

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

LAÍS LOMBA LARA

**MATERIAIS PRODUZIDOS POR PROCESSOS SEM QUEIMA: CONSIDERAÇÕES
SOBRE POSSÍVEIS EFEITOS DA ATIVAÇÃO POZOLÂNICA E DA ATIVAÇÃO
ALCALINA**

**Ilha Solteira
2021**

LAÍS LOMBA LARA

**MATERIAIS PRODUZIDOS POR PROCESSOS SEM QUEIMA: CONSIDERAÇÕES
SOBRE POSSÍVEIS EFEITOS DA ATIVAÇÃO POZOLÂNICA E DA ATIVAÇÃO
ALCALINA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
Unesp como parte dos requisitos para obtenção
do grau de Engenheiro Civil;

Nome do orientador:

Prof. Dr. Marco Antonio de M. Alcantara

FICHA CATALOGRÁFICA

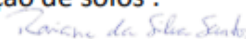
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

L318m Lara, Laís Lomba.
Materiais produzidos por processos sem queima: considerações sobre
possíveis efeitos da ativação pozolânica e da ativação alcalina / Laís Lomba
Lara. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
66 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2021

Orientador: Marco Antonio de M. Alcantara
Inclui bibliografia

1. Atividade pozolânica. 2. Ativação alcalina. 3. Estabilização de solos .


Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRUB-8 - 9999

Laís Lomba Lara

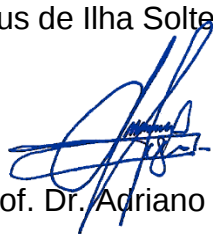
**Materiais produzidos por processos sem queima: Considerações
sobre possíveis efeitos da ativação pozolânica e da ativação alcalina**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao
Curso de Graduação em Engenharia Civil, da
Faculdade de Engenharia da Universidade
Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho",
Campus de Ilha Solteira

Aprovado em: 12/08/2021

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Marco Antônio de Moraes Alcantara
UNESP – Campus de Ilha Solteira (Orientador)



Prof. Dr. Adriano Souza

UNESP – Campus de Ilha Solteira



Prof. Dr. Artur Pantoja Marques
UNESP – Campus de Ilha Solteira

Ilha Solteira
12/08/2021

AGRADECIMENTOS

Sou eternamente grata a minha mãe e ao meu pai, minha fortaleza e fonte de incentivo, por acreditarem em mim e por estarem sempre presentes ao longo de toda essa jornada, superando os inúmeros desafios. Também agradeço ao meu irmão gêmeo e a minha avó, por todo o suporte. Um agradecimento especial ao meu avô, que não está mais entre nós, mas que sempre me apoiou e tenho certeza que aonde quer que ele esteja, ele está muito orgulhoso de mim.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Marco Antônio de Moraes Alcantara, por todos os ensinamentos e experiências, por sempre me guiar em busca do conhecimento e por me ajudar a tornar esse projeto uma realidade.

Também agradeço à Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Campus de Ilha Solteira, a todos os professores (as) do meu curso e a todos os técnicos (as) do laboratório de Engenharia Civil, pela alta qualidade de suas aulas e por não medirem esforços para transmitirem seus conhecimentos.

Também agradeço à Associação Atlética Acadêmica de Ilha Solteira, por todas as experiências que eu vivi com o esporte e por me dar a oportunidade de fazer parte do time de futsal feminino, que foi uma família para mim. Além disso, agradeço à Alicerce Empresa Júnior de Engenharia Civil, que me fez ter contato com a engenharia na prática ainda dentro da faculdade, o que fez eu me apaixonar ainda mais pela profissão.

A todos os meus amigos e amigas da graduação, por compartilharem todos os desafios com muita parceria e que fizeram tudo ficar mais divertido. Inclusive, a minha companheira de vida, que sempre esteve presente em todos os momentos. E também às minhas primas e às amigas da minha cidade, que sempre estiveram do meu lado.

Por fim, sou grata a Deus, por me guiar no caminho da fé.

RESUMO

O estudo tem por finalidade analisar os processos de estabilização química de solos com a cal e com o hidróxido de sódio, buscando as possibilidades de encontrar o estabilizante mais adequado para cada tipo de solo e as possíveis sinergias entre os processos. Foram utilizados três tipos de solos do município de Ilha Solteira e foram adotados os teores de 8% de cal e 1%, 2% e 3% de hidróxido de sódio, em misturas dadas por: (I) um só tipo de estabilizante, seja a cal ou o hidróxido de sódio, e (II) com os dois tipos de estabilizantes reunidos conjuntamente. Para isso, foram levadas em consideração a caracterização dos solos, juntamente com as propriedades geotécnicas e as relativas à composição e à atividade química, tais como: a granulometria, os limites de Atterberg, os parâmetros de compactação, os teores de matéria orgânica, de ferro e de alumínio, além da acidez potencial, da saturação de bases e do pH. Além disso, foram considerados os resultados mecânicos relativos aos ensaios de compressão simples, tomados aos 90, 180, 365 e 545 dias de cura. Os solos utilizados foram dos tipos: Argissolo, Latossolo vermelho amarelo e Latossolo vermelho escuro, identificados neste trabalho por TT, LT e R, respectivamente. Por fim, observou-se que diferentes tipos de solos foram promissores de modo preferencial para com diferentes tipos de estabilizantes, quando considerados o uso de um só deles separadamente, bem como, quando reunidos, foi possível observar sinergia, em particular para o caso do solo LT, e o caráter antagônico para o solo TT.

Palavras-chave: atividade pozolânica; ativação alcalina; estabilização de solos.

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the most adequate stabilizer for each type of soil by investigating soil stabilization with quicklime and sodium hydroxide. Two types of mixtures were evaluated: I) with only one stabilizer, either quicklime or sodium hydroxide; and II) with both stabilizers. Quicklime content was at 8%, while sodium hydroxide was used at 1%, 2% and 3%. The analysis included soil characterization; geotechnical properties; granulometry; Atterberg limits; compaction parameters; organic matter, iron and aluminium content; potential acidity; base saturation; pH; and concrete compression test mechanical results at 90, 180, 365 and 545 days of curing time. Three types of soil from the municipality of Ilha Solteira were used: Ultisol (TT), Yellow-Red Oxisol (LT) and Dark-Red Oxisol (R). Results show that each type of soil works better with a single type of stabilizer. When both stabilizers are used together, the best synergy happens particularly with LT soil; the opposite happens with TT soil.

Keywords: pozzolanic activity; alkaline activation; soil stabilization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de aplicação do solo-cimento: tijolos	21
Figura 2 – Prensa manual	22
Figura 3 – Sistema de aplicação do solo-cimento: parede monolítica.....	23
Figura 4 – Sistema de aplicação do solo-cal: pavimentação.....	28
Figura 5 – Estabilização de solos com 8% de cal, variação com o tipo de solo e com o tempo	42
Figura 6 – Estabilização com o NaOH no solo tipo LT, variações com o tempo	43
Figura 7 – Estabilização com o NaOH no solo tipo TT, variações com o tempo	44
Figura 8 – Estabilização com o NaOH no solo tipo R, variações com o tempo.....	44
Figura 9 – Estabilização mista no solo tipo LT, variações com o tempo	46
Figura 10 – Estabilização mista no solo tipo TT, variações com o tempo	46
Figura 11 – Estabilização mista no solo tipo R, variações com o tempo	47
Figura 12 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo LT, com 90 dias de cura.....	48
Figura 13 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo TT, com 90 dias de cura.....	49
Figura 14 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo R, com 90 dias de cura.....	49
Figura 15 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo LT, com 180 dias de cura.....	50
Figura 16 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo TT, com 180 dias de cura.....	50
Figura 17 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo R, com 180 dias de cura.....	51
Figura 18 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo LT, com 365 dias de cura.....	51
Figura 19 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo TT, com 365 dias de cura.....	52

Figura 20 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo R, com 365 dias de cura.....	52
Figura 21 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo LT, com 545 dias de cura.....	53
Figura 22 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo TT, com 545 dias de cura.....	53
Figura 23 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo R, com 545 dias de cura.....	54
Figura 24 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo LT, com 90 dias	55
Figura 25 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo TT, com 90 dias	56
Figura 26 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo R, com 90 dias	56
Figura 27 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo LT, com 180 dias	57
Figura 28 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo TT, com 180 dias	57
Figura 29 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo R, com 180 dias	58
Figura 30 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo LT, com 365 dias	58
Figura 31 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo TT, com 365 dias	59

Figura 32 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo R, com 365 dias	59
Figura 33 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo LT, com 545 dias	60
Figura 34 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo TT, com 545 dias	60
Figura 35 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo R, com 545 dias	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição granulométrica dos solos.....	35
Tabela 2 – Índices de Atterberg para os solos avaliados	35
Tabela 3 – Parâmetros de compactação para os solos sem adição de cal.....	36
Tabela 4 – Parâmetros de compactação para os solos com adição de 8% de cal.....	36
Tabela 5 – Análise química dos solos estudados sem aditivos LT, TT, e R.....	36
Tabela 6 – Teores de Cal e de Hidróxido de sódio e os valores de umidade ótima adotados (solo LT)	37
Tabela 7 – Teores de Cal e de Hidróxido de sódio e os valores de umidade ótima adotados (solo TT)	37
Tabela 8 – Teores de Cal e de Hidróxido de sódio e os valores de umidade ótima adotados (solo R)	37
Tabela 9 – Valores da resistência à compressão simples com o uso da cal hidratada (MPa)	40
Tabela 10 – Valores da resistência à compressão simples com o uso do hidróxido de sódio (MPa).....	40
Tabela 11 – Valores da resistência à compressão simples com o uso da cal hidratada e do hidróxido de sódio (MPa).....	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS	15
3. REVISÃO DE LITERATURA	16
3.1. MECANISMOS DE ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA: CONTEXTOS DE UTILIZAÇÃO E TECNOLOGIAS APROPRIADAS.....	16
3.1.1. Solo-Cimento	16
3.1.2. Solo-cal.....	23
3.1.3. Solo-hidróxido de sódio.....	29
3.2. SUSTENTABILIDADE	31
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4.1. ASPECTOS GERAIS.....	32
4.2. ESTRATÉGIA DO TRABALHO.....	33
4.3. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS.....	34
4.4. VALORES DOS TEORES DE ADITIVOS E TEORES DE UMIDADE ADOTADOS.....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS.....	39
5.2. COMPORTAMENTO MECÂNICO	39
5.2.1. Avaliação das propriedades mecânicas com o uso da cal hidratada ..	39
5.2.2. Avaliação das propriedades mecânicas com o uso do hidróxido de sódio	40
5.2.3. Avaliação das propriedades mecânicas com o uso da cal e do hidróxido de sódio	41
5.2.4. Análise particular para cada tipo de estabilização apresentados	41
5.3. AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SINERGIA ENTRE OS TIPOS DE ADITIVOS	47
5.3.1. Comportamento médio, comportamento do processo misto e ativação alcalina.....	48
5.3.2. Comportamento do processo misto, comportamento pozolânico e ativação alcalina	55

5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS DESEMPENHOS REFERENTES AOS TIPOS DE SOLO E ÀS PROPOSTAS DE ESTABILIZAÇÃO.....	62
6. CONCLUSÃO	64

1. INTRODUÇÃO

A prática da estabilização de solos é bastante antiga, havendo referências na literatura de que ela seja milenar, e que tenha sido utilizada como recurso técnico, ainda que sob condições primitivas, durante o desenvolvimento de civilizações passadas (ALCANTARA, 1995).

Ainda de acordo com Alcantara (1995), nos tempos recentes, com o desenvolvimento científico e tecnológico, o assunto tem recebido uma nova caracterização, principalmente com o auxílio dos recursos proporcionados pela ciência do solo, ciências básicas e da engenharia, mais especificamente de suas subáreas como a Pedologia, a Química, a Físico-Química e a Mineralogia dos Solos. O conceito de 'estabilização de solos', no presente, compreende todo tipo de melhoria que se pode dar a um solo, com um fim específico. Isto quer dizer que um dado solo pode estar 'estabilizado' quando se analisa uma propriedade, e não o sendo para o caso de uma outra propriedade (PINTO, 1983).

A estabilização de solos pode ser efetuada por métodos diversos, dentre eles a estabilização mecânica, a granulométrica e a química, por exemplo. Isso pode ser feito, otimizando-se as condições de massa e o esqueleto granular ou ainda promovendo a cimentação, respectivamente. Desta maneira, este assunto pode ser explorado para a fabricação de materiais de construção.

Dentre os processos de estabilização química se pode distinguir os proporcionados pela incorporação de elementos de natureza alcalina ao solo, como a cal ou o hidróxido de sódio. Alcantara (1995) e Segantini e Alcantara (2017) apresentam três mecanismos da estabilização solo-cal, sendo eles: (I) a floculação, fenômeno a curto prazo de influência de natureza físico-química, o qual pode interferir nos índices de Atterberg e nos parâmetros de compactação dos solos, (II) a dissolução e a liberação de alumino-silicatos à solução do solo, em decorrência do ataque alcalino e (III) as reações pozolânicas, as quais ocorrem a longo prazo.

A literatura clássica preconiza os solos de clima temperado como os mais promissores para a estabilização com a cal, em decorrência de apresentarem predominância de minerais tipo 2:1 e natureza não ácida. Não obstante a isso, Alcantara (1995) apresenta resultados promissores para solos tropicais de Ilha Solteira-SP, quando

considerados três tipos de solos: o Argissolo, o Latossolo vermelho amarelo e o Latossolo vermelho escuro. O desempenho em termos de valores máximos alcançados em 28 dias de cura se deu na seguinte ordem: Argissolo, Latossolo vermelho amarelo e Latossolo vermelho escuro. O Latossolo vermelho escuro, embora este apresentasse a maior porcentagem de argila (o mais rico em argilo-minerais), apresentava também o maior teor em óxidos de ferro e de alumínio, e matéria orgânica, que são inibidores das reações solo-cal.

Mesmo diante dos valores nominais alcançados pelos materiais de solo-cal de Ilha Solteira, outras alternativas podem ainda ser implementadas, no sentido de incrementar os valores de resistência mecânica, como a incorporação de materiais pozolânicos, apresentados em Segantini e Alcantara (2017). Uma outra ação no sentido de melhorar o processo pozolânico é a utilização conjunta da cal e de um outro aditivo auxiliar, como um que possa atuar com a sua alcalinidade. Thornburn e Mura (1969), citado em Alcantara (1995), apresentam como aditivos auxiliares o uso do hidróxido de sódio (NaOH) e do hidróxido de potássio (KOH).

De modo geral, segundo Thornburn e Mura (1969), os componentes químicos atuam provavelmente a partir das seguintes formas: (I) na formação de compostos cimentantes intermediários com elementos do solo, a partir dos quais ocorrem a liberação ou o desencadeamento de novas reações químicas, de modo a que se obtenham produtos de neo-formações na reação global; (II) como catalisadores das reações solo-cal.

À propósito, com relação ao uso de NaOH para estabilização de solos, Ingles e Metcalf (1973) apresentam os resultados de uma experiência realizada com solos lateríticos da Índia, com desempenho surpreendente, onde o valor da resistência mecânica, medida por meio de ensaio de compressão simples, apresenta ganhos de resistência mecânica com relação ao tempo de até 8,0 MPa após 90 dias de cura.

Conforme os autores, o NaOH apresenta reação favorável em solos ricos em caulinita e alumínio, e fraco desempenho nos solos ricos em montmorilonita. Um mecanismo de estabilização proposto consiste no seguinte: (I) degradação da estrutura do argilomineral pelo ataque alcalino, resultando como produtos de degradação, o silicato e o aluminato de sódio, respectivamente; (II) os últimos se precipitam com a formação de

óxidos hidratados de alumínio, que preenchem poros e promovem cimentação, com aumento da massa específica aparente. Em tempos mais recentes, este processo tem sido denominado como “ativação alcalina”.

