

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – Mestrado

GISLAINI BEZERRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA ESTABILIZAÇÃO DE UM
SOLO ARENOSO POR MEIO DA INCORPORAÇÃO DE CAL
E DE PÓ DE PEDRA**

MARINGÁ

2023

GISLAINI BEZERRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA ESTABILIZAÇÃO DE UM
SOLO ARENOSO POR MEIO DA INCORPORAÇÃO DE CAL
E DE PÓ DE PEDRA**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientadora: Prof.^a. Juliana Azoia Lukiantchuki

MARINGÁ

2023

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

B574a

Bezerra, Gislaini

Análise experimental da estabilização de um solo arenoso por meio da incorporação de cal e de pó de pedra / Gislaini Bezerra. -- Maringá, PR, 2023.
123 f.: il. color., figs., tabs., maps.

Orientadora: Profa. Dra. Juliana Azoia Lukiantchuki.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

1. Solos - Estabilização - Processos. 2. Solo arenoso. 3. Cal. 4. Pó de pedra. I. Lukiantchuki, Juliana Azoia, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 23.ed. 625.74

GISLAINI BEZERRA

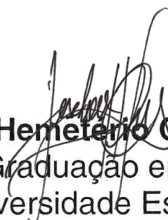
**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO ARENOSO
POR MEIO DA INCORPORAÇÃO DE CAL E DE PÓ DE PEDRA**

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 28/09/2023, julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Juliana Azoia Lukiantchuki
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá
Professora Orientadora de Estudos



Prof. Dr. Jeselay Hemeferio Cordeiro dos Reis
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá



Profa. Dra. Raquel Souza Teixeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Londrina

Ao meu marido pelo constante apoio e incentivo ao longo desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Embora uma dissertação seja, pela sua finalidade acadêmica, um trabalho individual, há contribuições de natureza diversa que não podem nem devem deixar de ser destacadas. Por essa razão, desejo expressar meus sinceros agradecimentos:

À Deus, por me fazer perseverar e não desistir nos momentos mais difíceis, por sempre me fazer querer melhorar e me dar forças para realizar todos os meus sonhos.

Ao meu marido, Marco Antonio Pagliarini, quero agradecer todo o apoio, o sacrifício, o incentivo e o amor que tem por mim. Sem você este trabalho não existiria.

Aos meus pais, irmã, cunhado e sobrinhos, que sempre me incentivaram a estudar e que me fizeram gostar da área de geotecnia. Sem o apoio de vocês, eu não seria a pessoa que sou hoje.

Ao meu sogro, que cedeu o solo para que eu pudesse desenvolver minha pesquisa.

À minha orientadora, Juliana Azoia Lukiantchuki, agradeço imensamente toda a dedicação em me auxiliar na elaboração deste trabalho, a paciência, a motivação e o acolhimento. Tenho muito orgulho de ter sido sua orientada, aprendi muito com você.

Aos professores: Jeselay H. C. Reis, Raquel S. Teixeira e Nelcí H. M. Gutierrez, que aceitaram fazer parte deste trabalho como banca.

Ao professor José Wilson, que dispôs de seu tempo para me ensinar a realizar o ensaio de massa específica da cal.

Ao professor Carlos Humberto, que me emprestou o Sonelastic para que eu pudesse fazer o ensaio de excitação por impulso.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, principalmente, àqueles que me ensinaram durante o mestrado e que foram fundamentais para que eu evoluísse na engenharia.

Aos técnicos do Laboratório de Solos da UEM, Cipriano e Aparecido, pela ajuda e parceria durante todos os ensaios, pelas conversas e brincadeiras que deixaram a pesquisa mais leve.

Aos técnicos do Laboratório de Saneamento da UEM, principalmente à Marcela, que me auxiliou nos ensaios de pH dos materiais.

E a todos os amigos, antigos e novos, que compartilharam comigo cada momento dessa jornada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

“O ensino deve inspirar os estudantes a descobrir por si mesmos, a questionar quando não concordarem, a procurar alternativas se acham que existem outras melhores, a revisar as grandes conquistas do passado e aprender porque algo lhes interessa”.

Noam Chomsky

RESUMO

O solo é um material de construção muito abundante e vem sendo utilizado dentro da construção civil desde a antiguidade. No entanto, o solo não é um material homogêneo, por isso suas características nem sempre atendem aos requisitos de projeto de uma determinada obra. De forma a viabilizar seu uso, por vezes, é fundamental que se promova a modificação de uma ou mais de suas propriedades. Uma forma de fazer isto, é por meio da estabilização. A estabilização química é muito utilizada na construção civil e pode ser feita com cimento, material betuminoso ou cal. No entanto, às vezes, a estabilização química não é suficiente para que o solo atinja os requisitos impostos pelo projeto, por isso, faz-se necessário a estabilização conjunta, ou seja, é necessário fazer a estabilização química e mecânica ao mesmo tempo. Dentre as estabilizações mecânicas mais utilizadas está a correção granulométrica, esta corresponde a uma melhoria na uniformidade dos grãos que compõem o solo. A correção granulométrica pode ser feita com diversos materiais, dentre eles, o pó de pedra. O principal objetivo desse trabalho é estudar a estabilização de um solo arenoso com a incorporação de cal e pó de pedra (estabilização conjunta). Para isso, foram ensaiadas 16 matrizes com diferentes teores de cal (0%, 7%, 9% e 11%) e pó de pedra (0%, 25%, 50% e 75%). Os materiais e as matrizes foram descritos por meio da caracterização geotécnica e química. O comportamento mecânico das matrizes foi avaliado por meio do ensaio de resistência à compressão simples, pela técnica de excitação por impulso (Sonelastic) e pela microscopia eletrônica de varredura. Os tempos de cura utilizados foram 7, 14, 21 e 28 dias. Os resultados dos ensaios de resistência indicaram que a incorporação de 11% de cal e 25% de pó de pedra ao solo aumentou, significativamente, a resistência do solo, mostrando que a incorporação de ambos os materiais pode auxiliar na estabilização deste solo.

Palavras-chave: Solo arenoso; Solo-cal; Pó de pedra; Estabilização.

ABSTRACT

Soil is a widely used material for construction applications since ancient times. However, the soil is not a homogeneous material, therefore its properties do not always meet the requirements of a specific project. Sometimes, the suitability of the natural soil depends on its property's modification. In this way, the soil stabilization, mainly, the chemical stabilization can be a solution to improve the soil performance. The chemical stabilization can be done using Portland cement, bituminous material or lime. However, for some situations, the chemical stabilization is not enough for the soil meet the requirements imposed by the design. Therefore, the chemical and mechanical stabilization can be used simultaneously. The mechanical stabilization can be a granulometric correction, which results in a soil with better uniformity of the grains. The particle size correction can be done using different materials, including the stone dust. The main objective of this work is to evaluate the chemical and mechanical stabilization of a sandy soil with the incorporation of lime and stone dust, simultaneously. The experimental program was done using 16 mixtures, which were tested with different lime contents (0%, 7%, 9% and 11%) and stone dust contents (0%, 25%, 50% and 75%). The materials and mixtures were investigated through geotechnical and chemical characterization. The mechanical behavior and the microstructure of the mixtures were evaluated using the unconfined compressive strength test, the impulse excitation technique (Sonelastic) and scanning electron microscopy (SEM). The curing times used were 7, 14, 21 and 28 days. The results of the resistance tests indicated that the incorporation of 11% lime and 25% stone dust in the natural soil increased significantly the soil's resistance, showing that the incorporation of both materials can promote the stabilization of the soil.

