



LUCAS URGEL

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE SOLOS ESTABILIZADOS COM
CIMENTO E CAL PARA A APLICAÇÃO EM OBRAS RODOVIÁRIAS**

LAVRAS / MG

2023

LUCAS URGEL

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE SOLOS ESTABILIZADOS COM
CIMENTO E CAL PARA A APLICAÇÃO EM OBRAS RODOVIÁRIAS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Paulo Roberto Borges
Orientador

LAVRAS / MG

2023

LUCAS URGEL

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE SOLOS ESTABILIZADOS COM
CIMENTO E CAL PARA A APLICAÇÃO EM OBRAS RODOVIÁRIAS
EVALUATION OF THE BEHAVIOR OF SOILS STABILIZED WITH CEMENT
AND LIME FOR APPLICATION IN ROAD WORKS**

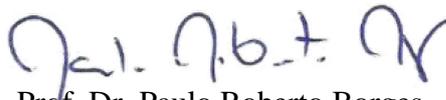
Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 18 de dezembro de 2023

Dr. Paulo Roberto Borges UFLA

Dra. Andréa Aparecida Ribeiro Corrêa UFLA

Dr. Saulo Rocha Ferreira UFLA



Prof. Dr. Paulo Roberto Borges
Orientador

LAVRAS / MG

2023

RESUMO

O presente trabalho aborda a temática da estabilização de solos em estradas, com foco na análise de resultados obtidos a partir da aplicação de cimento e cal. A pesquisa fundamenta-se em uma revisão de literatura detalhada, explorando as interações complexas entre esses aditivos e os solos, visando otimizar a estabilidade em vias rodoviárias. Ao longo do estudo, examinam-se os efeitos desses agentes estabilizadores nas propriedades geotécnicas do solo, destacando-se o aumento da resistência, controle da plasticidade, redução da expansão e permeabilidade. A análise crítica dos resultados obtidos revela a eficácia dessas práticas na melhoria das características dos solos, proporcionando benefícios significativos para a durabilidade e desempenho das estradas. Contudo, a pesquisa enfatiza a necessidade de uma abordagem personalizada, considerando a variabilidade dos solos e adaptando as dosagens de cimento e cal conforme as condições locais. A precisão nesse ajuste é essencial para garantir resultados consistentes e maximizar a eficiência da estabilização em projetos viários. Este estudo contribui não apenas para a compreensão teórica da estabilização de solos com cimento e cal, mas também oferece insights práticos para profissionais da engenharia civil e gestores de infraestrutura. A busca por estratégias sustentáveis e eficazes na estabilização de estradas é essencial para o desenvolvimento de infraestruturas duradouras e economicamente viáveis, promovendo avanços significativos no campo da engenharia civil rodoviária.

Palavras-chave: Estabilização de solos; Cimento; Cal; Estradas; Sustentabilidade; Engenharia civil rodoviária; Propriedades Geotécnicas

ABSTRACT

This work addresses the topic of soil stabilization on roads, focusing on the analysis of results obtained from the application of cement and lime. The research is based on a detailed literature review, exploring the complex interactions between these additives and soils, aiming to optimize stability on roadways. Throughout the study, the effects of these stabilizing agents on the geotechnical properties of the soil are examined, highlighting the increase in resistance, control of plasticity, reduction of expansion and permeability. The critical analysis of the results obtained reveals the effectiveness of these practices in improving soil characteristics, providing significant benefits for the durability and performance of roads. However, the research emphasizes the need for a personalized approach, considering soil variability and adapting cement and lime dosages according to local conditions. Accuracy in this adjustment is essential to ensure consistent results and maximize stabilization efficiency in road projects. This study contributes not only to the theoretical understanding of soil stabilization with cement and lime, but also offers practical insights for civil engineering professionals and infrastructure managers. The search for sustainable and effective strategies for stabilizing roads is essential for the development of durable and economically viable infrastructure, promoting significant advances in the field of civil road engineering.

Keywords: Soil stabilization; Cement; Lime; Roads; Sustainability; Civil Road Engineering; Geotechnical Properties

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Terminologia do Sistema Unificado	15
Figura 2. Esquema de classificação pelo Sistema Unificado	16
Figura 3. Classificação dos Solos pelo Sistema Rodoviário	17
Figura 4. Estrutura-tipo de um pavimento flexível.....	19
Figura 5. Estrutura de um pavimento rígido.....	19
Figura 6. Corte longitudinal de um pavimento de concreto cimento	20
Figura 7. Pavimento semirrígido com uma sub-base de solo-cimento	20
Figura 8. Camadas do Pavimento	21
Figura 9. Etapas da estabilização de solos com cal	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Faixa de diâmetro dos grãos do solo.....	17
Tabela 2. Propriedades do solo-cimento para compor uma base rodoviária.....	23
Tabela 3. Variação à Compressão com Teor de Cimento	25
Tabela 4. Classificação da cal aérea quanto ao teor de Óxido de Magnésio.....	27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 OBJETIVO.....	11
3 JUSTIFICATIVA.....	11
4 REFERENCIAL TEÓRICO	12
4.1 Solos.....	12
4.2 Pavimento rodoviário.....	18
4.2.1 Classificação dos pavimentos	18
4.2.2 Camadas de um pavimento rodoviário	21
4.2.2.1 Subleito	21
4.2.2.2 Reforço do subleito.....	22
4.2.2.3 Sub-base.....	22
4.2.2.4 Base	22
4.2.2.5 Revestimento	23
4.3 Cimento	23
4.3.1 Estabilização com solo-cimento.....	24
4.3.2 Dosagem solo-cimento	25
4.4 Cal.....	26
4.4.1 Tipos de cal.....	26
4.4.1.1 Cal aérea	26
4.4.1.2 Cal Hidráulica	27
4.4.2 Propriedades importantes da cal para estabilização de solos.....	27
4.4.3 Estabilização com solo-cal.....	28
4.5 Solo-cimento e solo-cal nas pavimentações de estradas	32
4.5.1 Solo-cimento.....	32
4.5.2 Solo-cal.....	34
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
REFERÊNCIAS.....	38

1 INTRODUÇÃO

Visando melhorar o desenvolvimento dos serviços de infraestrutura, é de suma importância técnicas construtivas que, além de melhorar a eficiência das obras, garantam economia na execução e baixos impactos ambientais. Em diversas obras geotécnicas, os solos em seu estado original, não apresentam os requisitos necessários para desempenhar adequadamente as condições impostas em um projeto, seja como material de construção civil ou elemento de suporte. Desta forma, uma das alternativas possíveis, é a estabilização dos solos, de modo a melhorar o desempenho das propriedades físicas e mecânicas apresentadas pelo mesmo (OLIVEIRA, 2018).

O solo é um recurso natural inesgotável e imprescindível para existência da vida humana. É um substrato terrestre resultante de intemperismo e decomposições de rochas ao longo de anos. Sendo, apesar disso, um elemento natural de diversas utilizações, como por exemplo, servindo de suporte estrutural para qualquer tipo de construção (SANTOS, 2017).

De acordo com Santos (2017), na engenharia civil, este é considerado parte importante em qualquer construção, pois o estudo do mesmo é que definirá as características fundamentais de um projeto com relação ao assentamento da obra em um dado terreno. Esta análise delimitará substancialmente como os solos e rochas se comportarão em virtude das ações do homem.

Vale considerar ainda que, o solo é um material heterogêneo, ou seja, com características variáveis, e anisotrópico, suas propriedades e materiais que o compõem não são iguais. Por isso, o seu estudo é indispensável para conhecimento de suas particularidades e entendimento do seu comportamento, para que os parâmetros deste substrato, em campo, atendam aos requisitos mínimos de segurança de um projeto, sabendo o que se esperar do mesmo (CARMO, 2015).

As especificidades de cada solo, são comumente conhecidas através de ensaio de laboratórios que associam os resultados obtidos a sua utilização em campo. Estes parâmetros, definidos experimentalmente, definem suas características e permeiam as possibilidades de uma construção no terreno em questão. Quando tais parâmetros não são suficientes para que a obra seja possível, dentro dos padrões de segurança exigidos, existem métodos diversos que modificam as propriedades do solo em estudo para viabilidade da mesma. Tais modificações podem, ainda, agirem de formas variadas, modificando as propriedades mecânicas ou químicas do solo (ROCHA, 2021).

O Brasil conta com uma extensa malha viária que totaliza 1,72 milhões de quilômetros de rodovias, das quais aproximadamente 213 mil são pavimentadas, correspondendo a 12,4% do total (CNT, 2022). Os tipos de pavimentos predominantes no país são os rígidos e flexíveis, sendo o pavimento flexível o mais proeminente e amplamente utilizado.

O pavimento flexível apresenta diversas vantagens, destacando-se especialmente pela praticidade executiva, uma vez que é composto por cinco camadas distintas: subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento. As camadas de sub-base e base desempenham papéis fundamentais, seguindo o revestimento, e podem ser constituídas por materiais finos (naturais), estabilizadas granulometricamente com a incorporação de outros solos, brita ou materiais que conferem resistência para aprimorar a qualidade do solo. Além disso, existe a possibilidade de estabilização química dessas camadas, conforme diretrizes do DNIT (2006).