Segundo Longui (2015), o processo de ativação alcalina requer a presença de um ativador e de um precursor, sendo que o primeiro é dado por uma base ou por um sal básico, e o segundo é dado por um elemento passivo de receber o ataque alcalino, normalmente à base de alumino-silicatos. Estudos têm sido realizados com precursores à base de escória ou de cinzas, com a obtenção de produtos diversos. Neste trabalho, se considera os argilo-minerais do solo como possíveis precursores.

Aflitos e Ferreira (1986), consideram que o uso de cal e de NaOH na estabilização de solos lateríticos contribuiu para o aumento da resistência mecânica da mistura, quando considerados o uso da cal ou do NaOH somente. Advertem os autores que, para teores mais elevados do NaOH, acima de 3%, podem ser desencadeadas reações exotérmicas violentas, as quais podem conduzir à desagregação do material.

Em pesquisa realizada com solos de Ilha Solteira-SP, Alcantara et al (2008) apresentam um estudo envolvendo o uso da cal e do hidróxido de sódio. Os valores se deram preferencialmente maiores para com o uso da cal. Sendo que para com o uso do hidróxido de sódio, encontrou-se valores favoráveis preferencialmente aos solos Latossolo vermelho escuro (2,76 MPa), Latossolo vermelho amarelo (2,11 MPa) e Argissolo (1,35 MPa), quando considerados os teores de 1% com relação à massa do solo seco. Destaca-se que se verificou um desempenho superior para o caso do Latossolo vermelho escuro, embora este tenha sido o menos favorável para o caso da cal.

Verificou-se também que houve casos de sinergia para os dois tipos de estabilizantes.

Diante das possibilidades de sinergia entre os dois tipos de aditivos, verificada através dos resultados de Alcantara et al (2008), propõe-se um estudo variando diferentes teores de cal e de hidróxido de sódio, para solos selecionados, de modo a melhor compreender o papel dos aditivos estabilizantes de solo.

2. OBJETIVOS

Verificar a influência da adição da cal e do hidróxido de sódio, em diferentes teores, quando aplicados isoladamente e conjuntamente, em misturas com três tipos de solos tropicais. Além disso, identificar a melhor eficácia desses aditivos e estabelecer recomendações para com o uso racional em aplicações tecnológicas.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. MECANISMOS DE ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA: CONTEXTOS DE UTILIZAÇÃO E TECNOLOGIAS APROPRIADAS

Com relação à estabilização química dos solos, destacam-se dois tipos de processos: os de ação aglomerante e os de interação com o solo. O primeiro é baseado no preenchimento dos vazios e na aglutinação das partículas, conhecido como o solo-cimento. Já o segundo, é feito por meio de um ataque alcalino e uma posterior disponibilização de elementos minerais do solo e sua recombinação na formação de produtos cimentantes, conhecido como solo-cal ou também, o solo com adição de hidróxido de sódio.

3.1.1. Solo-Cimento

a) Definição e histórico

Solo-cimento é o produto que resulta da mistura íntima de solo, cimento portland e água, o qual o cimento atua por ação aglomerante onde as partículas do solo agem como microagregados. Assim, após sua compactação na umidade ótima, o solo sofre reações de hidratação do cimento e adquire resistência.

Como dito, o solo-cimento é o resultado de um tipo de estabilização feita por processo de ação aglomerante, o qual tem por finalidade unir os materiais. Assim, as reações químicas iniciam-se com o processo de hidratação do cimento, com a posterior formação de uma pasta, e tem como produtos finais os cristais de etringita (trissulfoaluminato de cálcio hidratado), a portlandita (Ca(OH)_2), a alita (C_3S), a belita (C_2S) e o monossulfualuminato de cálcio hidratado. Dentre estes, os silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) são os principais responsáveis pelo ganho de resistência, onde a alita é responsável pela resistência inicial e a belita pela resistência a longo prazo. Além disso, a portlandita (hidróxido de cálcio) pode reagir com materiais pozolânicos disponíveis no solo, e produzir mais silicato amorfo cimentante, diminuindo os espaços vazios e aumentando a resistência do solo (MAKUSA, 2013; MEHTA et al., 1994).

O cimento é um aglomerante hidráulico, ou seja, um estabilizante que depende apenas da presença da água. Devido a isso, com relação ao tempo, a evolução mecânica

do solo-cimento está relacionada à cinética da hidratação do cimento e o consequente ganho de resistência. Esta vantagem tende a ser maior conforme o teor de cimento com relação à massa do solo-seco.

De acordo com Pinto (1985), os fatores que afetam as propriedades do solo-cimento são: (I) o tipo de solo, (II) o teor de cimento, (III) o teor de umidade e (IV) o grau de compactação, além da homogeneidade da mistura, e do tempo de cura. Exemplificando, o cimento requer vazios na estrutura do solo para abrigar a pasta e, neste caso, os solos arenosos são os mais eficazes. Já para o caso dos argilosos, o solo-cimento é menos econômico, devido a elevada superfície específica do solo.

Segundo Andrade Filho (1989), a concepção do solo-cimento teve origem em Salzburg, na Áustria, em 1917, mas só em 1932, foram apresentados relatos dos primeiros trabalhos cientificamente controlados, através da utilização na pavimentação de 17000 m² em Johnsonville, na Carolina do Sul. A partir daí, passou a normalizar os ensaios com o solo-cimento.

Já no Brasil, o interesse se deu início em 1936, por meio da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), que levou à pavimentação do aeroporto de Petrolina (PE) com o uso do solo-cimento em 1941.

A partir de 1960, o solo-cimento passou a receber grande aceitação na pavimentação de vias urbanas, de rodovias e aeroportos, de pátios industriais e áreas para estacionamento de veículos. Além disso, em revestimento de barragens de terra e de canais de irrigação, e na fabricação de blocos e tijolos para alvenaria de vedação.

De acordo com Segantini e Alcantara (2017), o solo-cimento pode ser classificado em três categorias: (I) o solo-cimento compactado, (II) o solo-cimento plástico e (III) o solo-cimento autoadensável. No primeiro caso, é feita a compactação, buscado alcançar a máxima densidade aparente de acordo com o teor ótimo de umidade e a energia de compactação, através de prensas para a fabricação dos tijolos, podendo ser manuais ou automatizadas. Já no segundo caso, é compactado a baixos níveis de energia, o qual pode ser produzido em betoneiras e moldadas com o auxílio de vibração. Para o terceiro caso, esta variante tem surgido nos últimos anos, como aquele que é capaz de se adensar pelo seu próprio peso. Neste caso, as misturas se encontram em estado fluido, alcançado pelo uso de superplastificantes.

Da possibilidade de redução de custos, e dos aspectos relacionados à preservação ambiental, se contribuiu para o aumento do interesse pelas construções em particular o uso de tijolos modulares.

Sobre a redução de custos, temos que as regularidades das dimensões dos tijolos modulares podem permitir que se dispense o uso de argamassa de assentamento. Também, pode ser dispensado o uso de argamassa de regularização (emboço), e o chapisco. Mediante aspectos construtivos, pode não ser preciso o embutimento das caixas de passagem e das tubulações para instalações elétricas, devido aos furos dos tijolos, permitindo a passagem da fiação (na vertical), e o formato das canaletas (na horizontal). Assim, dispensam-se os rasgos nas paredes, evitando desperdício e acelerando o cronograma da obra. Dito isso, conta-se com possível economia de até 30% no custo final das construções, tomado com relação às técnicas construtivas convencionais.

Já sobre o aspecto ambiental, que é uma importante vantagem do uso do solo-cimento, tem-se que o solo é um material abundante na natureza, principalmente em regiões de clima tropical, sendo que é possível utilizar o do próprio local da construção, reduzindo o custo com transporte. Além disso, é o material que consome menos energia na sua fabricação e aplicação na obra.

Considerando o fluxo de materiais e energia na fase de extração, transporte e fabricação, cabe ressaltar que a diminuição das distâncias de transporte pode implicar favoravelmente na diminuição ou dispensa do consumo de combustíveis fósseis. Já com relação ao cimento, sabe-se que este é produzido a partir da queima de materiais calcários e argilosos para se produzir o clínquer de Portland. Sendo que isso deve ser um aspecto a ser considerado, visto que desta queima são emitidas quantidades de gás carbônico à natureza, devido à combustão e à eliminação do calcário. Uma maneira de se mitigar o problema é através do uso de cimentos que impliquem em menor consumo de poluentes, os quais apresentam adições minerais em sua composição, que são introduzidos para a moagem conjunta com o clínquer. Ainda assim, cabe considerar que durante a fabricação do solo-cimento se recorre a formas de energias renováveis.

b) Materiais componentes do solo-cimento

Primeiramente, temos o solo, que é o material com maior proporção na mistura, o qual deve ser utilizado para que haja economia no consumo do cimento. Quanto à granulometria, os arenosos são os solos mais adequados, visto que possuem grãos de areia grossa e pedregulhos, ou seja, materiais inertes que favorecem a diminuição de maiores quantidades de cimento, de forma a aglomerar os grãos menores. Porém, também é necessário que o solo possua um teor mínimo de fração fina para garantir a resistência inicial do solo-cimento compactado. Então, por isso existem faixas granulométricas consideradas ideais.

Além do solo, temos o cimento, sendo que o cimento portland composto (CP II) é o mais usado.

c) Dosagem do solo-cimento

A dosagem do solo-cimento é baseada em três variáveis fixas, sendo elas: (I) a quantidade de cimento, (II) a quantidade de água e (III) a massa específica aparente seca máxima.

A PCA (Portland Cement Association) dispõe de uma norma geral para a dosagem do solo-cimento, que consiste em: (I) identificação e classificação do solo, (II) escolha do teor de cimento para o ensaio de compactação, (III) execução do ensaio de compactação, (IV) escolha dos teores de cimento para o ensaio de durabilidade, (V) moldagem dos corpos-de-prova para o ensaio de durabilidade, (VI) execução do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem e (VII) escolha do teor de cimento adequado em função dos resultados obtidos. Porém, devido a essa norma exigir muito tempo para realizar os ensaios, os resultados foram correlacionados e apresenta-se uma norma simplificada, que conta com as seguintes operações: (I) ensaios preliminares do solo, (II) ensaio de compactação do solo-cimento, (III) determinação da resistência à compressão simples aos sete dias e (IV) comparação entre a resistência média obtida aos sete dias e a resistência admissível para o solo-cimento produzido com o solo em estudo.

Por fim, segundo o Estudo Técnico ET-35 da ABCP (1986), a dosagem do solo-cimento deve ser feita através de ensaios de laboratório e baseados nas possíveis aplicações do material.

d) Sistemas de aplicação

Fundações: o solo-cimento é um material que pode ser aplicado em fundações diretas de obras de pequeno porte. Porém, deve-se ter cuidado quando tem a presença de solos superficiais colapsíveis, tomando medidas para evitar a infiltração de água no solo, como a impermeabilização de áreas molhadas e o próprio escoamento da água.

Um exemplo foi a construção do Hospital Adriano Jorge, em Manaus (AM), em 1950. Sendo que as fundações foram feitas em sapatas corridas com o solo-cimento compactado em valas.

Além disso, foram feitos ensaios em estacas de solo-cimento, representando uma alternativa viável para aplicação em fundações profundas submetidas a pequenas cargas. Porém, o projeto de fundação deve ser compatível com a carga aplicada, o diâmetro da estaca, seu comprimento, as características do solo e o teor de cimento ideal.

Ainda assim, em ensaios feitos no Campo Experimental da UNESP, em Ilha Solteira, foi verificado que as estacas de solo-cimento apresentam menor capacidade de carga do que as de concreto. Mas, isso não impede o uso das estacas de solo-cimento com segurança, desde que as cargas de trabalho sejam compatíveis com a capacidade da fundação e a tensão admissível do material.

Tijolos e blocos para alvenaria: O solo-cimento é uma alternativa para a construção da alvenaria em habitações e outras edificações. As vantagens vão desde a fabricação até a aplicação no canteiro de obras, sendo que os equipamentos utilizados são de baixo custo, a resistência à compressão é maior com relação ao tijolo de barro cozido e a qualidade é superior, porque apresenta textura uniforme, dimensões regulares e superfícies planas.

Além disso, são mais viáveis quanto ao ponto de vista ecológico, devido a não necessidade de passar pelo processo da queima. Sendo que o mesmo consome grandes quantidades de madeira ou óleo combustível, como acontece na produção dos tijolos convencionais nas olarias.

Existem diversos modelos de prensas para a fabricação dos tijolos, podendo criar diferentes tipos de moldes de tijolos, sendo eles maciços, modulares com encaixe, canaletas, placas de revestimento e elementos decorativos. Dito isso, é muito comum o aprimoramento dos equipamentos para a fabricação dos tijolos, o que contribui para a racionalização das técnicas de construção, permitindo projetos com menor custo e maior qualidade.

Um exemplo disso são os tijolos de encaixe, que apresentam as seguintes vantagens: execução das edificações com aplicação das técnicas de alvenaria estrutural; redução da necessidade de rasgos nas paredes e do consumo de tubulações nas instalações hidráulicas e elétricas, que podem ser embutidas nos furos dos tijolos; redução da necessidade de formas, porque os furos coincidentes dos tijolos possibilitam a execução de canaletas, vergas e colunas grauteadas; execução de paredes com tijolos aparentes, dispensando a utilização de argamassas de aderência, emboço e reboco; aplicação de argamassa de gesso ou massa única diretamente sobre os tijolos; possibilidade de assentamento de azulejos sem necessidade de chapisco e massa grossa; e possibilidade de dispensa do uso de argamassa de assentamento dos tijolos.

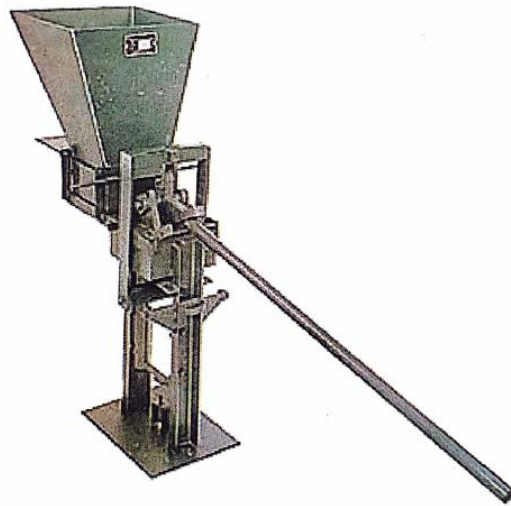
Um exemplo de aplicação em tijolos com o auxílio da prensa manual, está apresentado nas Figuras 1 e 2, a seguir.

Figura 1 – Sistema de aplicação do solo-cimento: tijolos



Fonte: SEGANTINI, A.A; ALCANTARA, M.A.M (2017).

Figura 2 – Prensa manual



Fonte: SEGANTINI, A.A; ALCANTARA, M.A.M (2017).

Parede monolítica: o solo-cimento é compactado dentro de formas, em blocos horizontais sucessivos. Faz-se a compactação na umidade ótima, o que permite a imediata desforma do bloco recém-confeccionado e assim, possibilita a execução dos próximos blocos.

O Manual de Construção do Solo-Cimento do CEPED (1984), explica o processo de construção das paredes monolíticas, assim como o critério para escolha do solo e a dosagem a ser utilizada.

O sistema construtivo em paredes monolíticas apresenta as seguintes vantagens: não há necessidade de confecção dos tijolos e blocos, possibilitando economia do custo da mão de obra; não há necessidade de grandes áreas para fabricação, cura e estocagem dos materiais; é possível utilizar o solo do próprio local, reduzindo custos com transporte; dispensa uso de revestimento; e pode reduzir o custo da parede em torno de 40% comparado ao da alvenaria convencional.