Key-words: Sandy soil; Soil-lime; Stone dust; Stabilization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Granulometria com o acréscimo de cal	24
Figura 2 - Resultados da compactação de solo dispersivo	26
Figura 3 - Resultados da compactação em um solo coesivo	26
Figura 4 - Influência da cal na microestrutura do solo	28
Figura 5 - Microestrutura de um solo expansivo estabilizado com cal	29
Figura 6 - RCS de um solo dispersivo estabilizado com cal	30
Figura 7 - Resistência à compressão não confinada para (a) solo expansivo e (b) solo residual não confinado	31
Figura 8 - Resultados de resistência à compressão simples de acordo com o tempo de cura	32
Figura 9 - Variação do peso específico aparente seco e da umidade ótima em relação ao teor de pó de pedra.....	35
Figura 10 - Peso específico aparente seco e umidade ótima em relação ao teor de pó de pedra	35
Figura 11 - Microscopia com grãos de pó de pedra	36
Figura 12 - Resistência à compressão simples com relação ao tamanho das partículas do pó de pedra	37
Figura 13 - Influência do pó de pedra na resistência do solo	38
Figura 14 - Influência da cal e do pó de pedra na curva de compactação do solo	39
Figura 15 - RCS em solo com incorporação de cal e pó de pedra.....	40
Figura 16 - Influência do pó de pedra na mistura solo-cal	41
Figura 17 - Porosidade em misturas de solo-cal e pó de pedra	42
Figura 18 - MEV em solo-cal com e sem pó de pedra	43
Figura 19 - Xambrê - Pr (a); Solos do Paraná (b)	46
Figura 20 - Localização da jazida do solo	47
Figura 21 - Localização de Maringá-Pr nos grupos litológicos	49
Figura 22 - Confeção dos corpos de prova	53
Figura 23 - Marcações para o corpo de prova	54
Figura 24 - Esquema do ensaio de propagação de onda (Sonelastic).....	55
Figura 25 - Ensaio de resistência à compressão simples.....	56
Figura 26 - Preparo das amostras para o ensaio de MEV	57
Figura 27 - Curva granulométrica do solo natural.....	60

Figura 28 - Curva granulométrica do pó de pedra.....	61
Figura 29 - Curva granulométrica da cal.....	62
Figura 30 - Granulometria dos materiais e misturas	63
Figura 31 - Curvas granulométricas das misturas de solo-pó de pedra.....	64
Figura 32 - Massa específica real dos grãos.....	65
Figura 33 - DRX do solo natural	68
Figura 34 - DRX do pó de pedra	69
Figura 35 - DRX da cal	69
Figura 36 - Curva de compactação para o solo natural	70
Figura 37 - Curva de compactação para a mistura S75-P25	71
Figura 38 - Curva de compactação para a mistura S50-P50	71
Figura 39 - Curva de compactação para a mistura S25-P75	72
Figura 40 - Curvas de compactação sem cal	73
Figura 41 - Curvas de compactação para as misturas com 7% de cal.....	73
Figura 42 - Curvas de compactação para as misturas com 9% de cal.....	74
Figura 43 - Curvas de compactação para as misturas com 11% de cal.....	74
Figura 44 - Porosidade por teor de pó de pedra, para 0% de cal.....	75
Figura 45 - Porosidade por teor de pó de pedra, para 7% de cal.....	76
Figura 46 - Porosidade por teor de pó de pedra, para 9% de cal.....	77
Figura 47 - Porosidade por teor de pó de pedra, para 11% de cal.....	77
Figura 48 - Porosidade por teor de cal, para 0% de pó de pedra.....	78
Figura 49 - Porosidade por teor de cal, para 25% de pó de pedra.....	79
Figura 50 - Porosidade por teor de cal, para 50% de pó de pedra.....	79
Figura 51 - Porosidade por teor de cal, para 75% de pó de pedra.....	80
Figura 52 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 7 dias de cura.....	81
Figura 53 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 14 dias de cura.....	82
Figura 54 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 21 dias de cura.....	83
Figura 55 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 28 dias de cura.....	84
Figura 56 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de pó de pedra das amostras com 7 dias de cura.....	85

Figura 57 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de pó de pedra das amostras com 14 dias de cura.....	86
Figura 58 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de pó de pedra das amostras com 21 dias de cura.....	87
Figura 59 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de pó de pedra das amostras com 28 dias de cura.....	88
Figura 60 - Variação da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura das amostras com 0% de pó de pedra	90
Figura 61 - Variação da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura das amostras com 25% de pó de pedra	90
Figura 62 - Variação da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura das amostras com 50% de pó de pedra	91
Figura 63 - Variação da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura das amostras com 75% de pó de pedra	91
Figura 64 - Variação da velocidade de propagação (Vp) e do módulo de elasticidade dinâmico (Ecd) em função do teor de cal para o solo natural.	93
Figura 65 - Variação da velocidade de propagação (Vp) e do módulo de elasticidade dinâmico (Ecd) em função do teor de cal para a mistura S ₇₅ P ₂₅	94
Figura 66 - Variação da velocidade de propagação (Vp) e do módulo de elasticidade dinâmico (Ecd) em função do teor de cal para a mistura S ₅₀ P ₅₀	95
Figura 67 - Variação da velocidade de propagação (Vp) e do módulo de elasticidade dinâmico (Ecd) em função do teor de cal para a mistura S ₂₅ P ₇₅	96
Figura 68 - Micrografia para as amostras com 9% de cal e 28 dias de cura (×500)	97
Figura 69 - Micrografia para as amostras com 9% de cal e 28 dias de cura (×1000)	98
Figura 70 - Micrografia para as amostras com 9% de cal e 28 dias de cura (×2000)	99
Figura 71 - Micrografia para as amostras com 9% de cal e 28 dias de cura (×5000)	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 - Granulometria de um solo residual jovem com adição de cal.....	25
Tabela 3 - Resultados obtidos no Proctor de um solo arenoso	27
Tabela 4 - pH obtido em misturas de cal e solo sedimentar	27
Tabela 5 - pH de misturas de solo com cal em pó e em pasta	28
Tabela 6 - Resultados de RCS para um solo arenoso estabilizado com cal	30
Tabela 7 - Influência do tempo de cura na resistência do solo	32
Tabela 8 - Granulometria de solo com incorporação de pó de pedra	34
Tabela 9 - RCS para teores diferentes de cal e de pó de pedra.....	43
Tabela 10 - Etapas e Ensaio do Programa de Pesquisa	45
Tabela 11 - Proporções dos materiais para as misturas adotadas.	50
Tabela 12 - Análise química realizada no Agrisolum	58
Tabela 13 - Coeficiente de uniformidade e de curvatura.....	63
Tabela 14 - Limites de consistência.....	66
Tabela 15 - Resultado dos ensaios de pH em H ₂ O e CaCl ₂	66

LISTA DE ABREVIATURAS

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AASHTO – *American Association for State Highway and Transportation Officials* (Associação dos Servidores Estaduais Rodoviários e de Transporte dos EUA)

ASTM – *American Society for Testing Materials* (Sociedade Americana para Teste de Materiais)

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

pH – Potencial Hidrogeniônico

SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos

ICL – *Initial Consumption of Lime* (Consumo inicial de cal)

RCS – Resistência à Compressão Simples

MDD – *Maximum Dry Density* (Máxima densidade seca)

OMC – *Optimum Moisture Content* (Teor de umidade ótima)

SP – *Stone Powder* (Pó de pedra)

UCS – *Unconfined Compressive strength* (Resistência à compressão não-confinada)

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

DRX – Difractometria por Raio-X

COMCAP – Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa da Universidade Estadual de Maringá

GEMA – Grupo de Estudos Multidisciplinares do Meio Ambiente

UEM – Universidade Estadual de Maringá

LVDTs – Transdutores de Deslocamento Variável Linear

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

MO – Matéria Orgânica

LP – Limite de Plasticidade

LL – Limite de Liquidez

IP – Índice de Plasticidade

NP – Não Plástico

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

LISTA DE SÍMBOLOS

CO₂ – Dióxido de carbono

CaCl₂ – Cloreto de Cálcio

Ecd – Módulo de elasticidade dinâmico

Eci – Módulo de deformação tangencial inicial

ρ – Densidade do corpo de prova

Q – Quartzo

K – Feldspato

C – Caulinita

Mi – Mica

Mu – Muscovita

Ma – Magnetita

He – Hematita

Fe – Ferro

Mg – Magnesita

W – Umidade

W_{ot} – Umidade Ótima

ρ_d – Peso Específico Aparente Úmido

q_u – Resistência à Compressão Simples Não confinado

Ca – Teor de Cal

Pp – Teor de Pó de Pedra

Vp – Velocidade de Propagação

η – Porosidade

e – Índice de Vazios

S – Grau de Saturação

γ_d – Massa Específica

Mcp – Massa do Corpo de Prova

V_a – Volume de Água

V_v – Volume de Vazios

Vpm – Velocidade de Propagação Média

SUMÁRIO

CAPÍTULO I: CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
1.1 INTRODUÇÃO	18
1.2 JUSTIFICATIVA	19
1.3 OBJETIVOS	20
1.3.1 Objetivo Geral	20
1.3.2 Objetivos específicos	20
1.4 ESCOPO	21
CAPÍTULO II: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO	22
2.2 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA POR MEIO DE CAL HIDRATADA	23
2.2.1 Alterações causadas pela cal.....	24
2.2.1.1 Granulometria	24
2.2.1.2 Peso específico aparente seco e umidade ótima	25
2.2.1.3 Potencial Hidrogeniônico - pH	27
2.2.1.4 Microestrutura	28
2.2.1.5 Resistência à compressão	29
2.2.2 Efeito do tempo de cura na resistência à compressão simples de misturas solo-cal.....	31
2.3 ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA POR MEIO DO PÓ DE PEDRA	32
2.3.1 Alterações causadas pelo pó de pedra	33
2.3.1.1 Granulometria	34
2.3.1.2 Peso específico aparente seco e umidade ótima	34
2.3.1.3 Potencial Hidrogeniônico (pH).....	35
2.3.1.4 Microestrutura	36
2.3.1.5 Resistência à compressão simples	37
2.4 ESTABILIZAÇÃO POR MEIO DE CAL E PÓ DE PEDRA.....	38
CAPÍTULO III: PROGRAMA DE PESQUISA	44
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	44
3.2 MATERIAIS.....	45
3.2.1 Solo.....	46
3.2.2 Cal.....	47
3.2.3 Pó de pedra	48