Atualmente, 60% do transporte de cargas realizado no Brasil é movimentada pelo modal rodoviário. O modal ferroviário responde por 21%, o aquaviário por 14%, o dutoviário por 5% e o aéreo por menos de 1%. O modal de transporte rodoviário encontra-se em parte em estado deficiente, sendo os investimentos nas rodovias prioritários neste momento, não apenas por ser o modal mais utilizado, mas por exigir menor investimento quando comparado aos demais modais (PROTEAUTO TRUCK, 2021).

Destaca-se ainda que pelo modal rodoviário circula 96% dos passageiros. Levantamentos recorrentes da Confederação Nacional do Transporte – CNT têm considerado a grande maioria dos pavimentos do Brasil de baixo conforto ao rolamento, incluindo muitos trechos concessionados da malha federal. Estima-se de 1 a 2 bilhões de reais, por ano, para manutenção das rodovias federais (CNT, 2022).

De acordo com a Pesquisa CNT de Rodovias 2022, o nível a que chegou a destruição da malha rodoviária pavimentada do País, só seria revertido atualmente se o poder público (em parceria ou não com as concessionárias de rodovias) investisse um alto valor financeiro: R\$ 94,93 bilhões. Com o grande aquecimento na economia brasileira técnicas para estabilização de solos visando à pavimentação devem ser aprimoradas, focando sempre no baixo custo, velocidade de execução e durabilidade, evitando desta maneira gastos exorbitantes com manutenções e retrabalhos de pistas.

A estabilização de solos é um mecanismo que pode ocorrer basicamente por três processos. A estabilização mecânica, que visa arrumar as partículas de solo ou a correção granulométrica; a estabilização física, onde as alterações das partículas de solos são realizadas por processo de aplicação de calor ou potencial elétrico; e a estabilização química, que

procura modificar o comportamento dos solos pela inserção de um aditivo ao mesmo (CRUZ; JALALI, 2003).

As técnicas de melhoramento de solos já eram utilizadas há mais de 3000 anos na construção dos templos na antiga Babilônia. Neste tempo eram utilizadas madeiras, bambus ou palhas como reforço para solos. Já os primeiros vestígios da aplicação da estabilização em construções de pavimentos rodoviários aludem a época das civilizações Mesopotâmica e Romana. Entretanto, o processo de estabilização em grande proporção só teve início após a Segunda Guerra Mundial, considerando o crescimento da demanda por aeroportos e vias de acesso mais resistentes às cargas (CRISTELO, 2001).

Obras rodoviárias estão sujeitas a grandes variações de materiais dentro de um mesmo projeto. Neste caso, a estabilização de solos pela inserção de um aditivo ao mesmo, torna-se uma alternativa interessante, que pode viabilizar o empreendimento.

Dentre os aditivos químicos mais utilizados na pavimentação, destacam-se o uso do cimento e a cal. A utilização do cimento como estabilizante de solos é uma técnica normatizada, que pretende realizar melhorias nas propriedades dos solos de maneira durável. Seja para modificar a plasticidade e o comportamento do solo em contato com a água, como para adquirir características cimentantes suficientes para aumentar a capacidade de suporte do material. A estabilização química com o emprego de cal hidratada ao solo é realizada por mecanismos de troca de íons, floculação, reações pozolânicas e a carbonatação. Onde, dependendo da constituição química e mineralógica, a granulometria das partículas, o tipo e teor de cal empregada, resultam em acréscimos de resistência, bem como melhorias na trabalhabilidade, plasticidade e expansibilidade (OLIVEIRA, 2018).

2 OBJETIVO

O propósito deste estudo consiste em analisar, por meio de uma revisão bibliográfica, os resultados obtidos com a utilização de solos estabilizados com cimento e cal em obras viárias.

3 JUSTIFICATIVA

Como aproximadamente 60% do transporte de cargas realizado no Brasil é feito via modal rodoviário existe a necessidade de um foco maior nesse assunto. Guérios (2013),

técnicas envolvendo cimento como aglomerante na estabilização de solos já são comuns em obras públicas (conhecidos como solo-cimento), porém, o alto custo deste aglomerante sinaliza o estudo de alternativas.

Além de uma alta velocidade na cura devido a flocculação inicial, conceito que será explicado neste trabalho, o preço cerca de 30% mais barato quando comparado ao cimento Portland é um atrativo para o uso de cal hidratada na estabilização da sub-base de pavimentos rodoviários (GUÉRIOS, 2013). A cal hidratada já é utilizada na área de estabilização de solos, porém dificilmente tem seu uso exclusivo, ou seja, normalmente é combinado com o cimento Portland devido à falta de estudos na dosagem específica de cal para cada tipo de solo.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Solos

O solo exibe uma vasta gama de características, cuja compreensão de sua origem de formação é essencial devido à sua notável complexidade. Analisando o solo sob essa perspectiva, o estudo de suas propriedades torna-se crucial para seu emprego como material de construção (MASSAD, 2016).

Na engenharia, depara-se com uma enorme diversidade de solos, que podem assumir várias formas, desde blocos duros, densos e grandes até pedregulhos, areias, siltes, argilas e até mesmo depósitos orgânicos como turfas compressíveis e moles (TERZAGHI; PECK, 1962).

Para os engenheiros rodoviários, os solos são materiais naturais suscetíveis à dispersão ao entrar em contato com a água; caracterizam-se como materiais naturalmente não consolidados, formados por processos mecânicos e hidráulicos, e que podem ser facilmente escavados sem a necessidade de explosivos (VILLIBOR et al., 2007).

A ação do intemperismo no solo, que varia em suas características e composições mineralógicas de acordo com as condições climáticas da região, é um fator significativo. Em regiões de clima temperado, a ação intemperizadora é predominantemente física, resultando da ação do gelo e degelo da água infiltrada na rocha ao longo do tempo, levando à quebra da estrutura da superfície da rocha em pequenos pedaços. Nessas regiões, os perfis do solo tendem a ser pouco espessos (SILVA, 2016).

Em áreas de clima tropical úmido, caracterizadas por variações de altas temperaturas e

elevados índices pluviométricos, o intemperismo predominante é o químico. Nesse contexto, a rocha matriz sofre desagregação devido a processos químicos induzidos pela presença de água, resultando em perfis de solo mais espessos. Essas características apresentam relevância geotécnica devido ao menor tamanho das partículas do solo (SILVA, 2016).

Os solos tropicais, originados em regiões tropicais úmidas, refletem as condições específicas do processo de intemperização ao qual foram submetidos, derivadas de processos geológicos e/ou pedológicos característicos dessas áreas. Entre as várias classes de solos tropicais, destacam-se principalmente os solos lateríticos e os solos saprolíticos (VILLIBOR et al., 2007).

De acordo com Villibor e Nogami (2009), os solos saprolíticos constituem a camada situada abaixo da espessa camada de solos lateríticos, sendo necessária intervenção humana, seja por meio de obras ou erosão, para sua exposição. Esses solos apresentam uma natureza heterogênea e são genuinamente residuais, mantendo uma mineralogia complexa resultante da decomposição gradual de seus minerais, preservando características da rocha original.

Já os solos lateríticos, formados pelo processo de laterização induzido pelo intemperismo, demonstram endurecimento com características tecnológicas relevantes, como a melhoria das condições do solo devido à presença de alumínio ou óxidos hidratados de ferro. Esses solos retêm caulinita como argilomineral dominante, conferindo-lhes colorações características, como amarelo, alaranjado, vermelho e marrom (VILLIBOR; NOGAMI, 2009).

Conforme Massad (2016), na resolução de desafios na Engenharia Civil, o solo desempenha papéis fundamentais, seja como material de construção em estradas, barragens de terra e enrocamento, ou como elemento natural em fundações de edifícios, escavações de valas, túneis e estabilização de encostas. O conhecimento das características de identificação, classificação e, de modo geral, das propriedades de engenharia do solo é indispensável para a elaboração de projetos adequados e a realização de obras seguras e econômicas.

A aplicação do solo como material de construção em camadas de pavimentos requer um rigoroso controle tecnológico, com estudo prévio de sua qualidade e acompanhamento metódico durante a aplicação. Diante desse cenário, foram desenvolvidos estudos de técnicas de estabilização para aprimorar as propriedades geotécnicas dos solos, seja por meio de aglutinantes ou pela otimização da distribuição granulométrica (SENÇO, 2007).

Caputo (2015) classifica os solos como materiais resultantes do processo de intemperismo ou da meteorização das rochas, que por decomposição química e/ou pelo processo mecânico através de agentes como a água, temperatura, vegetação e vento, formam

partículas grossas, intermediárias e finas. Entre estes agentes, a água é o que mais modifica as rochas através de seus mecanismos de oxidação, hidratação, carbonatação e efeitos químicos da vegetação.

Das (2011), não somente a composição química, mas também a forma e o tamanho dos grãos interferem na maioria das propriedades do solo. De acordo com Campos (2006), a principal classificação é com relação ao tamanho dos grãos. O solo apresenta faixas granulométricas variadas, conforme a predominância do seu tamanho são geralmente classificados como pedregulho, areia, silte ou argila, dentre estas a última é a que apresenta frações mais finas, normalmente com partículas menores que 2 μm (DAS, 2011).

Outra classificação muito utilizada é com relação a sua origem. Os solos residuais também chamados de autóctones são aqueles que após o intemperismo permanecem no local da rocha de origem. Os sedimentares ou alotóctones são os que sofrem ação dos agentes transportadores e os orgânicos são essencialmente formados pela decomposição de matéria vegetal e/ou animal (CAPUTO, 2015).