Um exemplo de aplicação da parede monolítica está apresentado na Figura 3, a seguir.

Figura 3 – Sistema de aplicação do solo-cimento: parede monolítica



Fonte: SEGANTINI, A.A; ALCANTARA, M.A.M (2017).

3.1.2. Solo-cal

O solo-cal é uma interação do solo com a cal, com a presença de reações físicas e químicas que ocorrem entre a cal e os constituintes do solo. Elas podem ocorrer de duas formas: por modificação ou estabilização. Sendo que a primeira, ocorre devido à troca de cátions de cálcio, fornecidos pelo hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , por cátions presentes no solo argilomineral, estimulada por um ambiente de alto pH e pelo sistema cal-água. Esse processo também é chamado de troca catiônica e é parcialmente responsável pela mudança da textura do solo, ocasionada pela floculação de partículas de argila (LITTLE, 1999).

Já a segunda, é um processo de longo prazo, proveniente da formação de silicatos de cálcio hidratados e aluminatos de cálcio hidratados, produzidos a partir das reações pozolânicas entre o cálcio da cal e os aluminatos e silicatos solubilizados no solo argilomineral. Estas reações dependem de ambientes com alto pH e também da reatividade do solo. Além disso, podem proporcionar a melhoria da capacidade de suporte e resistência mecânica do solo (LITTLE, 1999).

a) Matérias-primas básicas: solo e cal

Assim como no solo-cimento, o solo também é o material que entra em maior quantidade no solo-cal. No entanto, é imprescindível conhecer suas características mineralógicas, granulométricas e a sua acidez, visto que são propriedades que influenciam diretamente nos mecanismos de estabilização química do solo-cal.

O solo é um sistema em que suas partículas são dotadas de cargas envoltas por componentes diversos, conhecido como “solução do solo”. As atividades dessa “solução do solo” influem no comportamento macroscópico do solo e dependem do tipo de mineralogia predominante e também do tipo de íons presentes.

Dentro do contexto apresentado, é importante a atividade físico-química dos solos. Neste sentido, as estruturas dos minerais podem propiciar o surgimento de cargas elétricas em suas superfícies devido às substituições isomórficas. Essas substituições ocorrem quando um elemento químico substitui outro na estrutura, fazendo com que a força de atração eletrostática final seja superior àquela proporcionada pelo elemento de origem, restando, assim, cargas não satisfeitas na estrutura do mineral.

De acordo com a ciência dos solos, o solo é um corpo com dimensão espacial dotado de diferentes regiões (horizontes), definindo um perfil com a profundidade do terreno, ao longo de sua evolução. Eles são classificados em “A” (região superficial do solo, em que ocorrem os processos de mineralização e humificação da matéria orgânica), “B” (horizonte de acumulação de nutrientes e de bases trocáveis do solo: Ca^+ , Na^+ e K^+) e “C” (conhecido como “saprolito” - rocha podre - o qual consiste em um horizonte de alteração em que os minerais ainda guardam herança da rocha-mãe). Sendo que a espessura desses horizontes varia de acordo com o clima e o relevo do solo.

Por sua vez, a cal é resultante da calcinação de rochas calcárias ou dolomíticas, na qual se origina o óxido de cálcio ou o óxido de magnésio, constituindo-se estes a cal virgem. E através da hidratação da cal virgem, se obtém a cal hidratada, sendo que ambas podem ser utilizadas para a estabilização de solos.

b) Mecanismos de estabilização química dos solos com a cal

A estabilização química com a cal acontece por meio de mecanismos modificadores de sua estrutura, que podem ser de curto ou longo prazo. As de curto prazo mudam as condições de trabalhabilidade do material no estado fresco, o qual induz os solos à floculação, e provocam um pequeno aumento da umidade ótima e uma ligeira diminuição da massa específica aparente seca alcançada na compactação. Já as de longo prazo, consistem nos processos de cimentação do material, o qual contribui com o aumento da resistência mecânica e da rigidez, além da redução da impermeabilidade e da absorção dos solos. Sendo que isso acontece através de reações pozolânicas entre a cal hidratada e os argilo-minerais do solo.

Como já dito, as partículas finas dos solos apresentam cargas elétricas em suas superfícies, as quais são normalmente satisfeitas por íons presentes na solução do solo, como o íon K^+ e o Na^+ . A partir daí, forma-se um núcleo envolvido por uma nuvem de íons, conhecida como “Dupla Camada Difusa”, sendo um dos elementos contribuintes para as condições que induzem à dispersão ou à floculação dos solos. É um sistema onde os íons se dispõem em torno da partícula, de modo que exista um gradiente de concentração inversamente proporcional à distância do núcleo de carga.

De acordo com a teoria dos colóides, as partículas coloidais se encontram em constante movimento, denominado Movimento Browniano. O qual é um movimento que se estabelece através da atração das partículas e da repulsão entre elas. Porém, há um mecanismo de competitividade e de seletividade entre os possíveis íons presentes no meio, promovendo a satisfação das cargas presentes nas partículas não neutralizadas, de forma a se permitir um “complexo de trocas”, substituindo-se íons monovalentes por íons bivalentes.

O processo que reduz o índice de plasticidade do solo, é o da compressão da Dupla Camada Difusa, e a floculação dos solos. Isso acontece a partir das reações de troca iônica na superfície das partículas finas dos solos, em que os íons Ca^{2+} , bivalentes, por atenderem melhor os requisitos, substituem íons como os monovalentes de Sódio ou Potássio.

Sobre as reações a longo prazo, temos as pozolânicas, que ocorrem entre os elementos minerais solubilizados dos solos e a cal. Em níveis de alcalinidade promovidos

pela cal, os elementos minerais Sílica e Alumina estarão mais facilmente disponibilizados para a solução do solo. Por fim, o processo de reações pozolânicas entre os elementos minerais do solo e a cal, é realizado lentamente, e resulta no aumento da capacidade de resistência mecânica dos solos. E ainda, ele pode ser favorecido pela temperatura e pela difusão iônica da cal no solo.

Um outro processo químico inserido na tecnologia da cal é o da recarbonatação. No entanto, a cal deve atuar predominantemente em reação pozolânica com o solo, e menos via recarbonatação. De fato, considerando a compactação dos solos, se torna difícil o acesso do gás carbônico ao interior do material, para que a cal hidratada possa se recarbonatar, fato que justifica que a estabilização solo-cal se processe por meio de reações pozolânicas.

c) Critérios gerais para a escolha de solos potencialmente utilizáveis com a cal

Para que ocorram as reações pozolânicas, os solos devem possuir componentes reativos disponíveis, os quais são os alumino-silicatos. Eles são apresentados nas formas de minerais do tipo “1:1”, representados pela Caulinita e Halosita, ou “2:1”, representados pela Montmorilonita, Clorita e Vermiculita. O do tipo “1:1” são abundantes em solos tropicais, sendo que as duas unidades básicas compostas à base de Silício e Alumínio, dispõem-se solidárias de modo que o empacotamento seja maior e a superfície de exposição seja mínima, e não haja a presença de cargas não satisfeitas; isto resulta em um solo bastante estável do ponto de vista físico-químico. Além disso, os solos tropicais apresentam riqueza de oxi-hidróxidos de ferro e de alumínio.

Já os do tipo “2:1” constituem-se nas formas mais reativas, predominantes em solos de regiões temperadas ou com baixo grau de intemperismo. Sua estrutura mineralógica permite a ocorrência de cargas entre as lâminas de silício, de modo que esses minerais ficam sujeitos à interação com os elementos ativos do meio. Essas cargas são decorrentes de substituições isomórficas do Silício pelo Alumínio, por exemplo.

Assim, não é possível criar regras rígidas para a escolha dos solos.

d) Preparo das misturas de solo-cal

Para o preparo das misturas de solo-cal, faz-se o destorroamento do solo, o peneiramento e a mistura íntima com a cal. Sendo que a mistura é feita através de utensílios da construção civil, como enxadas e caixas de preparo de argamassa ou até betoneiras.

De acordo com as diferentes aplicações, o processo de mistura assume diferentes maneiras. Por fim, o cuidado que se deve ter é a proteção contra o contato direto do ar, para que não ocorra a possibilidade de recarbonatação da cal, antes que ela seja utilizada para os fins mais nobres: as reações pozolânicas.

e) Fatores tecnológicos do solo-cal

De acordo com Alcantara (1995), para serem feitos os estudos tecnológicos do solo-cal, devem ser consideradas as condições de compactação, as condições qualitativas da mistura e os fatores relativos à cura. Com relação à compactação, é importante para que se alcance a densidade desejada, a qual está relacionada com a umidade ótima do solo. Já com relação às condições qualitativas, temos: (I) o teor de cal, (II) o teor de umidade e o (III) o tipo de solo, quando se trata de mineralogia, composição, estrutura e granulometria. Por fim, com relação à cura, temos que os fatores que influenciam são as condições de umidade, a temperatura ambiente e o tempo de cura.

f) Sistemas de aplicação

Solo-cal para a fabricação de componentes de alvenaria: temos o uso de tijolos ou blocos de solo-cal e, como recurso para a fabricação do mesmo, usam-se as prensas.

Para isso, o solo é destorroado e passa por uma peneira de 2 mm a 3 mm. Assim, adiciona-se a cal, de acordo com o teor específico, e a água lentamente, até atingir a umidade desejada. Um detalhe importante é recobrir a mistura para que não haja a recarbonatação da cal, e para preservá-la para as reações pozolânicas.

Com relação aos requisitos de desempenho, temos: (I) a resistência mecânica, (II) a durabilidade, (III) estanqueidade e a (IV) a absorção limitada. Além disso, outro aspecto

interessante é a regularidade dimensional, resultante da prensagem, e também a fixação do revestimento, o qual o material apresenta bom desempenho quanto ao recebimento de chapiscos, argamassas e pintura. Por fim, ainda temos o conforto térmico, causado pela condutibilidade térmica do solo e o peso da construção, que contribuem para o seu desempenho termo-acústico.

Uso da cal como tratamento primário e construção de pavimentos: a estabilização solo-cal em pavimentos pode ser realizada em casos como reforço do solo do subleito, execução da própria base ou a melhoria do solo componente da base. Além disso, podem ser feitas reparações de pavimentos, e até tratamento primário para diminuição do índice de plasticidade em rodovias.

Para se obter os controles nos casos de estabilização de solos com a cal, temos técnicas como a curvatura e as dimensões do leito, a granulometria do solo, a distribuição da cal, a verificação pela variação do pH do leito, além dos ensaios de validação em obra feitos pela área de pavimentação.

Um exemplo de aplicação na pavimentação, está apresentado na Figura 4, a seguir.

Figura 4 – Sistema de aplicação do solo-cal: pavimentação



Fonte: SEGANTINI, A.A; ALCANTARA, M.A.M (2017).

Colunas solo-cal para a melhoria de propriedades geotécnicas e reforço: tem como objetivo melhorar as propriedades geotécnicas dos solos, tais como a resistência ao cisalhamento e a permeabilidade dos solos. Além disso, as vantagens ainda podem estar relacionadas com o aumento da capacidade de carga do terreno, a diminuição e o controle do recalque diferencial, e a aceleração da taxa de consolidação do terreno.

De acordo com Juran et al. (1989), faz-se a mistura do solo in situ com a cal através de um equipamento perfurador giratório, o qual é mergulhado no solo e a cal é forçada para dentro por meio do ar comprimido. Assim, afasta-se a broca de forma lenta para que possa permitir a mistura completa do solo com a cal e a compactação.

Esse processo das colunas solo-cal é similar ao de uma estaca quando a mesma é introduzida no solo, sendo que a principal diferença está na deformabilidade e na compressibilidade da inclusão.

3.1.3. Solo-hidróxido de sódio

a) Definição de ativação alcalina

É um processo de interação de materiais, o qual é caracterizado pelo ataque alcalino que resulta na degradação e solubilização de elementos inorgânicos. Assim, tem-se a posterior coagulação, condensação e cristalização interna, podendo surgir uma estrutura organizada e resistente.

Os materiais que podem sofrer o ataque alcalino, e a posterior reorganização em produtos cimentantes, têm sido conhecidos como os aluminossilicatos, o metacaulim, as cinzas volantes e as escórias. Além disso, têm-se as bases alcalinas que são o hidróxido de sódio, o hidróxido de potássio, e os sais básicos, como o silicato de sódio e alumínio.

Deste modo, têm-se os materiais que recebem o ataque alcalino, conhecidos como “precursores”, e os materiais que provocam o ataque alcalino, os quais são os “ativadores”.

b) História da concepção e do conceito acerca dos materiais alcalinamente ativados

De acordo com Torgal e Jalali (2009), a discussão sobre a ativação alcalina inicia-se na década de 40, na Bélgica, sendo que Purdon (1940) era a principal referência. Assim, segundo ele, a ativação alcalina era feita em duas fases, sendo que a primeira é conhecida como fase inicial com a liberação de sílica, alumina e hidróxido de cálcio. Já a segunda, é a fase posterior, onde ocorre a formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Dito isso, o hidróxido tinha a função de agir como catalisador do processo.

Glukhovsky (1959) procurou uma ligação entre a ativação alcalina e os materiais utilizados nas construções históricas tais como as pirâmides egípcias e as construções romanas. Uma observação feita foi com relação aos fatores quanto à resistência mecânica e à durabilidade dos materiais. Além disso, tem-se outro fato interessante quanto à natureza da microestrutura interna, que se assemelha com os produtos que ocorrem no mundo geoquímico, denominados por “zeólitas”.

Isto despertou a atenção de Davidovits (1979), e foram realizadas pesquisas que confirmaram que a estrutura formada pela ativação alcalina assume uma configuração espacial por meio da reunião de unidades minerais básicas, o qual ficou conhecida como “geopolímero”. Sendo que, o “geopolímero” é o produto final da ativação alcalina.

c) Os mecanismos da ativação alcalina

Os mecanismos de ativação alcalina são entendidos segundo alguns estágios. O primeiro estágio é o ataque alcalino, que resulta na dissolução do material e assim, disponibiliza-se elementos e substâncias minerais como a sílica e a alumina. Junto com a solução, tem-se também os cátions das bases. Dito isso, dentro do processo de dissolução, acontecem as rupturas das ligações Si-O-Si e Al-O-Al e assim, a posterior formação de oligômeros, a base de silicatos e de aluminatos. Por fim, esses produtos iniciais formados, estão sujeitos a formações estruturais.

Então, nos estágios seguintes, esses produtos tendem a se coagular, formar um gel e se condensarem e no final, ocorrer a cristalização a nível tridimensional.

De acordo com Duxson et al (2006), o mecanismo é feito com a gradativa saída de água do sistema com a formação do gel e por fim, a reorganização e o endurecimento.

3.2. SUSTENTABILIDADE

A construção civil impacta diretamente no crescimento e desenvolvimento do país, sendo o setor com papel fundamental para o atendimento das demandas básicas como de habitação e infraestrutura para fornecer serviços como saneamento básico, mobilidade, saúde e sistemas de energia. E ainda assim, influencia no surgimento de tecnologias e inovações.

Porém, além do uso excessivo de recursos naturais, é um dos setores que mais gera resíduos ao meio ambiente. De acordo com Oliveira (2002), a construção de edifícios compreende o consumo de elevadas quantidades de recursos físicos do planeta, visto que um metro quadrado de construção consome cerca de uma tonelada de materiais. Quando demolido o edifício, a composição básica de entulho das obras de construção civil varia segundo a procedência da obra.

Assim, atualmente, procuram-se medidas que visam o desenvolvimento sustentável, que de acordo com Salomão et al. (2018), é o “desenvolvimento em que a velocidade da inevitável agressão ao ambiente é menor do que a velocidade com que a natureza consegue reagir para compensar esses danos”. Ou seja, é a criação de ferramentas com o objetivo de diminuir os impactos ao meio ambiente causados pela construção civil.

