	GW-GC, GP-GM, etc.
	S > G : S	% P #200 < 5		SW CNU > 6 e 1 < CC < 3
			SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3	
% P #200 > 12			SC 	
			SM	
		5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.	
% P #200 > 50	C	CL		
		CH		
	M	ML		
		MH		
	O	OL		
		OH		

Fonte: Pinto (2006, p.57)

2.3.2. Sistema Rodoviário de Classificação

O Sistema Rodoviário de Classificação foi proposto nos Estados Unidos e é muito aplicado na engenharia rodoviária em todo o mundo. Assim como o Sistema de Classificação Unificada, este método baseia-se na composição granulométrica e nos limites de consistência para a classificação dos solos. O Quadro 3 apresenta o esquema de classificação pelo Sistema Rodoviário (PINTO, 2006).

Quadro 3 – Sistema Rodoviário de Classificação

		% P #10 2,0 mm	% P #40 0,42 mm	% P #200 0,075 mm	IP
% P #200 < 35	A-1a	< 50	< 30	< 15	< 6
	A-1b		< 50	< 25	< 6
	A-3		> 50	< 10	NP
	A-2				
% P #200 > 35	A-4				
	A-5				
	A-6				
	A-7-5				
	A-7-6				

Fonte: Pinto (2006, p.58)

2.3.3. Sistemática MCT

A classificação MCT, apresentada por Villibor (1981) em sua tese, permitiu o estudo geotécnico dos solos finos, aqueles que passam integralmente pela peneira quadrada de malha de 2mm. A grande maioria dos solos brasileiros enquadra-se nesta situação, e o conhecimento a cerca desses solos, na década de 70, era baseado em estudos realizados para solos do hemisfério norte. Em contraste com os solos de regiões tropicais, os solos do hemisfério norte, em sua maioria, possuem granulometria grosseira e são classificados através de ensaios de granulometria e limites de liquidez e plasticidade (NOGAMI; VILLIBOR, 2009).

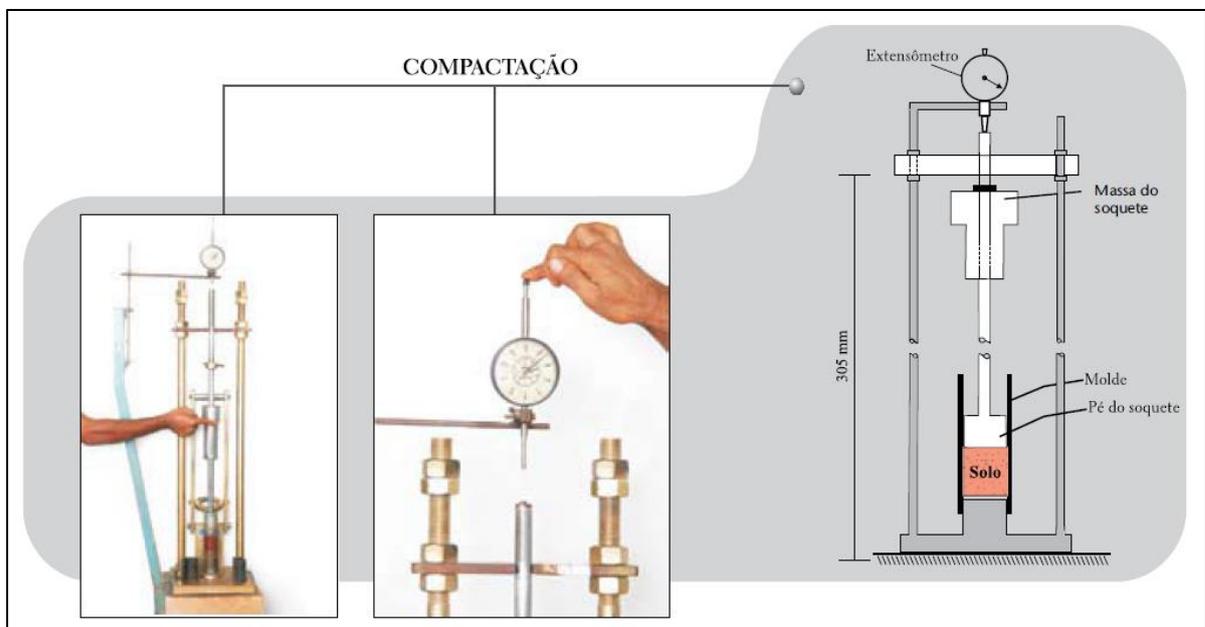
Devido ao emprego de uma metodologia inadequada para solos finos, muitos solos com elevada capacidade de suporte e ideais para uso como base de pavimentos eram classificados como inadequados pelos métodos tradicionais de ensaio (NOGAMI; VILLIBOR, 2009).

O conjunto de ensaios da sistemática MCT caracteriza-se pela utilização de corpos de prova cilíndricos, de diâmetro igual a 50 mm e altura igual ou próxima a 50 mm. A sigla MCT é uma abreviatura de M = miniatura, C = compactação e T= tropical, já que a sistemática é desenvolvida em corpos de prova em miniatura para análise e compactação de solos tropicais (NOGAMI; VILLIBOR, 2009).

2.3.3.1. Ensaio de Compactação Mini-Proctor

O ensaio é utilizado para compactar os solos em laboratório e fornecer a curva de compactação correspondente à energia aplicada por meio do soquete. Através da curva podem ser determinadas a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima. As diretrizes do ensaio são normatizadas pela DNER ME 228/94 e os equipamentos e procedimentos de ensaio estão ilustrados na Figura 4 (DNER, 1994a; NOGAMI; VILLIBOR, 2009).

Figura 4 – Ensaio de Compactação



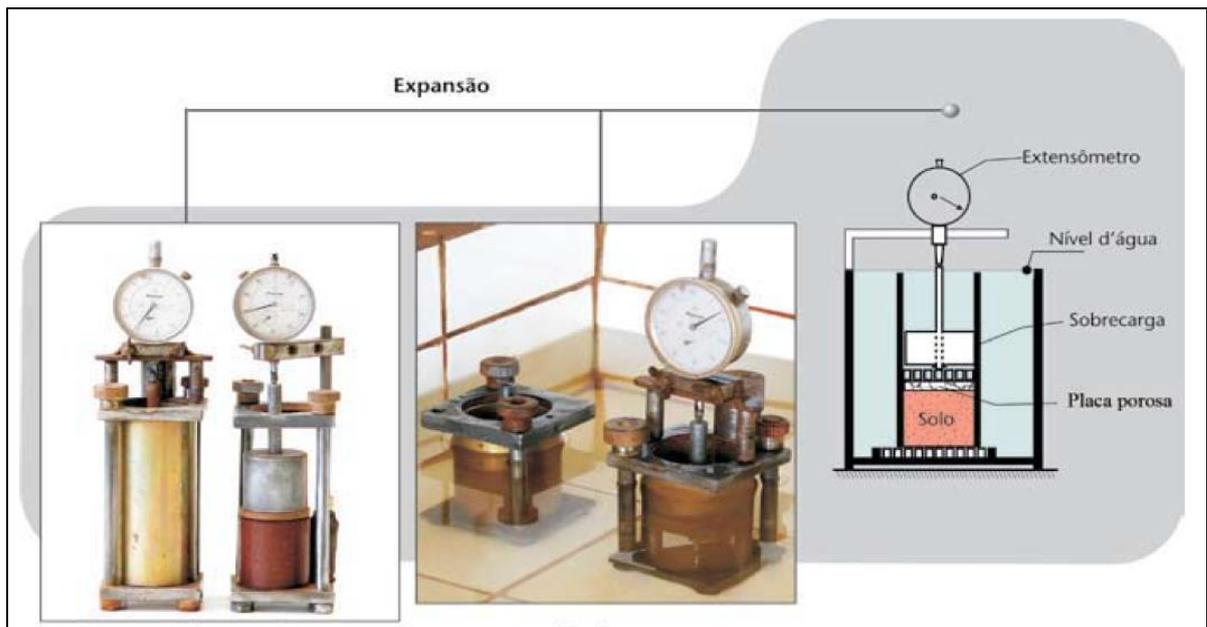
Fonte: Nogami e Villibor (2009, p.43)

2.3.3.2. Ensaio Mini-CBR e Expansão

O ensaio fornece a capacidade de suporte de um solo compactado. O procedimento é o mesmo adotado para o ensaio de CBR, porém com dimensões

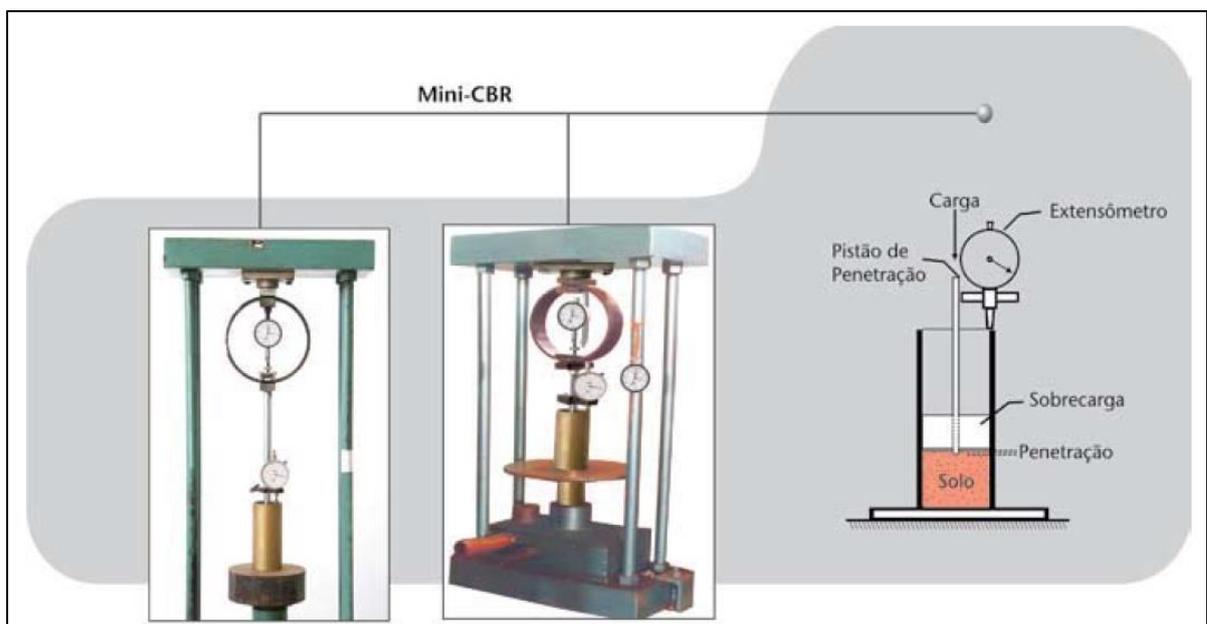
reduzidas. O ensaio fornece resultados que possibilitam o dimensionamento de pavimentos e a escolha de solos para reforço do subleito, sub-bases, bases e acostamentos. As diretrizes do ensaio são normatizadas pela DNER ME 254/97 e os equipamentos e procedimentos de ensaio estão ilustrados nas Figuras 5 e 6 (DNER, 1997; NOGAMI; VILLIBOR, 2009; VILLIBOR et al.,2009).

Figura 5 – Ensaio de Expansão



Fonte: Nogami e Villibor (2009, p.47)

Figura 6 – Ensaio Mini-CBR

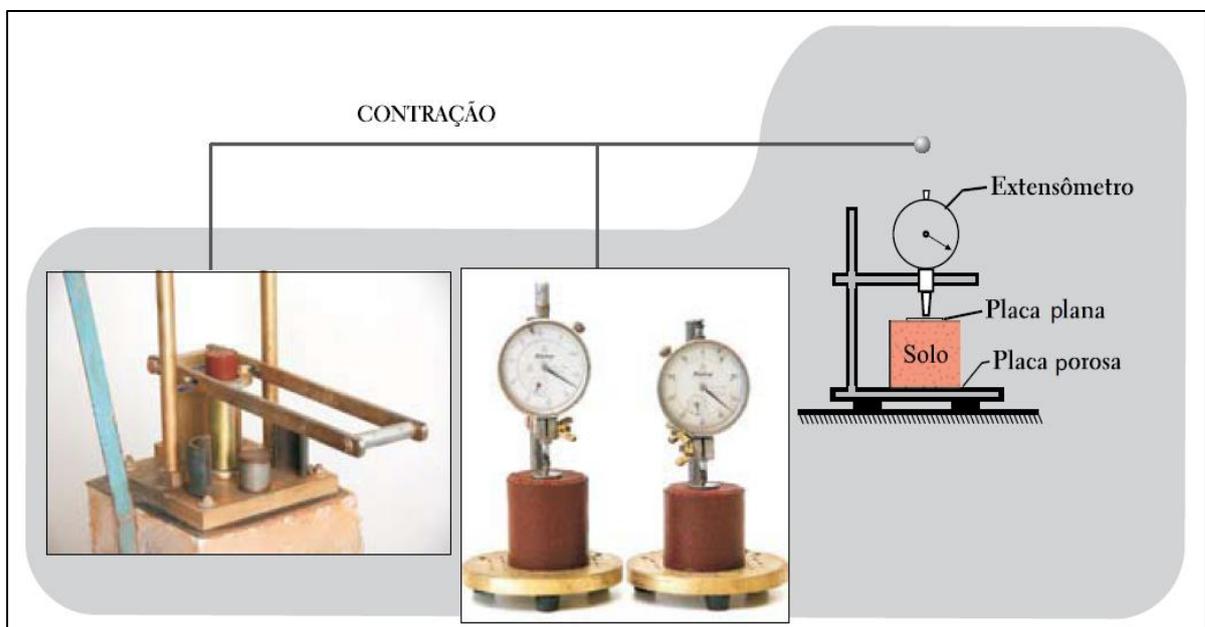


Fonte: Nogami e Villibor (2009, p.47)

2.3.3.3. Ensaio de Contração

Apresenta a contração da amostra em função de seu teor de umidade de compactação. A partir dos resultados obtidos pelo ensaio, é possível verificar a contração durante a fase construtiva e durante a vida útil do pavimento, com o objetivo de evitar a propagação de trincas na camada de revestimento. Os equipamentos e procedimentos de ensaio estão ilustrados na Figura 7 (NOGAMI; VILLIBOR, 2009; VILLIBOR et al., 2009).

Figura 7 – Ensaio de Contração



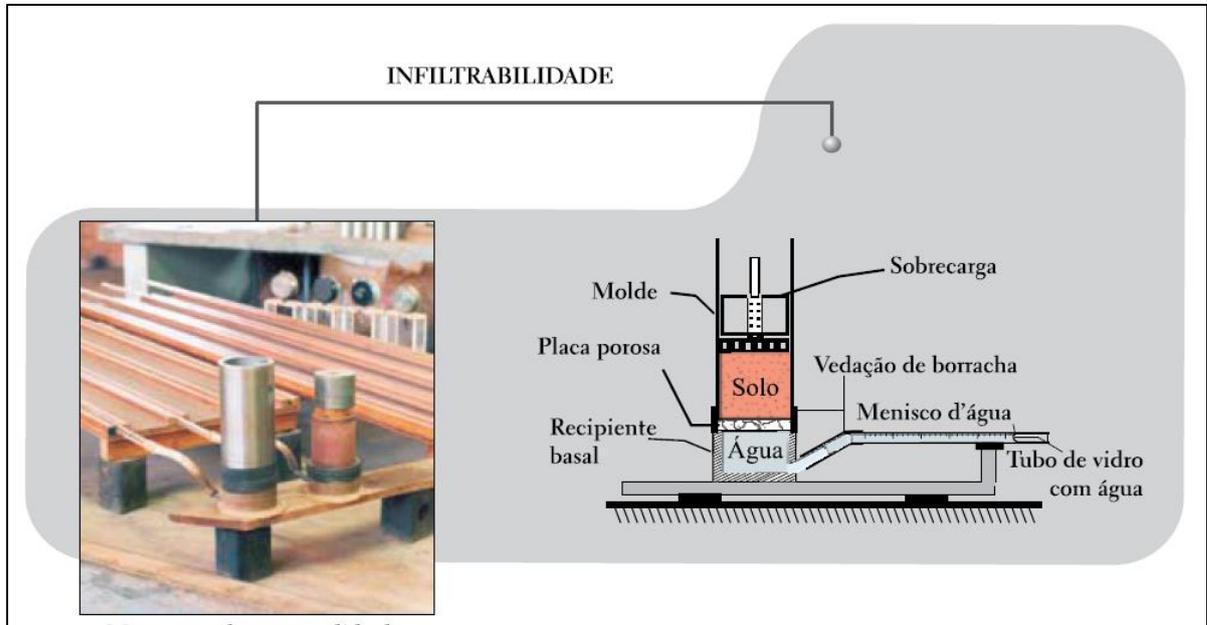
Fonte: Nogami e Villibor (2009, p.49)

2.3.3.4. Ensaio de Infiltrabilidade e Permeabilidade

O ensaio determina a penetração de água em corpos de prova de solos compactados. Os resultados deste ensaio são utilizados para determinar a escolha de solos para acostamentos e para bases revestidas de finas camadas betuminosas. É possível estimar, a partir dos dados obtidos no ensaio de infiltrabilidade, a velocidade e a quantidade de água que penetra em camadas de solo quando chove durante a fase de execução ou operação da rodovia. O ensaio de permeabilidade fornece informações para cálculos de escoamento de água em meio saturado, priorizando os solos para uso em camadas de base de pavimentos. Os equipamentos e