Os solos de formação orgânica são classificados de acordo com a quantidade de matéria orgânica presente em seu volume total. Hartlén e Wolski (1996) apresentam uma classificação de acordo com o teor de matéria orgânica presente no solo, podendo ser classificados como pouco, mediantemente e altamente orgânicos.

A mineralogia do solo é determinada em função do processo de intemperismo da rocha mãe. Através das alterações e da decomposição dos minerais das rochas, os solos podem apresentar minerais inalterados, novos minerais e minerais argílicos (HALLAL, 2003). Caputo (2015) distingue a composição mineralógica do solo por minerais primários que são os mesmos encontrados nas rochas de origem e por minerais secundários que são os formados durante o processo de decomposição química. Algumas partículas de maior tamanho são frequentemente agregações de minerais distintos, apesar de que na maioria das vezes as partículas são compostas por um único mineral (PINTO, 2006).

4.1.1 Sistemas de Classificação dos solos

A primeira característica que distingue os solos é o tamanho das partículas que o constituem. Alguns solos possuem partículas visíveis a olho nu, como os grãos de pedregulho, já outros solos apresentam partículas tão finas que não podem ser percebidas individualmente e formam uma pasta quando molhadas (PINTO, 2006).

Muitas organizações utilizaram a granulometria das partículas para classificar os solos

como, por exemplo, o Sistema Unificado de Classificação dos Solos adotado pela ASTM - American Society for Testing and Materials (DAS, 2007).

O Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) fundamenta-se na identificação dos solos conforme as suas propriedades de textura e plasticidade, e reúne-os de acordo com o seu comportamento. Esse sistema leva em conta a porcentagem de pedregulhos, areias e finos; a forma da curva granulométrica; a plasticidade e a compressibilidade (SOUSA, 2013).

Originalmente esse sistema foi proposto por Arthur Casagrande em 1942 para o uso nos trabalhos de construção de aeroportos sob a responsabilidade da USACE – U.S Army Corps of Engineers – durante a Segunda Guerra Mundial. Neste sistema, todos os solos são identificados pelo conjunto de duas letras, como mostra a Figura 1. As cinco primeiras letras indicam o tipo principal do solo e as quatro restantes correspondem a dados complementares dos solos.

Figura 1. Terminologia do Sistema Unificado

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: Souza (2014)

O Sistema Unificado de Classificação dos Solos agrupa o solo em duas categorias distintas (DAS, 2007):

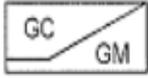
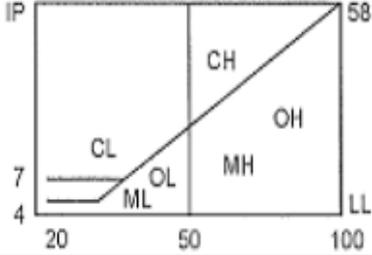
1. Solos de granulometria grossa que possuem menos de 50% de suas partículas passando pela peneira N° 200. Os símbolos do grupo iniciam com a letra G ou S. A letra G representa um solo pedregulhoso ou pedregulho enquanto a letra S um solo arenoso ou areia (DAS, 2007).

2. Solos de granulometria fina são compostos de 50% ou mais de materiais passantes na peneira N° 200. Os prefixos que indicam este grupo são as letras M (que representa silte inorgânico) e C (que indica argila inorgânica). Neste grupo também há a presença de siltes e argilas orgânicas que é identificado pela letra O. Para designar a turfa, terra preta (muck) e

outros solos altamente orgânicos é empregado o símbolo Pt.

Na Figura 2 é apresentado um esquema para a classificação pelo Sistema Unificado.

Figura 2. Esquema de classificação pelo Sistema Unificado

% 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: Souza (2014)

Outro sistema de classificação dos solos é o Sistema da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) também conhecido como Sistema Rodoviário (DAS, 2007).

Sobre o Sistema Rodoviário, Pinto (2006, p.20) afirma:

Neste sistema, também se inicia a classificação pela constatação da porcentagem de material que passa na peneira nº 200, só que são considerados solos de granulação grosseira os que têm menos de 35% passando nesta peneira, e não 50% como na Classificação Unificada. Estes são os solos dos grupos A-1, A-2, e A-3. Os solos com mais de 35% passando na peneira nº 200 formam os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7.

Na Figura 3 é apresentado um quadro de classificação dos solos segundo o Sistema Rodoviário.

Figura 3. Classificação dos Solos pelo Sistema Rodoviário

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

* O I.P. de grupos A - 7 - 5 e A - 7 - 6 é igual ao valor de grupo A - 7 menos 20.

Fonte: Pinto (2006)

A Associação Brasileira de Normas Técnicas agrupa os solos em faixas de diâmetros das partículas que o compõe como estabelece a norma NBR 6502/95. A Tabela 1 apresenta a divisão dos solos conforme a ABNT.

Tabela 1. Faixa de diâmetro dos grãos do solo

Diâmetro (mm)							Silte	Argila
Pedregulho			Areia					
grosso	médio	fino	grossa	média	fina			
60 a 20	20 a 6	6 a 2	2 a 0,6	0,6 a 0,2	0,2 a 0,06	0,06 a 0,002	<0,002	

Fonte: ABNT (1995)

Além destes solos a NBR 6502/95 dispõe que a pedra de mão apresenta diâmetros entre 60 mm e 200 mm enquanto o matacão, um fragmento de rocha, possui um diâmetro compreendido entre 200 mm e 1 m.

4.2 Pavimento rodoviário

O pavimento rodoviário é a superestrutura composta por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre a infraestrutura ou terreno de fundação, denominada de subleito (DNIT, 2006).

Construído sobre a superfície de terraplenagem, o pavimento é dimensionado para resistir aos esforços provenientes do tráfego de veículos e de ações do clima, e oferecer aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com comodidade, economia e segurança. (BERNUCCI et al, 2010).

O comportamento estrutural do pavimento depende da espessura de cada uma de suas camadas, da rigidez destas e do subleito, assim como da interação entre as diferentes camadas do pavimento (BERNUCCI et al, 2010).

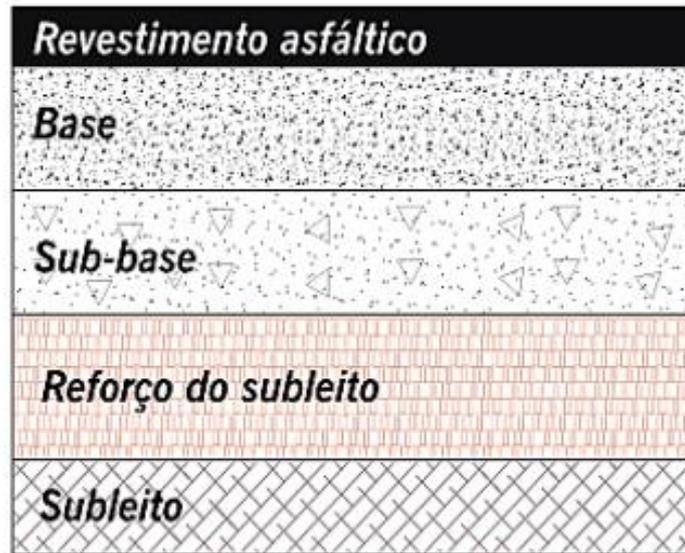
Estas camadas podem possuir uma ou mais funções específicas e devem oferecer aos veículos melhores condições de suporte e rolamento em qualquer circunstância climática (BALBO, 2007).

4.2.1 Classificação dos pavimentos

Os pavimentos podem ser classificados em flexíveis, rígidos e semirrígidos.

- Flexível: São pavimentos, normalmente constituídos de revestimento betuminoso de pequena espessura, cujas camadas não trabalham à tração (MARQUES, 2012). Como exemplo de pavimento flexível temos aquele constituído por uma base de brita (brita graduada, macadame) ou por uma base de solo pedregulhoso com revestimento asfáltico (DNIT, 2006). A Figura apresenta uma estrutura-tipo de um pavimento flexível.

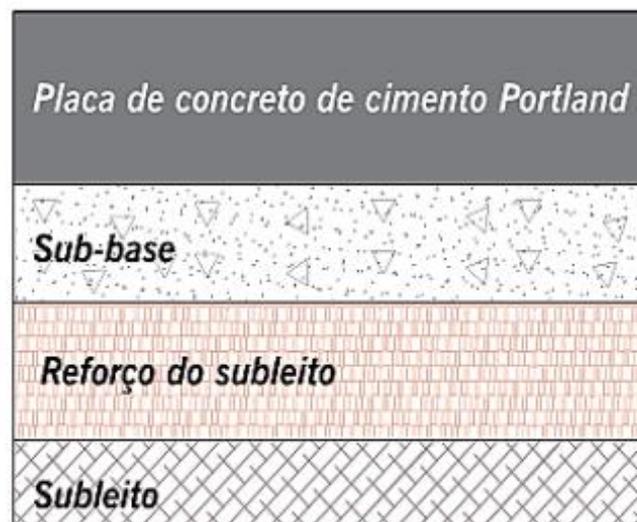
Figura 4. Estrutura-tipo de um pavimento flexível.



Fonte: Bernucci et al. (2010)

- Rígido: Os pavimentos rígidos possuem revestimento de alta rigidez em relação às camadas inferiores e, logo, absorve aproximadamente todas as tensões oriundas do carregamento aplicado (DNIT, 2006). Um exemplo de pavimento rígido são os pavimentos de concreto-cimento cujo revestimento consiste numa placa de concreto feito com cimento Portland. A espessura do pavimento é função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas inferiores do pavimento (BERNUCCI et al, 2010). A Figura 5 mostra a estrutura de um pavimento rígido.