Dentro do contexto, a estabilização química de solos é uma técnica que visa a sustentabilidade, minimizando os impactos ambientais, visto que é um processo sem queima, ou seja, não há a liberação de gás carbônico e nem o uso de eletricidade para a fabricação dos componentes. Além disso, pode-se utilizar o próprio solo do local como matéria prima, além de que este produto apresenta alto desempenho como o conforto térmico. Por fim, ainda resulta na não formação de subprodutos, além de que após a demolição, este pode retornar integralmente à natureza, o que pode gerar um equilíbrio maior.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. ASPECTOS GERAIS

A metodologia proposta para o trabalho consiste em: caracterização dos solos, tanto do ponto de vista das propriedades geotécnicas e de consistência, como do ponto de vista do comportamento físico-químico; reprodução dos corpos de prova de acordo com os parâmetros de compactação do solo e os teores de aditivos; cura dos corpos de prova; ensaios mecânicos de resistência à compressão simples; comparação e análise de resultados.

A caracterização dos solos do ponto de vista das propriedades geotécnicas e de consistência utilizados no experimento, foi dada conforme as seguintes prescrições: (I) a granulometria, de acordo com a NBR 7181, (II) os limites de Atterberg, com base nas NBR 6459:84 e NBR 7180:84, e (III) a identificação dos parâmetros de compactação para solos com e sem adição de cal, com base na NBR 7182:86.

Já a caracterização dos solos do ponto de vista do comportamento físico-químico, se deu de modo a determinar constituintes importantes para a química do solo, tais como: o conteúdo de óxidos de ferro e de alumínio, o conteúdo de matéria orgânica, a acidez potencial e o pH.

A moldagem e reprodução dos corpos de prova se deu por meio de compactação em equipamento miniatura, o qual foi aplicada a energia do Proctor normal, através de impacto, reproduzindo-se unidades experimentais em formatos cilíndricos de dimensões 50 x 50 mm.

A cura dos corpos de prova se deu em câmara úmida sujeita a temperatura média de 22°C e grau higrotérmico de aproximadamente 100%. Os corpos de prova permaneceram acondicionados em embalagem plástica durante os períodos de 90, 180, 365 e 545 dias, quando então, eram imersos em água por 24 horas e rompidos em prensa manual para avaliação de ensaios de CBR.

Os ensaios de resistência mecânica à compressão simples, foram realizados conforme a NBR 12025:2012; sendo que, esses valores foram dados como referência para a avaliação do desempenho na estabilização química.

4.2. ESTRATÉGIA DO TRABALHO

Para fazer a comparação e análise de resultados, parte-se do princípio de que o estudo propôs uma avaliação tecnológica de dois tipos de misturas: (I) individuais, que são os solos aditivados com a cal ou o hidróxido de sódio, separadamente, e (II) híbridas, que são os solos aditivados com a cal e o hidróxido de sódio, conjuntamente, caracterizadas pelo processo misto. Isso acontece de modo a se identificar o desempenho para a produção de materiais sem queima, curados e transformados pelo processo de estabilização química.

Por outro lado, tendo ocorrido o advento do covid-19, foram impostas condições sanitárias as quais trouxeram o impedimento de acesso de docentes e discentes ao laboratório. Em vista disso, decidiu-se utilizar de resultados prévios do acervo do pesquisador e orientador, obtido conforme o projeto de pesquisa desenvolvido durante o período de 2005 a 2008.

Serão abordados três tipos de solos, com a utilização da cal hidratada em valor constante de 8% para todos, e com o hidróxido de sódio que deverá variar entre 1 a 3% com relação à massa seca do solo. Para isso, são considerados os três tipos de solos conforme já citados: um do tipo Argissolo, identificado pelo apelido de “Torre de transmissão” (TT), outro do tipo Latossolo vermelho amarelo, apelidado por “Linha de transmissão” (LT) e o outro do tipo Latossolo vermelho escuro, apelidado por “Rotatória” (R), respectivamente. Sendo que os apelidos são dados conforme os seus locais de coleta.

Para os procedimentos de análise deste estudo, é necessário que se apresente algumas definições com respeito aos resultados obtidos, as quais estão relacionadas a seguir.

- a) **Ativação alcalina:** serão considerados com esta denominação, os resultados que são obtidos da estabilização de solos com hidróxido de sódio.
- b) **Ativação pozolânica:** serão considerados com esta denominação, os resultados alcançados pela interação da cal hidratada com o solo.
- c) **Valores médios de resultados:** são os valores médios dos resultados alcançados com o processo de atuação do hidróxido e da cal hidratada, quando

considerados separadamente. Neste caso, se procura tomar a relação matemática, sem considerar a possível interferência de um processo de estabilização sobre outro, ou seja, como se fossem independentes.

- d) **Processo misto:** resultados alcançados pela atuação conjunta do solo com os dois tipos de aditivos (casos de misturas híbridas).

Como apresentado na proposta de trabalho, a sistemática consiste em dois tipos diferentes de análise, sendo elas: (I) para cada um dos tipos de solos individualmente, se procede a análise em identificar o comportamento quando considerado um tipo de aditivo, seja o hidróxido de sódio nos teores de 1%, 2% e 3%, ou a cal hidratada em teor de 8%, com relação à massa de solo, e então, verificar seu desempenho, e (II) para os casos de misturas híbridas, verificar a influência da variação do teor de hidróxido de sódio, quanto à possível sinergia, bem como se existe sinergia. Sendo que, considera-se para caracterizar como sinergia, a ocorrência do fato de que os valores alcançados dos ensaios mecânicos para as misturas híbridas, sejam superiores aos valores médios dos resultados individuais realizados com cada tipo de mistura (cal ou hidróxido de sódio), ou que os valores apresentados para as misturas híbridas sejam efetivamente superiores aos casos das composições individuais.

Conforme explicitado em (II), usam-se dois critérios, sendo um para verificar as tendências de comportamento com base no valor médio, e o outro com base no comportamento efetivamente observado em laboratório.

Finalmente, se propõe identificar quando seria vantajoso o uso da mistura individual ou da mistura híbrida para cada tipo de solo.

4.3. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

Tendo em vista a importância das características dos solos em termos geotécnicos, físicos, de composição química, de mineralogia e atividade físico-química, é apresentada neste item, a caracterização referente aos três tipos de solos utilizados no experimento.

a) Composição granulométrica:

A composição granulométrica dos solos sem aditivos está apresentada na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1 – Composição granulométrica dos solos

GRANULOMETRIA (%)				LT	TT	R
	%	<	0,005	26	31	52
0,005	<	%	<	0,05	04	12
0,05	<	%	<	0,42	60	55
0,42	<	%	<	2,00	10	02
						04

Fonte: Alcantara et al (2008).

b) Índices de Atterberg:

Os valores dos índices de Atterberg dos solos sem aditivos estão apresentados na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2 – Índices de Atterberg para os solos avaliados

	LT	TT	R
W_{LL}	23	26	48
W_{LP}	13	16	27
W_{IP}	10	10	21

Fonte: Alcantara et al (2008).

c) Compactação do solo:

Os parâmetros de compactação do solo sem a adição de cal, do solo sem aditivos estão apresentados na Tabela 3, a seguir. Sendo que os valores representam também os referentes ao uso do hidróxido de sódio.

Tabela 3 – Parâmetros de compactação para os solos sem adição de cal.

	LT	TT	R
UMIDADE ÓTIMA (%)	10,06	12,60	20,53
DENSIDADE SECA MÁXIMA (kg/dm³)	2,004	1,910	1,698

Fonte: Alcantara et al (2008).

Os parâmetros de compactação do solo com a adição de cal estão apresentados na Tabela 4, a seguir. Assim, observa-se que puderam ser alterados alguns valores em decorrência da floculação causada pela influência da cal.

Tabela 4 – Parâmetros de compactação para os solos com adição de 8% de cal.

	LT	TT	R
UMIDADE ÓTIMA (%)	11,08	13,8	21
DENSIDADE SECA MÁXIMA (kg/dm³)	1,946	1,910	1,698

Fonte: Alcantara et al (2008).

d) Caracterização química e físico-química do solo:

A caracterização dos solos sem aditivos dos pontos de vista da química e da físico-química, está apresentada na Tabela 5, a seguir.

Tabela 5 – Análise química dos solos estudados sem aditivos LT, TT, e R.

	MATÉRIA ORGÂNICA	ACIDEZ POTENCIAL (H+AL)	ALUMÍNIO	FERRO	SATURAÇÃO DE BASES	pH
	g/dm³	mmol/dm³	mmol/dm³	mg/dm³	%	pH_{CaC12}
LT	2	16	1	3	13	4,7
TT	1	18	6	2	8	4,4
R	18	38	14	11	7	4,3

Fonte: Alcantara et al (2008).

4.4. VALORES DOS TEORES DE ADITIVOS E TEORES DE UMIDADE ADOTADOS

Os teores de cal e de hidróxido de sódio, bem como os teores de umidade ótima de moldagem são dados conforme os valores apresentados nas Tabelas 6 a 8, a seguir.

Tabela 6 – Teores de Cal e de Hidróxido de sódio e os valores de umidade ótima adotados (solo LT)

TEOR DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO	TEOR DE UMIDADE ÓTIMA ADOTADO	TEOR DE CAL E HIDRÓXIDO DE SÓDIO	TEOR DE UMIDADE ÓTIMA COM A CAL
1	10,06	(8),(1)	11,08
2	10,06	(8),(2)	11,08
3	10,06	(8),(3)	11,08

Fonte: Alcantara et al (2008).

Tabela 7 – Teores de Cal e de Hidróxido de sódio e os valores de umidade ótima adotados (solo TT)

TEOR DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO	TEOR DE UMIDADE ÓTIMA ADOTADO	TEOR DE CAL E HIDRÓXIDO DE SÓDIO	TEOR DE UMIDADE ÓTIMA COM A CAL
1	12,60	(8),(1)	13,8
2	12,60	(8),(2)	13,8
3	12,60	(8),(3)	13,8

Fonte: Alcantara et al (2008).

Tabela 8 – Teores de Cal e de Hidróxido de sódio e os valores de umidade ótima adotados (solo R)

TEOR DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO	TEOR DE UMIDADE ÓTIMA ADOTADO	TEOR DE CAL E HIDRÓXIDO DE SÓDIO	TEOR DE UMIDADE ÓTIMA COM A CAL
1	20,53	(8),(1)	21,0
2	20,53	(8),(2)	21,0
3	20,53	(8),(3)	21,0

Fonte: Alcantara et al (2008).

Os teores dos aditivos foram propostos de serem adotados em função do peso seco do solo. Já o teor de umidade, é proposto de ser adotado conforme seu valor para casos de adição de solos com a cal.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, será considerada inicialmente a caracterização de solos, seguindo-se com os resultados conforme os tipos de estabilização propostos, sejam, pela cal hidratada, pelo hidróxido de sódio e pelo processo misto, envolvendo o uso simultâneo da cal hidratada e do hidróxido de sódio. Em continuidade, se discutirá a ocorrência de sinergia entre os estabilizantes, conforme os critérios propostos, apresentados no item 4.2, Materiais e Métodos.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

Com vista à caracterização dos solos apresentada nas Tabelas 1 a 5, observa-se que existem três famílias de solo com características particulares dos pontos de vista químico e geotécnico. Desta forma, se toma em consideração que diferentes desempenhos poderão ser alcançados, quando avaliados sob três diferentes tipos de estabilização química. Cabe considerar que os solos do tipo Latossolo e Argissolos são abundantes em especial no estado de São Paulo.

Do ponto de vista geotécnico, os resultados se apresentam coerentes pois os índices de Atterberg se relacionam com as condições de granulometria e com os parâmetros de compactação, distinguindo-se os comportamentos característicos dos solos de natureza arenosa (solo LT), argilosa (solo R), e intermediária (solo TT).

5.2. COMPORTAMENTO MECÂNICO

5.2.1. Avaliação das propriedades mecânicas com o uso da cal hidratada

Os valores obtidos com os ensaios de avaliação da resistência à compressão simples, alcançados com os processos de estabilização com cal hidratada estão apresentados na Tabela 9, a seguir.

Tabela 9 – Valores da resistência à compressão simples com o uso da cal hidratada (MPa)

TEMPO DE CURA (DIAS)	TIPO DE SOLO		
	LT	TT	R
90	4,33	5,83	1,71
180	4,26	5,30	2,04
365	4,25	5,28	1,78
545	4,18	5,66	1,41

Fonte: Alcantara et al (2008).

5.2.2. Avaliação das propriedades mecânicas com o uso do hidróxido de sódio

Os valores obtidos com os ensaios de avaliação da resistência à compressão simples, alcançados com os processos de estabilização com o hidróxido de sódio estão apresentados na Tabela 10, a seguir.

Tabela 10 – Valores da resistência à compressão simples com o uso do hidróxido de sódio (MPa)

TEMPO DE CURA (DIAS)	LT			TT			R		
	TEOR DE NaOH (%)			TEOR DE NaOH (%)			TEOR DE NaOH (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
90	2,16	1,20	3,03	1,35	2,1	2,65	2,76	2,04	1,71
180	1,76	1,25	3,05	1,22	2,4	4,1	2,89	1,76	2,14
365	1,89	1,97	2,79	1,13	2,17	2,99	3,09	1,95	1,66
545	1,95	1,63	3,34	1,08	2,12	3,03	2,91	2,52	2,49

Fonte: Alcantara et al (2008).

5.2.3. Avaliação das propriedades mecânicas com o uso da cal e do hidróxido de sódio

Os valores obtidos com os ensaios de avaliação da resistência à compressão simples, alcançados com os processos de estabilização com a cal e com o hidróxido de sódio estão apresentados na Tabela 11, a seguir.

Tabela 11 – Valores da resistência à compressão simples com o uso da cal hidratada e do hidróxido de sódio (MPa)

DIAS DE CURA	LT			TT			R		
	TEOR DE NaOH (%)			TEOR DE NaOH (%)			TEOR DE NaOH (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
90	3,68	4,77	2,26	3,05	2,69	2,95	2,45	2,38	2,26
180	4,09	4,32	2,38	3,18	2,96	2,6	2,06	2,08	2,38
365	3,79	3,92	1,91	2,53	2,33	2,92	1,74	1,74	1,91
545	3,78	4,76	1,87	3,36	3,44	2,91	2,20	1,87	1,87

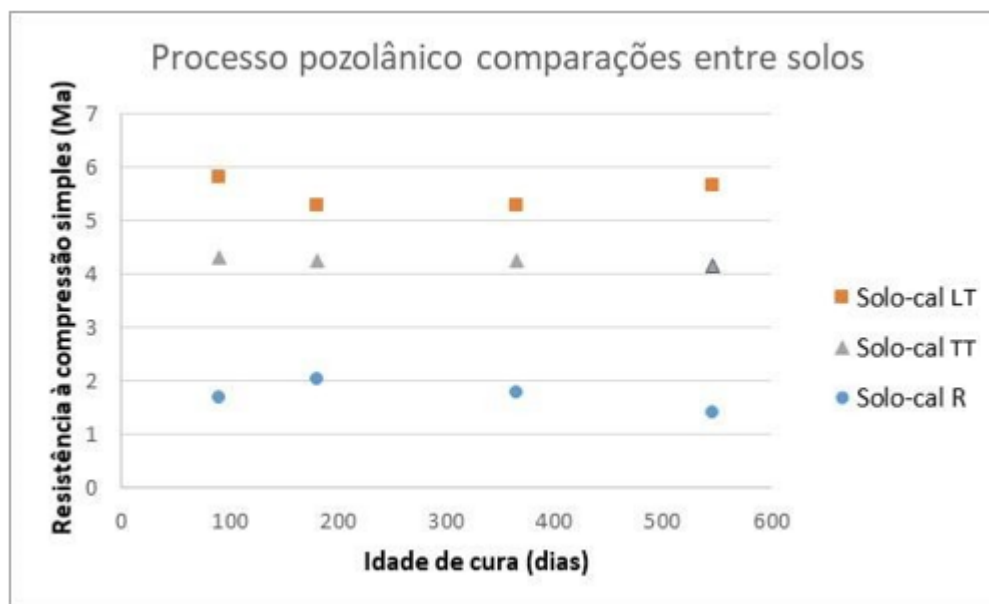
Fonte: Alcantara et al (2008).