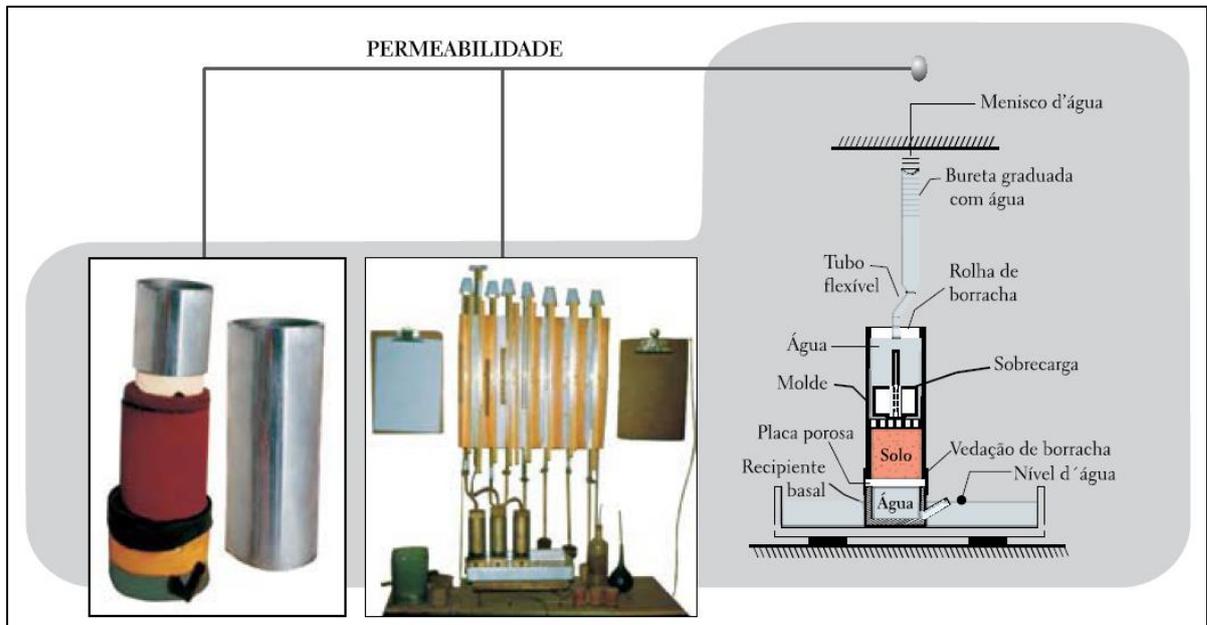
procedimentos de ensaio estão ilustrados nas Figuras 8 e 9 (NOGAMI; VILLIBOR, 2009; VILLIBOR et al., 2009).

Figura 8 – Ensaio de Infiltrabilidade



Fonte: Nogami e Villibor (2009, p.50)

Figura 9 – Ensaio de Permeabilidade



Fonte: Nogami e Villibor (2009, p.50)

2.3.3.5. Ensaio de Compactação Mini-MCV

É o ensaio de compactação com várias energias, utilizado no preparo de corpos de prova para determinação do Mini-CBR, Contração e outras propriedades da metodologia MCT. Difere do Mini-Proctor por utilizar a mesma massa úmida para qualquer teor de umidade. O ensaio pode ser utilizado no controle da compactação e na previsão da erodibilidade. As diretrizes do ensaio são normatizadas pela DNER ME 258/94 (DNER, 1994c; NOGAMI; VILLIBOR, 2009; VILLIBOR et al., 2009).

2.3.3.6. Ensaio de Penetração da Imprimadura Betuminosa

Permite prever a imprimadura que será obtida na base, através da correlação com valores obtidos em corpos de prova compactados em laboratório (NOGAMI; VILLIBOR, 2009).

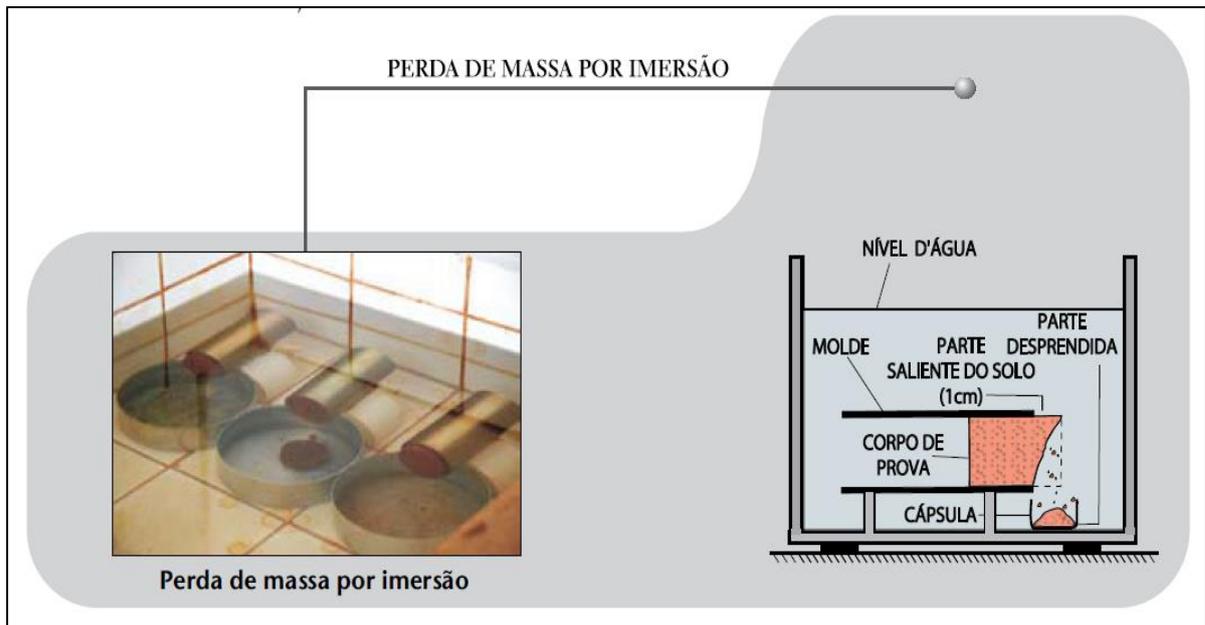
2.3.3.7. Ensaio Mini-CBR de Campo

O ensaio fornece a capacidade de suporte em campo, utilizando-se para isto cargas de cerca de 500 kgf para base e menos de 100 kgf para subleitos (NOGAMI; VILLIBOR, 2009).

2.3.3.8. Ensaio da Perda de Massa por Imersão

Os dados obtidos no ensaio são utilizados para fins classificatórios da MCT e poderão dar subsídio a estudos de erodibilidade do solo. As diretrizes do ensaio são normatizadas pela DNER ME 256/94 e os equipamentos e procedimentos de ensaio estão ilustrados na Figura 10 (DNER, 1994b; NOGAMI; VILLIBOR, 2009).

Figura 10 – Ensaio de Perda de Massa por Imersão

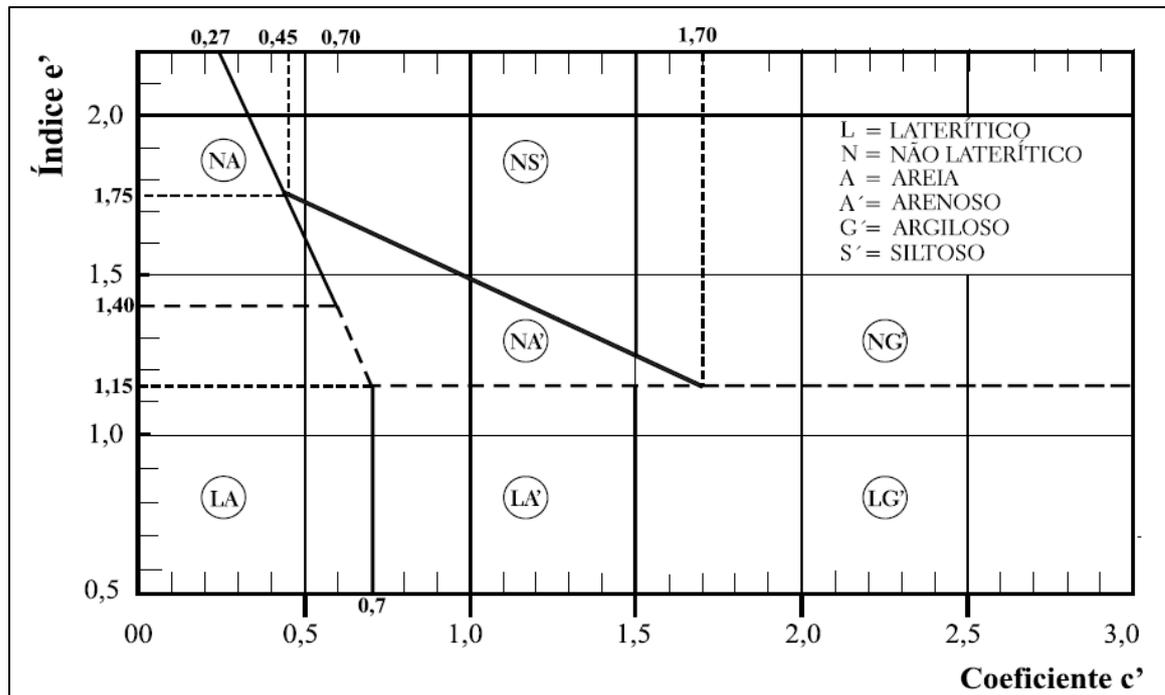


Fonte: Nogami e Villibor (2009, p.53)

2.3.3.9. Classificação Geotécnica MCT

Determina a classificação do solo em laterítico ou não laterítico através da utilização de dados provenientes dos ensaio Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão. Os valores obtidos através dos ensaios citados são plotados no gráfico da classificação de solos MCT que pode ser observado na Figura 11. As diretrizes do ensaio são normatizadas pela DNER CLA 259/96 (DNER, 1996; NOGAMI; VILLIBOR, 2009).

Figura 11 – Gráfico da Classificação de Solos MCT



Fonte: Nogami e Villibor (2009, p.54)

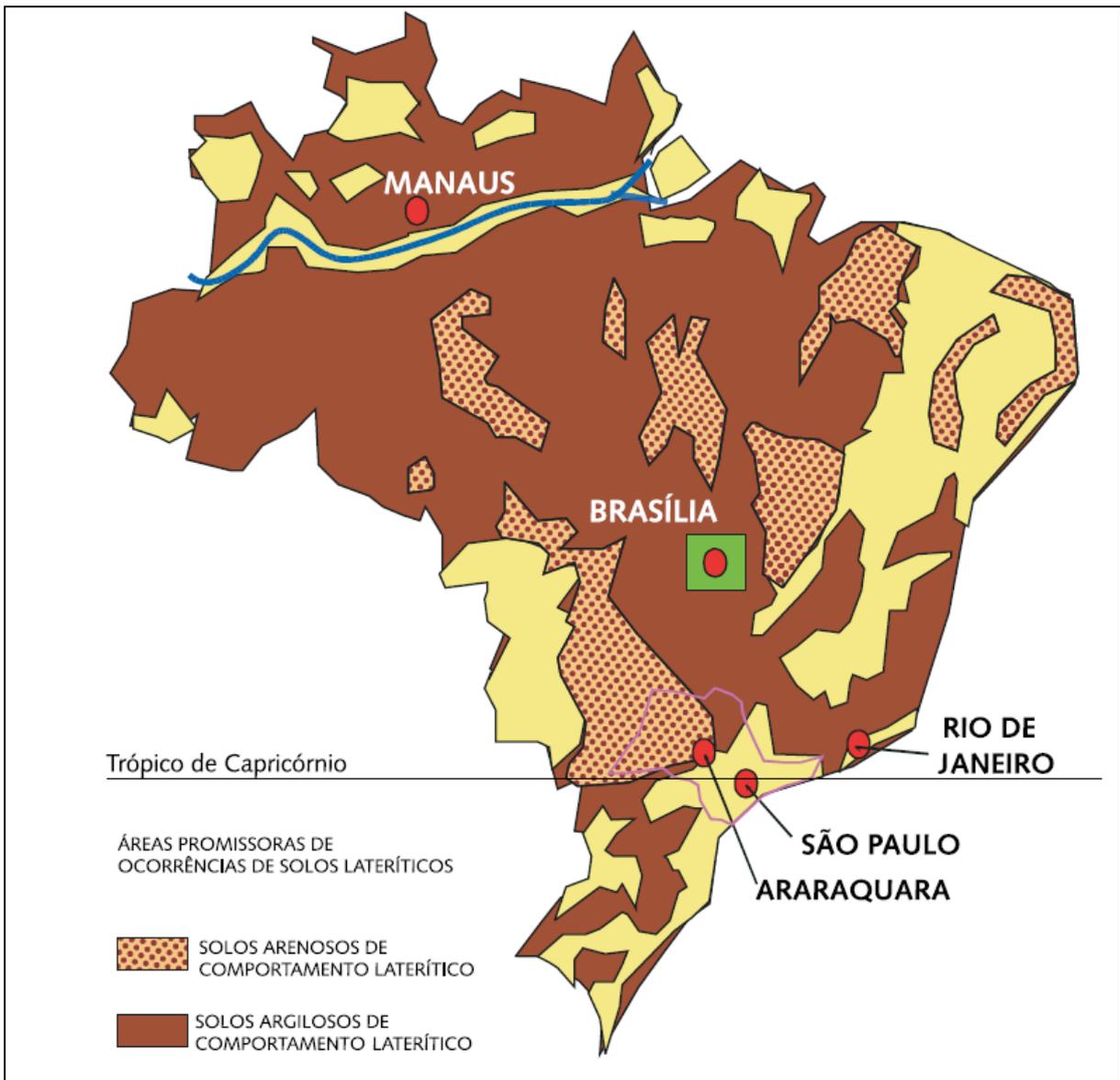
2.3.4. Ocorrência de Solos Lateríticos

Solos lateríticos arenosos e argilosos compreendem 65% do território brasileiro, conforme ilustrado na Figura 12 (MEDINA; GUIDA, 1995; NOGAMI; VILLIBOR, 2009).

Segundo Dias (1989), os solos lateríticos estão presentes em aproximadamente 20% do território rio-grandense. A partir de levantamento realizado pelo Ministério da Agricultura, identificou-se que a estação de mapeamento Santo Ângelo é a estação que apresenta o maior grau de laterização no Rio Grande do Sul. Os solos foram considerados profundos, com profundidade variando entre 2 e 4 metros, bem drenados, friáveis, de coloração vermelha escura e desenvolvidos a partir de rochas eruptivas basálticas (DNPEA, 1973).

A unidade de mapeamento Santo Ângelo encontra-se na região das missões, compreendendo uma área de aproximadamente 19560 km², representando 7,26% da área territorial do estado do Rio Grande do Sul. O município de Cândido Godói, distante 80 km do município de Santo Ângelo, está inserido na referida unidade de mapeamento (DNPEA, 1973).

Figura 12 – Ocorrência de solos lateríticos no território brasileiro



Fonte: Nogami e Villibor (2009, p.206)

2.4. Estabilização de Solos

A estabilização de solos consiste na melhoria e adaptação das propriedades do material disponível, a fim de que este atenda aos requisitos de projeto (NÚÑEZ, 1991). Solos podem ser estabilizados basicamente por métodos mecânicos, através de compactação e correção granulométrica, métodos físicos com a utilização de calor e eletricidade e métodos químicos através da incorporação de aditivos químicos ao solo.

Cristelo (2001) defende que a estabilização deve ser pensada não apenas em termos de correção das propriedades naturais dos solos, como também de modo a prevenir condições adversas que podem vir a acontecer durante a vida útil da obra.

A estabilização química pode ser classificada como uma estabilização permanente, na qual diversos tipos de aditivos podem ser utilizados. De acordo com Teixeira (2010), os materiais mais utilizados para estabilização de solos em obras rodoviárias são o cimento, a cal e o betume.

2.4.1. Estabilização de Solo com Cal

O emprego da cal como agente estabilizador de solos é o mais antigo método de estabilização química conhecida. A cal utilizada para a estabilização de solos é o produto proveniente da calcinação de rochas carbonatadas cálcicas ou magnesianas (dolomíticas), a uma temperatura próxima de 1000°C (GUIMARÃES, 2002). O resultado da calcinação é o óxido de cálcio (CaO) e o cálcio-magnésio (CaO-MgO) (BEHAK, 2007).

A introdução de cal no solo altera suas características de plasticidade, variações volumétricas e resistência (CRISTELO, 2001). A eficácia do processo de estabilização com cal é influenciada pelo tipo de solo a ser estabilizado, a quantidade e tipo de cal utilizada e pela temperatura e tempo de cura (CRISTELO, 2001; TEIXEIRA, 2010).

A resistência a compressão cresce linearmente com o aumento da proporção de cal e exponencialmente com a redução da porosidade na mistura (SANTOS, 2004).

Segundo Santos (2004), a cal é recomendada para a melhoria das propriedades de solos argilosos ou muito siltosos que apresentem baixa capacidade de suporte e plasticidade e expansão muito elevadas. Porém, Cristelo (2001) afirma que praticamente todos os solos finos apresentam melhorias das suas características físicas após a adição de cal.