3.2.4 Misturas	49
3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	49
3.3.1 Ensaios de caracterização geotécnica	50
3.3.2 Ensaios de difração de raio X (DRX)	51
3.3.3 Compactação – Proctor Normal	51
3.3.4 pH dos materiais	52
3.4 MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA	52
3.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	53
3.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	55
3.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	57
CAPÍTULO IV: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	58
4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA	58
4.1.1 Caracterização do solo	58
4.1.2 Análise granulométrica	59
4.1.3 Massa específica real dos grãos	65
4.1.4 Limites de Atterberg	65
4.1.5 pH dos materiais e das misturas	66
4.1.5 Difratometria por raio X (DRX)	67
4.1.4 Compactações	69
4.1.4.1 Influência do teor de cal	70
4.1.4.2 Influência do teor de pó de pedra	72
4.1.5 Porosidade	74
4.1.5.1 Efeito do pó de pedra.....	75
4.1.5.2 Efeito da cal	78
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	80
4.2.1 Efeito da cal	81
4.2.2 Efeito do pó de pedra	85
4.2.3 Efeito do tempo de cura	89
4.3 TÉCNICA DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO (SONELASTIC)	92
4.3.1 Efeito da cal	92
4.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	96
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
APÊNDICE A	108

APÊNDICE B..... 112
APÊNDICE C 114

CAPÍTULO I: CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 INTRODUÇÃO

O solo é um material da construção com grande aplicabilidade e grande abundância no mundo, porém seu uso requer que certos critérios técnicos sejam atendidos, o que restringe a utilização de certas jazidas devido a sua qualidade tecnológica inferior. Nem sempre as qualidades do solo, nas proximidades da construção, são adequadas para seu uso e isso leva a necessidade de transportar materiais de outras jazidas, para que o critério técnico seja atendido.

No entanto, o transporte do solo representa um considerável acréscimo no custo total da obra, o que torna essa solução economicamente inviável, assim recorre-se as estabilizações mecânicas e químicas, que podem ser feitas no solo, para que se garanta a estabilidade dos agregados e assim se atenda as especificações exigidas em projeto. A escolha adequada do tipo de estabilização é feita com base nas propriedades que precisam ser modificadas e nos propósitos a que se destinam a estabilização.

Segundo Godim (2008), a estabilização mecânica é aquela que modifica apenas o arranjo das partículas do solo ou sua granulometria, os métodos mais utilizados para esse fim são a compactação e a correção granulométrica. Já a estabilização química se faz com a utilização de agentes estabilizantes que reagem com as partículas do solo modificando-o fisicamente.

Os aditivos mais utilizados na estabilização do solo são o cimento, a cal e os materiais betuminosos. A mistura solo-cal é feita com base na escarificação do solo, ou seja, é adicionado a cal na superfície do solo solto, depois há uma mistura de ambos os materiais e em seguida se acrescenta água e se faz a compactação desta mistura, com isso aumenta-se a resistência mecânica do solo.

A produção da cal, no entanto, é conhecida como uma atividade de grande geração de impactos ambientais, tanto na utilização de recursos naturais quanto na produção de gases que poluem o meio ambiente. Para que se reduza os impactos gerados na produção de cal, uma alternativa, é substituir ou diminuir a quantidade de cal na construção.

Em solos que possuem uma granulometria muito ruim somente a adição da cal não é suficiente para garantir as características de projeto. Nesse sentido, a estabilização conjunta é uma solução. Para solos que apresentam uma má granulometria a estabilização granulométrica é o mais indicado, pois esta promove uma correção no solo.

Na literatura há diversos materiais que são utilizados para fazer a correção granulométrica dos solos, dentre eles tem-se: resíduos da construção civil, pneus velhos, material asfáltico, outros solos, rejeitos de mineração, entre outros. Um material que apresenta grande potencial e que vem sendo pesquisado para esse tipo de estabilização é o pó de pedra.

Esta pesquisa tem por objetivo, portanto, analisar a estabilização de um solo arenoso, da cidade de Xambrê – Pr, por meio da incorporação de cal e pó de pedra.

1.2 JUSTIFICATIVA

Apesar do solo ser um material disponível na natureza, nem sempre este apresenta as características necessárias para ser empregado em obras de engenharia. Em casos assim, para se evitar mudanças em projeto, como: abandono de locais ou remoção do material, surgiu a estabilização de solos.

Os tipos de estabilizações mais comuns na engenharia são a química, a mecânica e conjunta, ou seja, a estabilização físico-química do solo. A estabilização escolhida dependerá de diversos fatores, como custo, finalidade e propriedades do solo e do material que será utilizado para a estabilização.

No caso da estabilização química, os materiais utilizados para este fim são, normalmente, grandes geradores de poluição, principalmente a ambiental. Como exemplo pode-se citar a produção de cal. Segundo Gurgel e Filho (2012), a atividade caieira causa impactos ambientais, como: degradação da área devido a extração do calcário, supressão vegetal, uso de lenha como fonte energética (o que resulta em poluição atmosférica), entre outros.

Estes materiais são, também, muito custosos, o que torna a estabilização conjunta muito comum em obras de engenharia. Pensando nisso, antes da estabilização química, faz-se a estabilização mecânica do solo. Esta pode ser por realizada por meio da compactação e/ou da correção granulométrica. Esta última consiste na incorporação de um outro material para que a granulometria do solo seja rearranjada e, com isso, o comportamento mecânico seja melhorado. Uma opção viável desse tipo de estabilização é a incorporação de resíduos industriais, como o pó de pedra.

O pó de pedra é um resíduo que apresenta grande potencial para o uso na estabilização de solos. Além disso, a possibilidade do uso deste material contribui para minimizar o descarte irregular/inadequado deste resíduo no meio ambiente.

Diante do potencial deste resíduo, da diminuição do impacto ambiental causando pelo seu descarte irregular e pelos impactos ambientais causados na produção de cal, além da redução no custo da obra, um estudo da viabilidade de uma mistura composta por ambos os materiais se mostra uma opção interessante. A junção da cal e do pó de pedra acarreta na preservação de recursos naturais e na redução da exploração de jazidas de solos naturais; além de colaborar com a diminuição do consumo da cal e favorecer a destinação ambientalmente adequada do pó de pedra.

1.3 OBJETIVOS

A seguir são apresentados os objetivos, geral e específicos, desta pesquisa.

1.3.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem por objetivo analisar a estabilização de um solo arenoso, da cidade de Xambrê – Pr, por meio da incorporação de cal e pó de pedra.

1.3.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, foram desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar as características do solo, da cal e do pó de pedra por meio de ensaios de caracterização geotécnica, química e mineralógica;
- Analisar as características das misturas de solo-cal, solo-pó de pedra e solo-cal-pó de pedra utilizando ensaios de caracterização geotécnica;
- Avaliar o comportamento mecânico do solo natural e das misturas, submetidas a diferentes teores de cal e de pó de pedra, além de diferentes tempos de cura, por meio do ensaio de resistência à compressão simples;
- Avaliar o comportamento do módulo de elasticidade dinâmico do solo natural e das misturas, também considerando os diferentes teores de cal e pó de pedra e o período de cura, por meio de ensaios não destrutivos (Sonelastic);
- Investigar a microestrutura das diferentes misturas por meio de ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV);

- Investigar a influência do teor de cal e do teor de pó de pedra no solo arenoso da cidade de Xambrê – Pr.

1.4 ESCOPO

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos principais, sendo eles: Considerações Iniciais, Fundamentação Teórica, Materiais e Métodos, Resultados e Discussões e Conclusões.

O Capítulo I apresenta uma contextualização da problemática do tema, a justificativa da pesquisa e os objetivos geral e específicos.

O Capítulo II faz uma abordagem geral sobre o solo, a cal, a mistura solo-cal, o pó de pedra, a mistura solo-pó de pedra e a mistura solo-cal-pó de pedra. Nesse tópico há a contextualização da temática principal da pesquisa e a apresentação do embasamento teórico que guiaram as discussões.