5.2.4. Análise particular para cada tipo de estabilização apresentados

a) Estabilização de solos com a cal:

A Figura 5 ilustra os resultados referentes aos casos da estabilização com a cal somente, para as idades de 90,180, 365 e 545 dias de cura e os três tipos de solo.

Figura 5 – Estabilização de solos com 8% de cal, variação com o tipo de solo e com o tempo



Fonte: acervo do autor (2021).

Com relação ao desempenho mecânico proporcionado pela estabilização química, observa-se que, para a estabilização solo-cal (processo pozolânico), conforme Tabela 9 e Figura 5, os solos LT e TT obtiveram o melhor desempenho, enquanto que, para este tipo de estabilização, o solo R obteve o desempenho inferior. Quando verificado a composição química e atividade dos solos, conforme a Tabela 5, considera-se que este desempenho pode ser justificado pelo fato que o solo R dispõe da maior quantidade, em porcentagem, de óxidos de ferro e de matéria orgânica, os quais são inibidores das reações solo-cal, conforme Segantini e Alcantara (2017). Além do mais, o solo R ainda apresenta o maior conteúdo de alumínio (que contribui para a acidificação de solos), a maior acidez potencial e a menor saturação de bases, que são fatores não favoráveis para os solos estabilizados com cal. Ainda assim, o solo R, em particular apresenta o maior teor de alumínio em concentração.

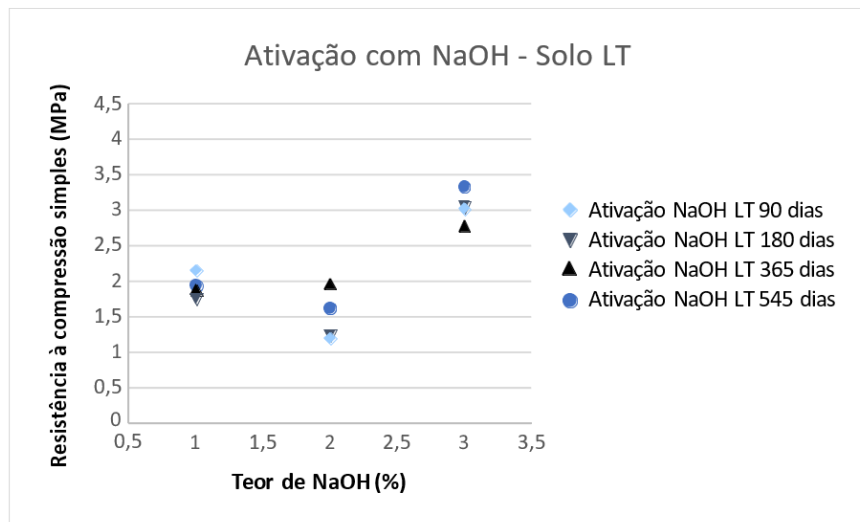
Por outro lado, com relação aos solos LT e TT, verifica-se que são os que apresentam os mais baixos teores de matéria orgânica e de óxidos de ferro, assim como, são também os que apresentam os valores mais baixos correspondentes à acidez potencial, fatores que contribuem para o melhor desempenho do solo com a cal. Desta

forma, os solos LT e TT se apresentaram com desempenho mais favorável para a estabilização com a cal. O solo LT, em particular, apresenta saturação de bases maior que os demais, assim como o maior valor de pH, o que o coloca em situação mais favorável.

b) Estabilização de solos com o hidróxido de sódio:

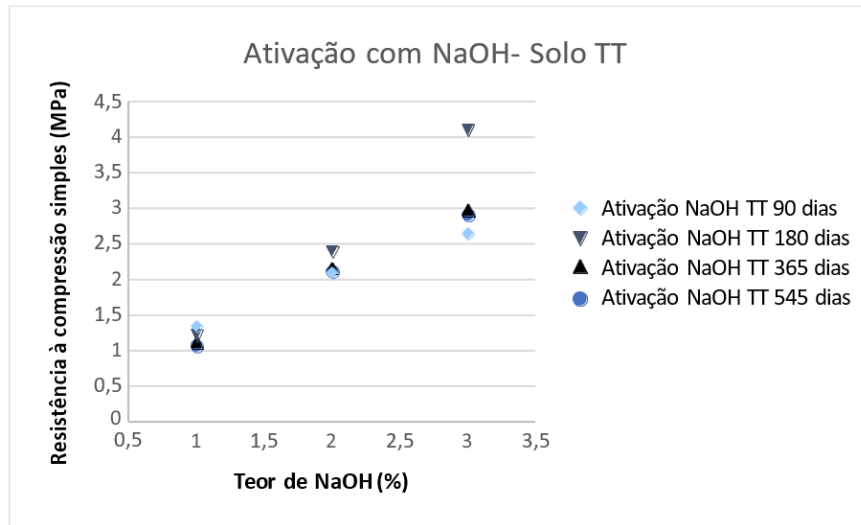
Nas Figuras 6 a 8, são apresentados os casos de estabilização de solos com o hidróxido de sódio somente, para as idades de 90, 180, 365 e 545 dias de cura e os três tipos de solo.

Figura 6 – Estabilização com o NaOH no solo tipo LT, variações com o tempo



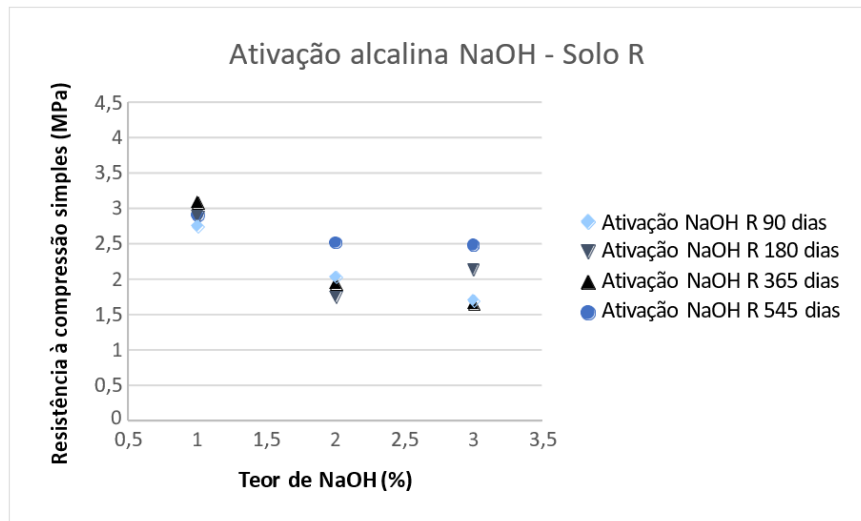
Fonte: acervo do autor (2021).

Figura 7 – Estabilização com o NaOH no solo tipo TT, variações com o tempo



Fonte: acervo do autor (2021).

Figura 8 – Estabilização com o NaOH no solo tipo R, variações com o tempo



Fonte: acervo do autor (2021).

Quando se considera a estabilização com o hidróxido de sódio (ativação alcalina), observa-se, conforme a Tabela 10, que o desempenho se deu de modo diferenciado quanto aos tipos de solos, assim como foi na estabilização solo-cal (processo pozolânico). Para os casos dos solos TT e LT, o desempenho se deu de modo moderado a baixo, comparado com os casos do solo R. Isso se deu, provavelmente, para o solo R,

devido ao maior conteúdo de alumínio em composição, o qual é importante para o desenvolvimento das reações cimentantes decorrentes deste tipo de estabilização.

Uma outra coisa que se faz observar, é a relação entre a magnitude dos valores de resistência com a variação do teor do aditivo, de onde podemos ver um comportamento distinto entre o solo R e os solos LT e TT.

Para o caso do solo R, com 1% do teor do aditivo, o desempenho se deu superior aos com 2% e 3%, ou seja, o desempenho veio a diminuir com o aumento do teor do aditivo. Quanto à diminuição do desempenho no aumento do teor do aditivo, este pode ser explicado, talvez, pela interação do aditivo com a matéria orgânica, com a formação de compostos não cimentantes, no que fizeram diminuir o atrito interno do solo.

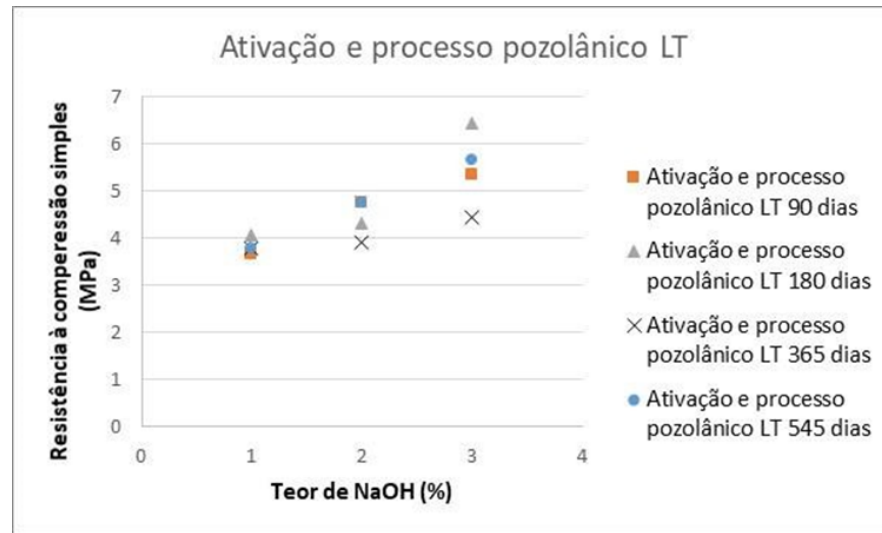
Já com relação aos solos LT e TT, o desempenho se dá aparentemente de modo crescente com o aumento do teor de hidróxido de sódio. Sendo que o desempenho, talvez, poderia ser ainda crescente para maiores teores do aditivo, além de 3%, tendo em vista a tendência dos resultados apresentados.

Cabe mencionar, com base nas Tabelas 9 e 10 e nas Figuras 5 a 8, que o desempenho, tanto das misturas de solo-cal como de solo-hidróxido de sódio, pode sofrer variações positivas ou negativas com relação ao tempo de cura. Isto se faz devido a possíveis novas cimentações, que fazem aumentar a resistência, ou possíveis microfissurações internas, que implicam na diminuição da resistência, ou ainda devido a posterior regeneração mediante a difusão iônica, a partir dos aditivos que ainda permaneciam resguardados das reações.

c) Estabilização mista:

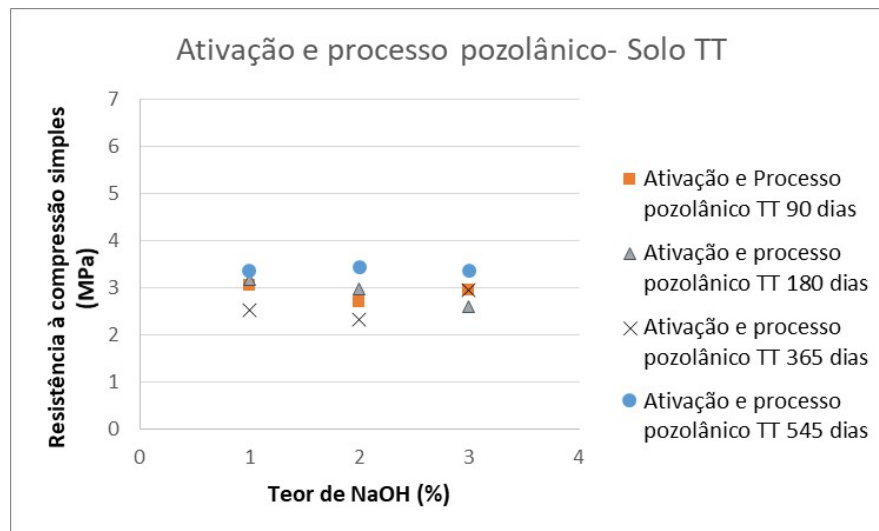
E nas Figuras 9 a 11, são apresentados os casos de estabilização mista com o hidróxido de sódio e com a cal, para as respectivas idades de cura e os três tipos de solo.

Figura 9 – Estabilização mista no solo tipo LT, variações com o tempo



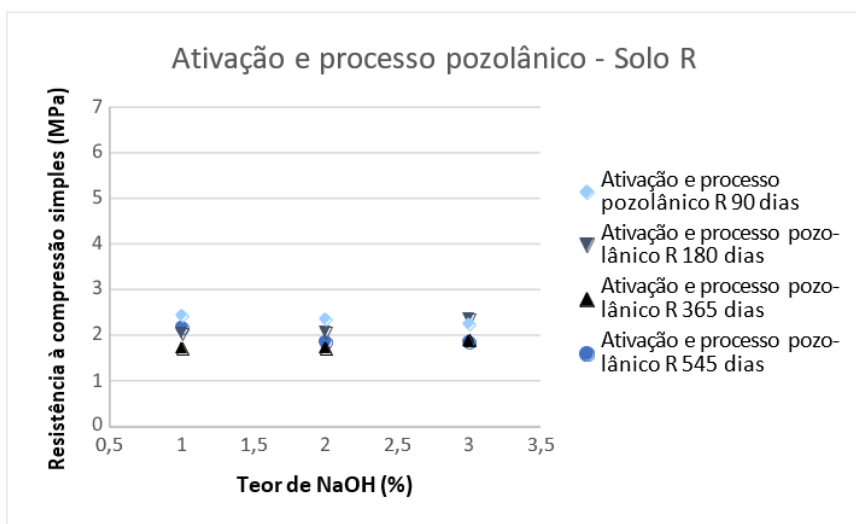
Fonte: acervo do autor (2021).

Figura 10 – Estabilização mista no solo tipo TT, variações com o tempo



Fonte: acervo do autor (2021).

Figura 11 – Estabilização mista no solo tipo R, variações com o tempo



Fonte: acervo do autor (2021).

Através das Figuras 9 a 11, podemos observar que os valores da resistência mecânica por meio do processo misto (ativação alcalina e processo pozolânico), considerando os solos LT, TT e R, em função da variação do teor de hidróxido de sódio, é mais relevante para o solo LT, sendo crescentes com o teor deste aditivo.