A melhoria de algumas propriedades como: plasticidade, textura, trabalhabilidade e expansibilidade, ocorrem de forma praticamente imediata, através da troca catiônica entre as argilas presentes no solo e a cal. O processo de melhoramento pode estender-se até alguns dias após a mistura, período este no qual a floculação (aglomeração) das partículas ainda está ocorrendo (BEHAK, 2007; LITTLE, 1999).

O aumento de resistência do solo é garantido por reações pozolânicas que iniciam-se algumas semanas após a adição de cal ao solo e podem se estender por períodos prolongados de tempo, até mesmo anos em alguns casos. As reações pozolânicas formam produtos cimentícios (silicatos e aluminatos de cálcio) que proporcionam aumento da resistência e durabilidade da mistura solo-cal (BEHAK, 2007; LITTLE, 1999). Little (1999) relata um aumento de mais de 10 vezes do módulo de resiliência, mais de 20 vezes o valor da resistência ao cisalhamento e contínuo aumento de resistência mecânica.

2.4.2. Estabilização de Solo com Cimento Portland

O Instituto Americano de Concreto (ACI) define solo-cimento como uma mistura compactada de solo com cimento e água em quantidades pré-determinadas. O cimento utilizado para estabilização de solos é o cimento do tipo Portland, composto pela combinação de óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro, provenientes do calcário, da argila e do gesso. A presença de sílica (SiO_2) e da alumina (Al_2O_3) tem importância fundamental na obtenção de produtos com elevadas resistências (COUTINHO, 1973).

O processo de estabilização de solos com cimento Portland constitui-se na pulverização de cimento e água em um solo. A mistura é, então, compactada e permanece em processo de hidratação durante aproximadamente 7 dias (PEIXOTO; NUNES; AFFONSO, 2001).

A estabilização de solo com cimento Portland é o tipo de estabilização mais difundida atualmente (PEIXOTO; NUNES; AFFONSO, 2001). A referida técnica vem sendo utilizada desde 1915 nos Estados Unidos, onde o solo estabilizado era empregado em bases e sub-bases de pavimentos rodoviários. Os estados de Dakota do Sul, Iowa, Ohio, Califórnia e Texas foram os pioneiros.

A estabilização com cimento Portland é adequada para uma grande variedade de solos, desde materiais granulosos a materiais siltosos e argilosos (ZHANG; TAO, 2008).

O cimento contribui para a melhoria de diversas propriedades do solo. Teores de cimento mais baixos diminuem a plasticidade da mistura, podendo, ou não, influenciar na resistência mecânica da mesma. Porém, teores de cimentos mais elevados proporcionam o aumento da resistência mecânica devido à sua ação aglutinante (cimentante) (CRUZ; JALALI, 2010). É comumente utilizada uma

porcentagem de cimento variando entre 5 a 7% nos siltes, 7 a 15% nas areias e cerca de 4% nos cascalhos (PEIXOTO; NUNES; AFFONSO, 2001).

2.4.3. Estabilização de Solo com Emulsões Asfálticas

Bernucci et al (2008) define emulsões asfálticas como misturas heterogêneas de cimento asfáltico (CAP) e água, estabilizadas com agentes emulsificantes. Os emulsificantes são tensoativos que, por sua vez, possibilitam que as moléculas de asfalto permaneçam suspensas na água durante determinado tempo (BERNUCCI et al., 2008).

A tecnologia foi desenvolvida a partir de pesquisas para a construção de aeroportos e rodovias durante a 2ª Guerra Mundial. No Brasil, o primeiro trecho de solo-emulsão foi realizado no estado de São Paulo na década de 1960 (SUAREZ, 2008).

A incorporação de emulsão asfáltica ao solo confere reforço a solos granulares através da cimentação de suas partículas, impermeabilização de solos finos coesivos e a conversão de solos que resistiam apenas ao atrito em solos coesivos (KÉZDI, 1979). Estudos realizados por Suarez (2008) concluíram que a estabilização solo-emulsão proporciona um aumento de resistência e diminuição da deformação das camadas de base e sub-base.

2.4.4. Estabilização de Solo com Cinza Volante

Cinza volante é um material de partículas extremamente finas e leves, originada da combustão de carvão em usinas termelétricas. Rohde et al. (2006) conceituam quimicamente as cinzas volantes como materiais particulados, sílicoaluminosos, de textura siltosa e com a massa específica dos grãos variando entre 2050kg/m³ e 2200kg/m³. As cinzas são remanescentes da matéria mineral calcinada nos processos de combustão de carvão pulverizado, em ambiente oxidante e de alta temperatura, extraídos por meios eletrostáticos dos gases de combustão (ROHDE et al., 2006; CAMARA, 2011).

As propriedades físico-químicas das cinzas, todavia, variam não somente de usina para usina, mas de caldeira para caldeira na mesma usina e até numa mesma caldeira em tempos diferentes, pois estão condicionadas as características e manejo

do carvão utilizado e também das condições de operação das caldeiras (GOETHE, 1990).

O carvão mineral é utilizado como combustível para geração de energia térmica, e no Brasil, as termelétricas estão situadas geograficamente próximas as principais jazidas carboníferas do país, nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná (POZZOBON, 1999).

De acordo com os dados do Balanço Energético Nacional de 2014, com os dados referentes a 2013, 5,6% da oferta de energia foi proveniente da combustão de carvão mineral (EPE, 2014). Esta porcentagem, de acordo com os dados de Rhode et al. (2006), corresponde a uma produção que atinge aproximadamente 4.000.000 toneladas por ano de cinza volante, das quais somente em torno de 50% são aproveitadas.

A estabilização de solos com cinza volante em misturas de solo-cinza-cal teve suas primeiras aplicações nas décadas de 1920 e 1930, conforme Rohde et al. (2006). Porém, o primeiro registro de utilização de cinza volante no Brasil foi em 1964 nas obras da hidrelétrica de Jupirá, onde as mesmas foram incorporadas ao concreto a fim de diminuir seu calor de hidratação (ROSA, 2009).

A cinza volante, por si só, possui pouca ou nenhuma capacidade de cimentação, porém, na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxidos alcalinos e alcalinos terrosos à temperatura ambiente para formar ou ajudar na formação de compostos com propriedades cimentantes (ROSA, 2009). Segundo Mateos (1961), parte da cal combina-se com as partículas de solo e outra parte com o dióxido de carbono presente na fase água e ar do solo, e ainda a terceira parte, remanescente, combina-se com a cinza volante, originando a reação de natureza pozolânica.

Os estudos de Mallmann (1996) constataram que o aumento da energia de moldagem resulta em um aumento da resistência, devido ao maior número de reações pozolânicas que são facilitadas pela aproximação dos grãos. Além disso, constatou-se que o tempo de cura é o fator que mais influencia a resistência à compressão simples de corpos-de-prova curados à temperatura ambiente de aproximadamente 21°C. Porém, de acordo com Camara (2011), as variações de temperatura afetam diretamente as reações pozolânicas e tais reações tendem a cessar em temperaturas inferiores a 7°C e acelerar em temperaturas elevadas.

Cerrati (1979) ao estudar os efeitos da adição de cinza volante combinada com cal para a estabilização de um solo residual compactado, constatou uma relação de 0,10 a 0,13 entre as resistências à tração na compressão diametral e à tração na flexão.

Kaniraj e Havanji (1996) relatam que o peso específico máximo aparente seco da mistura solo-cinza-cal hidratada diminui e a umidade ótima aumenta com o aumento do teor de cinza volante para uma mesma energia de compactação.

Carraro (1997) ao estabilizar um solo arenoso compactado com cinza volante e cal observou que valores médios de resistência à tração na compressão diametral e as resistências à tração e à compressão são variáveis com o tempo de cura.

Em um solo silte-arenoso tratado com cal e cinza volante por Consoli et al. (2001) foi observado um comportamento frágil na ruptura e a diminuição da deformação axial na ruptura como consequência da cimentação. Os autores verificaram que não só a cimentação influencia nesse processo, mas também as condições de compactação.

2.4.5. Estabilização de Solo com Cinza da Casca de Arroz

A casca de arroz é um resíduo da cultura orizícola. A incineração deste resíduo tem sido utilizada como forma de reduzir seu volume e gerar energia. Porém, a queima ainda produz a cinza da casca de arroz (CCA) que é outro resíduo. Juliano (1985) concluiu que a casca de arroz, quando incinerada, produz aproximadamente 20% de seu peso de cinza. Ainda, segundo Ali, Adnan e Choy (1992) cada 4 toneladas de arroz gera 1 tonelada de casca.

O Brasil, na safra 2013/2014, produziu 12 milhões de toneladas de arroz, sendo que 8 milhões foram colhidas no estado do Rio Grande do Sul (IRGA, 2014). A partir dos dados previamente apresentados, pode-se estimar que cerca de 400 mil toneladas de cinza teriam sido produzidas a partir da incineração de toda a casca proveniente da referida safra.

Korisa (1958), Juliano (1985) e Basha, Hashim e Muntohar (2003) afirmam que mais de 90% da composição química da CCA é sílica, valor este superior ao encontrado na cinza volante, como observado por Ali, Adnan e Choy (1992).

A cinza apropriada para o desenvolvimento de reações pozolânicas é a cinza amorfa, por possuir uma maior superfície específica, o que possibilita uma melhor

interação química com a cal. A fim de produzir a variedade amorfa, a temperatura de incineração deve ser controlada entre 550°C e 700°C. Temperaturas abaixo de 500°C podem não garantir a queima de todo o material orgânico, enquanto temperaturas acima de 900°C produzem cinzas cristalinas (BOATENG; SKEETE, 1990). De acordo com Metha (1975), quando incinerado em temperatura controlada, o resíduo misturado com a cal se transforma em um cimento estruturalmente tão bom quanto o cimento Portland.

A cinza da casca de arroz, assim como a cinza volante, por si só não possui cimentação. O poder cimentício é garantido a partir da reação química da sílica amorfa com a cal, produzindo silicatos hidratados de cálcio (BOATENG; SKEETE, 1990). “As reações químicas produzidas entre a cal e a cinza da casca de arroz, e seus efeitos físicos sobre os solos, são muito similares aos que acontecem entre a cal e os argilo-minerais de solos argilosos” (BEHAK, 2007, p. 8).

As vantagens relacionadas a adição de cinza da casca de arroz ao solo são apontadas por Behak (2007) e estão relacionadas a melhoria das propriedades físicas e mecânicas dos solos e a disposição adequada de um resíduo nocivo à saúde humana.

Rahman (1986; 1987) utilizou CCA para estabilizar um solo laterítico e concluiu que este é um material com potencial para substituir a cal ou o cimento, porém o autor não explica o motivo do aumento da capacidade de suporte a partir da adição de somente cinza. Tempos depois, Muntohar e Hantoro (2000) atribuíram o aumento de resistência verificado por Rahman ao ângulo de atrito interno da mistura. Desta forma, a estabilização realizada por Rahman foi muito mais granulométrica do que química, devido ao baixo efeito pozolânico produzido apenas pela CCA e o solo.

A pesquisa de Ali, Adnan e Choy (1992) concluiu que a resistência das misturas solo-cal pode ser aumentada adicionando entre 6 e 12% de CCA. A resistência à compressão cresce, rapidamente, com o aumento da quantidade de CCA até atingir um teor ótimo, a partir do qual a resistência decresce, pois existe cinza além da quantidade necessária para reagir com a cal disponível. Os mesmos autores concluíram que o aumento da temperatura de cura aumenta a resistência à compressão simples do solo+cal+CCA. Muntohar e Hantoro (2000) obtiveram aumento de resistência na estabilização de um solo argiloso com 10% de CCA e 10% de cal.

Ali, Adnan e Choy (1992) ao fixarem um teor de 12% de CCA em um solo areno-argiloso, compararam o ganho de resistência do solo ao adicionar cal ou cimento. O resultado demonstrou que a cal propicia maiores ganhos de resistência do que o cimento nas misturas solo+CCA.

Basha, Hashim e Muntohar (2003) estudaram a estabilização com CCA de um solo residual fino, concluindo que os teores ótimos de CCA reduzem a plasticidade do solo de 10% a 15%.

Muntohar e Hantoro (2000) pesquisaram os efeitos da estabilização com CCA e cal nas propriedades de um solo silto-argiloso e observaram que a densidade real dos grãos decresce à medida que é adicionada CCA. O mesmo acontece ao fixar-se o teor de CCA e aumentar-se o teor de cal.

Behak (2007) concluiu que as misturas de solos estabilizados com CCA e cal apresentam menor peso específico aparente máximo e maior teor de umidade ótima que o solo natural, para uma mesma energia de compactação. Ali, Adnan e Choy (1992) explicaram que o decréscimo do peso específico aparente máximo da mistura é devido à baixa densidade real dos grãos da CCA e o aumento da umidade ótima pode ser devido à absorção de água pela CCA.

Muntohar e Hantoro (2000) determinaram o Índice de Suporte Califórnia (ISC) de um solo argiloso estabilizado com CCA e cal e concluíram que os valores de ISC para diferentes teores de CCA, com teor de cal constante, não diferiram significativamente. Por outro lado, Basha, Hashim e Muntohar (2003) observaram uma diminuição nos valores de ISC das misturas solo silto-arenoso com CCA. Portanto, segundo os autores a CCA não é apropriada como estabilizante por si só.

2.5. Requisitos para utilização de bases de solo laterítico

Não existe uma normalização específica que determine os requisitos mínimos para solos lateríticos estabilizados com cal e cinza da casca de arroz conforme proposto neste trabalho. Porém, é possível encontrar normas que estabelecem critérios para bases e sub-bases estabilizadas com cimento, com cal e também bases executadas com solo laterítico.

A norma do DNIT 143/2010 – ES (DNIT, 2010) estabelece que a mistura de solo-cimento deve apresentar um valor mínimo de 2,1 MPa para a resistência à compressão aos sete dias.

Já a especificação de serviço do DER-PR ES-P 11/05 (DER-PR, 2005) diferencia bases e sub-bases de solos tratados com cimento das bases e sub-bases de solo-cimento, as quais possuem requisitos diferenciados. Para solos tratados com cimento especifica-se 1,2 a 2,1 MPa para a utilização de sub-bases de pavimentos e 1,5 a 2,1 MPa para bases. Para camadas de pavimentos, tanto base como sub-base de solo estabilizado com cimento exige-se um mínimo de 2,1 MPa, em conformidade com o especificado pela norma DNIT 143/2010 – ES (DNIT, 2010).

Para bases e sub-bases de solo-cal a norma do DER-SP ET-DE-P00/005 (DER-SP, 2006) não estabelece uma resistência mínima a ser atingida, porém estabelece o teor mínimo de cal, que deve ser de 3%, e o tipo de solo a ser estabilizado, que deve ser argiloso e pertencente ao grupo LG' da classificação MCT.

Segundo a especificação técnica do DER-SP ET-DE-P00/015 (DER-SP, 2005) e Nogami e Villibor (2009) as sub-bases ou bases de solo arenoso fino laterítico (SAFL) podem ser executadas com solos pertencentes aos grupos LA, LA' e LG' da classificação MCT desde que atendam aos critérios apresentados no Quadro 4.

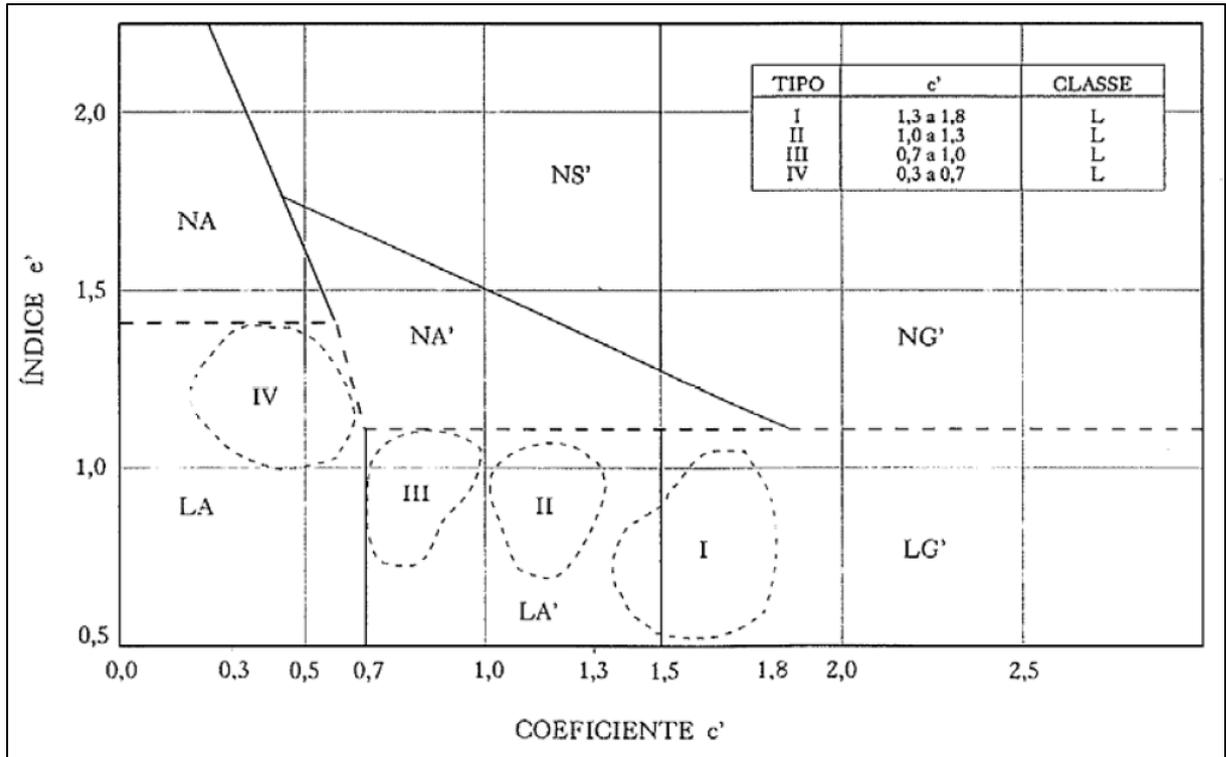
Quadro 4 – Critério geral de escolha de SAFL para bases de pavimentos

Propriedades	Intervalos admissíveis
Grupos MCT	LG', LA', LA
Capacidade de Suporte Mini-CBR _{H0} (%)	≥ 40
Expansão sem sobrecarga – Es (%)	≤ 03
Relação RIS (%) ou Perda de Suporte por Imersão PSI (%)	≥ 50 ≤ 50
Contração Axial – Ct (%)	0,1 a 0,5
Coeficiente de Sorção d'água - s	10 ⁻² a 10 ⁻⁴
Coeficiente de Permeabilidade – ks	10 ⁻⁶ a 10 ⁻⁸
Limite de Liquidez	≤ 25%
Índice de Plasticidade	≤ 6

Fonte: Adaptado de DER/SP (2005), DNIT (2006) e Nogami e Villibor (2009)

A norma do DER-SP ET-DE-P00/015 (DER-SP, 2005) recomenda que sempre que possível deve-se seguir a seguinte sequência de preferência dos tipos de solos lateríticos: Tipo I, Tipo II, Tipo III e Tipo IV, conforme representado na Figura 13.