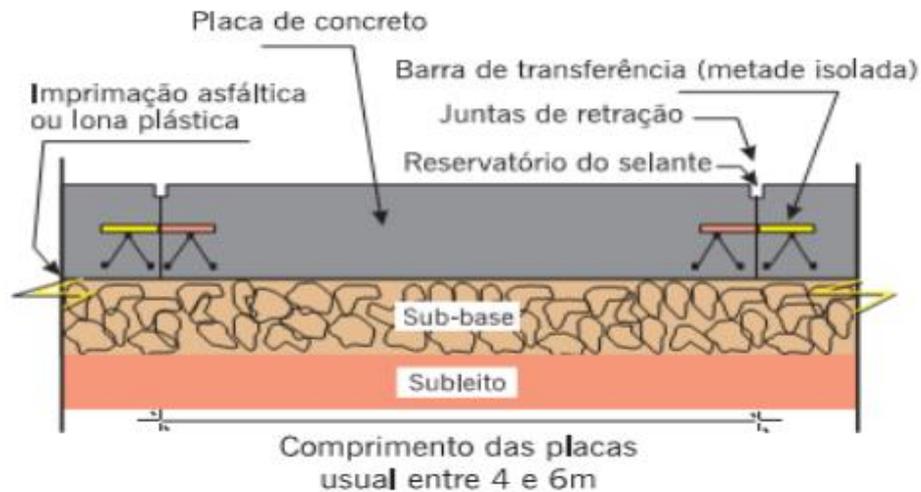
Figura 5. Estrutura de um pavimento rígido.



Fonte: Bernucci et al. (2010)

As placas de concreto podem ou não ser armadas com barras de aço (BERNUCCI et al, 2010). Um corte longitudinal de um pavimento rígido é mostrado na Figura 6.

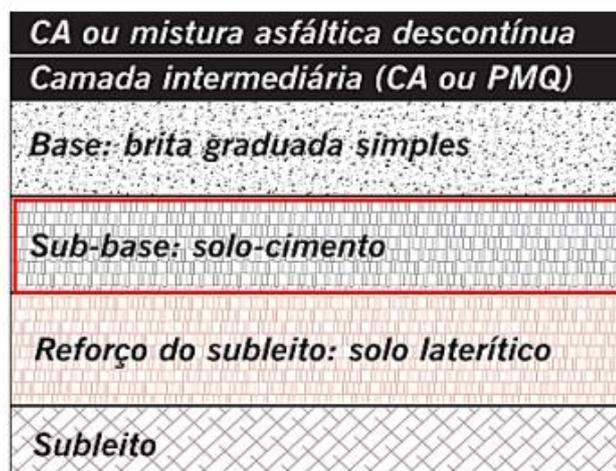
Figura 6. Corte longitudinal de um pavimento de concreto cimento



Fonte: Bernucci et al. (2010)

- Semirrígido: Souza (2004) o pavimento semirrígido é aquele identificado por uma base cimentada quimicamente, como por exemplo, uma camada de solo-cimento e revestida por uma camada de material betuminoso. Pavimentos com revestimento asfáltico cuja base ou sub-base possui materiais cimentados e que também trabalham à tração são denominados de pavimentos semirrígidos (BERNUCCI et al, 2010). Na Figura 7 é apresentada uma estrutura tipo de um pavimento semirrígido.

Figura 7. Pavimento semirrígido com uma sub-base de solo-cimento

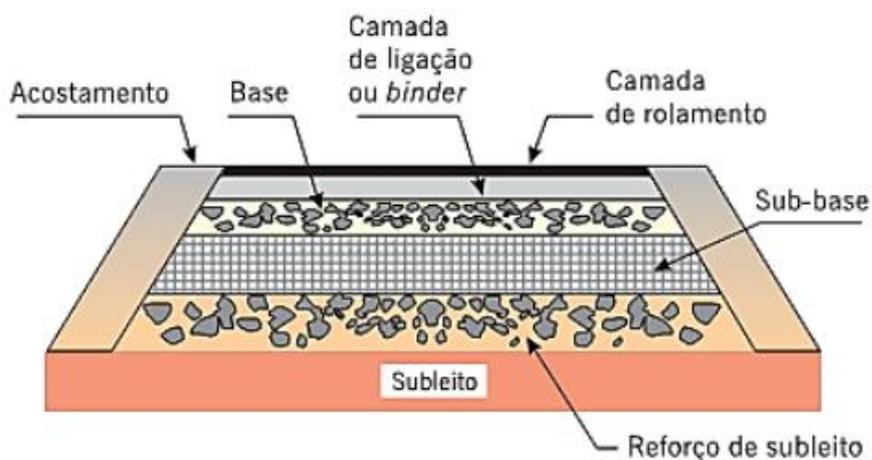


Fonte: Bernucci et al. (2010)

4.2.2 Camadas de um pavimento rodoviário

O pavimento é constituído por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (Figura 8). Dependendo do volume de tráfego e dos materiais disponíveis pode haver ausência de algumas camadas (BERNUCCI et al., 2010; SOUZA, 2014).

Figura 8. Camadas do Pavimento



Fonte: Bernucci et al. (2010)

4.2.2.1 Subleito

O subleito é o terreno de fundação no qual será apoiado todo o pavimento devendo ser considerado e estudado até a profundidade em que as cargas impostas pelo tráfego atuam de forma significativa (MARQUES, 2012).

O subleito será composto de material natural consolidado e compactado, por exemplo, nos cortes do corpo estradal, ou por material transportado e em seguida compactado, como no caso dos aterros. (BALBO, 2007).

Caso o material do subleito obtiver $CBR < 2\%$, ele deve ser substituído por outro de melhor resistência ($CBR > 2\%$) até pelo menos 1,00 metro, podendo ser utilizado como material de sub-base quando o CBR do subleito for $\geq 20\%$ (MARQUES, 2012).

Quando o terreno do subleito for irregular deve-se efetuar a regularização do mesmo, devendo ser executada após o término dos trabalhos de limpeza e movimentação de terra, sendo construída sobre o subleito, cuja função é conformá-lo transversalmente e longitudinalmente, corrigindo algumas falhas da superfície de terraplenagem (SOUZA, 2004).

4.2.2.2 Reforço do subleito

O reforço do subleito pode ser definido como a camada estabilizada granulometricamente, construída sobre o subleito corretamente compactado e regularizado, utilizada quando se torna necessário diminuir as espessuras elevadas da camada de sub-base, causadas pela baixa capacidade de suporte do subleito (DNIT, 2010b).

De acordo com Souza (2004) o reforço do subleito “é a camada que desempenha função semelhante à da sub-base, sem especificações definidas, apenas com condições de apresentar características de suporte superiores às do subleito.”. Segundo o DNIT (2006) os materiais adequados para o reforço do subleito são aqueles que apresentam CBR superior ao do subleito e expansão $\leq 1\%$ (medida com uma sobrecarga de 10 lb).

4.2.2.3 Sub-base

A sub-base é uma estrutura do pavimento, complementar à base e possui as mesmas funções desta, sendo executada sobre o subleito ou reforço do subleito, devidamente compactado e regularizado (DNIT, 2010).

Quando a espessura da base necessária para transmitir os esforços para as camadas inferiores for muito elevada, por razões construtivas e econômicas, divide-se a base em duas camadas, criando uma sub-base, que geralmente possui menor custo (BALBO, 2007).

Conforme o DNIT (2006) para compor a camada de sub-base o material deve possuir CBR $\geq 20\%$, índice de grupo nulo e expansão $\leq 1\%$ (medida com uma sobrecarga de 10 lb).

4.2.2.4 Base

É a camada destinada a suportar e distribuir as cargas verticais provenientes dos veículos e sobre a qual o revestimento é construído. Esta camada está localizada acima da sub-base, quando presente, ou diretamente sobre o subleito (SOUZA, 2004).

As bases podem ser constituídas por diferentes materiais, tais como solo estabilizado naturalmente, misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico, concretos, entre outros (BALBO, 2007).

Conforme especificações do DNIT (2006), um solo considerado adequado para compor a base de um pavimento deve apresentar um Limite de Liquidez $\leq 25\%$, Índice de Plasticidade $\leq 6\%$, CBR (California Bearing Ratio) $\geq 80\%$ e expansão $\leq 0,5\%$ (medida com uma sobrecarga de 10 lb). Em face da inexistência de normas específicas para a execução de camadas de pavimento com solo-cal, foi consultada a norma DNIT 143/2010 – ES: Pavimentação de Base de Solo-Cimento – Especificação de Serviço (DNIT, 2010a).

Segundo a norma DNIT 143/2010, a mistura de solo-cimento deve apresentar, aos 7 (sete) dias, uma resistência à compressão com valor mínimo de 21 kg/cm², ou 2,1 MPa. Existem critérios específicos que devem ser atendidos para que a mistura solo-cimento seja utilizada na construção da camada de base de rodovias. Estas características são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades do solo-cimento para compor uma base rodoviária

Peneiras	Porcentagem	Tolerância
2 ^{1/2} "	100%	-
Nº 4	50 a 100%	± 5%
Nº 40	15 a 50%	±2%
Nº 200	5 a 35%	±2%
Limite de liquidez	Máximo 40%	
Índice de plasticidade	Máximo 18%	

Fonte: DNIT (2010a)

4.2.2.5 Revestimento

O revestimento constitui a camada que suporta diretamente a carga proveniente do rolamento dos veículos, com o objetivo de aprimorar as condições do tráfego, proporcionando conforto, segurança e durabilidade ao pavimento, além de resistir ao desgaste (MARQUES, 2012).