5.3. AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SINERGIA ENTRE OS TIPOS DE ADITIVOS

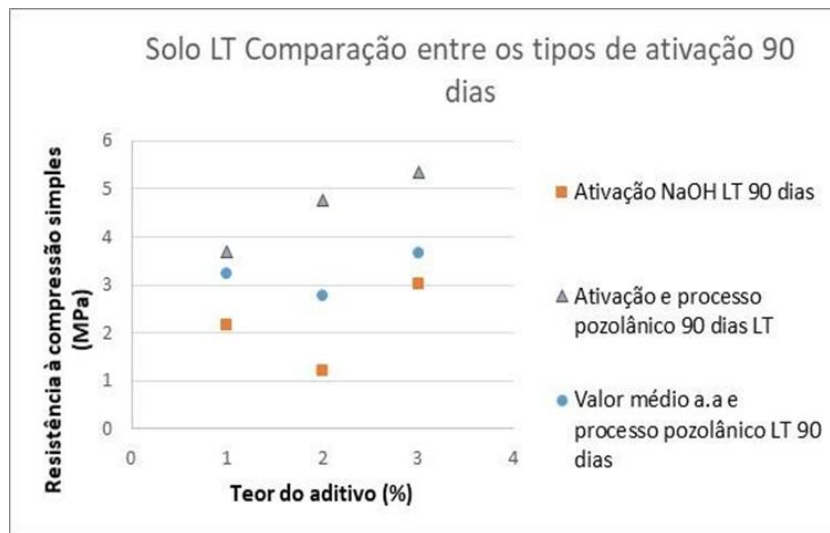
A Tabela 11 apresentou os valores dos desempenhos envolvendo o teor de cal de 8% (processo pozolânico), juntamente com os teores de 1, 2 e 3% de hidróxido de sódio (ativação alcalina). Pretende-se considerar as possibilidades de ocorrência de sinergia ou de antagonismo entre os dois tipos de aditivos e, para tanto, explora-se dois caminhos: (I) a comparação de valores do desempenho do processo misto com os que representariam o comportamento médio, dado conforme o valor médio dos resultados obtidos das estabilizações com a cal e com o hidróxido de sódio, e ainda são tomados em consideração como referência os valores da estabilização com hidróxido de sódio e (II) a comparação dos valores do processo misto com os valores resultantes da estabilização com o hidróxido de sódio e da estabilização com a cal.

5.3.1. Comportamento médio, comportamento do processo misto e ativação alcalina

As Figuras 12 a 23, ilustram a comparação dos valores individuais referentes ao hidróxido de sódio (ativação alcalina) com os valores médios dos resultados obtidos com o hidróxido de sódio e com a cal (comportamento médio), e com os valores alcançados através do processo misto (ativação e processo pozolânico), para as idades de cura de 90, 180, 365 e 545 dias.

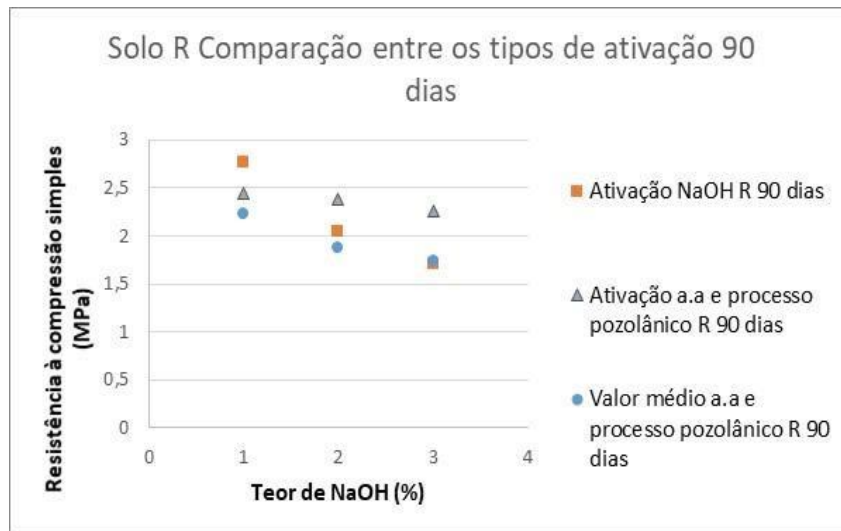
a) 90 dias:

Figura 12 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo LT, com 90 dias de cura



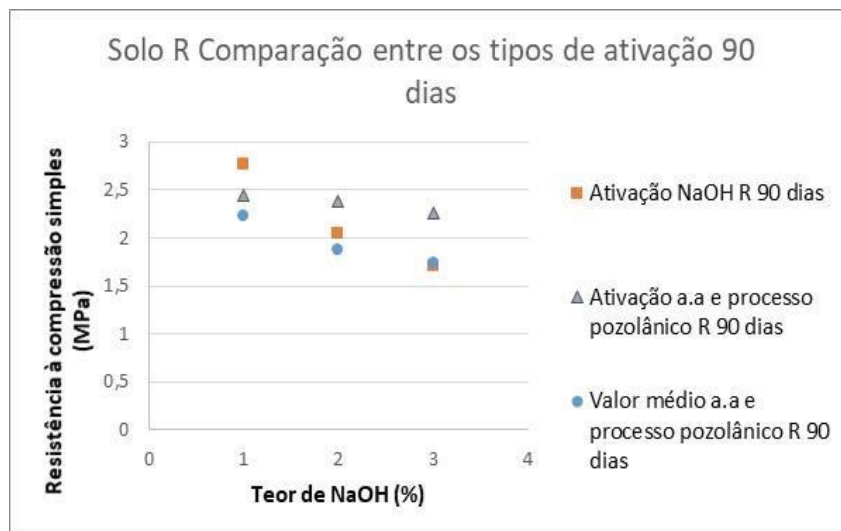
Fonte: acervo do autor (2021).

Figura 13 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo TT, com 90 dias de cura



Fonte: acervo do autor (2021).

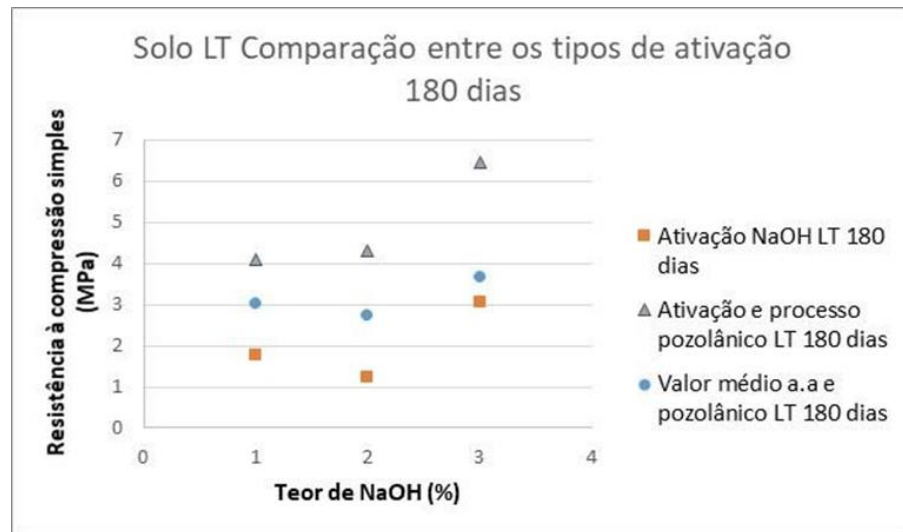
Figura 14 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo R, com 90 dias de cura



Fonte: acervo do autor (2021).

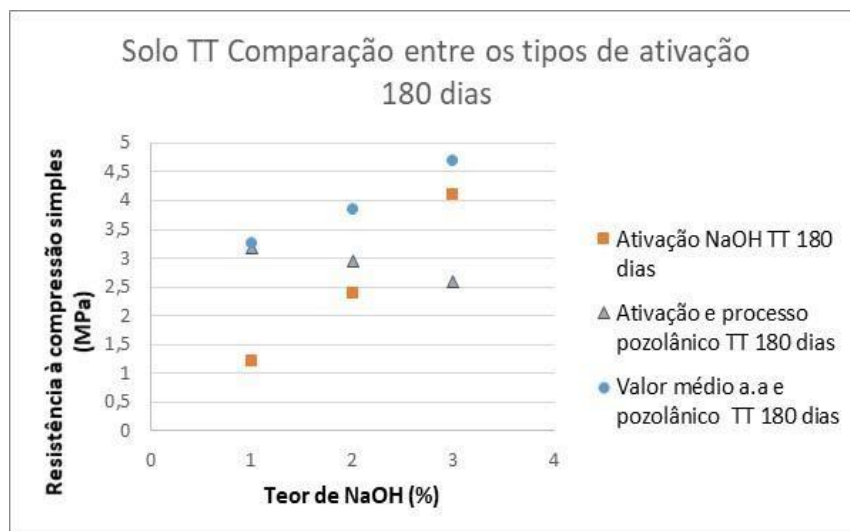
b) 180 dias:

Figura 15 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo LT, com 180 dias de cura



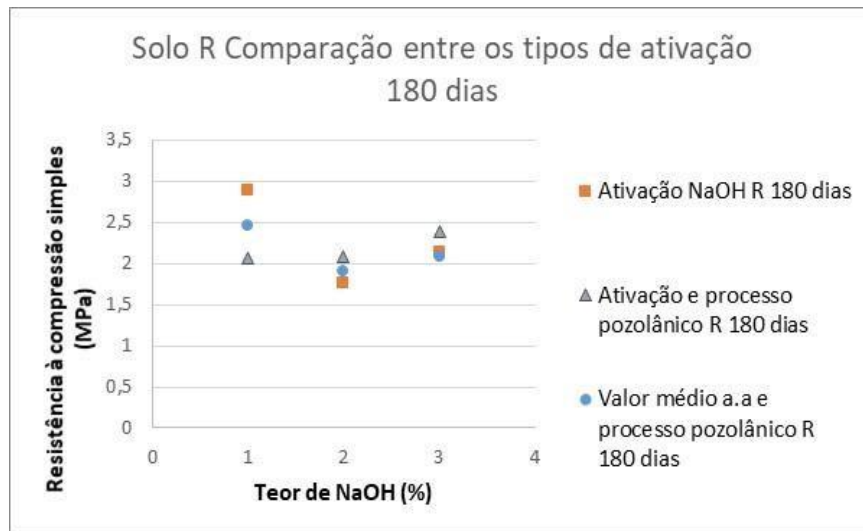
Fonte: acervo do autor (2021).

Figura 16 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo TT, com 180 dias de cura



Fonte: acervo do autor (2021).

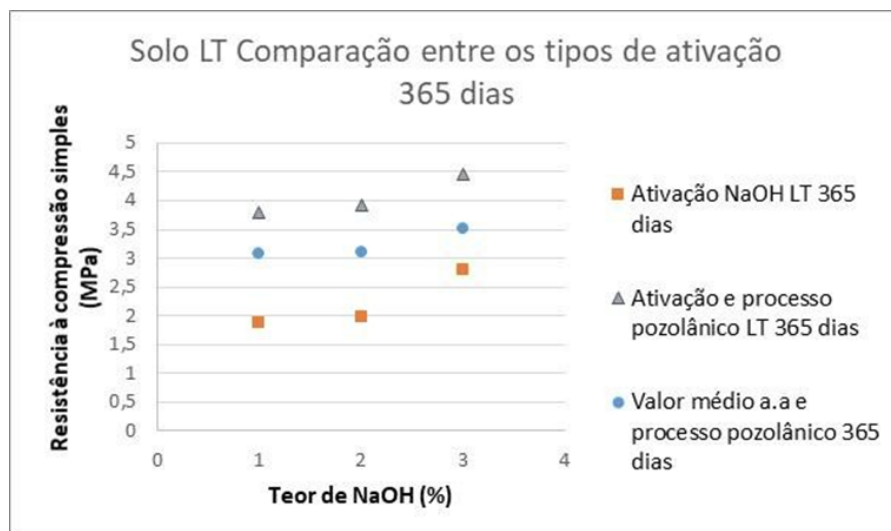
Figura 17 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo R, com 180 dias de cura



Fonte: acervo do autor (2021).

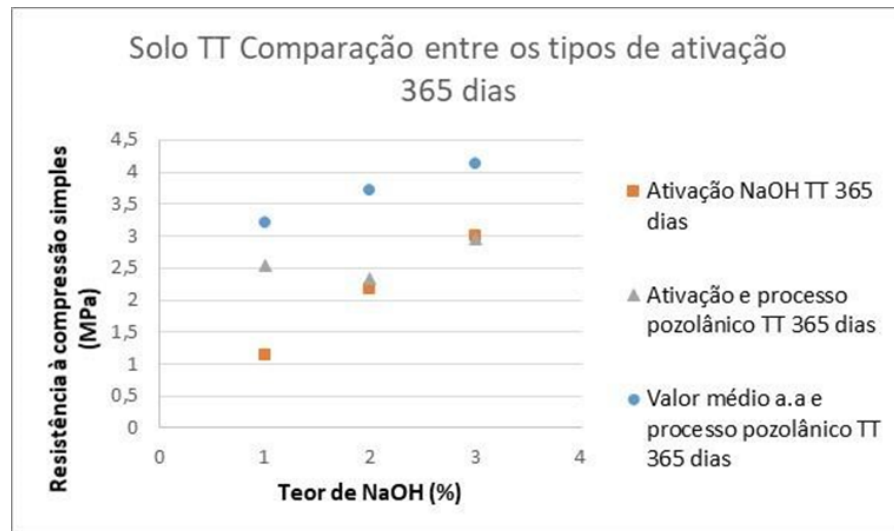
c) 365 dias:

Figura 18 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo LT, com 365 dias de cura



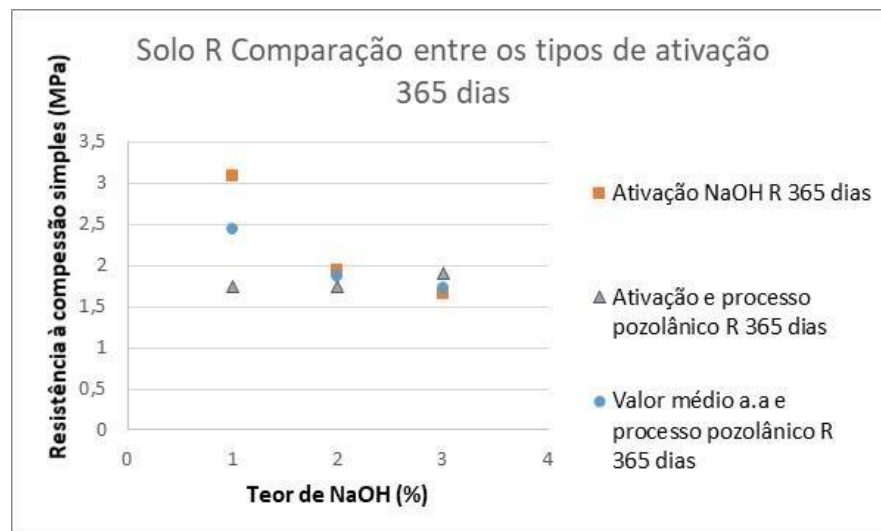
Fonte: acervo do autor (2021).

Figura 19 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo TT, com 365 dias de cura



Fonte: acervo do autor (2021).

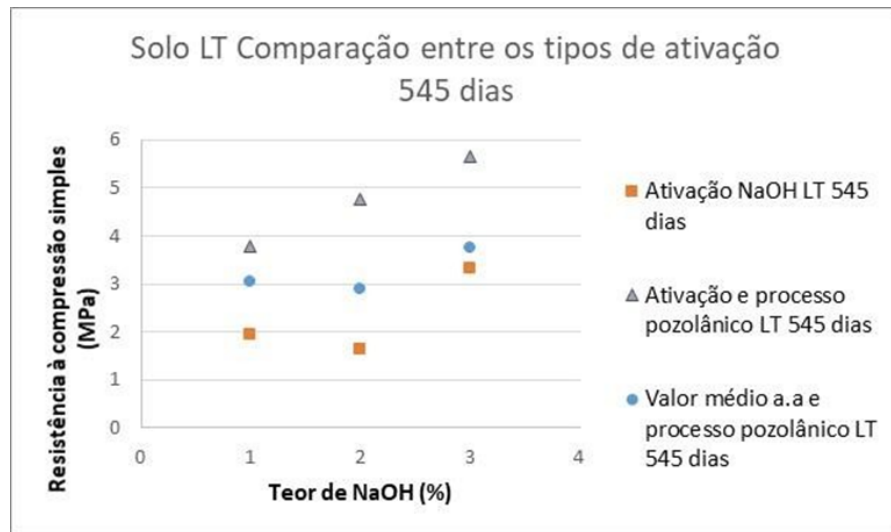
Figura 20 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo R, com 365 dias de cura



Fonte: acervo do autor (2021).