O Capítulo III descreve em detalhes todos os materiais utilizados na pesquisa, bem como os métodos de ensaios usados para o estudo do comportamento das misturas analisadas. São descritos os procedimentos, em sua maioria regidos por normas, a moldagem dos corpos de prova e a execução do ensaio de resistência, da técnica de excitação por impulso e da microscopia eletrônica de varredura.

O Capítulo IV traz, em detalhes, todos os resultados obtidos pelos ensaios, tanto dos materiais quanto das misturas. Nesse capítulo são analisados os comportamentos individuais dos materiais e misturas, além de comparações entre seus desempenhos e o de outras pesquisas já realizadas.

Por fim, o Capítulo V exhibe uma sumarização dos resultados parciais obtidos e como o trabalho cumpriu com os objetivos propostos.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO

A estabilização do solo pode ser considerada qualquer modificação realizada em alguma propriedade do solo que melhore o seu comportamento tendo em vista sua aplicação na engenharia. Mais especificamente, a estabilização do solo consiste na aplicação de algum material estabilizante que modifique as propriedades desse solo de maneira que ele possa atender as necessidades previstas em projeto.

Para Medina e Motta (2004), a estabilização do solo consiste no tratamento dado ao material para melhorar suas características de resistência, sejam elas: a diminuição da compressibilidade, a melhoria da resistência ao cisalhamento e a diminuição ou aumento da permeabilidade.

Para Vizcarra (2010), a estabilização de um solo é a alteração de qualquer propriedade de forma tal que haja uma melhora em seu comportamento, considerando o ponto de vista da engenharia. Para o autor, a estabilização consiste em um tratamento (artificial), por meio de um processo físico, químico ou físico-químico, que torne o solo estável para uso, mantendo, ainda, a estabilidade sob a ação de cargas exteriores e, também, sob as ações climáticas.

De acordo com Medina e Motta (2004), as mudanças que a engenharia visa são relacionadas a resistência ao cisalhamento, a permeabilidade e a compressão. Godim (2008), ainda acrescenta a expansibilidade e a durabilidade como outras propriedades que são importantes para a engenharia.

Quando há mudanças apenas no arranjo das partículas do solo ou em sua granulometria o método é conhecido como estabilização física, entre as técnicas mais usuais estão a compactação e a correção granulométrica.

A estabilização por meio da correção granulométrica, segundo Godim (2008), consiste na composição de solos ou de solos e agregados de maneira que a mistura resultante garanta a resistência do material por meio do contato entre os grãos de partículas maiores e do preenchimento dos vazios feito através dos materiais de grãos mais finos, isso para garantir uma menor permeabilidade e uma maior densidade do solo.

Quando o solo ou a mistura de outro material com o solo não consegue atingir a estabilidade mecânica adequada ou quando a resistência desse solo ou dessa mistura não é atingida, faz-se necessário a adição de estabilizantes químicos. A estabilização química é um

processo em que agentes estabilizantes e partículas do solo reagem um com outro, modificando, assim, as propriedades físicas do solo, isso resulta em uma melhora das características mecânicas e hidráulicas do material. Os aditivos mais utilizados na estabilização dos solos são: a cal e o cimento Portland.

A escolha do tipo de estabilização, de acordo com Lopes (2011), é influenciada pelo custo, pela finalidade da obra e pelas características dos materiais e propriedades do solo que necessitam ser corrigidas.

2.2 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA POR MEIO DE CAL HIDRATADA

A estabilização realizada com a cal pode ser obtida com o uso de hidróxido de cálcio (cal hidratada) ou de óxido de cálcio (cal viva ou cal virgem). O efeito da estabilização dependerá do ataque químico da cal sobre os argilominerais, propiciando a formação de compostos cimentantes, como os silicatos de cálcio. Normalmente, a cal hidratada é mais utilizada que a cal virgem, pois esta apresenta maior dificuldade de estoque e manipulação, principalmente em regiões úmidas (INGLES; METCALF, 1972).

A cal hidratada, de acordo com a ABNT NBR 7175 (2003), é obtida pela hidratação da cal virgem e constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio ou uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio. Os tipos de cal hidratada que existem no mercado são: CH-I, CH-II e CH-III.

Dentre as várias características que a cal fornece para o solo estão: a diminuição da plasticidade, a redução da expansão e o aumento da resistência do solo, por ser um material fino; e o aumento da superfície específica do material, o aumento da capacidade de saturação e a diminuição do peso específico aparente seco, devido as reações químicas que ocorrem da mistura da cal com outros materiais e ligantes (ARAÚJO *et al*, 2008).

O procedimento para a dosagem da mistura solo-cal depende de vários testes feitos em laboratório, esses testes visam estudar a resistência e a durabilidade adequadas ao uso a qual a mistura se destina. Entre os métodos de dosagem mais utilizados estão: o Método de Lime Fixation Point, desenvolvido por Hilt e Davidson em 1960; o método desenvolvido por Eades e Grimm em 1966, conhecido por Método do pH; o Método de Thompson (1966); e o método proposto por Rogers *et al* (1997), conhecido por Método do ICL (*Initial Consumption of Lime*).

Nem sempre o método adotado vai funcionar para todos os tipos de solo. Estudo realizados por Kanazawa (2015) mostraram que o Método do pH não produziu a máxima

resistência à compressão em solos tropicais e subtropicais. Nuñez (1991), observou que, em solos saprolíticos de arenito, o Método do pH não apresentou níveis de cal viáveis. Thomé (1994), constatou que solos caracterizados como Gley Húmicos não obtiveram um teor ótimo de cal com o Método de Eades e Grim.

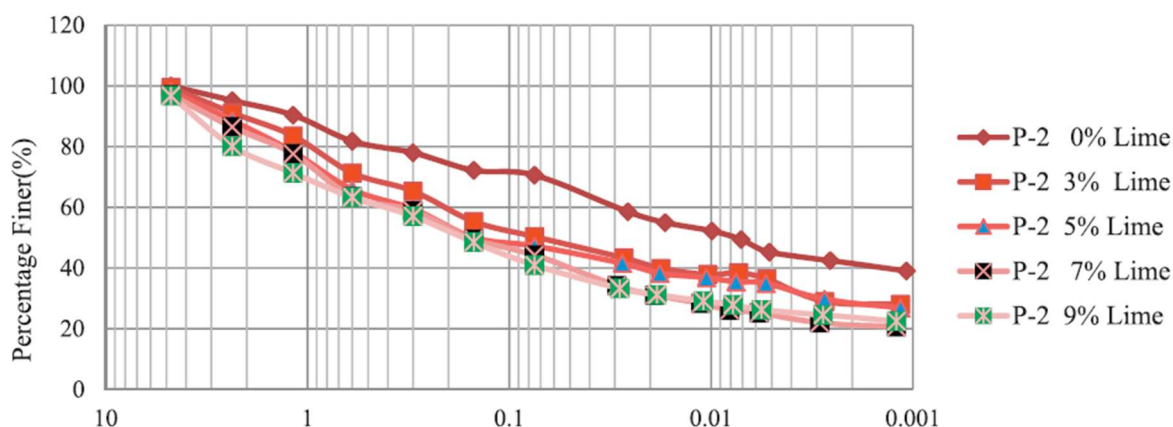
2.2.1 Alterações causadas pela cal

As reações químicas causadas pela incorporação da cal ao solo influenciam nas propriedades e no comportamento mecânico deste. Essas alterações podem ser observadas na granulometria, no peso específico aparente seco, na umidade ótima, no pH, na microestrutura e na resistência à compressão simples, entre outras não evidenciadas neste trabalho.

2.2.1.1 Granulometria

De acordo com Guimarães (2002), quando se adiciona cal ao solo a principal consequência é a aglomeração e floculação, por troca iônica, das finíssimas partículas de argila, isso faz com que o solo se torne mais grosseiro, permeável e friável. No estudo de Gidday e Mittal (2020), os resultados obtidos (Figura 1), com a adição de cal em um solo dispersivo, mostraram que este apresentou uma redução na quantidade de partículas finas conforme o aumento do teor de cal.

Figura 1 - Granulometria com o acréscimo de cal



* Porcentagem de finos (Percentage Finer); Cal (Lime).

Fonte: Gidday e Mittal, 2020.

Silva (2006), em sua pesquisa realizada com uma argila arenosa (solo de Goiânia), mostrou que, com acréscimos de 3% e 6% de cal ao solo, a quantidade de material fino

diminuiu. O decréscimo de material passante na peneira nº200 chegou a 9,9% em relação ao solo natural.

O mesmo comportamento foi obtido na pesquisa de Salomão (2005), em que foram acrescidos teores de cal de 0% a 9%, em um solo residual jovem com predominância de pedregulho e outro com predominância de características siltosas. Os resultados encontram-se na Tabela 2.