De acordo com Bernucci et al. (2010, p.13), "as estruturas de pavimento em geral são submetidas a esforços de compressão e tração devido à flexão, sendo que as demais camadas, em sua maioria, estão sujeitas principalmente à compressão".

4.3 Cimento

No Brasil, o mercado dispõe de 8 opções que atendem aos mais variados tipos de obras (SARTORI, 2015). Segundo ABCP, o cimento diferencia-se de acordo com a proporção

de clínquer e sulfatos de cálcio, pozolanas, material carbonático, entre outros que podem ser acrescentados durante o processo de moagem. Diferem-se também em função de propriedades intrínsecas, como a cor, resistência etc.

4.3.1 Estabilização com solo-cimento

De acordo com Marques (2006), muitas vezes as misturas de solo com cimento são erroneamente confundidas e classificadas como solo cimento. Entretanto, existem três tipos distintos de misturas que envolvem solo e algum teor de cimento. Conforme descrito por Sartori (2015), essas misturas são categorizadas da seguinte maneira: Mistura Solo Cimento é o resultado da compactação e cura da mistura composta por solo, cimento e água, com o objetivo de atender critérios de estabilidade e durabilidade; Solo modificado com cimento trata-se de uma mistura que contém pequenas quantidades de cimento (1 a 5%), com o intuito de modificar algumas propriedades físicas, como reduzir o índice de plasticidade através do aumento do Limite de Plasticidade (LP) e da diminuição do Limite de Liquidez (LL); Solo cimento-plástico é um material endurecido com uma consistência similar à de uma argamassa. Este tipo de mistura possui solo, cimento e água em quantidade suficiente para a compactação e completa hidratação do cimento, além de conter maiores quantidades deste último. Então, para que haja uma boa aceitação da mistura do solo com o cimento, é preciso quantificar corretamente a quantidade de cimento a ser adicionado, sendo que esta varia conforme a qualidade do solo utilizado, além do teor de umidade ótima. A dosagem pode ser determinada através do Método Simplificado, uma metodologia empírica, que utiliza tabelas e ábacos, que estima o teor para cada tipo de solo, levando em consideração a sua resistência à compressão e teor de água (SENÇO, 2007).

Seguindo ainda o exposto pelo autor, é interessante ressaltar que o material que deve ser mais controlado é o solo, devido a sua heterogeneidade.

A Tabela 3 abaixo mostra a variação da compressão de acordo com o teor de cimento.

Tabela 3. Variação à Compressão com Teor de Cimento

Solo	Teor de cimento (%)	Resistência à comp. Aos 7 dias (MPa)	Densidade seca (g/cm ²)	Teor de água (%)
argila siltosa	7	2,4	1,78	16
	10	2,74	1,78	
	13	3,09	1,78	
Argila arenosa	7	1,78	1,87	14
	10	2,62	1,89	
	13	3,64	1,89	
Areia argilosa	7	1,65	1,78	12
	10	1,94	1,82	
	13	2,69	1,84	
Areia de granulometria uniforme	7	1,44	1,78	10
	10	2,81	1,84	
	13	5,88	1,89	
Seixo mal graduado	7	1,1	1,99	10
	10	2,47	2,01	
	13	3,84	2,04	

Fonte: Senço (2007)

4.3.2 Dosagem solo-cimento

Após anos de experiência brasileira, passou-se a conhecer melhor os solos e quais desses são mais adequados para serem utilizados nas bases e sub-bases com adições de cimento.

A princípio, Sartori (2015) ressalta que todos os tipos de solo podem ser estabilizados com cimento, contudo, alguns tornam-se inviáveis economicamente devido ao alto teor de cimento que deve ser adicionado à mistura. Visto isso, surgiu a necessidade de criar um novo procedimento para que houvesse uma dosagem mais precisa.

O novo método, apresentado pela NBR 12253 (ABNT, 1992), segue uma ordem específica para realização:

Primeiramente, são conduzidos os ensaios preliminares do solo. Em seguida, procede-se à escolha do teor de cimento para o ensaio de compactação. Posteriormente, é realizada a execução do ensaio de compactação conforme os parâmetros estabelecidos.

Segue-se então a determinação do teor de cimento para o ensaio de compressão simples, utilizando um ábaco como método. Na sequência, são moldados pelo menos 3 corpos de prova para o teor de cimento selecionado.

Após a moldagem, é executado o ensaio de compressão simples conforme a MB 03361 - NBR 12025. Por fim, são analisados e registrados os resultados obtidos na dosagem, concluindo o processo conforme o método proposto pela norma.

4.4 Cal

Sartori (2015), a cal hidratada, um material extremamente fino e leve é muito utilizada na construção civil como aglomerante. O seu uso como aditivo em solos para fins de estabilização deve-se ao fato desta ser um excelente reagente, que torna o solo impermeável e aplicável para uso em bases de pavimentos urbanos e rodoviários, melhorando assim a relação custo x benefício, que visa aproveitar o solo e conferir-lhe maior capacidade de resistir a carregamentos e intempéries.

A cal é um aglomerante inorgânico, produzido a partir de rochas carbonáticas, composto basicamente por cálcio e magnésio, cujo endurecimento ocorre por reação com o CO₂ (CINCOTTO et al., 2010).

De acordo com Souza (2014), a cal é um dos materiais mais empregados na construção civil, encontrando aplicações que vão desde seu emprego na argamassa de assentamento de alvenaria até seu uso na estabilização de solos.

As matérias primas da cal são o calcário constituído basicamente pela calcita (CaCO₃) e o dolomito composto essencialmente pela dolomita (MgCO₃.CaCO₃). A composição química é um fator determinante para o desempenho da cal (CINCOTTO et al., 2010).

A cal é produzida a partir da extração, seleção e moagem do calcário, sendo depois submetido a altas temperaturas, dentro de fornos industriais, num processo chamado de calcinação. O resultado de todo esse processo é óxido de cálcio (SOUSA, 2013).

4.4.1 Tipos de cal

4.4.1.1 Cal aérea

De acordo com Silva (2010) a cal aérea é um aglomerante que resulta da calcinação de uma rocha com percentagem mínima de 95% de carbonato de cálcio ou de carbonato de cálcio e magnésio, a uma temperatura situada entre 900°C e 1100°C, cujo endurecimento é

feito através da reação do gás carbônico do ar em contato com a pasta, num processo chamado de carbonatação. Há dois tipos de cal aérea: a cal viva e a cal hidratada (SILVA, 2010).

A cal aérea pode ser classificada em gorda e magra de acordo com a taxa de impurezas presente na rocha calcária. A cal aérea gorda provém de calcários quase puros com teores de carbonato não inferiores a 99% e possuem uma coloração branca (SOUSA, 2013). A cal aérea magra possui teores de argila e demais impurezas compreendidas entre 1% e 5% (SILVA, 2010). A cal aérea também pode ser classificada de acordo com o teor de óxido de magnésio proveniente da calcinação do carbonato de magnésio presente na dolomita (SILVA, 2010).

Na Tabela 4 abaixo são apresentados os tipos de cal aérea conforme o teor de carbonato de magnésio presente na sua composição.

Tabela 4. Classificação da cal aérea quanto ao teor de Óxido de Magnésio

Tipo de Cal	Teor de Óxido de Magnésio (%)
Cal calcítica	<2%
Cal cálcico-dolomítica	2 a 20%
Cal dolomítica	20 a 45%

Fonte: Silva (2010)

4.4.1.2 Cal Hidráulica

A cal hidráulica é produzida a partir da cozedura de calcários com porcentagens de argilas normalmente compreendidas entre 5% e 20% a uma temperatura entre 1200 °C e 1500 °C (SILVA, 2010). A cal hidráulica é um produto que enrijece tanto em contato com a água quanto com o ar (COUTINHO, 2006).

A cal hidráulica é composta por silicatos de cálcio ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$) e aluminatos de cálcio ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$) que, hidratando-se, endurecem na água ou ao ar. É também composta por óxido de cálcio (CaO) – no mínimo 3%, que continua livre e que vai endurecer por carbonatação (COUTINHO, 2006).

4.4.2 Propriedades importantes da cal para estabilização de solos

As principais características que afetam as reações entre os solos e a cal são: a granulometria, a superfície específica, a reatividade, o peso específico, a solubilidade e o teor em cálcio (SILVA, 2010).

A granulometria da cal é um parâmetro físico que induz outras propriedades da cal quando empregada na estabilização de solos como a velocidade de hidratação e a homogeneidade da mistura (SILVA, 2010). Geralmente a cal hidratada possui uma granulometria mais fina que a cal viva, devido ao processo de hidratação (CRISTELO, 2001).

A superfície específica é uma das qualidades mais importantes da cal, devido a sua relação direta com outras propriedades da cal como a homogeneização da mistura e a reatividade com outros elementos (BERNUCCI, 2008). Superfícies de contato maiores propiciam melhores misturas com o solo e a água (SILVA, 2010).