Figura 13 – Gráfico das áreas dos tipos de SAFL



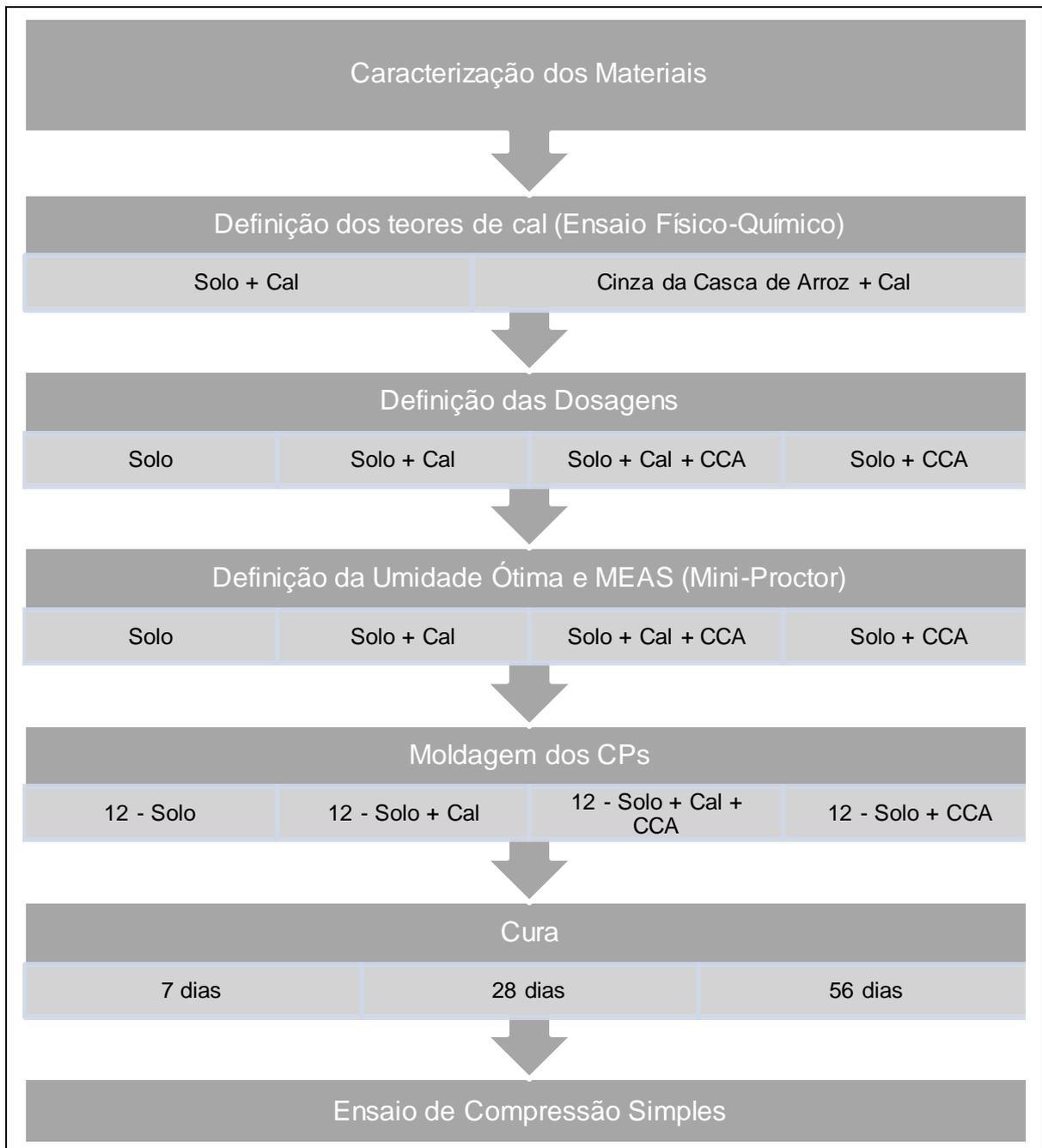
Fonte: Adaptado de DER-SP (2005)

3. METODOLOGIA

3.1. Organização dos Procedimentos

Os ensaios realizados foram organizados no fluxograma apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Fluxograma dos Procedimentos.



Fonte: Elaboração própria

Um maior detalhamento da caracterização dos materiais é apresentado no fluxograma da Figura 15.

Figura 15 – Fluxograma da Caracterização dos Materiais.



Fonte: Elaboração própria

3.2. Materiais

3.2.1. Solo

O solo utilizado na pesquisa foi coletado em jazida localizada na BR 307 km 28, distante 05 km da entrada da cidade de Cândido Godói, estado do Rio Grande do Sul. A localização da cidade de Cândido Godói e da jazida pode ser observada na Figura 16.

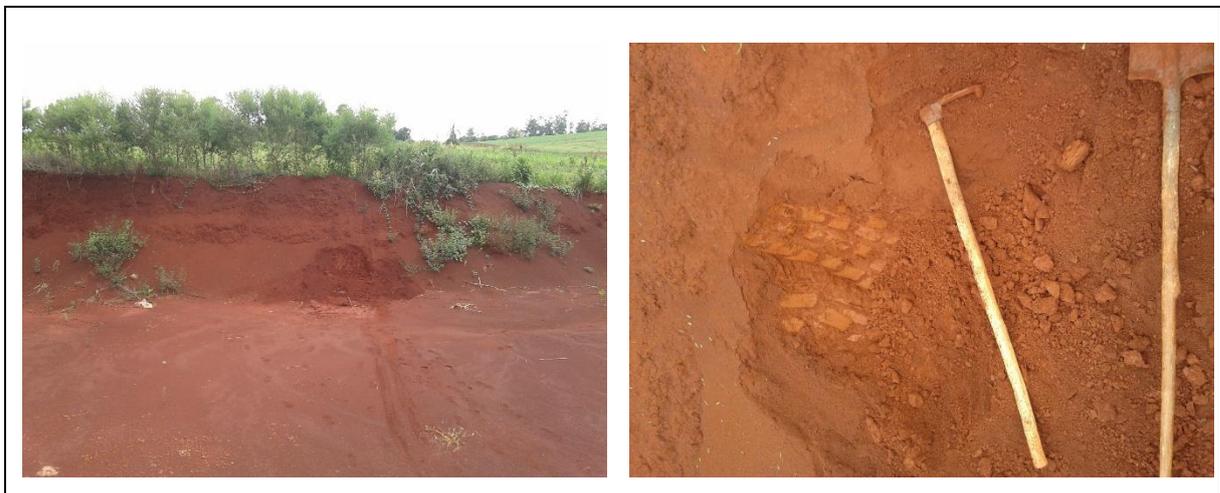
Figura 16 – Localização da Jazida



Fonte: Google Earth

O solo é um Latossolo Roxo, classificado como Argiloso Laterítico segundo a sistemática MCT. A jazida e o solo podem ser melhor observados na Figura 17.

Figura 17 – Jazida



Fonte: Elaboração própria

3.2.2. Cal

Foi utilizada cal hidratada comercializada na cidade de Alegrete - RS, classificada na classe CH-II Dolomítica que atende aos requisitos impostos pela NBR 7175 (ABNT, 2003).

3.2.3. Cinza da Casca de Arroz

A cinza de casca de arroz (CCA) foi cedida pela CAAL (Cooperativa Agroindustrial Alegrete Ltda.), localizada no município de Alegrete, estado do Rio Grande do Sul. A empresa não possui o controle da temperatura de queima da casca de arroz. É importante ressaltar que tal cinza é um resíduo proveniente da Usina Termelétrica da empresa, o qual vem sendo depositado no meio ambiente de forma inadequada e não possui custo algum de aquisição.

3.2.4. Água

Foi utilizada água destilada para produção das misturas e realização de todos os ensaios. O processo de destilação da água proveniente do sistema de abastecimento urbano da cidade de Alegrete é realizado no Laboratório de Solos e Pavimentação da Unipampa – Campus Alegrete.

3.3. Métodos

3.3.1. Coleta e Preparo do Solo

O solo foi coletado obedecendo as especificações da NBR 9604 (ABNT, 1986) - Abertura de Poço e Trincheira de Inspeção em Solo. A retirada da amostra deformada foi realizada com o uso de pá e enxada. Previamente, antes da escavação, foi realizada uma limpeza superficial do terreno, retirando qualquer vestígio de vegetação presente, conforme especificado pela normativa. O material foi acondicionado em bolsas para o transporte.

Já no laboratório, a amostra foi destorroada e armazenada para a utilização nos ensaios futuros.

3.3.2. Ensaios de Caracterização

3.3.2.1. Classificação Granulométrica

Foi realizada a análise granulométrica da amostra preparada conforme as recomendações da NBR 6457 (ABNT, 1986). A classificação granulométrica foi regida pela NBR 7181 (ABNT, 1984) – Solo – Análise Granulométrica.

Realizou-se o ensaio de sedimentação, no qual foram efetuadas as leituras do densímetro correspondentes aos tempos de sedimentação de 0,5, 1, 2, 4, 8, 15 e 30 minutos, 1, 2, 4, 8 e 24 horas, a contar do início da sedimentação. Após a realização da leitura de 24h, o material foi passado pela peneira 0,075 mm, lavado em água corrente e foi realizado o peneiramento fino, utilizando-se as peneiras de 1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15 e 0,075 mm.

Para o cálculo da porcentagem de solo em suspensão correspondente a cada leitura do densímetro foi utilizada a Equação 1.

$$Q_s = N \times \frac{\delta}{(\delta - \delta_d)} \times \frac{V \cdot \delta_c \cdot (L - L_d)}{\frac{M_h}{(100 + h)} \times 100} \quad \dots(1)$$

Onde:

Q_s = porcentagem de solo em suspensão;

N = porcentagem de material que passa na peneira de 2 mm;

δ = massa específica dos grãos do solo (g/cm^3);

δ_d = massa específica do dispersor (g/cm^3);

V = volume da suspensão (cm^3);

δ_c = massa específica da água (g/cm^3);

L = leitura do densímetro na suspensão;

L_d = leitura do densímetro no meio dispersor;

M_h = massa do material úmido submetido à sedimentação;

h = umidade higroscópica do material passado na peneira de 2 mm.

O diâmetro máximo das partículas em suspensão foi definido pela Equação 2.

$$d = \sqrt{\frac{1800 \cdot \mu}{\delta - \delta_d} \times \frac{a}{t}} \quad \dots(2)$$

Onde:

d = diâmetro máximo das partículas (mm);

μ = coeficiente de viscosidade do meio dispersor (g.s/cm²);

δ = massa específica dos grãos do solo (g/cm³);

δ_d = massa específica do dispersor (g/cm³);

a = altura de queda das partículas (cm);

t = tempo de sedimentação (s).

A porcentagem de material que passa em cada peneira do peneiramento fino foi obtido pela Equação 3.

$$Q_f = \frac{(M_h \times 100) - M_i \cdot (100 + h)}{M_h \times 100} \times N \quad \dots(3)$$

Onde:

Q_f = porcentagem do material passante em cada peneira;

M_h = massa do material úmido submetido ao peneiramento;

M_i = massa do material retido acumulado em cada peneira;

h = umidade higroscópica do material passado na peneira de 2 mm;

N = porcentagem de material que passa na peneira de 2 mm.

3.3.2.2. Massa Específica do Solo

A massa específica da amostra de solo foi determinada seguindo as especificações da NBR 6508 (ABNT, 1984) – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica. Foi ensaiada uma amostra de aproximadamente 250 g preparada conforme as recomendações da NBR 6457 (ABNT, 1986) e ilustrada na Figura 18.

Figura 18 – Execução do Ensaio de Massa Específica do Solo



Fonte: Elaboração própria

A massa específica dos grãos de solo foi determinada a partir da Equação 4.

$$\delta = \frac{M_1 \cdot 100 / (100 + h)}{[M_1 \cdot 100 / (100 + h)] + M_3 - M_2} \times \delta_T \quad \dots(4)$$

Onde:

δ = massa específica dos grãos do solo (g/cm^3);

M_1 = massa do solo úmido;

M_2 = massa do picnômetro + solo + água, na temperatura T de ensaio;

M_3 = massa do picnômetro cheio de água;

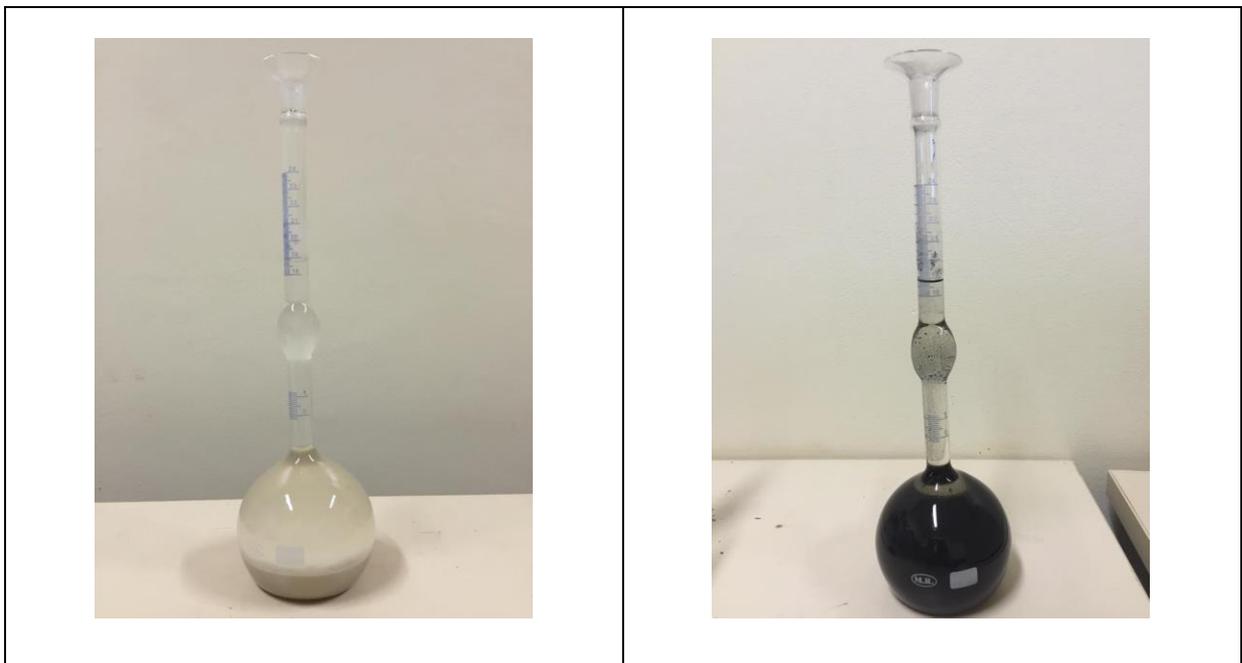
h = umidade inicial da amostra;

δ_T = massa específica da água na temperatura T de ensaio.

3.3.2.3. Massas Específicas da Cal e da Cinza da Casca de Arroz

As massas específicas das amostras de cal e da cinza da casca de arroz foram determinadas seguindo as especificações da NBR NM 23 (ABNT, 2001) – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. A Figura 19 apresenta as amostras de Cal e CCA, respectivamente, sendo ensaiadas.

Figura 19 – Execução dos Ensaios de Massas Específicas



Fonte: Elaboração própria

A massa específica do material foi determinada pela Equação 5.

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad \dots(5)$$

Onde:

ρ = massa específica do material (g/cm³);

V_1 = volume inicial (cm³);

V_2 = volume final (cm³).

3.3.2.4. Limite de Liquidez

O limite de liquidez da amostra de solo foi determinado segundo as especificações da NBR 6459 (ABNT,1984) – Solo – Determinação do limite de liquidez. A amostra utilizada no ensaio, foi correspondente à metade da amostra especificada pela NBR 6457 (ABNT, 1986), ou seja, aproximadamente 0,5 kg.