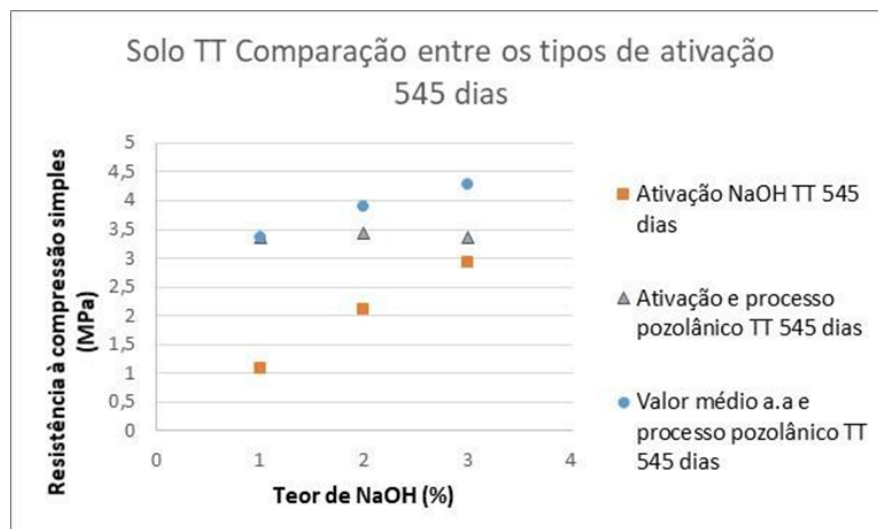
d) 545 dias:

Figura 21 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo LT, com 545 dias de cura



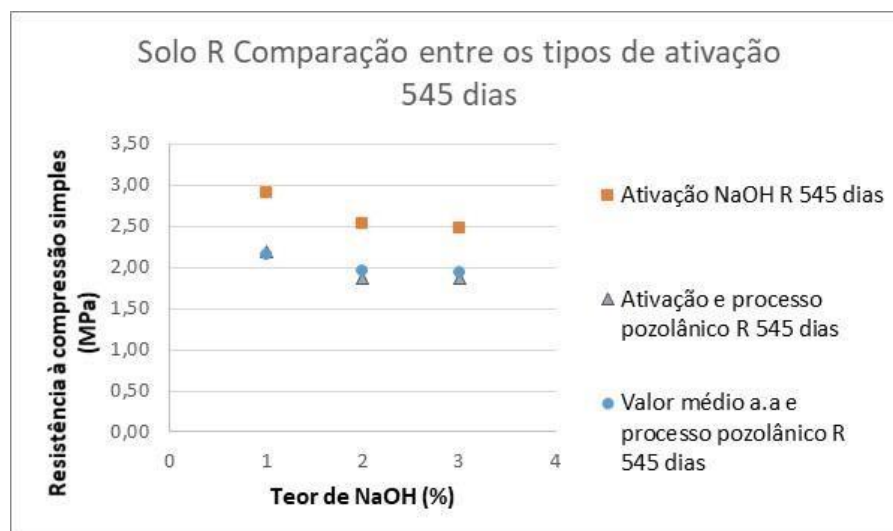
Fonte: acervo do autor (2021).

Figura 22 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo TT, com 545 dias de cura



Fonte: acervo do autor (2021).

Figura 23 – Aspectos comparativos com o comportamento médio no solo tipo R, com 545 dias de cura



Fonte: acervo do autor (2021).

Do primeiro tipo de comparação, com base no comportamento médio, comportamento misto e ativação alcalina, verifica-se que conforme o critério adotado, para o solo LT houve um caso de sinergia entre os estabilizantes, envolvendo todas as idades de cura, visto que, os valores da estabilização mista se apresentaram predominantemente superiores aos apresentados para o comportamento médio entre os dois tipos de estabilização; enquanto que, para o solo TT, o comportamento médio se deu predominantemente acima do valor efetivamente alcançado pela composição híbrida, sendo o da estabilização com hidróxido de sódio o de menor valor. Já para os casos do solo R, houve casos de sinergia, conforme a idade de cura e os teores adotados, sendo que, para as idades mais avançadas de cura, os valores se mesclam sem uma definição precisa quanto ao status da composição híbrida.

Para o solo R, uma observação importante é que, embora tenha sido observado algum caso de sinergia, o desempenho com 1% de hidróxido de sódio (ativação alcalina) se deu superior aos demais casos, seja com a cal (processo pozolânico), híbrida (processo misto) ou com relação ao comportamento médio (valor matemático).

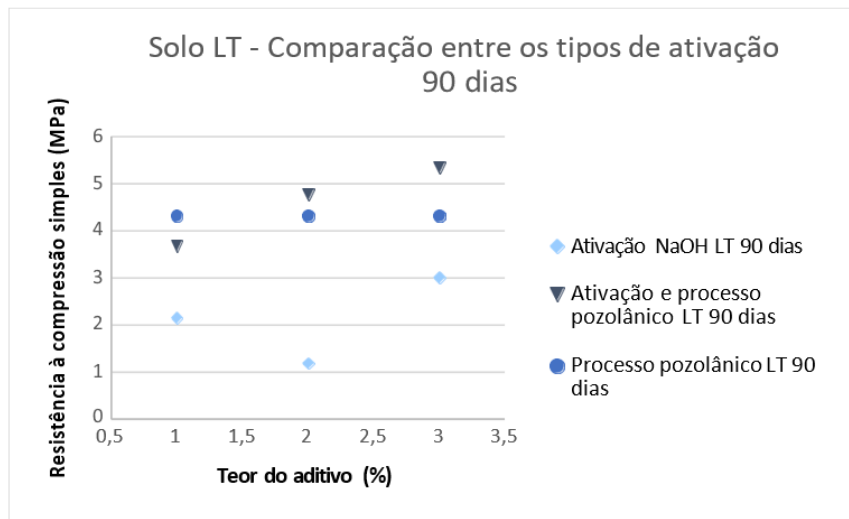
Então, conforme o primeiro critério adotado, considera-se que ocorreu sinergia para com o solo LT, antagonismo para com o solo TT, e casos de sinergia parcialmente para com o solo R, em função das condições adotadas.

5.3.2. Comportamento do processo misto, comportamento pozolânico e ativação alcalina

As Figuras 24 a 35, ilustram a comparação dos valores entre o hidróxido de sódio (ativação alcalina), o processo misto (ativação e processo pozolânico) e o comportamento com a cal (processo pozolânico), para as idades de cura de 90, 180, 365 e 545 dias.

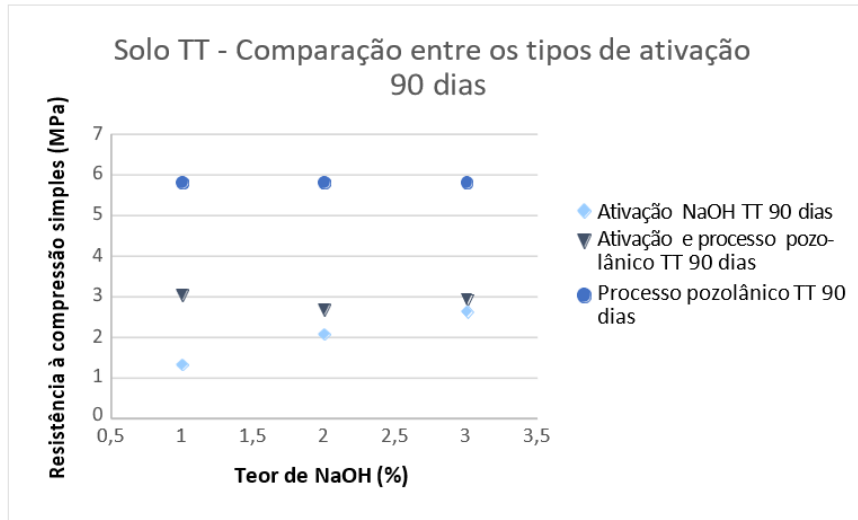
a) 90 dias:

Figura 24 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo LT, com 90 dias



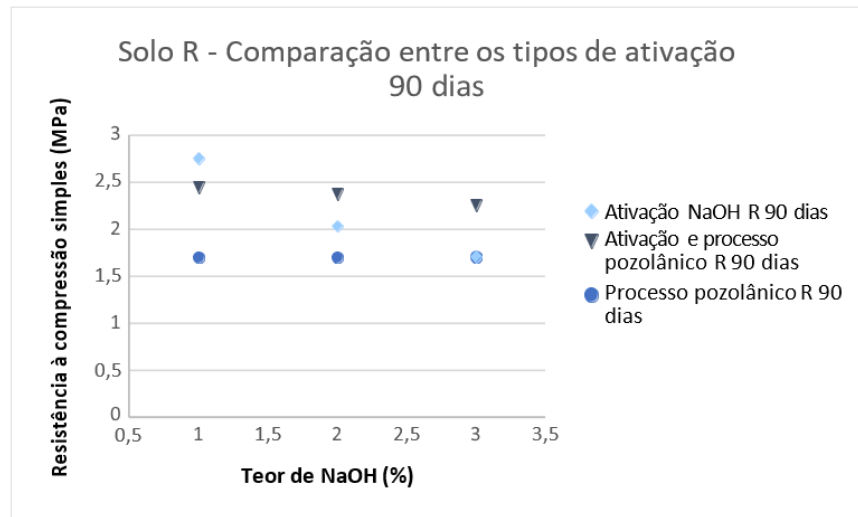
Fonte: acervo do autor (2021).

Figura 25 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo TT, com 90 dias



Fonte: acervo do autor (2021).

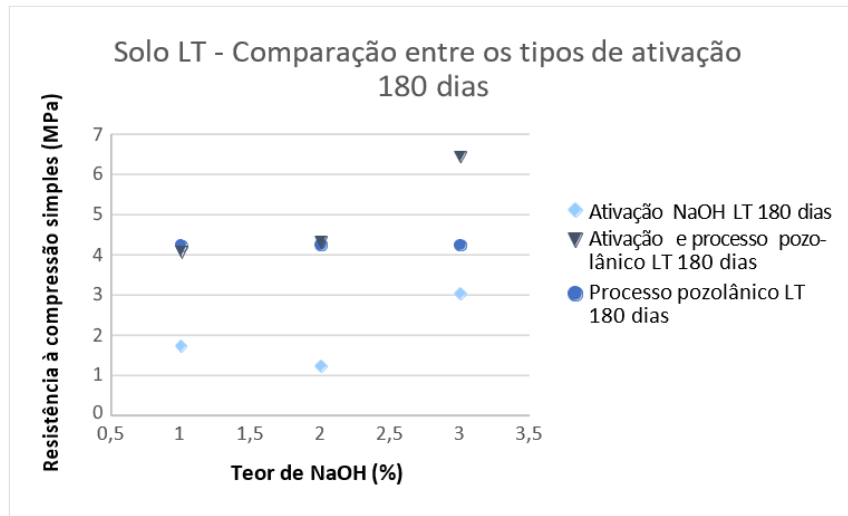
Figura 26 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo R, com 90 dias



Fonte: acervo do autor (2021).

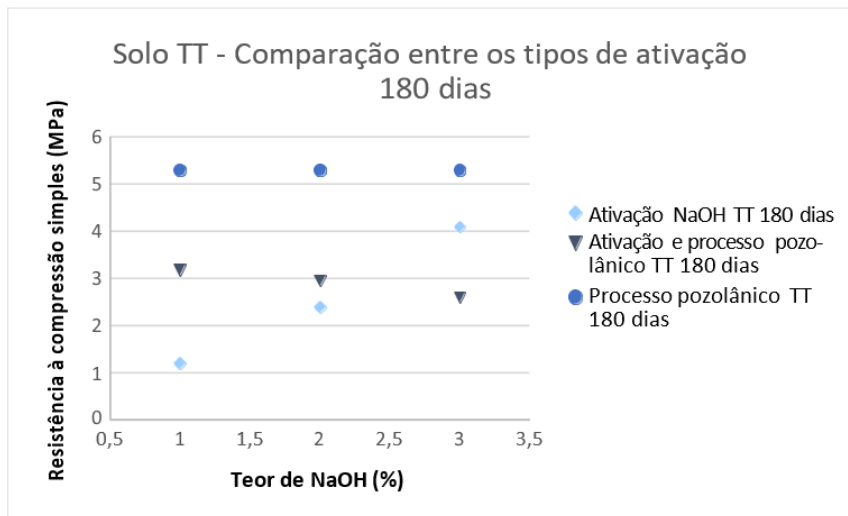
b) 180 dias:

Figura 27 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo LT, com 180 dias



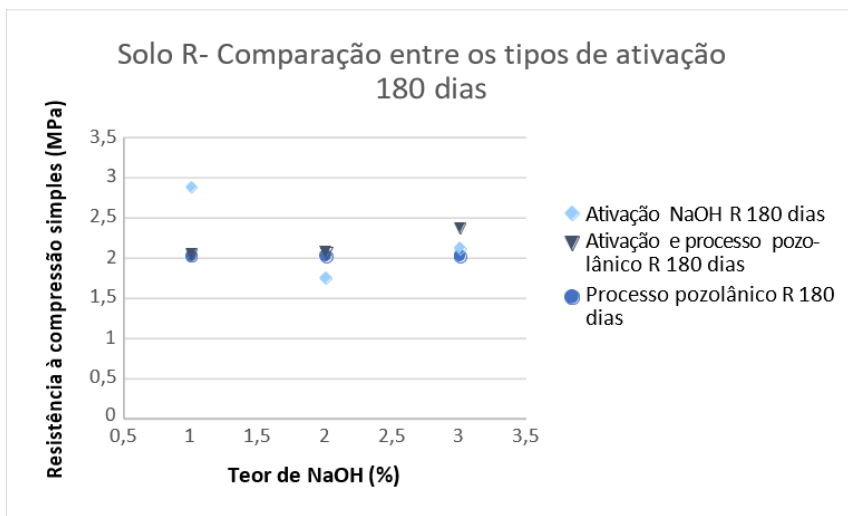
Fonte: acervo do autor (2021).

Figura 28 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo TT, com 180 dias



Fonte: acervo do autor (2021).

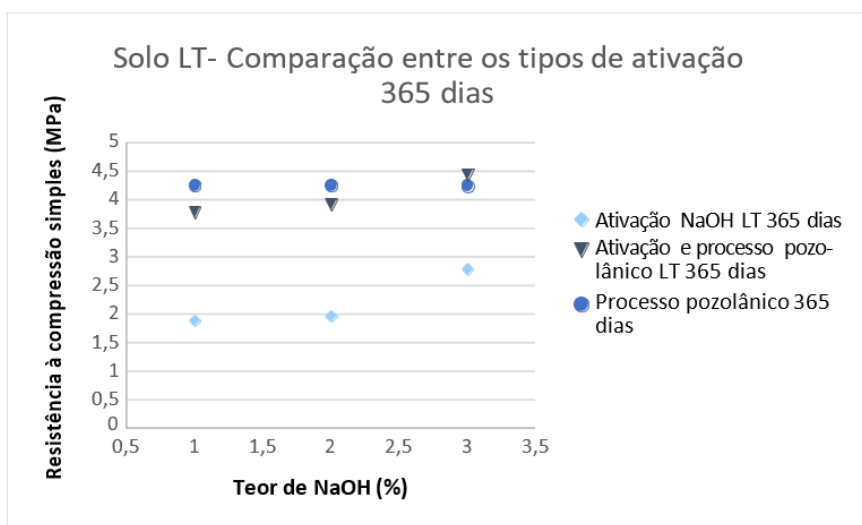
Figura 29 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo R, com 180 dias



Fonte: acervo do autor (2021).