A reatividade da cal está associada com a eficiência e a rapidez da sua ação estabilizante e está ligada a outras propriedades físicas e químicas, particularmente com a superfície específica (SILVA, 2010). Este parâmetro possibilita prever a duração da reação e, no caso desta ser exotérmica, o aumento da temperatura produzida (CRISTELO, 2001).

O valor do peso específico da cal viva está compreendido entre 3.200 kg/m³ e 3.300 kg/m³, constatando-se uma redução na densidade da cal viva com a presença de impurezas, enquanto que para a cal hidratada essas mesmas impurezas elevam o peso específico (CRISTELO, 2001).

A solubilidade da cal diminui com a temperatura e também varia com a composição da cal, sendo que a cal viva é menos solúvel que a cal hidratada e a cal calcítica é mais solúvel que a cal dolomítica (SILVA, 2010).

Em relação às propriedades químicas da cal, o teor de cálcio é a mais importante, podendo este aparecer na cal sob a forma livre ou combinada (CRISTELO, 2001):

- Forma livre: óxido de cálcio presente na cal virgem e o hidróxido de cálcio na cal hidratada (GUÉRIOS, 2013).

- Forma combinada: carbonatos, silicatos, aluminatos ou, mais raramente, sulfatos e fosfatos (GUÉRIOS, 2013).

4.4.3 Estabilização com solo-cal

A estabilização de solos é um método que concede ao mesmo, maior resistência às cargas, ao desgaste ou à erosão, através da compactação, correção de sua granulometria e plasticidade ou pela adição de substâncias que lhe atribuem coesão, resultante da cimentação ou aglutinação dos seus grãos (SOUSA, 2013).

Conforme o destino do tratamento, a aplicação da cal pode consistir numa técnica de melhoria ou de estabilização do solo. De acordo com Silva (2010) essas técnicas são:

- Melhoria: procedimento com resultados praticamente instantâneos, que se baseia no melhoramento das propriedades geotécnicas do solo. Esta técnica possibilita apenas garantir temporariamente determinados comportamentos dos materiais em meio a solicitações impostas;

- Estabilização: método utilizado para modificar significativamente, a médio e a longo prazo, as propriedades dos solos, nomeadamente os argilosos. Transparece num endurecimento gradual da mistura ao longo do tempo, após a compactação.

A estabilização de solos é um tratamento aplicado ao solo, para alterar características do solo natural que são indesejáveis para execução de determinadas obras de engenharia. Pode ocorrer por um processo mecânico, químico ou químico-mecânico (SOUSA, 2013):

- Processo Mecânico: compactação realizada em camadas, por meio da aplicação de uma energia de compressão no solo e com controle de umidade. O controle tecnológico ocorre por meio de ensaios;

- Processo Químico: acréscimo de um agente químico que produz uma ação cimentante, modificando as propriedades físicas dos grãos do solo, reunidos através do emprego da cal, cimento ou subprodutos da indústria;

- Processo Químico-mecânico: é uma combinação das duas metodologias de estabilização de solos.

Cristelo (2001), a necessidade de estabilizar um solo deve-se a um dos seguintes fatores:

- Fraca capacidade de suporte de carga ou elevada permeabilidade em solos de fundação que, em virtude da sua localização, são difíceis de tratar por outras técnicas que não as injeções;

- Solos naturais pouco apropriados à execução de fundações superficiais, especialmente estradas e aeroportos.

Guimarães (2002), aponta que a adição de cal no solo se baseia na inter-relação de elementos presentes no solo (argila e quartzo), na presença de matéria orgânica, dos componentes do meio ambiente, como temperatura, água, ar (anidrido carbônico), no tipo e teor de cal a ser utilizado. Sendo que esta interdependência se traduz em reações químicas, físicas e físico-químicas. Devido à estabilização solo cal ser de caráter químico e ter grande influência na fração argila do solo, torna-se de suma importância o conhecimento da fração argila do solo.

Portelinha (2008), pequenos incrementos de cal ao solo de até aproximadamente 2%, são suficientes para promover a completa substituição dos cátions nas superfícies de argila,

mas ainda insuficiente para desencadear as reações pozolânicas de cimentação entre as partículas que são responsáveis pelo contínuo aumento de resistência mecânica de solos tratados com cal.

O solo-cal é uma mistura de solo, cal e água em quantidades estabelecidas em ensaios laboratoriais, gerando um produto capaz de ser utilizado em qualquer camada do pavimento, exceto o revestimento asfáltico devido à ausência de solo nesta camada, sendo seu uso para apenas melhorar a adesividade e a granulometria da mistura asfáltica (AZEVEDO, 2010).

Ao se misturar uma determinada quantidade de cal a um solo, iniciam-se imediatamente reações químicas que alteram as propriedades geotécnicas do solo, tais como a plasticidade a granulometria, a quantidade de finos e a capacidade de carga da mesma, sendo estas características dependentes de outros fatores como o tipo de solo a ser estabilizado, o teor de cal empregado na mistura, o tempo, a temperatura de cura, dentre outros aspectos (SOUZA, 2014; SARTORI, 2015).

A estabilização de solos com o emprego da cal resulta em melhorias significativas na textura e estrutura do solo, minimizando a plasticidade e gerando uma elevação na resistência mecânica o que não é somente possível como provável (CRISTELO, 2001).

Para Ferreira (2006), a estabilização solo cal está sujeita a dois tipos de ações, sendo uma imediata, decorrente da troca catiônica, floculação das argilas e carbonatação, ocasionando a redução de plasticidade e expansão do material. E outra reação de longo prazo, que está fundamentada no caráter pozolânico dos materiais estabilizados, tendo como consequência o aumento da capacidade de suporte do material.

Uma base ou sub-base executada com o produto derivado da mistura entre solo e cal, devidamente homogeneizado, compactado e recoberto com uma camada de rolamento, deve apresentar capacidade de suportar as cargas verticais provenientes do tráfego, para que haja uma boa distribuição destas cargas, de maneira a não prejudicar o desempenho do pavimento (SENÇO, 2001).

Sabe-se ainda que ao realizar tal mistura com teor de umidade ótima, ocorrem algumas reações químicas que promovem alterações físicas nos mesmos. Entre elas podemos citar: aumento da resistência à compressão, o mesmo ocorre com a capacidade de carga, criação de uma barreira resistente à penetração de água, entre outros (SARTORI, 2015).

Ainda de acordo com Sartori (2015), alguns fatores possuem influência sobre este processo de estabilização, podendo ser benéficos ou maléficis. A temperatura influi de forma positiva quando esta está em torno de 60°, fazendo com que as resistências evoluem rapidamente, enquanto a baixas temperaturas o ganho de resistência é bem lento. A cal a ser

utilizada também é um fator preponderante, onde as cales hidratadas podem conferir ao material maiores valores de resistência. Solos mais finos também apresentam melhores resultados para a estabilização com cal.

Um estudo realizado por Rizzo e Lollo (2006) utilizando cal em um solo arenoso siltoso (72% de areia, 10% de silte e 8% de argila) constatou que com o aumento do teor de cal aumenta a umidade ótima e reduz o valor da massa específica aparente seca.

A Figura 9 abaixo apresenta as etapas da estabilização de um solo com emprego da cal. Para executar a mistura do solo com a cal deve ser primeiro distribuir os sacos de cal pela extensão da área a ser estabilizada (1), abrir os sacos de cal e posteriormente lançando sobre o solo (2). Em seguida o solo é homogeneizado com o auxílio de máquinas como uma motoniveladora (3), (4) (ARAÚJO, 2009).

Figura 9. Etapas da estabilização de solos com cal



Fonte: Araújo (2009)

Sobre as vantagens da estabilização com cal, Silva (2010) afirma que a estabilização de solos com cal tem-se revelado um método eficaz, mas também ecológico e económico, na medida em que permite o aproveitamento dos solos existentes no local onde a obra será

implementada, ao invés de substituí-los por outros, evitando despesas adicionais e impactos (sic) ambientais.

Em alguns tipos de solo, principalmente solos siltosos e argilosos, a mistura de solo-cal nem sempre atinge as propriedades desejadas como uma maior resistência, mesmo após um longo período de “cura” (OLIVEIRA, 2005).

No Brasil, Lovato (2004), relata alguns sucessos de estabilização de solo com cal utilizada em pavimentos entre eles:

a) Aeroporto Congonhas (São Paulo) – na área dos hangares da Varig (10000 m²) foi construído uma base de solo-cal-agregado com 6% de cal hidratada para estabilização de um solo classificado como A-7-5 e índice de plasticidade igual a 12. O material apresentou resistência à compressão simples de 1,5 MPa aos 28 dias;

b) Rodovia Curitiba/Porto Alegre – próximo ao km 10, no estado do Paraná, com mil metros de extensão ao qual foi estabilizado um solo siltoso com teores de cal de 3% e 7%;

c) Rodovia Brasília/Fortaleza – nas proximidades de Sobradinho/DF foram executados dois trechos de 150 m com utilização de cal na execução de base com teor de 1 e 3%;

d) Rodovia Cruz-Alta/ Carazinho (BR-377/RS) – 2 trechos experimentais em solo argiloso-arenoso com teor de 4% de cal calcítica;

e) Avenida Sernambetiba (Rio de Janeiro) – Execução de trecho de 18 km com base de solo-cal. Utilizando solo com 25% a 33% retido na peneira n° 200 com teores de 3% e 4% de cal.