A umidade foi determinada conforme a NBR 6457 (ABNT, 1986).

O procedimento foi repetido até a obtenção de 3 pontos, compreendendo os intervalos de 35 a 15 golpes.

A Figura 20 apresenta a amostra antes de ser ensaiada e após o ensaio no equipamento de Casagrande.

Figura 20 – Execução do Ensaio de Limite de Liquidez



Fonte: Elaboração própria

Os resultados permitiram a construção do gráfico do limite de liquidez. O teor de umidade correspondente a 25 golpes é o limite de liquidez do solo.

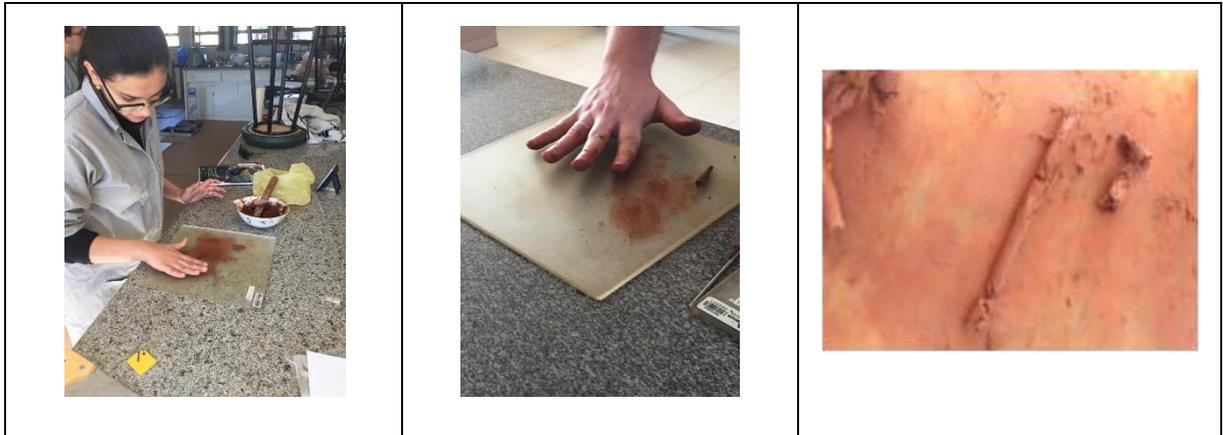
3.3.2.5. Limite de Plasticidade

O limite de plasticidade da amostra de solo foi determinado segundo as especificações da NBR 7180 (ABNT, 1984) – Solo – Determinação do limite de plasticidade. A amostra utilizada no ensaio, foi correspondente à metade da amostra especificada pela NBR 6457 (ABNT, 1986), ou seja, aproximadamente 0,5 kg.

A umidade foi obtida conforme a NBR 6457 (ABNT, 1986). A operação foi repetida até a obtenção de 3 teores de umidade e o teor de umidade adotado foi a média dos 3 valores.

As etapas do ensaio de Limite de Plasticidade estão apresentadas na Figura 21.

Figura 21 – Execução do Ensaio de Limite de Plasticidade



Fonte: Elaboração própria

O índice de plasticidade, que é a diferença entre os valores do limite de liquidez e limite de plasticidade, foi obtido a partir da Equação 6.

$$IP = LL - LP \quad \dots(6)$$

Onde:

IP = índice de plasticidade;

LL = limite de liquidez;

LP = limite de plasticidade.

3.3.2.6. Sistema Unificado de Classificação de Solos

A fim de realizar a classificação do solo, conforme o Sistema de Unificado de Classificação de Solos, foram utilizados os dados dos ensaios de classificação granulométrica. A classificação é regida pela norma ASTM D2487 (ASTM, 1985).

O primeiro quesito a ser observado é a porcentagem de finos passantes ou retidos na peneira de número 200. Se mais do que 50 % passar pela peneira, o solo será classificado em silte, argila ou orgânico. No caso contrário, o solo será classificado como areia ou pedregulho.

Foram seguidos os parâmetros apresentados no Quadro 2 do item 2.2.3.1.

Para o refinamento da seleção no quadro citado anteriormente, foi necessário a determinação do coeficiente de não uniformidade (CNU) e do coeficiente de curvatura (CC).

O CNU indica se o solo é bem graduado, mal graduado ou uniforme e pode ser calculado a partir da Equação 7. O CC detecta o melhor formato da curva granulométrica e pode ser obtido a partir da Equação 8.

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \dots(7)$$

$$CC = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad \dots(8)$$

Onde:

CNU = coeficiente de não uniformidade;

D_{60} = diâmetro abaixo do qual se situam 60% em peso das partículas;

D_{30} = porcentagem que passa igual a 30%.

D_{10} = porcentagem que passa igual a 10%.

3.3.2.7. Classificação Rodoviária

No Sistema de Classificação Rodoviária, normatizado pela AASHTO M145-42 (AASHTO, 1986) foram utilizados os dados dos ensaios de classificação granulométrica e os limites de liquidez e plasticidade.

O primeiro quesito a ser observado é se a porcentagem de finos passantes na peneira de número 200 é maior ou menor do que 50. Para solos de granulometria mais grossa, ainda foram consideradas as porcentagens passantes nas peneiras de 10, 40 e 200 e o índice de plasticidade. Para os demais casos consideram-se os limites de liquidez e índice de plasticidade.

Foram seguidos os parâmetros apresentados no Quadro 3 do item 2.2.3.2.

3.3.2.8. Ensaio de Compactação Mini-MCV

O ensaio de compactação em miniatura, Mini-MCV, segue os requisitos da norma do DNER ME 258/94 (DNER, 1994c) para solos passantes na peneira de 2 mm e realizado com corpos-de-prova de 50 mm de diâmetro.

Foram preparadas 5 porções com cerca de 500 g cada e adicionada a cada uma delas água em quantidade tal que se consiga obter porções que tenham umidades, sucessivamente, crescentes de cerca de 3 a 4%.

A começar pela amostra mais seca, foi pesada uma porção de 200 g e despejada no molde com o auxílio do funil. Para cada teor de umidade foi retirada uma amostra para a determinação do teor de umidade.

Foram realizados golpes sucessivos obedecendo à seguinte série: 2, 3, 4, 6, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 96, 128, 192 e 256 golpes e o processo foi interrompido quando: a diferença entre a leitura obtida após 4n golpes e a obtida após n golpes foi menor que 2 mm. A Figura 22 apresenta etapas da realização do ensaio.

Figura 22 – Execução do Ensaio de Mini-MCV



Fonte: Elaboração própria

O teor de umidade de cada porção foi determinado pela Equação 9.

$$h = \frac{(M_h - M_s) \times 100}{M_s} \quad \dots(9)$$

Onde:

h = teor de umidade da amostra;

M_h = massa de solo úmido;

M_s = massa de solo seco em estufa.

A massa específica aparente seca do solo compactado pode ser obtida a partir da Equação 10.

$$MEAS = \frac{100 \times M_h}{(100 + h) \times V} \quad \dots(10)$$

Onde:

MEAS = massa específica aparente seca do solo (g/cm^3);

M_h = massa de solo úmido da porção compactada;

h = teor de umidade da porção compactada;

V = volume do corpo-de-prova compactado, que é igual a área da seção interna do molde, geralmente $19,60 \text{ cm}^2$, multiplicada pela altura do corpo de prova.

As diferenças de altura determinadas pelas leituras do extensômetro foram calculadas pela Equação 11.

$$an = An - A4n \quad \dots(11)$$

Onde:

an = diferença de altura;

An = leitura obtida após n golpes;

$A4n$ = leitura obtida após $4n$ golpes.

A fim de demonstrar os resultados dos ensaios, foram traçadas a família de curvas de compactação e as curvas de Mini-MCV.

Nas curvas de compactação, as abscissas representam os valores de umidade de compactação e as ordenadas os valores de massa específica aparente seca.

Nas curvas de Mini-MCV, as abscissas representam o número de golpes em escala logarítmica e as ordenadas os valores de a_n calculados. A interseção dessas curvas com a linha horizontal correspondente a $a_n = 2$ mm, fornece o Mini-MCV.

3.3.2.9. Ensaio de Perda de Massa por Imersão

O ensaio de perda de massa por imersão, segue às prescrições da norma do DNER ME 256/94 (DNER, 1994b) realizado com corpos-de-prova de 50 mm de diâmetro.

Inicialmente, os corpos de prova, que já foram submetidos ao ensaio de compactação, serão deslocados no molde, com auxílio do extrator, de modo que seu topo fique 10 mm para fora do molde.

Os corpos-de-prova e seus suportes foram transferidos para o recipiente de imersão e posicionados horizontalmente, permanecendo imersos por 24 horas

As massas de solo contidas nas cápsulas foram determinadas após secagem em estufa.

Se a porção desprendida tivesse a forma de um único cilindro, a sua massa seca em estufa foi multiplicada pelo fator 0,5.

Na Figura 23 são apresentadas as etapas de realização do ensaio de Perda de Massa por Imersão.

Figura 23 – Execução do Ensaio de Perda de Massa por Imersão



Fonte: Elaboração própria

O cálculo da perda de massa por imersão foi obtido com a utilização da Equação 12.

$$P_i = \frac{10 \times M_d \times A}{M_s} \quad \dots(12)$$

Onde:

P_i = perda de massa por imersão (%);

M_d = massa de solo seco, desprendida do corpo de prova;

A = altura inicial do corpo-de-prova (mm);

M_s = massa seca em estufa do corpo-de-prova, calculada pela Equação 13.

$$M_s = \frac{100 \times M_u}{100 + H_c} \quad \dots(13)$$

3.3.2.10. Classificação MCT

Essa classificação é prescrita pela norma DNER CLA 259/96 (DNER, 1996) e se fundamenta nos ensaios descritos pelas normas DNER ME 256/94 (DNER, 1994b) e DNER ME 258/94 (DNER, 1994c).

Após a execução dos ensaios de mini-MCV e de perda de massa por imersão, foram obtidos os coeficientes “ P_i ”, “ c ” e “ d ”, a fim de calcular o índice “ e ” que classifica o solo segundo a sistemática MCT.

Os valores de “ c ” e “ e ”, foram localizados no gráfico da classificação MCT, apresentado na Figura 11, classificando a amostra de acordo com a área específica em que esse ponto se situa.

O coeficiente “ c ” é o coeficiente angular da parte mais inclinada e retilínea da curva Mini-MCV correspondente à condição Mini-MCV = 10 (ou ao teor de umidade que resulta em um Mini-MCV = 10).

O coeficiente “ d ” é o coeficiente angular da parte retilínea mais inclinada do ramo seca da curva de compactação, correspondente a 10 golpes, obtido na realização do ensaio de compactação Mini-MCV.

O coeficiente “ e ” foi calculado pela Equação 14.

$$e = \sqrt[3]{\left(\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d}\right)} \quad \dots(14)$$

Onde:

Pi = é o valor da perda de massa por imersão obtido de acordo com a norma DNER-ME 256/94.

Conforme supracitado, os valores de “c” e “e” foram localizados no gráfico da Figura 11 e classificados como:

NA = não laterítico – areias;

NA' = não laterítico – arenosos;

NS' = não laterítico – siltosos;

NG' = não laterítico – argilosos;

LA = laterítico – areias;

LA' = laterítico – arenosos;

LG' = laterítico – argilosos.

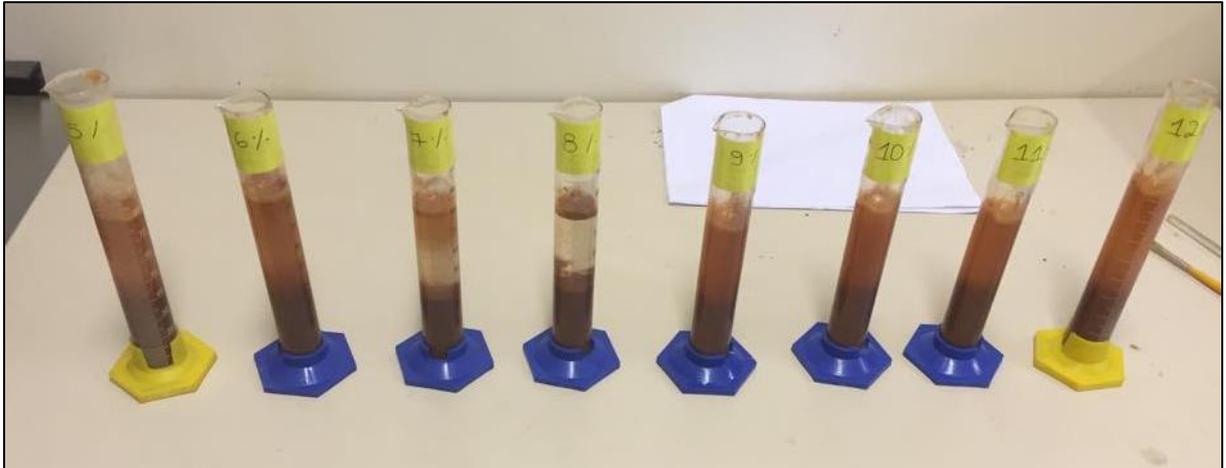
3.3.3. Ensaio Físico-químico

O método Físico-químico proposto por Casanova et. al. (1992) permite quantificar a quantidade necessária de cal para estabilizar o solo e para fazer a cinzas reagir quimicamente.

O ensaio mede a variação volumétrica das misturas. O teor de cal que produziu a máxima variação volumétrica, foi considerado como o mínimo requerido para a estabilização.

Para a determinação do mínimo teor de cal para estabilizar o solo, foram utilizadas 8 provetas de 100 ml e em cada uma delas foram adicionados teores crescentes de cal: 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, 10%, 11% e 12% sobre a massa de solo, conforme a Figura 24.

Figura 24 – Ensaio Físico-químico Solo + Cal



Fonte: Elaboração própria

Para a determinação do mínimo teor de cal para a máxima reatividade da cinza, foram utilizadas 7 provetas de 100 ml e em cada uma delas foram adicionados teores crescentes de cal: 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80% sobre massa da cinza.

Foram utilizadas massas de 25g para o solo natural e 10g para a cinza da casca de arroz.

Após a mistura dos materiais secos foi acrescentada água destilada, cada proveta foi agitada e deixada em repouso até o dia seguinte.

Após 24 horas, foi feita a leitura do volume da parte sólida dentro da proveta e a mistura foi agitada. A mistura foi deixada em repouso até o dia seguinte para a próxima leitura. O procedimento foi repetido todos os dias até que fossem obtidas leituras constantes ou decrescentes.

Foi calculada a variação volumétrica percentual para os diversos teores de cal, utilizando, para isto, a Equação 15.

$$\Delta V = \frac{V_{max} - V_{max(1^{\circ}dia)}}{V_{max(1^{\circ}dia)}} \quad \dots(15)$$

Onde:

ΔV = variação volumétrica (%);

V_{max} = volume máximo para cada teor de cal;

$V_{max(1^{\circ}dia)}$ = volume da leitura no 1º dia de cada mistura.

3.3.4. Ensaio de Compactação Mini-Proctor

O ensaio de compactação segue os requisitos da DNER ME 228/94 (DNER, 1994a) – Solos – compactação em equipamento miniatura, para solos passantes na peneira de 2 mm e realizado com corpos-de-prova de 50 mm de diâmetro.

O método de ensaio correlaciona o teor de umidade do solo e a sua massa específica aparente seca, gerando uma curva de compactação.

O procedimento de preparo da amostra no dia que antecede ao do ensaio deve ser realizado conforme previamente descrito no item 3.3.2.8 para o Ensaio de Compactação Mini-MCV.

A começar pela amostra preparada com o menor teor de umidade, foi pesada uma porção de 200 g e despejada no molde com o auxílio do funil. Foi efetuada a compactação com energia intermediária, com 6 golpes com o soquete do tipo pesado de cada lado do corpo de prova. Para cada corpo de prova foi determinada a umidade e a sua altura após a compactação. A execução do ensaio pode ser observada na Figura 25.

Figura 25 – Execução do Ensaio de Mini-Proctor



Fonte: Elaboração própria

O teor de umidade (w) e a massa específica aparente seca (MEAS) foram obtidas pelas Equações 9 e 10 descritas no item 3.2.2.8. Os resultados foram plotados

na curva de compactação, onde as ordenadas representam as massas específicas aparentes do solo seco e as abscissas os teores de umidade correspondente.

A massa específica aparente máxima do solo seco é o valor determinado pela ordenada máxima da curva de compactação e o teor de umidade ótima é o valor da abscissa correspondente.

3.3.5. Dosagem e Mistura

Foram realizadas dosagens com proporções de cal e cinza a serem baseadas nos resultados dos ensaios físico-químicos. Não obstante, foi realizada uma mistura de referência, utilizando somente cal e ainda está sendo testada uma mistura utilizando apenas cinzas.

No total, foram 4 dosagens: solo, solo+cal, solo+cal+CCA e solo+CCA.

Durante o preparo das dosagens, foram adicionados primeiramente materiais estabilizantes ao solo, cal e cinzas e, somente posteriormente, foi adicionada a água, dosada de acordo com a umidade ótima determinada pelos ensaios de compactação Mini-Proctor.

3.3.6. Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova

Os corpos-de-prova foram moldados em cilindros de dimensões 5 x 10 cm e moldados na umidade ótima e peso específico máximo para cada dosagem, determinados a partir do ensaio de compactação Mini-Proctor.