Tabela 1 - Granulometria de um solo residual jovem com adição de cal

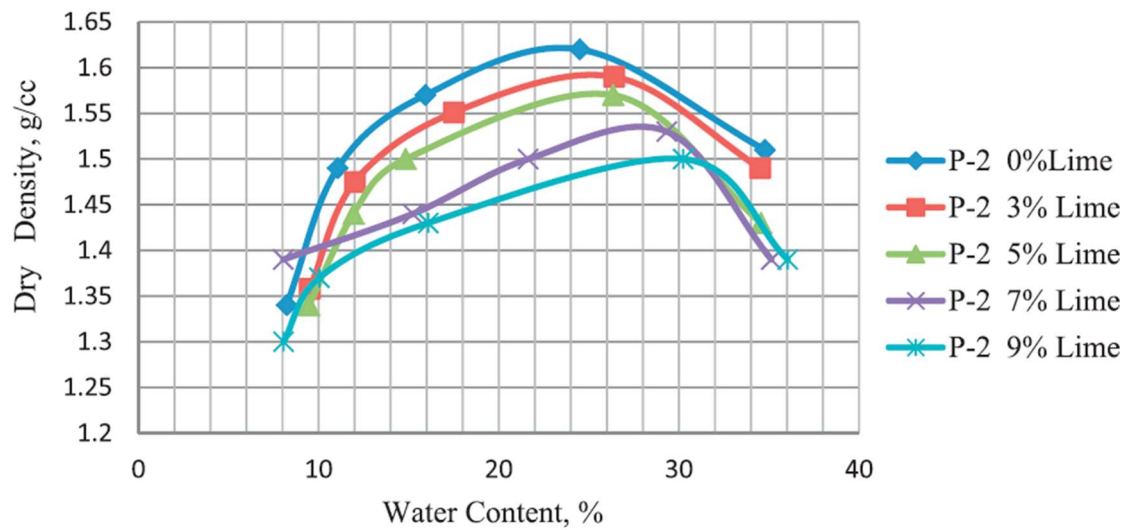
Amostra	Solo Goiânia				Solo APM Manso			
Porcentagem de Cal (%)	0	3	6	9	0	3	6	9
Limite de Liquidez (%)	48	38	39	45	31	37	36	40
Limite de Plasticidade (%)	27	24	25	25	19	22	22	26
Índice de Plasticidade (%)	21	14	14	20	12	15	14	14

Fonte: Salomão, 2005.

2.2.1.2 Peso específico aparente seco e umidade ótima

Em relação ao peso específico aparente seco e à umidade ótima, quando se adiciona cal ao solo, o comportamento mais comum é que o primeiro sofra uma redução e que a umidade sofra um aumento.

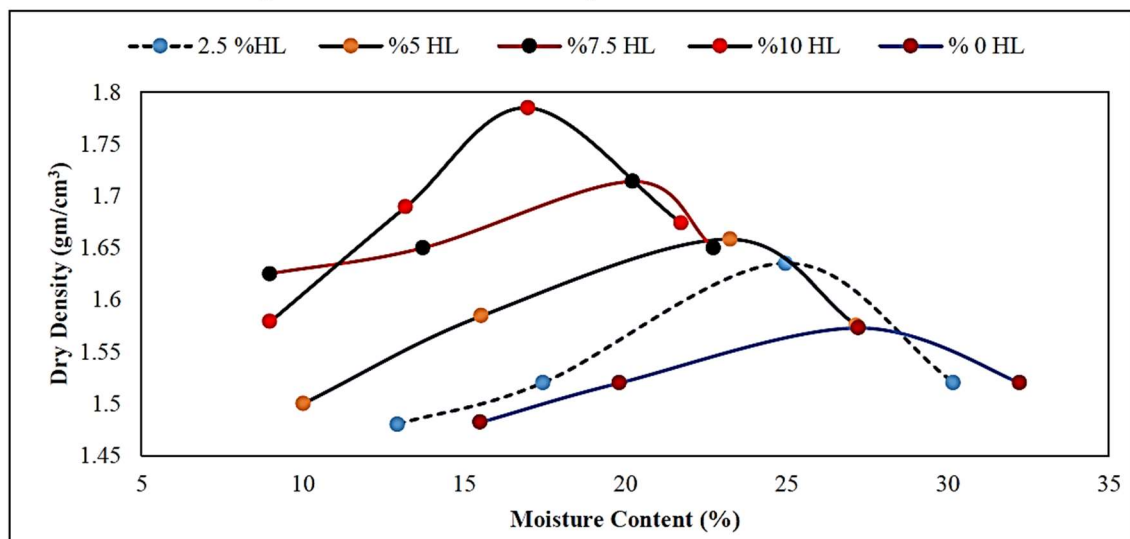
Em uma pesquisa realizada por Gidday e Mittal (2020), para o melhoramento de um solo dispersivo com cal, estudou-se o comportamento do peso específico aparente seco e da umidade ótima do solo ao se acrescentar vários teores de cal, mais especificamente, 0%, 3%, 5%, 7% e 9%. As curvas obtidas pelos pesquisadores estão presentes na Figura 2.

Figura 2 - Resultados da compactação de solo dispersivo

* Densidade seca (Dry density); Teor de umidade (Water content); Cal (Lime).

Fonte: Gidday e Mittal (2020)

Nestes resultados nota-se que conforme se aumenta o teor de cal no solo o peso específico aparente seco decresce, enquanto que a umidade ótima se eleva. O mesmo é percebido no estudo realizado por Salih e Salih (2020) ao utilizar diversos teores de cal hidratada, 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10%, para estabilizar um solo coesivo (Figura 3).

Figura 3 - Resultados da compactação em um solo coesivo

* Densidade seca (Dry density); Teor de umidade (Moisture content).

Fonte: Salih e Salih (2020)

Bordignon (2015) comprovou o mesmo efeito em um solo arenoso estabilizado com cal hidratada. Nesta, o autor utilizou os teores de 0%, 3%, 6%, 8% e 16% de cal. Os resultados para o ensaio estão na Tabela 3.

Tabela 2 - Resultados obtidos no Proctor de um solo arenoso

Medidas	Solo + adição para a energia normal de compactação				
Teor de Cal (%)	0 (%)	3 (%)	6 (%)	8 (%)	16 (%)
$\omega_{ót}$ (%)	26,42	27,02	27,32	25,62	26,53
γ_d máx	1,515	1,510	1,491	1,509	1,481

Fonte: Bordignon (2015)

2.2.1.3 Potencial Hidrogeniônico - pH

Guimarães (2002) afirma que quando a água circula por entre os poros de misturas solo-cal, há um enriquecimento gradual de íons e, conseqüentemente, uma tendência natural à acidificação do solo devido à presença de água, no entanto, a adição da cal ao solo provoca o inverso, ou seja, há uma gradativa mudança do pH do solo de ácido para alcalino.

Em um estudo feito por Bordignon (2015) para identificar os efeitos da adição da cal hidratada na estabilização de um solo sedimentar, uma das avaliações que o autor fez foi relativa ao potencial hidrogeniônico (pH) das misturas entre solo e cal, os resultados obtidos pelo pesquisador encontram-se na Tabela 4.

Tabela 3 - pH obtido em misturas de cal e solo sedimentar

Solo + Teor da Cal	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Média dos pHs
0%	7,9	7,8	8,0	7,9	7,9
3%	9,4	9,5	9,6	9,5	9,5
6%	11,1	11,0	11,3	11,1	11,1
8%	12,1	12,0	12,1	12,1	12,1
16%	12,3	12,2	12,2	12,1	12,2
Cal Pura (CHIII)	12,5	12,4	12,5	12,5	12,5
Água	8,7	8,6	8,7	8,6	8,6

Fonte: Bordignon, 2015

Nota-se que elevando a porcentagem de cal no solo, o pH da mistura tende a aumentar, nunca passando do valor da própria cal. A partir de um determinado valor, o pH passa a ficar

mais constante. Isso é percebido, também, no estudo de Araújo (2014), feita em um solo estabilizado com cal em pó e em pasta (Tabela 5).