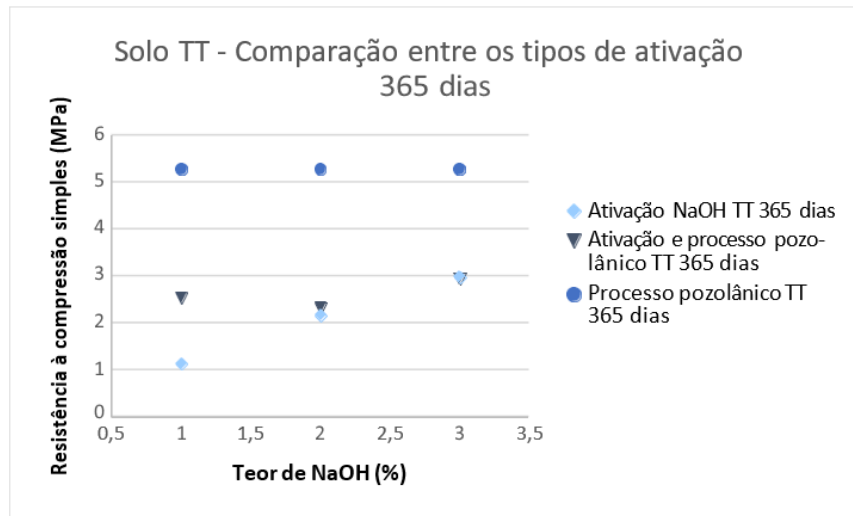
c) 365 dias:

Figura 30 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo LT, com 365 dias



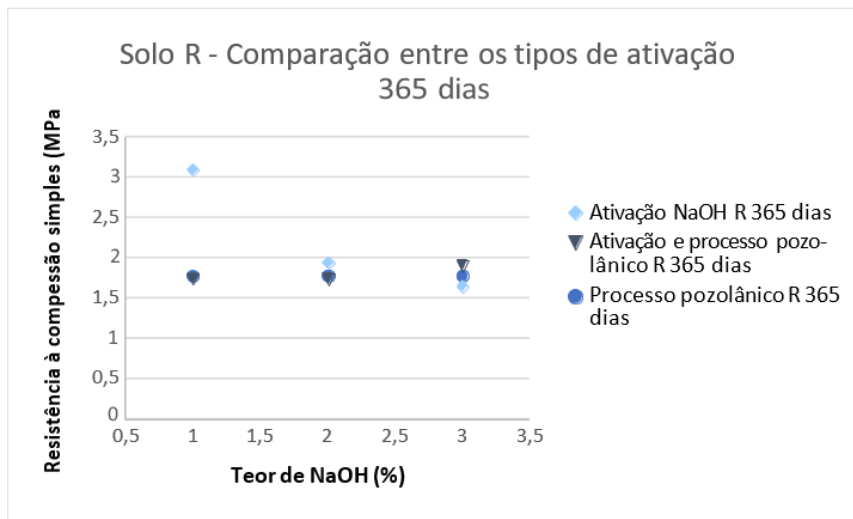
Fonte: acervo do autor (2021).

Figura 31 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo TT, com 365 dias



Fonte: acervo do autor (2021).

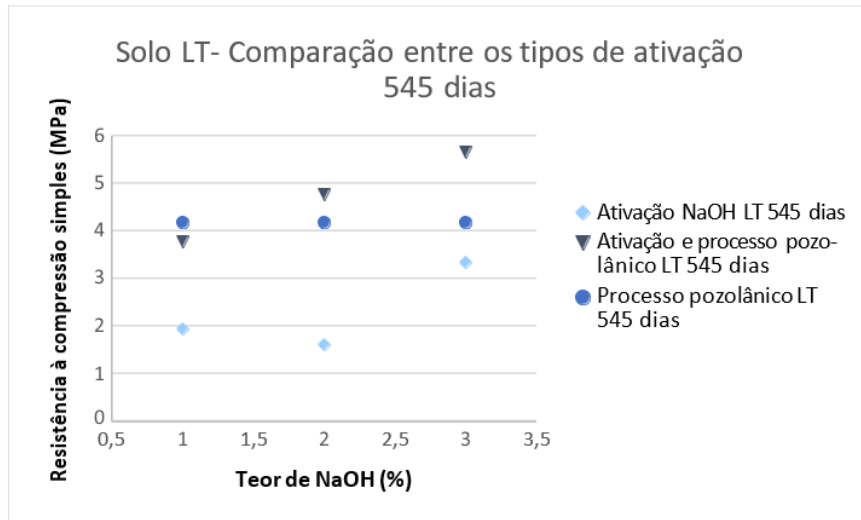
Figura 32 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo R, com 365 dias



Fonte: acervo do autor (2021).

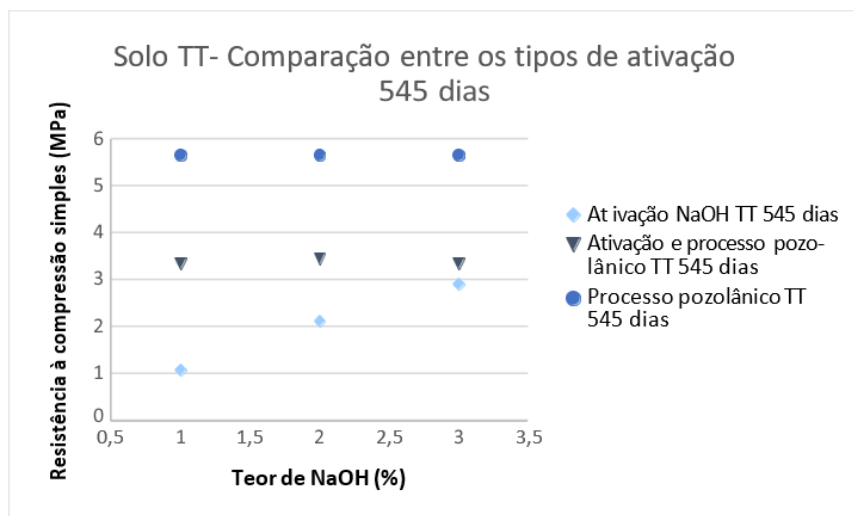
d) 545 dias:

Figura 33 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo LT, com 545 dias



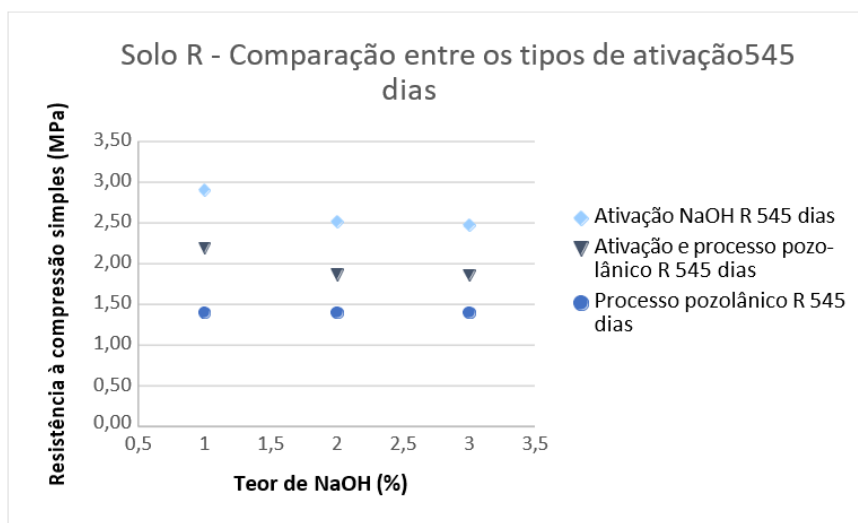
Fonte: acervo do autor (2021).

Figura 34 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo TT, com 545 dias



Fonte: acervo do autor (2021).

Figura 35 – Comparação dos valores de resultados do processo misto com os das individuais, com hidróxido de sódio ou com a cal, solo tipo R, com 545 dias



Fonte: acervo do autor (2021).

Do segundo tipo de comparação, com base no comportamento do processo misto, comportamento pozolânico e ativação alcalina, verifica-se, da mesma forma, a tendência de enquadramento dos resultados conforme verificado para o critério anterior, mas com algumas diferenças nas configurações.

Para o caso do solo LT, os valores da estabilização mista estiveram, de modo geral, superiores aos valores alcançados pela estabilização solo-cal, que individualmente foi a solução com desempenho predominante, indicando que ocorreu algo com a presença do hidróxido de sódio, de modo que o desempenho da composição híbrida fosse incrementado com relação aos valores obtidos com a cal somente; ainda assim, os valores da composição híbrida se tornam superiores aos da estabilização solo-cal, de modo geral, para teores iguais ou maiores do que 2% do hidróxido de sódio e, também, para uma das idades de cura, os valores da estabilização solo-cal foram superiores aos da estabilização mista (365 dias). Para o caso do solo TT, os valores da estabilização solo-cal se deram sempre superiores aos da estabilização mista, indicando um possível antagonismo entre os mecanismos de estabilização solo-cal e a ativação alcalina pelo hidróxido de solo. Já para o solo R, os valores de resistências mecânicas dados por 1%

de hidróxido de sódio se deram sempre superiores aos das demais soluções, indicando que para maiores teores de NaOH, os antagonismos passam a existir.

5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS DESEMPENHOS REFERENTES AOS TIPOS DE SOLO E ÀS PROPOSTAS DE ESTABILIZAÇÃO.

Considera-se que os dois tipos de critérios forneceram um indicativo para as possíveis ocorrências de sinergia ou de antagonismo. Sendo sinergia para com os solos LT, antagonismo para o solo TT e casos não bem definidos de sinergia para com o solo R.

Como razões para com as tendências de sinergia para o solo LT, têm-se possivelmente as seguintes, conforme a análise e atividade química: os baixos teores de matéria orgânica, os menores valores de acidez potencial e a menor acidez medida pelo pH, enquanto que o solo TT, embora apresente um teor intermediário de alumínio, maior do que para o solo LT, apresente também uma competição dentro dos processos de estabilização, conduzindo ao antagonismo.

Uma hipótese que não pode ser descartada é a que está em acordo com o caráter físico-químico da estabilização com o hidróxido de sódio, visto que o hidróxido de sódio tem o efeito de promover a dispersão nos solos, em efeito oposto ao da cal. Pode-se inferir sobre a ação deste na parte fina do solo, em especial a longo prazo. Se por um lado, ele pode promover melhorias nas condições de compactação, por outro, ele pode provavelmente agir sobre a mistura compactada em momentos posteriores, pelo efeito de dispersão, conduzindo a um processo lento de descompactação dos solos, a nível interno. Desta forma pode estar coerente que o aumento da saturação do hidróxido de sódio pode ter induzido à uma atuação deste no sentido desfavorável, em especial para o solo R, o mais rico em finos, assim como, para o caso do solo TT, com teor de finos intermediário. Nisto pode ter consistido, também, uma parte do antagonismo. Já para o caso do solo LT, se confirma a sinergia, em especial considerando que este apresentou a menor quantidade de finos.

Portanto, propõe-se a seguinte recomendação para com os solos pesquisados:

- a) **Solo LT:** Estabilização com cal ou estabilização mista, com maiores desempenhos para a estabilização mista.
- b) **Solo TT:** Estabilização com cal preferencialmente.
- c) **Solo R:** Estabilização preferencialmente com hidróxido de sódio em 1%.

Uma observação que também se faz, é que, para casos onde os valores do processo misto deram inferiores aos da composição com cal, os valores da composição híbrida se deram em valores quase constantes, considerando os teores de 1%, 2% e 3% de hidróxido de sódio. É o caso do solo TT e do solo R.

6. CONCLUSÃO

Conforme os casos de utilização dos três tipos de solo LT, TT e R, verificou-se que os aditivos possuem mecanismos particulares de atuação, os quais terão melhor desempenho dependendo da composição e da atividade química dos solos, por isso, observou-se inclusive, que para cada um dos tipos de solo encontrou-se uma solução que apresentasse o melhor desempenho.

Os mecanismos de estabilização poderão agir de modo em sinergia ou possuir antagonismo, com base nos mecanismos particulares de atuação os quais podem ser favoráveis ou conflitantes, reforçando ou diminuindo o desempenho do solo estabilizado. Assim, deve-se então, ser conhecidos os potenciais de aplicação, de modo a se escolher a solução adequada para um solo específico.

Os solos em particular podem apresentar desempenho favorável com determinado tipo de aditivo, não apresentando, obrigatoriamente, o mesmo desempenho, para com outro tipo de aditivo, como observado nos casos dos solos TT com a cal, e o solo R com o hidróxido de sódio.

REFERÊNCIAS

AFLITOS, A.O.; FERREIRA, H.C. Estabilização química de um solo laterítico com cal + traços de NaOH. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 8., 1986, Porto Alegre. **Anais [...]** Porto Alegre: Associação Brasileira de Mecânica de Solos, 1986. p. 9- 2.

ALCÂNTARA, M.A.M. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: Técnicas disponíveis e estudo de caso dirigido à estabilização solo-cal de três solos de Ilha Solteira – SP.** 1995. 91 p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

ALCANTARA, M.A.M.; LOPES, A.D.D.; SANTOS, L.P. Estudo de estabilização de solos combases: os casos de hidróxido de sódio e da cal. *In*: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 39., 2008, Recife. **Anais [...]** Recife: ABPv, 2008. np-np.

ANDRADE FILHO, J. **Reforço de solos com a utilização de tubulões em solo-cimento.** São Carlos, SP: USP, 1989. 190 p. Tese (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13555: Solo-cimento – determinação da absorção d'água.** Rio de Janeiro, ABNT, 1996. 1 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025: Solo-cimento – ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos – método de ensaio.** Rio de Janeiro, ABNT, 2012. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – análise granulométrica.** Rio de Janeiro, ABNT, 1984a. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459/84: Solo – determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, ABNT, 1984b. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180/84: Solo – determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, ABNT, 1984c. 3 p.

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO. **Manual de construção do solo-cimento**. Camaçari: Convênio CEPED/BNH/ABCP, 1984. 147 p.

DAVIDOVITS, L. **Synthesis of new high temperature geopolymers for reinforced plastics/composites**. SPEPACTEC79 Society of Plastic Engineers, Brookfield Center. 1979. p.151-154.

GLUKHOVSKY, V.D. **Soil cement** Gostroiizdat. Kiev, 1959, USSR.

INGLES, O.G. & METCALF, J.B. **Soil stabilization principles and practice**. New York, E.U.A: Swikey e Sans, 1973. 374 p.

JURAN, I., IDER, H.M., ACAR, Y.B.; GUERMAZI A. **A comparative study of soil improvement/reinforcement techniques for highway embankments**. Louisiana: Louisiana Transportation Research Center, 1989. p. 174-218. (Report).

LITTLE, D. N. (1999) **Evaluation of Stuctrural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates**. Volume 1: Summary of Findings. Prepared for the National Lime Association.

LONGUI, M.A. **Álcali-ativação de lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo**. 2015. 150 p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MAKUSA, G. P. **Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review**. Sweden: Lulea° University of Technology, 2013.

PINTO. C.S. **Estabilização de solos**. São Paulo: USP – Escola Politécnica, 1983. 20 p. (Notas de Aula).

SEGANTINI, A.A; ALCANTARA, M.A.M. **Solo-cimento e solo-cal. Materiais de Construção Civil e princípios de ciências de materiais**. São Paulo: Geraldo Isaia/IBRACON, 2017. p. 885-921. Vol 2.

THORNBURN, T.H.; MURA, R. **Stabilization of soils with inorganic salts and basis; a review of the literature**. Washington D.C.: Highway Research Board.1969. 22 p. Bulletin H.R.R, 294.