Foram moldados 4 corpos de prova para cada dosagem para cada tempo de cura, totalizando 48 corpos de prova.

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram embalados em plástico filme e em parafina e seguiram para cura em ambiente com temperatura controlada durante 7, 28 e 56 dias. Os corpos de prova após moldados estão apresentados na Figura 26.

Figura 26 – Corpos de prova moldados



Fonte: Elaboração própria

3.3.7. Ensaio de Compressão Simples

O ensaio obedeceu aos preceitos da NBR 12025 (ABNT, 2012) – Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio.

O carregamento foi aplicado com deformação controlada de aproximadamente 1 mm/min.

A tensão de ruptura à compressão foi obtida a partir da divisão da carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo de prova.

A partir dos dados do ensaio, foi possível a construção dos gráficos de Tensão versus Deformação e a determinação do Módulo de Elasticidade de cada dosagem.

O Módulo de Elasticidade de cada mistura foi determinado a partir do cálculo da inclinação da parte elástica da curva do gráfico de Tensão versus Deformação, conforme equação 16.

$$E = \frac{\sigma - \sigma_0}{\varepsilon - \varepsilon_0} \quad \dots(16)$$

Onde:

E = módulo de elasticidade (MPa);

σ = tensão final;

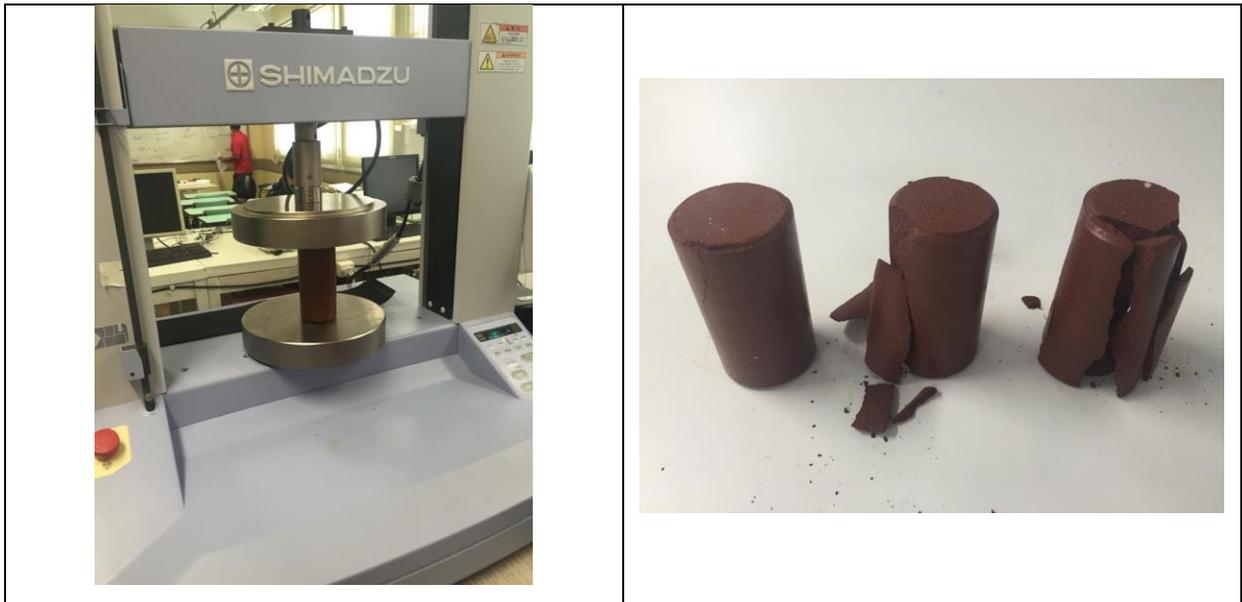
σ_0 = tensão inicial;

ε = deformação final;

ε_0 = deformação inicial.

Os corpos de prova durante e após rompimento podem ser observados na Figura 27.

Figura 27 – Execução do Ensaio de Compressão Simples



Fonte: Elaboração própria

4. RESULTADOS

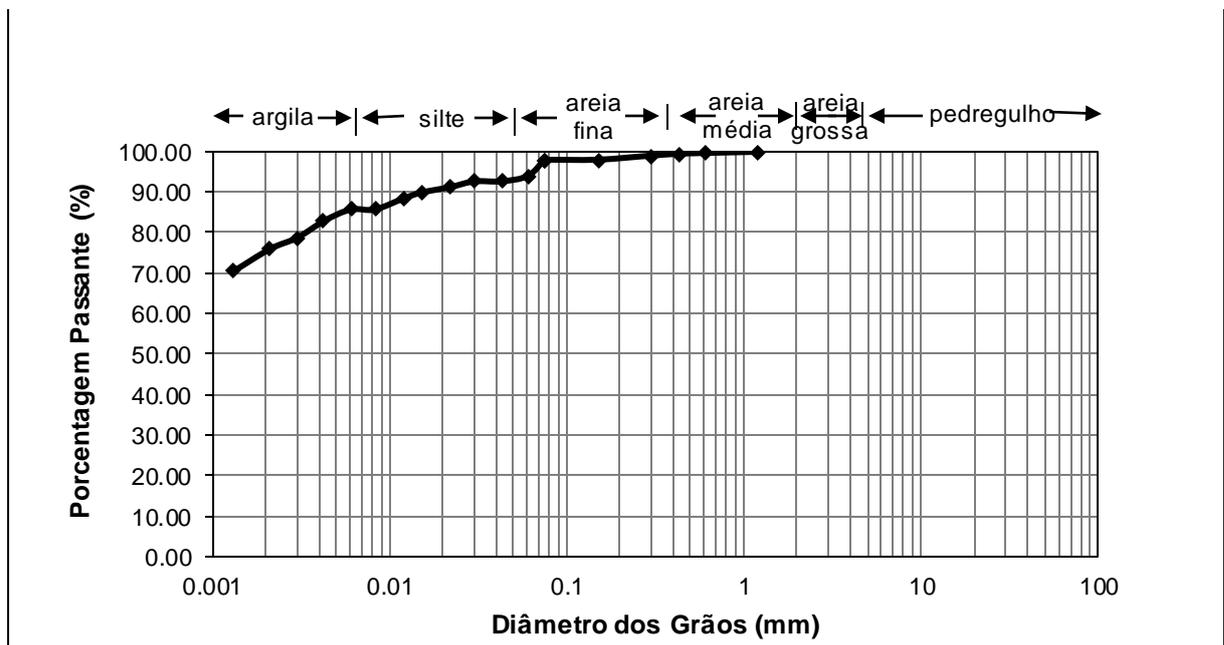
4.1. Caracterização dos Materiais

Os materiais utilizados neste estudo foram caracterizados a fim de verificar possíveis propriedades que pudessem afetar o desempenho das misturas utilizadas na estabilização do solo laterítico. Foram analisadas as granulometrias e massas específicas de todos os materiais e os limites de consistência do solo.

4.1.1. Granulometria

A curva granulométrica da amostra de solo é apresentada no Gráfico 1 e foi traçada a partir dos dados do procedimento prescrito em 3.3.2.1.

Gráfico 1 – Curva Granulométrica



Fonte: Elaboração própria

Percebe-se que se trata de um solo fino, com aproximadamente 98% passante na peneira #200. A porcentagem de argila no solo é de 82,9%, de silte 9,67%, de areia fina 6,76% e de areia média apenas 0,67%.

4.1.2. Massa Específica

As massas específicas do Solo, Cal e CCA, ensaiados conforme os procedimentos descritos nos itens 3.3.2.2 e 3.3.2.3, estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Massas Específicas dos Materiais

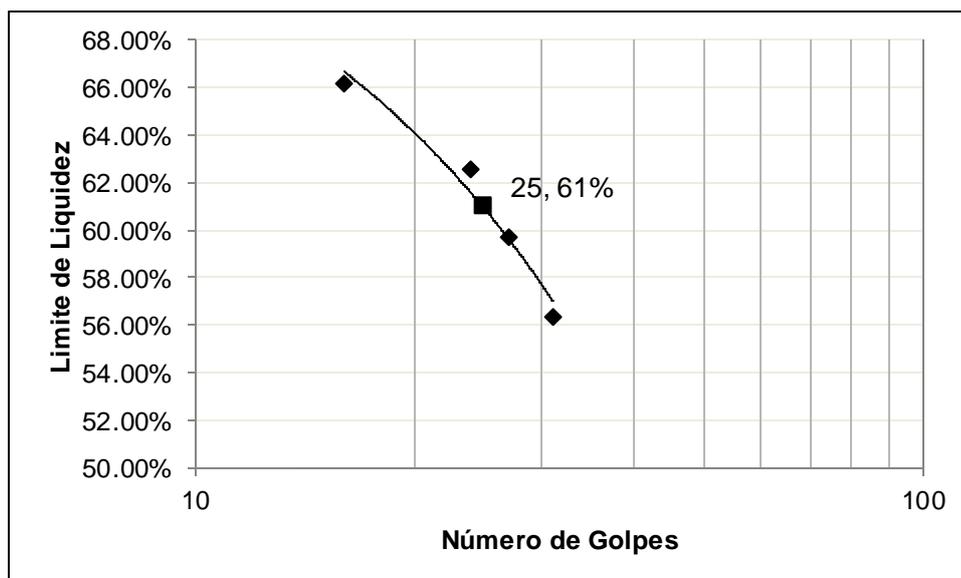
Solo	2,7 g/cm ³
Cal	2,34 g/cm ³
CCA	1,88 g/cm ³

Fonte: Elaboração própria

4.1.3. Limites de Consistência

O gráfico 2 apresenta o Limite de Liquidez do solo, correspondente aos 25 golpes, conforme procedimento descrito no item 3.3.2.4. O resultado do ensaio de Limite de Plasticidade, executado conforme o item 3.3.2.5 pode ser conferido na Tabela 2.

Gráfico 2 – Limite de Liquidez



Fonte: Elaboração própria

Os dados dos ensaios de Limite de Liquidez e de Plasticidades permitiram o cálculo do Índice de Plasticidade, tais resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Limites de Consistência

LL	60.97%
LP	42.09%
IP	18.88%

Fonte: Elaboração própria

O solo estudado possui média plasticidade ($6 < IP < 30$ e $30 < LL < 70$), percebe-se que o mesmo não é indicado para a utilização em bases de pavimentos (DNIT, 2006).

4.2. Classificações do Solo

O solo foi classificado segundo as três metodologias de classificação, a fim de possibilitar a comparação entre as mesmas, tal classificação pode ser analisada na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificações do Solo

Sistema Unificado de Classificação de Solos	MH
Sistema de Classificação Rodoviária	A 7-5
Sistema de Classificação MCT	LG´

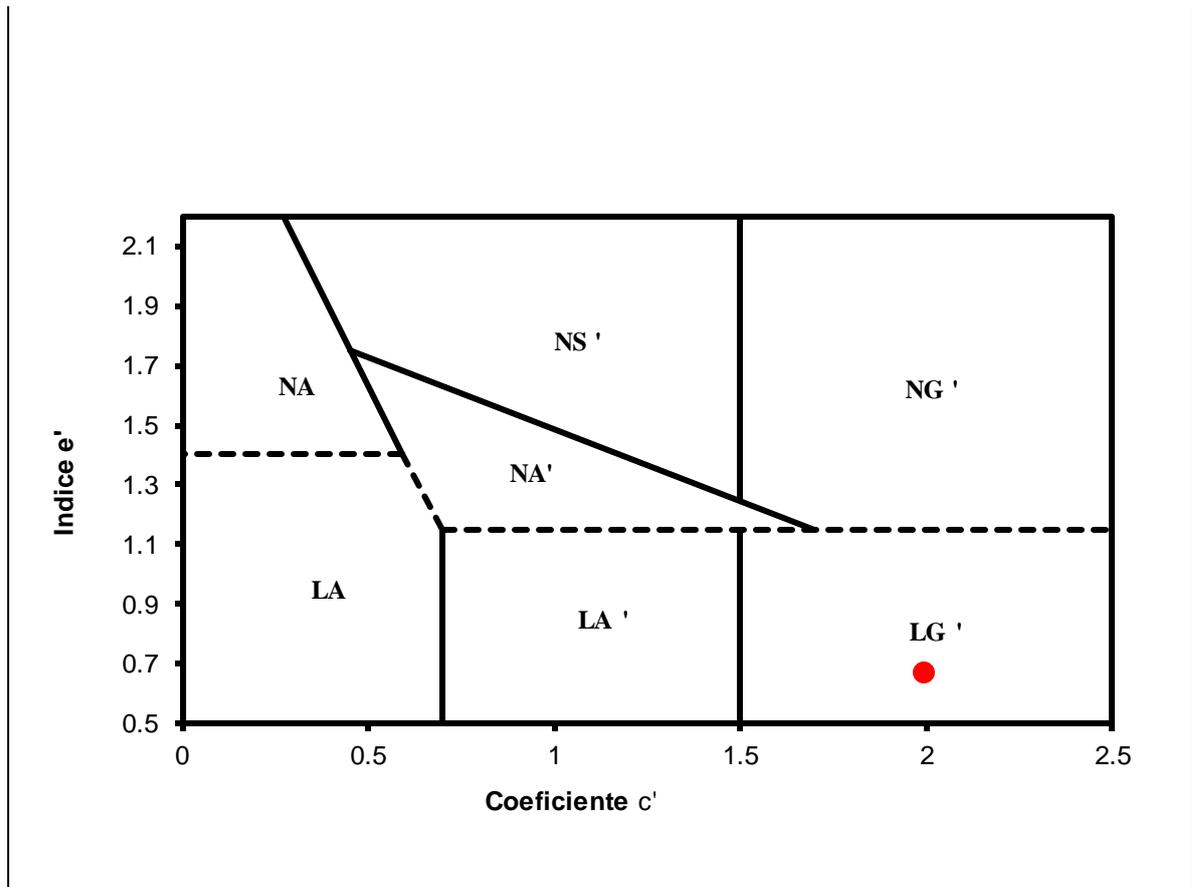
Fonte: Elaboração própria

Por se tratar de um solo fino, a classificação baseou-se nos Limites de Consistência e na granulometria, não sendo considerados os coeficientes CC e CNU.

Segundo o Sistema Unificado de Classificação, o solo é considerado uma Silte de Alta Compressibilidade (MH), correspondente ao grupo A 7-5 pela Classificação Rodoviária.

Plotando os resultados do Índice e' versus o Coeficiente c' , foi permitida a classificação do solo segundo a metodologia MCT. Conforme pode ser observado no Gráfico 3, o solo classificou-se como Laterítico Argiloso.

Gráfico 3 – Classificação MCT



Fonte: Elaboração própria

Pode-se constatar a limitação dos sistemas de classificação convencionais quando aplicados a classificação de solos finos tropicais. O solo argiloso, foi classificado como um silte pela Classificação Unificada, pois posicionou-se abaixo da linha A da Carta de Plasticidade (procedimento descrito em 3.3.2.6).

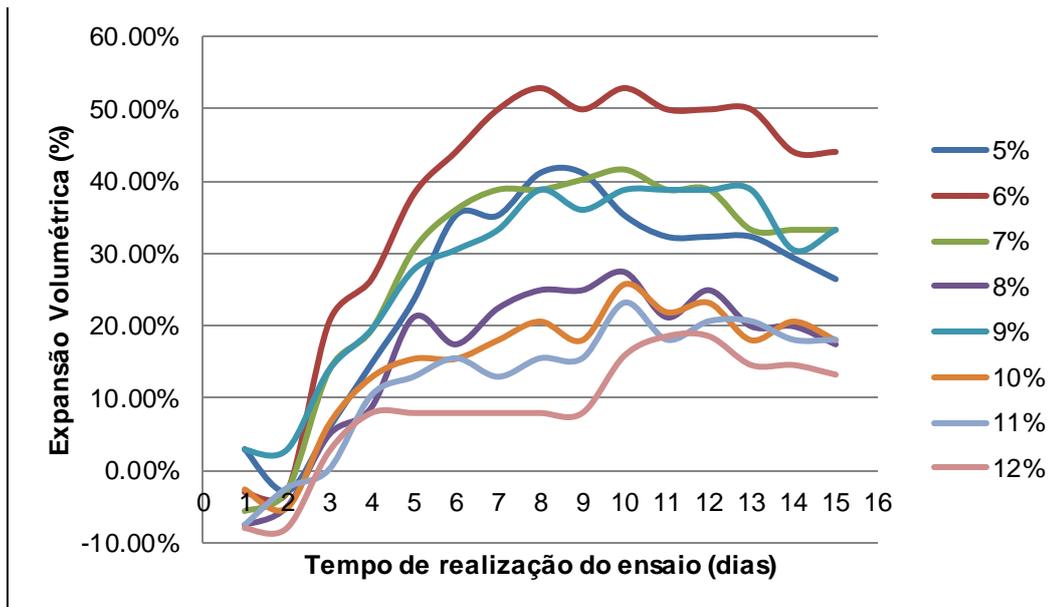
4.3. Definição dos Teores de Cal

Os teores de cal considerados ideais para a estabilização do solo e melhor reação com a cinza, foram obtidos a partir do ensaio Físico-químico descrito no item 3.3.3. Os gráficos do ensaio (Gráficos 4 e 5) podem ser conferidos a seguir.