Tabela 4 - pH de misturas de solo com cal em pó e em pasta

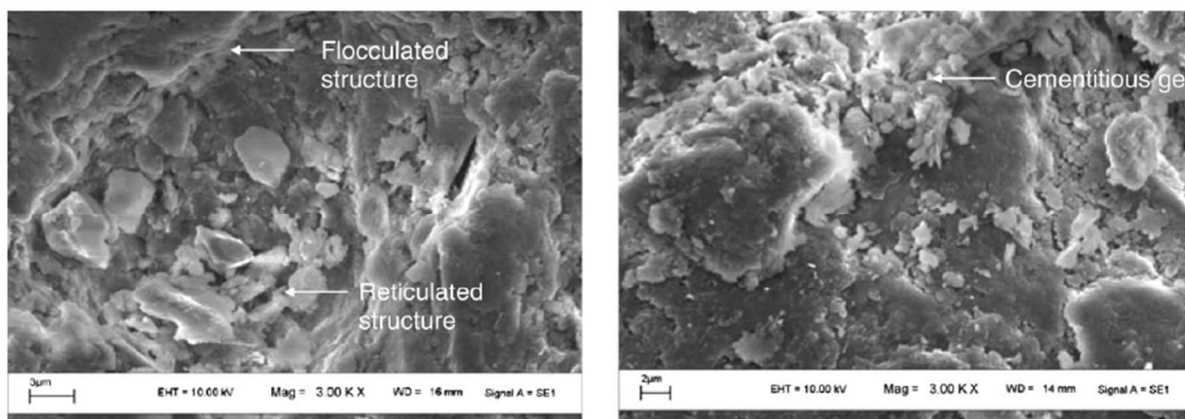
TEOR DE CAL (%)	pH (Am-A)		pH (Am-B)	
	0 DIA DE CURA	7 DIAS DE CURA	0 DIA DE CURA	7 DIAS DE CURA
1%	10,70	11,17	10,36	10,58
3%	11,90	12,12	11,55	11,62
5%	12,00	12,14	11,80	11,89
7%	12,00	12,32	11,82	11,89
9%	11,93	12,47	11,86	11,96

Fonte: Araújo, 2009.

2.2.1.4 Microestrutura

Com relação as características morfológicas das misturas, o trabalho de Dash e Hussain (2012) mostrou uma aglomeração das partículas causada pela adição da cal (Figura 4). Isso ocorreu devido a cimentação bem desenvolvida e estruturas cristalinas em forma reticulada e floculada, o que permitiu o solo ganhar resistência.

Figura 4 - Influência da cal na microestrutura do solo



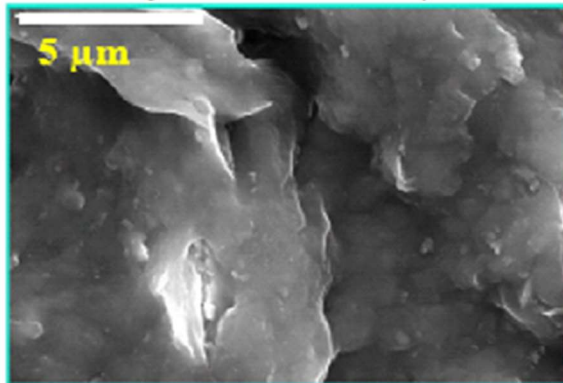
* Estrutura floculada (Flocculated structure); Estrutura reticulada (Reticulated structure); Gel cimentício (Cementitious gel).

Fonte: Dash e Hussain, 2012.

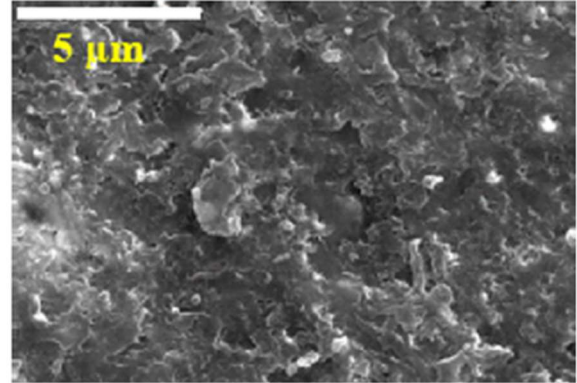
Mukhtar, Khattab e Alcover (2012), estudaram a microestrutura de um solo expansivo tratado com cal e concluíram que a cal modifica fortemente a textura do solo. A adição da cal no solo argiloso fez com que as partículas se unissem, fazendo com que a estrutura se tornasse mais compacta (Figura 5). Tudo isso contribuiu para a diminuição do índice de plasticidade e o aumento da resistência à compressão não confinada.

Figura 5 - Microestrutura de um solo expansivo estabilizado com cal

a: SEM image of untreated FoCa clay



b: SEM image of 10% lime treated FoCa clay



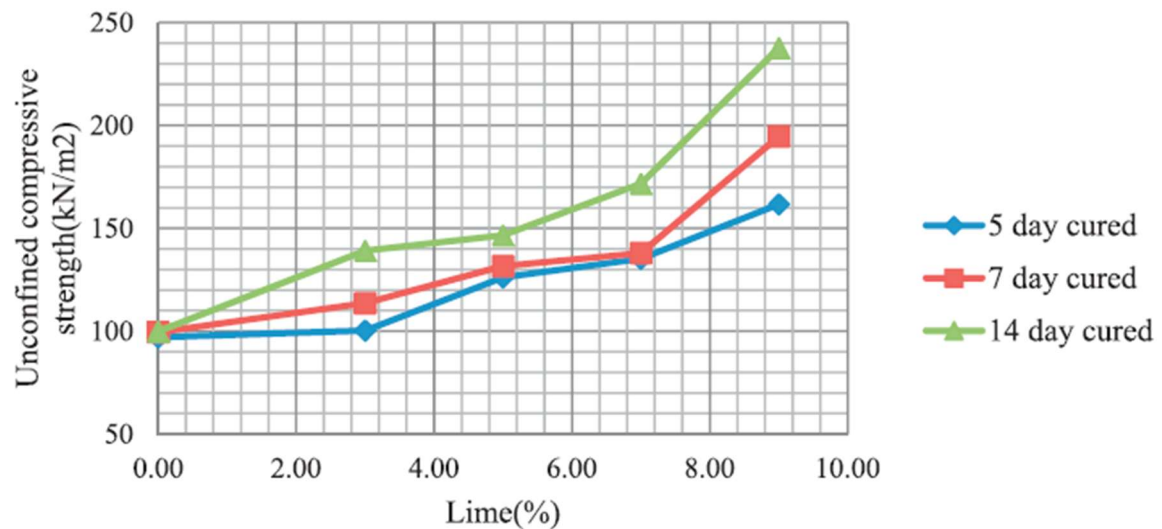
* Imagem do MEV de argila FoCa não tratada (SEM image of untreated FoCa clay); Imagem do MEV de argila FoCa tratada com 10% de cal (SEM image of 10% lime treated FoCa clay)

Fonte: Mukhtar, Khattab e Alcover, 2012

2.2.1.5 Resistência à compressão

A resistência à compressão simples (RCS), devido as reações rápidas de troca catiônica e floculação, aumenta de imediato. O valor da RCS pode variar desde ganhos modestos até várias centenas de vezes, quando comparado ao solo não estabilizado. O aumento da RCS é permanente ao longo do tempo devido as lentas reações pozolânicas (NEUBAUER; THOMPSON, 1972).

No Trabalho de Gidday e Mittal (2020) a resistência à compressão não confinada apresentou um aumento à medida que o teor de cal foi aumentando (Figura 6). O tempo de cura, 5, 7 e 14 dias, também influenciou a resistência, porém mesmo analisando apenas as curvas pelo tempo de cura, ainda, é possível perceber o aumento da resistência de acordo com o teor de cal.

Figura 6 - RCS de um solo dispersivo estabilizado com cal

* Resistência à compressão não-confinada (Unconfined compressive strength); Cal (Lime); Dias de cura (Day cured)

Fonte: Gidday e Mittal, 2020.

Salih e Salih (2020), em sua pesquisa sobre o efeito nas propriedades geotécnicas de solos estabilizados com cal, obtiveram o mesmo resultado, um aumento na resistência à compressão simples com o aumento do teor de cal. Nesse caso, os resultados obtidos foram de 174,23 kN/cm² com um teor de 0% de cal até a marca de 960,85kN/cm² para um teor de 10%.

Guérios (2013), também demonstrou esse crescimento da resistência com o aumento do teor de cal em seu estudo sobre o melhoramento do solo com adição de cal hidratada. Os valores de resistência foram de 1,63MPa para um teor de 0% de cal para 3,29MPa para 10% de cal. Bordignon (2015) resumiu seus dados em uma tabela (Tabela 6), e é possível constatar que a resistência aumentou tanto para o aumento do teor de cal quanto para o tempo de cura das amostras.