4.5 Solo-cimento e solo-cal nas pavimentações de estradas

4.5.1 Solo-cimento

A ideia de utilizar materiais alternativos, para suprir a demanda por bases granulares de pavimentos, que carregam consigo questões ambientais e em alguns casos custos elevados, deixou de ser no final dos anos 40, uma simples questão econômica e passou a ser uma necessidade tecnológica, política e social (SENÇO, 2001).

Pela norma NBR 12023 (ABNT, 1992 p.1), tem-se a definição de solo-cimento como o “produto endurecido, resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água em proporções estabelecidas através de dosagem, executada conforme a NBR 12253”.

Pires (2004) caracteriza o composto solo-cimento, como a mistura íntima e bem fracionada de solo com aglomerante hidráulico artificial denominado cimento Portland. Tal mistura resulta na estabilização do material e melhoramento das propriedades físicas.

De acordo com o que salienta Petrucci (1978), é preciso destacar que a presença de sulfatos no solo representa um fator de grande importância quando do emprego de solo-cimento. Tal afirmação se justifica pelo fato de que os sulfatos são reagentes na presença de hidróxido de cálcio e da alumina livre constituintes do cimento e formam em conjunto o sulfo-aluminato de cálcio. Este composto por sua vez apresenta natureza expansiva, podendo inclusive, por consequência de sua formação, inviabilizar o uso de cimento como estabilizante químico.

Em território brasileiro, a primeira experiência com solo-cimento em fundações de pavimentos, foi à execução de uma pequena pista de circulação, com 1.600 m², no Aeroporto Santos Dumont, no ano de 1940. A obra ocorreu devido iniciativa da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e autorização da Diretoria da Aeronáutica Civil (PITTA 1995 *apud* OLIVEIRA, 2011).

De acordo com dados da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) o Brasil possui mais de 25.000 km de estradas constituída por bases e/ou sub-bases de solo-cimento, sendo a rodovia que liga Caxambu-Areia em Minas Gerais, datada de 1942, a primeira rodovia federal a se utilizar esta técnica.

Em sua dissertação Macedo (2004), relata que apesar dos resultados satisfatórios obtidos com a utilização da estabilização de solo com a adição de cimento Portland, o emprego da técnica não progrediu durante os anos de 1942 a 1954, devido às interferências causadas na indústria do cimento pela Segunda Guerra Mundial. O autor continua a explanação, após este período conturbado houve a retomada da estabilidade do mercado e um significativo aumento nas obras de pavimento estruturado em solo-cimento. A partir daí a técnica passou a ser aplicada na maior parte dos empreendimentos de pavimentação do Estado de São Paulo, representando mais de 50% da extensão de toda a rede pavimentada.

Estudos indicam que as bases ou sub-bases de solo-cimento apresentam parâmetros adequados de resistência e durabilidade, desde que sejam atendidas as necessidades de compactação, tempo de mistura e espalhamento além de respeitadas as normas de dosagem (BERNUCCI et al., 2008).

A mistura solo-cimento compõe um material complexo, quando considerado a possibilidade de modificação de suas propriedades de acordo com os parâmetros adotados de: característica do solo, teor de umidade, tempo de cura, porosidade, quantidade de cimento,

compactação da mistura, dentre outros (CANCIAN, 2013). Foppa (2005) os parâmetros acima apresentam uma interdependência, ou seja, a alteração de um dos índices citados interfere diretamente na magnitude dos outros.

Na estabilização do solo com cimento é comum fazer a distinção entre duas categorias: o solo-cimento e o solo melhorado com cimento. O solo-cimento é caracterizado pela utilização de teores mais elevados de cimento, suficientes para melhorar a durabilidade e aumentar a resistência do solo. No solo melhorado com cimento utiliza-se baixas dosagens de cimento com objetivo principal de melhorar sua plasticidade e sensibilidade a água, sem cimentação acentuada.

Segundo o DNIT (2006), os teores usuais de cimentos adotados para o solo-cimento ficam entre 6% e 10%, já para o solo melhorado com cimento os teores variam de 2% a 4%. Diferentemente do concreto onde há gel de cimento suficiente para envolver toda a superfície do agregado, no solo-cimento a pasta, ou gel, de cimento é insuficiente, formando assim núcleos cimentantes interligados e espalhados pelo solo.

De acordo com Pitta (1995), nos solos finos há o surgimento de matrizes hexagonais geradas pela ligação química entre as partículas de solo e o cimento. Esta matriz envolve as partículas aglomeradas e ligam-se com outras matrizes adjacentes promovendo o travamento de uma sobre a outra. Lopes (2002) afirma que a estabilização de solos finos consome mais cimento em comparação com solos granulares por terem uma maior superfície específica.

4.5.2 Solo-cal

Para os materiais de base, sub-base e reforço do subleito, empregam-se métodos de seleção e de caracterização de propriedades. A seleção tem o objetivo de verificar as características inerentes aos materiais, uma vez que essas estão estritamente ligados aos parâmetros geotécnicos obtidos no estado compactado. Para que se obtenha uma estrutura de fundação adequada as normas regulamentadoras são desejáveis que os constituintes possuam atributos que tornem a mistura resistente, pouco deformável e com permeabilidade condizente com sua função na estrutura. Dentre uma gama de materiais possíveis de serem trabalhados para tratamento do solo, encontra-se a cal. (BERNUCCI et al., 2008).

Conforme descrito no Manual de pavimentação elaborado pelo DNIT (2006, p. 97).

[...] Solo-cal é uma mistura de solo, cal e água e, às vezes, cinza volante, uma pozolana artificial. O teor de cal mais frequente é de 5% a 6%, e o processo de estabilização ocorre por modificação, carbonatação e pozolanização.

A estabilização química de solo, através da adição de cal segue os mesmos objetivos da mistura com cimento, aumento da rigidez, incremento de trabalhabilidade e redução da expansão. O solo-cal é aplicado preferencialmente a solos argilosos e siltosos caulínicos, e utilizado principalmente como reforço de subleito ou sub-base. (BERNUCCI et al., 2008).

De acordo com Azevêdo (2010) solo-cal é definido como o produto final da mistura de solo, cal e água em proporções determinadas por ensaios de laboratório, sendo o composto obtido possível de ser empregado em qualquer das camadas do pavimento, não asfálticas, desde que obtenha conformidade com as normas regulamentadoras.

A estabilização dos solos por meio da adição de cal é uma das mais antigas técnicas empregadas pelo homem. Há exemplos encontrados ao sul da Itália, na Via Apia, no ano 312 a.C., em trechos da muralha da China, datado de 228 a.C, e em construções romanas (GUERIOS, 2013).

Em território nacional, a aplicação da técnica pode ser encontrada em vários trechos experimentais, datados principalmente da década de 1970, e algumas soluções pontuais das décadas de 1990 e 2000, tais como as etapas da duplicação da BR-040, ligando as cidades de Belo Horizonte à Sete Lagoas, o Contorno de Paraopeba, nesta mesma rodovia, ou mesmo na execução do subleito da rodovia BR/381, no segmento entre Nepomuceno e Três Corações, cuja o intuito inicial era controlar a umidade do material, mas por consequência um ganho de resistência foi adicionado ao pavimento (AZEVEDO, 2010).

Adicionando-se cal a solos, que contenham minerais argilosos em qualquer proporção, ocorrerão as seguintes reações em presença de um teor suficiente de umidade: troca de íons e floculação, reação cimentante pozolânicas e carbonatação. (AZEVEDO, 2010).

A presença de água na mistura solo-cal impõe a presença de íons, devido à ocorrência da hidrólise, a adição de quantidades significativas de cal proporciona uma grande concentração de cátions livres, dispostos a substituir permanentemente outros íons metálicos do solo, assim caracteriza-se o fenômeno denominado troca catiônica (DALLA ROSA, 2009).

Logo que ocorre a mistura da cal ao solo, o composto sofre um aumento no pH, portanto são criadas condições alcalinas, e essa também proporciona a formação de aluminatos, silicatos e alumino silicatos de cálcio hidratados, em números bastante significativos, esses elementos exercem elevada influência no processo de estabilização, já que possuem características cimentícias (GUIMARÃES, 1998).

Guimarães (1998) segue afirmando que, a troca iônica gera efeitos praticamente instantâneos, após poucos minutos de contato, mudanças nas propriedades físicas do solo podem ser observadas, como:

a) deslocamento da curva granulométrica para o lado grosseiro, devido a flocculação das partículas originais;

b) Alteração do índice de plasticidade, já que ocorre um ligeiro aumento do limite de plasticidade;

c) Redução do valor da densidade máxima seca e aumento do valor da umidade ótima;

d) Menor variação volumétrica e aumento da capacidade de suporte.

Fator relacionado a elevação do pH do composto, aumento da concentração eletrolítica da água intersticial, e a diminuição da espessura da dupla camada difusa, ocasionada pela substituição de íons, são apontados por Herzog e Mitchell (1963) *apud* Dalla Rosa (2009), como responsáveis pelo fenômeno da flocculação.

A reação de flocculação ocorre no curto prazo, e interfere na plasticidade da mistura e em menor escala na resistência ao cisalhamento, torna o solo visivelmente diferente do original porque há mudanças na textura, que acontecem devido à aglutinação das partículas finas do solo, formando agregados com dimensões maiores (PORTELINHA, 2008).