Para o ensaio de Solo+Cal o teor de 6% de cal foi o que apresentou a maior variação volumétrica, enquanto para o ensaio de Cal+CCA o teor de 40% foi o que mais expandiu.

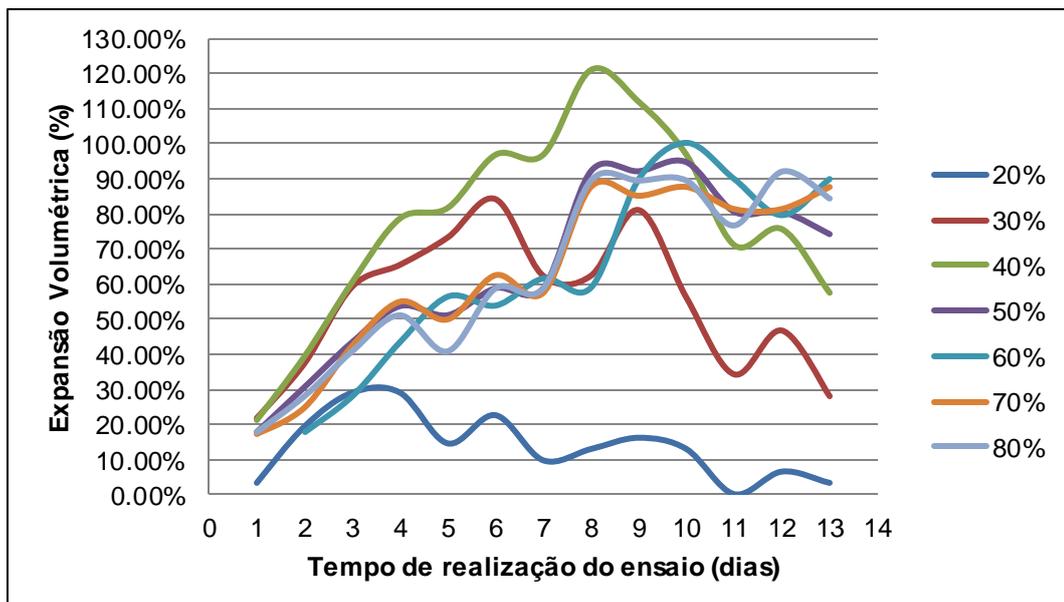
Sendo assim, definiu-se que seriam inseridos 6% de adições no solo e que para a dosagem de Solo+Cal+CCA, 40% das adições seriam de cal e o restante (60% de CCA). De forma análoga, na mistura de apenas Solo+CCA optou-se por utilizar um de 6% já que esta foi a dosagem recomendada de adição de cal. Tais proporções devidamente calculadas podem ser conferidas na Tabela 4.

Gráfico 4 – Ensaio Físico-químico Solo + Cal



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 5 – Ensaio Físico-químico CCA + Cal

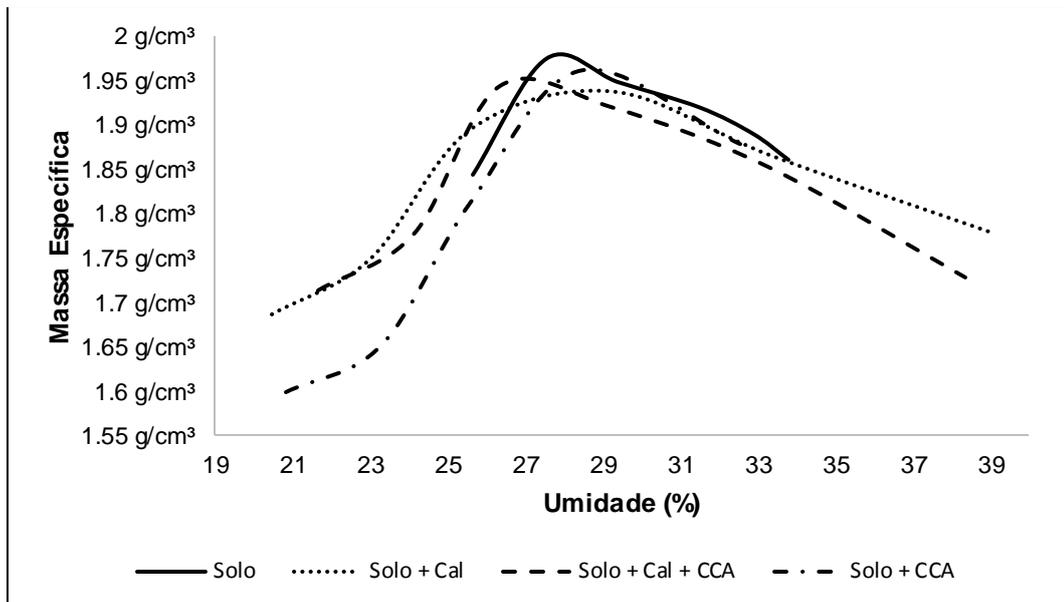


Fonte: Elaboração própria

4.4. Definição da Umidade Ótima e Massa Específica

O Gráfico 6, apresenta as curvas de compactação do Solo, Solo+Cal, Solo+Cal+CCA e Solo+CCA. O ponto máximo da curva é representado pelo valor da massa específica de moldagem nas ordenadas e a umidade ótima nas abscissas.

Gráfico 6 – Compactação – Mini-Proctor



Fonte: Elaboração própria

Percebe-se que a massa específica diminuiu e a umidade ótima aumentou com as adições, em consonância com os estudos anteriores expostos na bibliografia. O menor valor de massa específica e conseqüentemente, maior valor de umidade ótima, foi o da mistura de Solo+Cal. A massa específica aumentou, gradativamente, conforme foram aumentados os teores de CCA, porém esta ainda permaneceu abaixo da massa específica obtida para o solo (1,98 g/cm³).

A redução da massa específica pode ser explicada pela floculação inferida na estrutura a partir da adição da cal e da cinza, conseqüentemente, requerendo uma maior quantidade de água para a hidratação de tais materiais.

4.5. Dosagens

Na Tabela 3 são apresentados os dados compilados das misturas dosadas.

Tabela 4 – Dosagens executadas

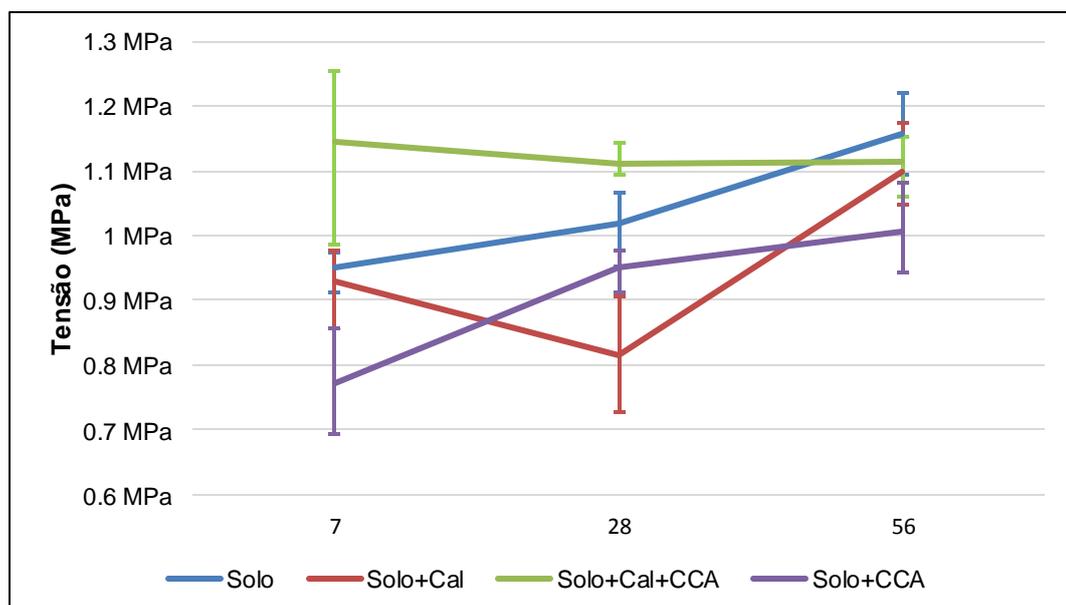
	Solo	Solo + Cal	Solo + Cal + CCA	Solo + CCA
Massa Específica	1,98 g/cm ³	1,94 g/cm ³	1,95 g/cm ³	1,96 g/cm ³
Umidade Ótima	28%	29%	27%	28,8%
Solo	100%	94%	94%	94%
Cal	-	6%	2,4%	-
CCA	-	-	3,6%	6%

Fonte: Elaboração própria

4.6. Resistência à Compressão Simples

A Resistência à Compressão Simples das misturas e do solo natural correspondentes a cada tempo de cura podem ser analisadas no Gráfico 7. Percebe-se que apenas o solo natural e o solo com adição de cinza da casca de arroz apresentaram retas crescentes durante todo decorrer do tempo de cura.

Gráfico 7 – Influência do Tempo de Cura na RCS



Fonte: Elaboração própria

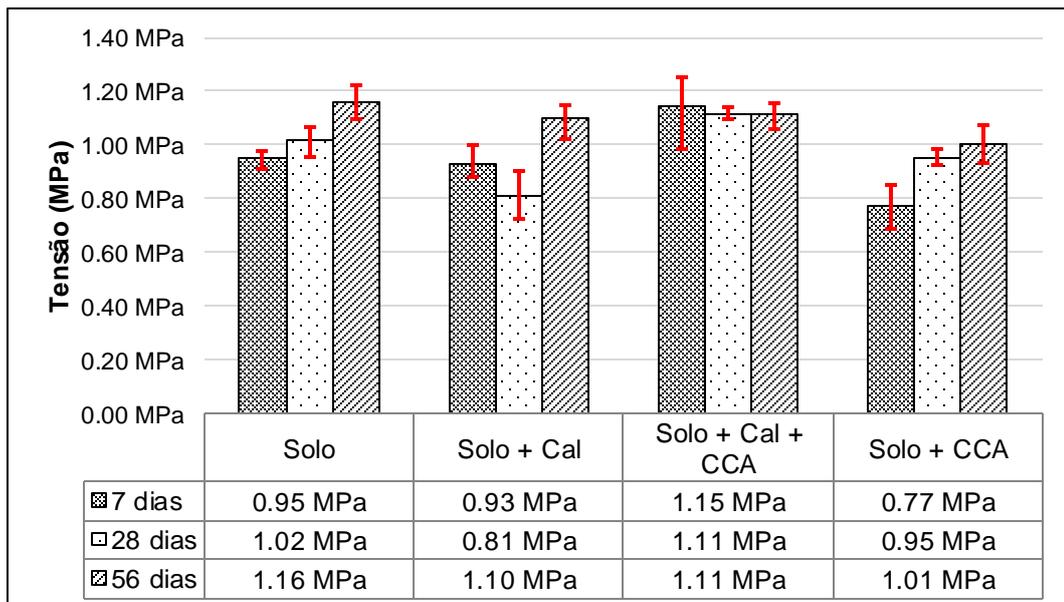
A mistura de Solo+CCA embora tenha apresentado o pior comportamento frente à resistência mecânica, foi a mistura que mais aumentou sua resistência no decorrer do tempo de cura (31%).

As misturas que continham cal dolomítica tiveram queda na resistência aos 28 dias. Aos 56 dias, a dosagem de Solo+Cal aumentou consideravelmente a sua resistência, se comparada com a resistência aos 28 dias, enquanto a mistura de Solo+Cal+CCA manteve-se constante.

Este comportamento de redução da resistência nas primeiras idades pode ser considerado comum em se tratando de adições de cal, pois as primeiras reações que ocorrem são responsáveis pela floculação das partículas. O ganho de resistência, é conferido pelas reações pozolânicas, as quais começam a ocorrer algumas semanas após a mistura e podem estender-se por anos em alguns casos, conforme supracitado em 2.4.1.

A partir da análise do Gráfico 8 é possível ter uma melhor ideia da dispersão dos valores de Resistência a Compressão Simples encontrados nas diferentes dosagens e tempos de cura. Pode-se inclusive constatar que embora a média dos valores de resistência do solo sejam superiores, algumas amostras de Solo+Cal e Solo+Cal+CCA estão na mesma faixa de resistência.

Gráfico 8 – Influência do Tempo de Cura na RCS



Fonte: Elaboração própria

Outro fator preponderante na queda de resistência das misturas com cal é a categoria de cal utilizada. Foi empregada nesta pesquisa Cal Dolomítica, variedade encontrada no estado do Rio Grande do Sul, pois gastos com transporte não condizem com a proposta do estudo. Não foram encontradas restrições quanto ao seu uso na bibliografia, porém encontrou-se evidências de redução da resistência em misturas de Latossolo Roxo e Cal Dolomítica nos estudos de Gutierrez, Krüger e Nobrega (1998) e Lovato (2004).

Não foi garantido o valor de 2,1 MPa em nenhuma das dosagens propostas, porém ressalta-se que este número provém das normativas utilizadas para solos estabilizados com cimento, não existindo especificação de resistência mínima para bases tampouco sub-bases de solo estabilizado com cal. As únicas exigências da especificação técnica ET-DE-P00/005 (DER-SP, 2006) são quanto ao teor mínimo de cal utilizado, que deve ser de 3%, e o tipo de solo a ser estabilizado. Ambos critérios foram obedecidos conforme apresentado na Tabela 4.

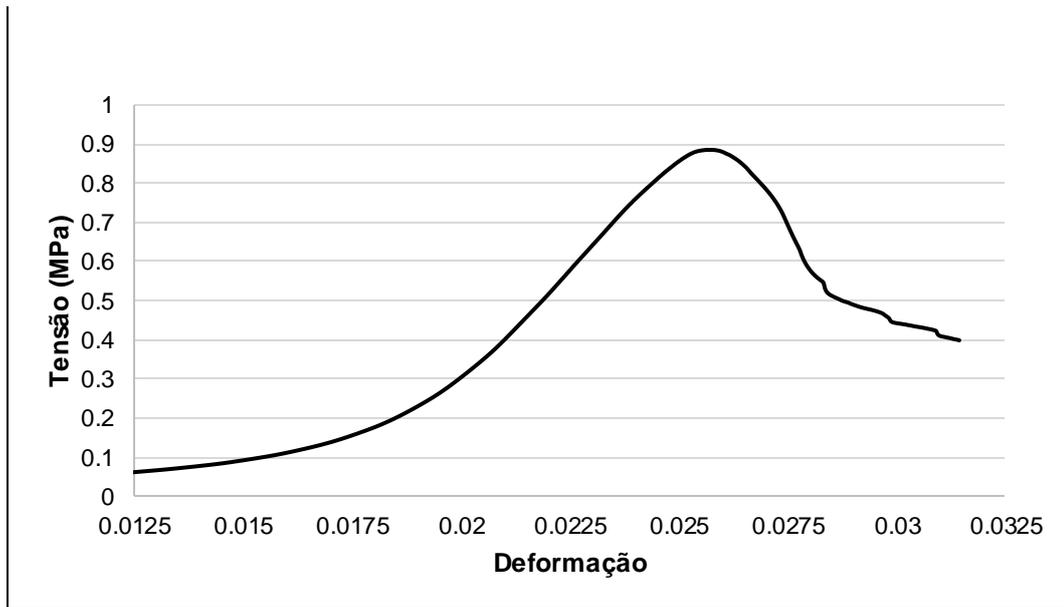
Ao analisar a especificação de serviço do DER-PR ES-P 11/05 (DER-PR, 2005), para solos tratados com cimento, admite-se uma resistência de 1,2 MPa aos 7 dias. Observa-se que devido a dispersão dos resultados, tanto o solo natural como a mistura de Solo+Cal+CCA atende a este requisito.

4.7. Rigidez das Misturas

Para cada um dos corpos de prova rompidos, traçou-se um gráfico de Tensão versus Deformação, conforme modelo apresentado no Gráfico 9. A partir da inclinação da reta de cada gráfico, foi obtido o Módulo de Elasticidade de cada mistura.

As misturas que continham cal, aumentaram consideravelmente seu módulo de elasticidade, sendo observado um aumento de 269% para a mistura de Solo+Cal e 209% para Solo+Cal+CCA em comparação com o módulo de elasticidade do solo natural.

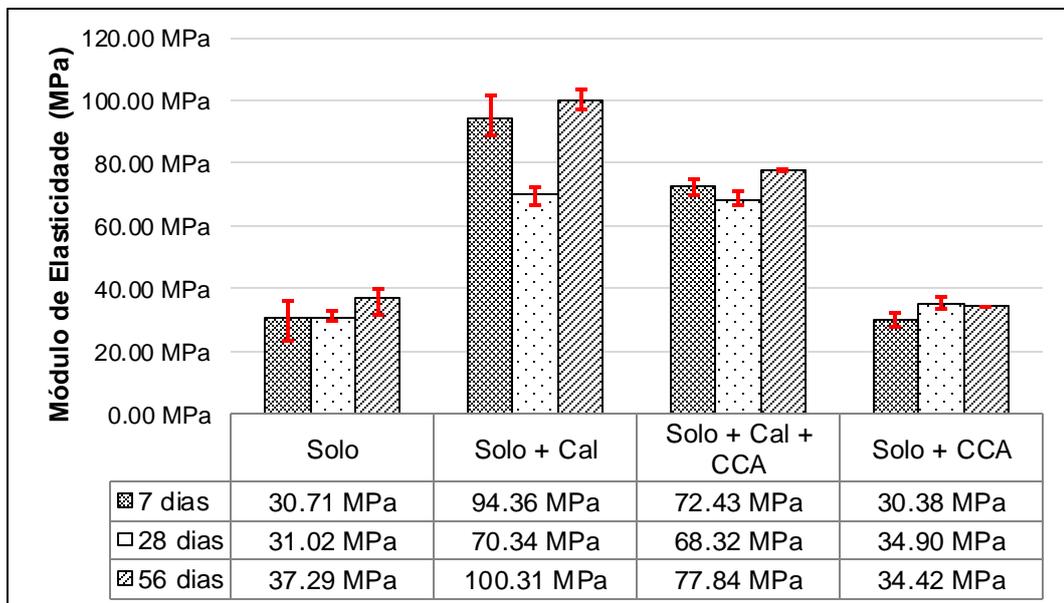
Gráfico 9 – Tensão x Deformação Solo+Cal 7 dias



Fonte: Elaboração própria

Os Módulos de Elasticidade de todas as dosagens podem ser analisados no Gráfico 10.