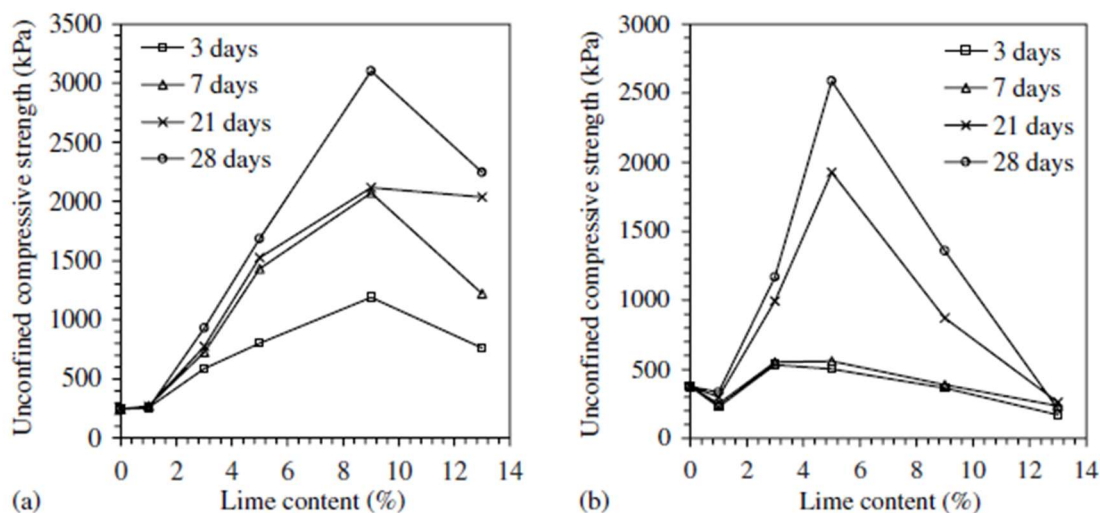
Tabela 5 - Resultados de RCS para um solo arenoso estabilizado com cal

Solo + Cal (%)	Ensaio de RCS em (MPa)				
	0 dia	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias
0 (%)	0,140	0,135	0,163	0,158	0,158
3 (%)	0,153	0,168	0,185	0,208	0,223
6 (%)	0,163	0,440	0,525	0,570	0,573
8 (%)	0,223	0,870	0,988	1,060	1,145
16 (%)	0,218	1,130	1,613	2,370	2,858

Fonte: Bordignon, 2015

Dash e Hussain (2012), ao validar o comportamento de solos estabilizados com cal, comprovaram que o aumento no teor de cal faz aumentar a resistência do solo, esse ensaio foi realizado com dois tipos de solo, um expansivo e o outro residual não expansivo (Figura 7).

Figura 7 - Resistência à compressão não confinada para (a) solo expansivo e (b) solo residual não confinado



* Resistência à compressão não confinada (Unconfined compressive strength); Teor de cal (Lime content); Dias (Days)

Fonte: Dash e Hussain (2012)

No primeiro caso, Figura 7(a), solo expansivo, os valores de resistência são maiores que no caso do solo residual não expansivo, até mesmo com um teor de cal de 13% o solo expansivo se mostrou mais resistente que o solo residual não expansivo, que mostrou uma queda brusca em sua resistência, chegando a valores abaixo do inicial, quando o teor de cal era de 0%.

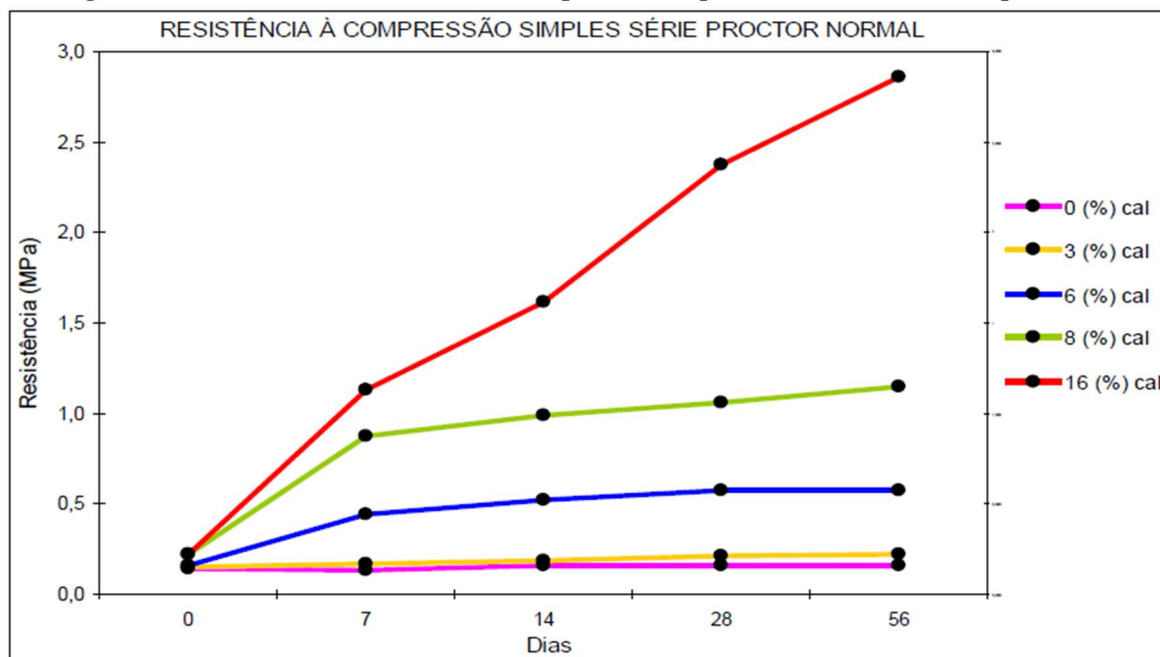
2.2.2 Efeito do tempo de cura na resistência à compressão simples de misturas solo-cal

Em misturas de solo cal a resistência à compressão simples tende a aumentar com o tempo de cura, esse aumento tende a se tornar constante depois de um determinado período.

No estudo realizado por Gidday e Mittal (2020), a resistência à compressão simples da mistura de solo-cal tende a aumentar de acordo com o tempo de cura utilizado no trabalho, como é possível analisar na Figura 7, que apresenta a resistência de acordo com a cura de 5, 7 e 14 dias. É perceptível que com o passar do tempo a resistência da mistura solo cal, independente do teor de cal utilizado, vai aumentando.

Bordignon (2015), mostrou o mesmo comportamento de resistência em misturas solo-cal com diferentes tempos de cura (Figura 8). Neste caso, o teor de 16% de cal se mostrou um grande aumento na resistência, quando incorporado ao solo, se comparado aos demais teores.

Figura 8 - Resultados de resistência à compressão simples de acordo com o tempo de cura



Fonte: Bordignon, 2015

Na pesquisa de Araújo (2009), o tempo de cura também apresentou influência na resistência à compressão simples de misturas de solo-cal em pó e em pasta, os resultados obtidos encontram-se nas Tabela 7.

Tabela 6 - Influência do tempo de cura na resistência do solo

TÉCNICA UTILIZADA		CAL EM PÓ			CAL EM PASTA		
TEOR DE CAL		3%	5%	7%	3%	5%	7%
TEMPO DE CURA	0 DIA	0	0	0	0	0	0
	7 DIAS	0,38	0,31	0,32	0,39	0,25	0,34
	14 DIAS	0,75	0,73	0,62	0,60	0,43	0,67
	28 DIAS	0,83	1,24	1,17	0,87	0,47	0,89
	90 DIAS	0,56	1,52	1,18	0,55	1,20	1,37

Fonte: Araújo 2009.

2.3 ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA POR MEIO DO PÓ DE PEDRA

A estabilização granulométrica é um tipo de estabilização física que é formada pela combinação proporcional entre agregados graúdos, agregados miúdos, silte e argila. A mistura

destas substâncias, de forma proporcional, resulta em um material que possui melhores propriedades de resistência as tensões devido ao carregamento, à erosão e ao desgaste – quando comparado ao material natural encontrado na obra. (KLINSKY, 2013)

Na literatura há diversos materiais que são utilizados para fazer a correção granulométrica dos solos, dentre eles estão: resíduos da construção civil, pneus velhos, material asfáltico, outros solos, rejeitos de mineração, entre outros. Um material que apresenta grande potencial para esse tipo de estabilização é o pó de pedra.

A norma ABNT NBR 7225: 1993, considera o pó de pedra como sendo um produto proveniente do processo de britagem de rochas e que seu diâmetro máximo é inferior a 0,075mm. Já Mendes e Soares (2000), afirmam que o pó de pedra, ou finos de pedreiras, são materiais com granulometria inferior a 4,8mm, resultantes do processo de britagem, detonação e redução granulométrica e peneiramento das rochas usadas na fabricação de brita. A ABNT NBR 10004: 2004, classifica o pó de pedra como pertencente a Classe II B – Inerte, em outras palavras, o material possui baixa capacidade de reação e não sofre alterações em sua composição com o passar do tempo, o que mostra a sua capacidade em ser reutilizado, ou seja, reciclado.