A carbonatação é uma reação entre a cal e o dióxido de carbono do ar. Azevêdo (2010) ressalta que a carbonatação deve ser evitada, já que diminui a disponibilidade de cátions de cálcio na superfície das partículas de argila, prejudicando as reações pozolânicas que produzem compostos cimentante mais resistentes, desse modo, é necessário que a camada estabilizada seja o máximo que possível protegida quanto à presença do dióxido de carbono do ar.

As reações pozolânicas são responsáveis pela cristalização do gel formado na reação da troca catiônica, desenvolvem-se de médio a longo prazo, conferem boa cimentação aos grãos do solo, ocasionando aumento da resistência mecânica e da capacidade de suporte na mistura solo-cal (PORTELINHA, 2008).

O desenvolvimento de técnicas para a determinação da quantidade ideal de cal conduziu a criação de vários métodos de dosagem, todos com o mesmo objetivo, indicar o teor ótimo de cal, porém tal variedade tem fundamento baseado na necessidade de compatibilizar as propriedades proporcionadas pela adição de cal, as condições singulares dos solos de cada local, desse modo, a utilização de dosagens oriundas de regiões que contenham solos muito diferentes da região de aplicação pode ocasionar grandes discrepâncias (SILVA, 2016).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa detalhada sobre solos estabilizados com cimento e cal para estradas revelou conclusões valiosas para aprimorar técnicas de estabilização em obras viárias. A revisão da literatura destacou as complexidades na interação entre solos, cimento e cal, enfatizando a importância desses fatores para decisões embasadas na escolha de materiais e técnicas adequadas. Aditivos em solos argilosos aumentam significativamente a resistência, e a adição de cal afeta a fração de argila, melhorando as características geotécnicas, especialmente em locais com solos finos. No entanto, a dosagem precisa de cal é crucial para alcançar resultados desejados, como melhor trabalhabilidade e aumento de resistência. O uso de cimento e cal na estabilização de solos para estradas mostra-se promissor, impactando positivamente as propriedades geotécnicas dos materiais. No entanto, é fundamental ajustar as dosagens conforme as características locais para resultados consistentes. Esta pesquisa não só amplia o conhecimento teórico, mas também oferece insights valiosos para profissionais da engenharia civil e gestores de infraestrutura, visando estradas duráveis e sustentáveis, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico das regiões beneficiada.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12023**. Solo-Cimento – Ensaio de Compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1992.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12253**: solo -cimento dosagem para emprego como camada de pavimento. Abril de 1992. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/abnt-nbr-12253-solo-cimento-dosagem-para-emprego/4770671/>. Acesso em: 05 dez. 2022.
- ARAÚJO, A. F. **Avaliação de Misturas de Solos Estabilizados com Cal, em Pó e em Pasta, para Aplicação em Rodovias do Estado do Ceará**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.
- AZEVÊDO, A. L. C. **Estabilização de solos com adição de cal** – um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem após a adição de cal. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 2010.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA L. M. G. de; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica**: Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS/ ABEDA. 2006.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica**: Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras, 2008.
- CAMPOS, I. M. **Conheça os três tipos principais de solo**: areia, silte e argila. IBDA. 2006. Disponível em <http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=9&Cod=59>. Acesso em: 01 maio. 2022.
- CANCIAN, M. A. **Influencia do teor de umidade, porosidade e do tempo de aplicação na mistura solo-cimento para pavimento rodoviário de um solo da bacia do Paraná**. Dissertação Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, 2013. Disponível em: < <http://www.uel.br/pos/enges/portal/pages/arquivos/dissertacao/85.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2023.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. vol.1, 6ª ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2015. 248p.
- CARMO, D. C. do. **Fundação sobre solo melhorado com cimento**: estudo de caso do bloco de sala de aula do curso de Engenharia Civil. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Graduação em Engenharia Civil. Universidade da Paraíba. Araruna. 2015.
- CINCOTTO, M. A.; QUARCIONI, V. Â.; JOHN, V. M. Cal na Construção Civil. In: ISAIA, Geraldo Cechella. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. Volume 1. p. 695 - 726.
- CNT. Confederação Nacional do Transporte. **Transportes no Brasil**. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt>. Acesso em: 01 maio. 2022.
- COUTINHO, J. de S. **Materiais de Construção 2**: 1ª Parte – Ligantes e Caldas. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP. 2006.

CRISTELO, N. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Dissertação (Mestrado em Estruturas, Geotécnica e Fundações) – Universidade do Minho, Braga, 2001.

DALLA ROSA, F. **Efeito do estado de tensões de cura no comportamento de uma areia artificialmente cimentada**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2009. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/10183/32004>. Acesso em: 27 nov. 2023.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Braja M. Das; tradução EZ2Translate; revisão técnica Leonardo R. Miranda. – São Paulo: Cengage Learning, 2011.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **Manual de Pavimentação**. 3.ed. Rio de Janeiro: Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisas, Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 2006. 274p.

FERREIRA, C. J. **Estabilização de solos com cal – uso da metodologia MCT**. Projeto Final, Publicação ENC. PF -012A/06 – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 150 p. 2006.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2005. Disponível em: < <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7845/000558347.pdf?sequence=1>. Acesso em: 27 nov. 2023.

GUÉRIOS, E. M. **Estudo do melhoramento de solo com adição de cal hidratada para uso em pavimento urbano**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Bacharel em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba/PR. 2013.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1998.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal – fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2002.

HALLAL, R.R. **Características de depósitos de argilas moles no estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (mestrado). Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre/RS. 2003.

HARTLÉN, J.; WOLSKI, W. **Embankments on Organic Soils**. Amsterdam: Elsevier, 1996.

LOPES, W. G. R. **Solo-cimento reforçado com bambu: características físico-mecânicas**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

MACEDO, M. M. **Solos modificados com cimento** – efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil, 2004.

MARQUES, G. L. de Oliveira. **Notas de Aula da Disciplina Pavimentação**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2006. 204 f.

MASSAD, F. **Mecânica dos Solos Experimental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

OLIVEIRA, L. C. da S. **Estabilização química de solos: análise da variação da resistência mecânica de solos por intermédio da adição de estabilizante líquido industrial**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Centro Universitário de Formiga-UNIFOR, Formiga, 2018.

OLIVEIRA, R.F.V. **Análise de dois solos modificados com cimento para dimensionamento de pavimentos**. Dissertação. Universidade Federal de Ouro Preto. 2011. Disponível em: <
http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2382/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_An%C3%A1liseSolosModificados.pdf. Acesso em: 27 nov. 2023.

OLIVEIRA, S. M. F. de. **Estudo do comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal para a utilização na construção rodoviária**. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 2005.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. Porto Alegre: Globo, 1978. 435 p.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PIRES, I. B. A. A. **Utilização do Tijolo Ecológico como Solução para Construção de Habitações Populares**. Monografia Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Salvador, 2004.

PITTA, M. R. Estabilização com solo-cimento. **Revista Techne**, v.1, n. 17, p.96, 1995.

PORTELINHA, F. H. M. **Efeito da cal e do cimento na modificação dos solos finos para fins rodoviários: mecanismo de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

PROTEAUTO TRUCK. **Logística do transporte rodoviário de cargas no Brasil**. Publicado em 22 abr. 2021. Disponível em: <https://blog.proteautobrasil.com.br/logistica-do-transporte-rodoviario-de-cargas-no-brasil-como-afeta-o-caminhoneiro/#:~:text=Mesmo%20com%20essas%20tr%C3%AAs%20outras,60%25%20da%20movimenta%C3%A7%C3%A3o%20de%20mercadorias>. Acesso em: 01 maio. 2022.

RIZZO, R. P.; LOLLO, J. A. Capacidade de retenção de barreiras de proteção produzidas com solo arenoso estabilizado quimicamente. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.11, n.3, p. 250-259, jul./set. 2006.

ROCHA, M. M. de S. **Análise do Comportamento de Fundações Superficiais Submetidas a Carregamentos Excêntricos em um Solo Residual**. Dissertação (mestrado). Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre/RS. 2021.

SANTOS, L. D. F. dos. **Estudo do comportamento do solo melhorado com cimento**. Trabalho de conclusão (Graduação). Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal Fluminense – UFF. Niterói/RJ. 2017.

SARTORI, G. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão**. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Campo Mourão/PR, 2015.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. vol.1. ed.2. São Paulo: Pini, 2007.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. Volume II, 2 ed. São Paulo: Ed. PINI. 2001. 671 p.

SILVA, M. F da. **Estudo comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

SILVA, M. F. Estudo da **Estabilização com Cal de um solo Laterítico e um solonão Laterítico**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos — Universidade de São Paulo, São Carlos. 2016.

SOUSA, A. T.de. **Estudo de parâmetros de dois tipos de solos característicos do Distrito Federal estabilizados com cal**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Brasília - UniCEUB, Brasília, 2013.

SOUZA, A. N. S. de. **Estudo de Mistura Solo-Cal para Base de Pavimento Rodoviário**. Trabalho de Curso (TC) apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil do UniCEUB - Centro Universitário de Brasília. Brasília/DF, 2014.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Mecânica dos Solos na Prática da Engenharia**. Tradução de A. J. C. Nunes e M. L. C. Campello. 1. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro técnico, 1962.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S.; CINCERRE, J. R.; SERRZA, P.R.M.; ZUPPOLINI, A.N. **Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas, Bases Alternativas com Solos Lateríticos**. São Paulo. 2007.

VILLIBOR, D. F; NOGAMI, J. S. **Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas: Bases alternativas com solos lateríticos** Gestão de Manutenção de Vias Urbanas. 3. ed. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.