Gráfico 10 – Módulos de Elasticidade das Dosagens



Fonte: Elaboração própria

Para todos os tempos de cura, as adições de cal e cal combinada com cinza da casca de arroz elevaram consideravelmente o módulo de elasticidade do solo

natural. Fato este que configura-se como o maior ganho deste estudo, pois a partir do aumento de rigidez evidenciado, pode-se supor que as deformações na camada final de revestimento serão reduzidas, contribuindo para a melhoria do desempenho da estrutura do pavimento como um todo.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1. Conclusões

O Latossolo Roxo, proveniente do noroeste do RS foi caracterizado e apresentou comportamento laterítico. O referido solo classificou-se como Argiloso Laterítico (LG´) pelo sistema de classificação MCT, como um Silte de Alta Compressibilidade (MH) pelo Sistema de Classificação Unificado e como A-7-5 pelo Sistema Rodoviário de Classificação.

O solo apresentou granulometria fina, com cerca de 98% passante na peneira #200 e massa específica de 2,7 g/cm³.

As porcentagens mínima de adições necessária para a estabilização do solo foi de 6%, sendo que a relação ideal de cal e CCA foi de 40% cal e 60% cinza. Salienta-se que tais teores, determinados a partir da metodologia proposta por Casanova, indicam o teor mínimo e mais econômico, podendo serem utilizadas maiores quantidades.

Não houve ganho significativo de resistência mecânica a partir da inclusão de cal e cinza da casca de arroz no solo, pelo contrário, as misturas que continham cal dolomítica tiveram queda na resistência aos 28 dias, voltando a crescer aos 56 dias. É necessária uma melhor análise química dos compostos gerados com a adição de cal dolomítica, porém há indícios de que tal categoria (Dolomítica CH-II) não seja adequada para a estabilização de solos argilosos lateríticos.

Ao longo do tempo de cura, as misturas que continham a cal dolomítica diminuíram a sua resistência aos 28 dias, enquanto a dosagem referência (apenas solo) e Solo+CCA aumentaram continuamente em todas as idades. Aos 56 dias todas as misturas apresentaram tendência de crescimento. Acredita-se que a resistência continuará a crescer ao longo do tempo, para esta comprovação, idades mais avançadas devem ser estudadas.

Embora o valor de 2,1 MPa não tenha sido atingido em nenhuma das dosagens propostas em nenhuma das idades analisadas, constatou-se que as adições de cal e cal com cinza da casca de arroz elevaram de forma significativa o módulo de elasticidade do solo natural, diminuindo assim deformações geradas na camada final de revestimento.

A adição de somente cinza da casca de arroz não se mostrou eficiente no acréscimo de resistência e também não alterou a rigidez dos corpos de prova,

concluindo-se assim que apenas a adição de cinza não é adequada para a estabilização do solo em estudo.

Acredita-se na viabilidade da utilização de cal e cal+CCA em camadas de pavimentos, ainda que a cal dolomítica, pois as misturas apresentaram ganho de desempenho frente à dosagem referência. Possivelmente, a substituição da cal dolomítica por cal cálcica apresentaria melhores resultados, porém é necessário analisar a viabilidade econômica de tal substituição, visto que esta variedade não é produzida no estado do Rio Grande do Sul.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Utilizar dosagens teores maiores de adições com este mesmo solo, a fim de verificar o ganho de resistência;
- Analisar as mesmas dosagens com um tempo prolongado de cura;
- Analisar os compostos gerados a partir da utilização da cal Dolomítica no solo laterítico argiloso;
- Substituir a cal Dolomítica por cal Cálcica para as mesmas dosagens;
- Testar outros tipos de cinza, como por exemplo a cinza volante;
- Utilizar cinza da casca de arroz com diferentes finuras;
- Realizar combinações binárias de cinza volante e cinza da casca de arroz.

REFERÊNCIAS

ALI, F. H; A ADNAN.; CHOY, C. K. Geotechnical Properties of a Chemically Stabilized Soil from Malaysia Witch Rice Husk Ash as an Additive. **Geotechnical and Geological Engineering**, Amsterdam, v. 10, n. 2, p.117-134, 1992.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **M145-42**: Specifications for Highway Materials. Washington, D. C.: AASHTO, 1986.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 2487**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). Philadelphia: ASTM, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: AMOSTRAS DE SOLO – PREPARAÇÃO PARA ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO E ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 9 p.

_____. **NBR 6459**: SOLO – DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 6 p.

_____. **NBR 6508**: GRÃOS DE SOLO QUE PASSAM NA PENEIRA DE 4,8 mm – DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 8 p.

_____. **NBR 6508**: GRÃOS DE SOLO QUE PASSAM NA PENEIRA DE 4,8 mm – DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 8 p.

_____. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 4 p.

_____. **NBR 7180**: SOLO – DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE PLASTICIDADE. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 3 p.

_____. **NBR 7181**: SOLO – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 13 p.

_____. **NBR 9604**: ABERTURA DE POÇO E TRINCHEIRA DE INSPEÇÃO EM SOLO, COM RETIRADA DE AMOSTRAS DEFORMADAS E INDEFORMADAS. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 9 p.

_____. **NBR 12025**: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 2 p.
ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. São Paulo: AMN, 2000. 5 p.

BASHA, E. A.; HASHIM, R.; MUNTOHAR, A. S. Effect of the Cement - Rice Husk Ash on the Plasticity and Compaction of Soil. **Electronic Journal of Geotechnical**

Engineering. 11p. 2003. Disponível em:

<<http://www.ejge.com/2003/Ppr0304/Abs0304.htm>>. Acesso em: 31 maio 2015.

BEHAK, L. **ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO SEDIMENTAR ARENOSO ARENOSO DO URUGUAI COM CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL.** 2007. 150 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica:** Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2008. 504 p.

BOATENG, A. A.; SKEETE, D. A. Incineration of Rice Hull for Uses as a Cementitious Material. The Guyana Experience. **Cement and Concrete Research.** USA, p. 795-802. 1990.

CAMARA, L. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS E SUAS APLICAÇÕES NA ENGENHARIA GEOTÉCNICA:** Aplicação de Cinzas de Carvão como Condicionadores de Solo. 2011. 16 f. Relatórios Anuais (PIBIC PUC-Rio) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2011.

CARRARO, J. A. H. **Utilização de Resíduos Industriais Na Estabilização de Um Solo Residual de Arenito.** 1997. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

CERATTI, J. A. P. **Efeitos da adição de cal e cinza volante nas propriedades de um solo residual compactado.** 1979. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1979.

CASANOVA, F. J.; CERATTI, J. A.; RODRIGUES, M. G. M. Procedimento para dosagem físico-química do solo-cimento. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 26., 1992, Aracajú. **Anais...** . Aracajú: Abpv, 1992. p. 82 - 86.

CONSOLI, N. C. et al. BEHAVIOR OF COMPACTED SOIL-FLY ASH-CARBIDE LIME MIXTURES. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.** New York, p. 774-782. set. 2001.

COUTINHO, A de Sousa. **Fabrico e Propriedades do Betão.** Lisboa: Lnec, 1973. 610 p.

CRISTELO, N. **ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS RESIDUAIS GRANÍTICOS ATRAVÉS DA ADIÇÃO DE CAL.** 2001. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Estruturas, Geotecnia e Fundações, Universidade do Minho, Guimarães, 2001.

CRUZ, M. L.; JALALI, S. MELHORAMENTO DO DESEMPENHO DE MISTURAS DE SOLO-CIMENTO COM RECURSO A ACTIVADORES DE BAIXO CUSTO. **Revista Luso-brasileira de Geotecnia,** p.49-64, nov. 2010.

DNPEA – Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária (Rio de Janeiro). Ministério da Agricultura. **Levantamento de Reconhecimento de Solos do Rio Grande do Sul**. Recife: DNPEA, 1973. 431 p.

DAS, B. M. **Principles of Geotechnical Engineering**. 5. ed. Toronto: Thomson, 2006. 589 p.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Thomson, 2007. 559 p. Tradução da 6ª edição norte-americana.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **ES-P 11/05: PAVIMENTAÇÃO: SOLO-CIMENTO E SOLO TRATADO COM CIMENTO**. Curitiba: DER-PR, 2005. 19 p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **ET-DE-P00/005: SUB-BASE OU BASE DE SOLO-CAL**. São Paulo: DER-SP, 2006. 20 p.

_____. **ET-DE-P00/015: SUB-BASE OU BASE DE SOLO ARENOSO FINO DE COMPORTAMENTO LATERÍTICO** – SAFL. São Paulo: DER-SP, 2005. 19 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 228/94: Solos – compactação em equipamento miniatura**. Rio de Janeiro: DNER, 1994a. 14 p.

_____. **ME 254/97: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-CBR e Expansão**. Rio de Janeiro: DNER, 1997. 14 p.

_____. **ME 256/94: Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão**. Rio de Janeiro: DNER, 1994b. 6 p.

_____. **ME 258/94: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV**. Rio de Janeiro: DNER, 1994c. 14 p.

_____. **CLA 259/96: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura**. Rio de Janeiro: DNER, 1996. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. 274p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **143/2010 – ES: Pavimentação – Base de solo-cimento – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: DNIT, 2010. 10 p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Rio de Janeiro). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA-SPI, 2006. 306 p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Rio de Janeiro). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Solo brasileiro agora tem mapeamento digital**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2062813/solo-brasileiro-agora-tem-mapeamento-digital>>. Acesso em: 21 jun. 2015.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro: EPE, 2014. 54 p. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Síntese do Relatório Final_2014_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Síntese%20do%20Relatório%20Final_2014_Web.pdf)>. Acesso em: 28 jun. 2015.

FERNANDES, W. D. **VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E ESTABILIDADE DE TALUDES DE UM SOLO NATURAL E MELHORADO COM CIMENTO, CAL E CINZA DA CASCA DE ARROZ**. 2014. 117 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2014.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. United Nations (Org.). **FAO/UNESCO Soil Map of the World**. Disponível em: <<http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/faounesco-soil-map-of-the-world/en/>>. Acesso em: 21 jun. 2015.

GUIDA, H. N. **ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO LATERÍTICO FINO PELO ÁCIDO FOSFÓRICO**. 1971. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1971.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2002. 341 p.

GUTIERREZ, N. H. M; KRÜGER, C. A.; NÓBREGA, M. T. de. Efeitos da Adição de Cal e Cimento nas Propriedades Físicas e Mecânicas de um Solo Argiloso Laterítico. In: XI COBRAMSEG, 1998, Brasília. **Anais...** Brasília: ABMS, 1998.

GOETHE, C. A. V. Sistemas de Controle e Disposição Final das Cinzas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda - SC e da Usina Termelétrica do Jacuí - RS. In: II SEMINÁRIO DE ESTUDOS DA APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS DA COMBUSTÃO DO CARVÃO MINERAL, 1989, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Eletrosul, 1990.

IRGA - INSTITUTO RIOGRANDENSE DO ARROZ. Secretaria da Agricultura e Abastecimento. **Série Histórica de Produção e Produtividade - RS x BR**. Porto Alegre: Instituto Riograndense do Arroz, 2014. 2 p. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/upload/20150303144437producao_rs_e_brasil.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2015.

JULIANO, B. O. **Rice: Chemistry and Technology**. St Paul, Minneapolis: American Association of Cereal Chemists, 1985. 774 p.

KANIRAJ, S. R.; HAVANAGI, V. Fly ash and fly ash-soil mixture for embankment construction. In: ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 1996, Osaka. **Proceedings...** Rotherdam: A. A. Balkema, 1996. v. 2, p. 757 - 762.

KEZDI, Á. **STABILIZED EARTH ROADS: DEVELOPMENTS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING**. New York: Elsevier, 1979. 327 p.

KLAMT, R. A. **UTILIZAÇÃO DA CAL E DA CINZA DA CASCA DE ARROZ NO MELHORAMENTO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE SOLOS**. 2012. 105 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2012.

KORISA, J. **Rice and Its By-products**. 2. ed. London: Edward Arnold, 1958. 426 p.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1969. 553 p.

LITTLE, D. N. **EVALUATION OF STRUCTURAL PROPERTIES OF LIME STABILIZED SOILS AND AGGREGATES: VOLUME 1: SUMMARY OF FINDINGS**. National Lime Association, 1999. 89 p.

LOVATO, R. S. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO LATERÍTICO ESTABILIZADO COM CAL, APLICADO À PAVIMENTAÇÃO**. 2004. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

MALLMANN, J. E. C. **ESTABILIZAÇÃO POZOLÂNICA DE CINZAS VOLANTE E PESADA COM CAL DOLOMÍTICA HIDRATADA E AREIA, CURADAS PELOS PROCESSOS DE AUTOCLAVAGEM E CÂMARA À TEMPERATURA CONSTANTE**. 1996. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

MATEOS, Manuel. **Physical and mineralogical factors in stabilization of Iowa soils with lime and fly ash**. 1961. 247 f. Dissertation (PhD) – Major of Civil Engineering, Iowa State University of Science And Technology, Ann Arbor, Michigan, 1961.

METHA, P. K. Rice Hull Ash Cement. High-Quality, Acid Resisting. **ACI Journal**. USA, p. 235-236. 1975.

MEDINA, J.; GUIDA, H. N. Stabilization of lateritic soils with phosphoric acid. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 13, p.199-216, 1995.

MELFI, A. J.; PEDRO, G. Estudo geoquímico dos solos e formações superficiais do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 7, p.271-286, 1977.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **FUNDAMENTALS OF SOIL BEHAVIOR**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2005. 577 p.

MUNTOHAR, A. S.; HANTORO, G. Influence of Rice Husk Ash and Lime on Engineering Properties of a Clayey Subgrade. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**. 12p. 2000. Disponível em: <www.ejge.com/2000/Ppr0019/Abs0019.htm>. Acesso em: 30 maio 2015.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Use of lateritic fine-grained soils in road pavement base courses. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 9, n. 3 - 4, p.167-182, 18 jun. 1991.

NOGAMI, Job Shuji; VILLIBOR, Douglas Fadul. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995. 240 p.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **PAVIMENTOS ECONÔMICOS**: Tecnologia do uso dos Solos Finos Lateríticos. São Paulo: Arte & Ciência, 2009. 291 p.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização Físico-química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação**. 1991. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Terratek, 2007. 385 p.

PEIXOTO, R. A. F.; NUNES, F. P.; AFFONSO, H. M. M. Estudo da influência do teor de cimento na resistência mecânica de misturas em solo-cimento aditivado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30. 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Conbea, 2001.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 354 p.

POZZOBON, C. E. **APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS PARA A CINZA DO CARVÃO MINERAL PRODUZIDA NO COMPLEXO TERMELÉTRICO JORGE LACERDA**. 1999. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

RAHMAN, M. A. The Potential of Some Stabilizers for the Use of Lateritic Soil in Construction. **Building and Environment Journal**, England, v. 21, n. 1, p.57-61, 1986.

RAHMAN, M. A. EFFECTS OF CEMENT-RICE HUSK ASH MIXTURES ON GEOTECHNICAL PROPERTIES OF LATERITIC SOILS. **Soils And Foundations: Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering**, v. 27, n. 2, p.61-65, jun. 1987.

ROHDE, G. M. et al. **Cinzas de Carvão Fóssil no Brasil: Aspectos Técnicos e Ambientais**. Porto Alegre: Cientec, 2006.

ROSA, A. D. **Estudos dos Parâmetros-Chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal**. 2009. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SANTOS, J. **ESTABILIZAÇÃO DE UMA ARGILA LATERÍTICA DO DISTRITO FEDERAL PARA USO EM RODOVIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO**. 2004.

95 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

SOLIZ, V. V. P. **ESTUDO DE TRÊS SOLOS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO ASFÁLTICA**. 2007. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SUAREZ, D. A. A. **Estudo do comportamento mecânico de dois solos lateríticos do Estado de São Paulo com adição de emulsão asfáltica**. 2008. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

TEIXEIRA, C. C. R. **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE LIGANTES À BASE DE SÓDIO E CINZAS VOLANTES NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS – COMPARAÇÃO COM SOLUÇÕES TRADICIONAIS**. 2010. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2010.

VILLIBOR, D. F. **Pavimentos econômicos: novas considerações**. 1981. 234 f. Tese (Doutorado) - Curso de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.

VILLIBOR, D. F. et al. **Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas**. 2. ed. São Paulo: Arte & Ciência, 2009. 196 p.

ZHANG, Zhongjie; TAO, Mingjiang. Durability of Cement Stabilized Low Plasticity Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. p. 203-213. fev. 2008.