Por não possuírem grande utilização, o pó de pedra acaba sendo acumulado nos pátios e arredores das pedreiras. Esses lugares são suscetíveis a ação da chuva e dos ventos o que faz surgir diversos tipos de problemas, como: alteração da paisagem, assoreamento de rios e lagos, geração de poeira e comprometimento dos lençóis freáticos (D'AGOSTINO e SOARES, 2003). Segundo Almeida e Sampaio (2002), o estoque destes materiais pode sofrer a ação de intempéries e acabar sendo drenados pelos rios, causando assoreamento destes.

Em decorrência do grave problema ambiental gerado pelo acúmulo do pó de pedra nas áreas entorno das pedreiras, esse material vem sendo amplamente estudado. Por possuir pouca ou nenhuma reação pozolânica, uma das funções que ele pode adquirir dentro da construção civil é o de estabilização granulométrica para solos mal graduados.

2.3.1 Alterações causadas pelo pó de pedra

Assim como a cal, o pó de pedra também causa mudanças em algumas propriedades físicas, químicas e mecânicas do solo. Essas alterações podem ser observadas na granulometria, no peso específico aparente seco, na umidade ótima, no pH, na microestrutura e na resistência à compressão simples do solo. Essas propriedades serão tratadas a seguir, pois são relevantes para este trabalho.

2.3.1.1 Granulometria

A adição do pó de pedra no solo causa uma mudança na granulometria do solo no sentido de aumentar a fração mais grossa e diminuir a fração fina. Isso é visto em trabalhos como o de Souza (2020), em que foi estudado a incorporação de pó de pedra e resíduos da construção civil em misturas de solo-cimento. De acordo com a pesquisa, a incorporação do pó de pedra fez com que a granulometria do solo natural, com 51% de argila, 34% de silte e 15% de areia fina, alterasse para 20,1% de areia grossa, 8,8% de areia média, 23,46% de areia fina, 27,51 % de silte e 20,13% de argila, para uma mistura de 50% solo e 50% pó de pedra.

O mesmo comportamento foi observado por Abdulrasool (2015), em uma pesquisa sobre estabilização de um solo argiloso com pó de pedra (Tabela 8).

Tabela 7 - Granulometria de solo com incorporação de pó de pedra

Stone powder %	0%	1%	3%	5%
Sand size %	1%	3%	3%	6%
Silt size %	61%	66%	67%	71%
Clay size %	38%	31%	30%	23%

* Pó de pedra (Stone powder); Quantidade de areia (Sand size); Quantidade de silte (Silt size); Quantidade de argila (Clay size).

Fonte: Abdulrasool, 2015.

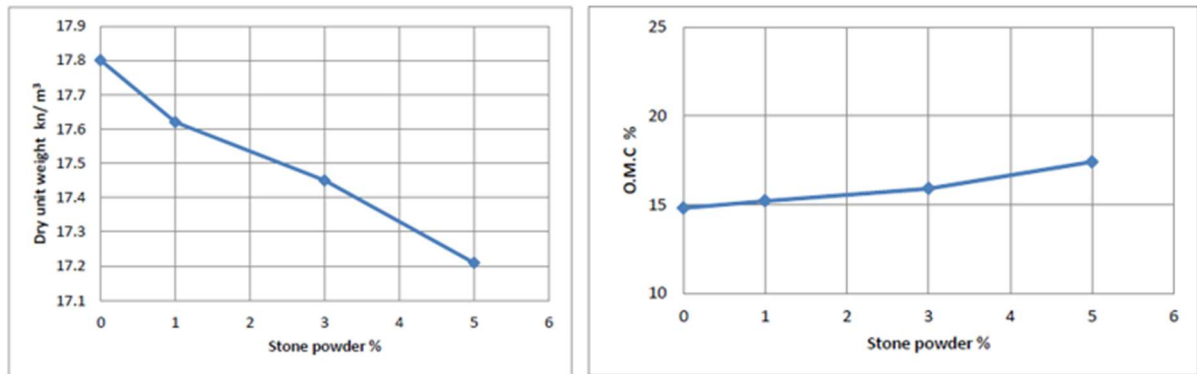
2.3.1.2 Peso específico aparente seco e umidade ótima

Com relação ao peso específico aparente seco e a umidade ótima quando se acrescenta pó de pedra, a literatura apresenta variações nos resultados.

Na pesquisa de Souza (2020), o peso específico aparente seco aumentou de 1,46g/cm³, no solo natural, para 1,77g/cm³, no solo com 50% de pó de pedra. Com relação a umidade ótima, houve uma redução de 32%, no solo natural, para 20,55%, na mistura de 50% solo e 50% pó de pedra.

Na pesquisa de Abdulrasool (2015), essas duas propriedades se comportaram de forma diferente do apresentado por Souza (2020) – Figura 9.

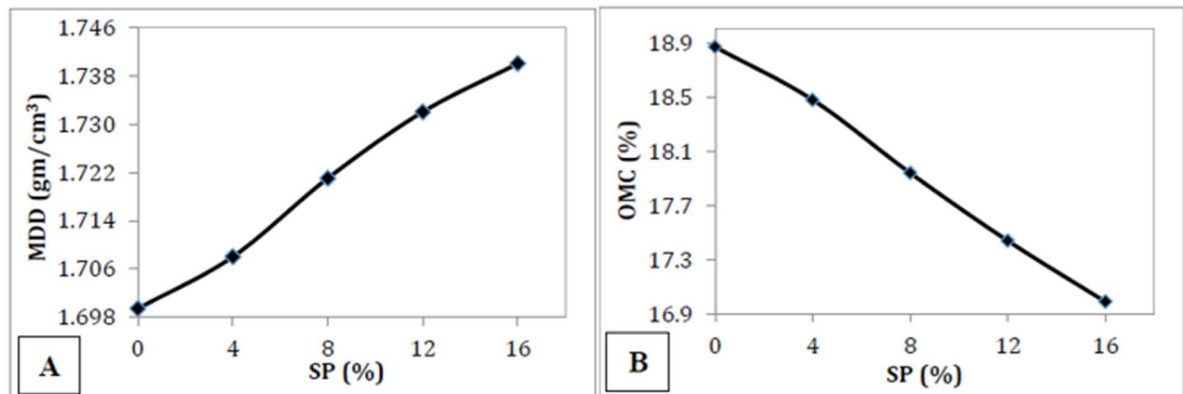
Figura 9 - Variação do peso específico aparente seco e da umidade ótima em relação ao teor de pó de pedra



* Peso específico seco (Dry unit weight); Pó de pedra (Stone powder); Teor de umidade (O.M.C).
Fonte: Abdulrasool, 2015.

Na Figura 9 pode-se observar que o peso específico aparente seco diminui com o aumento do teor de pó de pedra, enquanto que a umidade ótima aumenta com o aumento do teor de pó de pedra. Obtendo o mesmo comportamento, a pesquisa de Salih (2022), também apresentou um aumento da umidade ótima e uma redução no peso específico aparente seco em relação ao aumento do teor de pó de pedra (Figura 10).

Figura 10 - Peso específico aparente seco e umidade ótima em relação ao teor de pó de pedra



* Peso específico seco (MDD); Pó de pedra (SP); Teor de umidade (O.M.C).
Fonte: Salih, 2022.

2.3.1.3 Potencial Hidrogeniônico (pH)

Com relação ao Potencial Hidrogeniônico (pH), um aumento no teor de pó de pedra ao solo não traz grandes variações no pH do solo, se comparado a cal, por exemplo. A pesquisa de Roohbakhshan e Kalantari (2013), que estuda o efeito da adição do pó de pedra e da cal nas características de um solo, mostrou que um aumento de 3% de pó de pedra ao solo resultou no aumento do pH de 6,82 para 7,88.

Para um acréscimo de 6% de pó de pedra, o pH subiu para 7,93. Para 9% de pó de pedra o pH foi para 8 e para um acréscimo de 11% de pó de pedra ao solo, o potencial hidrogeniônico da mistura foi para 8,04.

2.3.1.4 Microestrutura

O pó de pedra pode modificar a microestrutura dos solos, pois, dependendo da sua granulometria, ele pode acrescentar grãos mais finos ou mais grossos neste. Na Figura 11 é possível notar as partículas do pó de pedra sendo cimentada pela incorporação do cimento. Essa imagem é apresentada no trabalho de Nakayenga et al (2021), os autores pesquisaram a influência do teor de pó de pedra e do tamanho das partículas na resistência de misturas solo-cimento.

A incorporação do pó de pedra gera um aumento de grãos mais grossos na argila, como apresentado no trabalho de Nakayenga et al (2021)

Figura 11 - Microscopia com grãos de pó de pedra



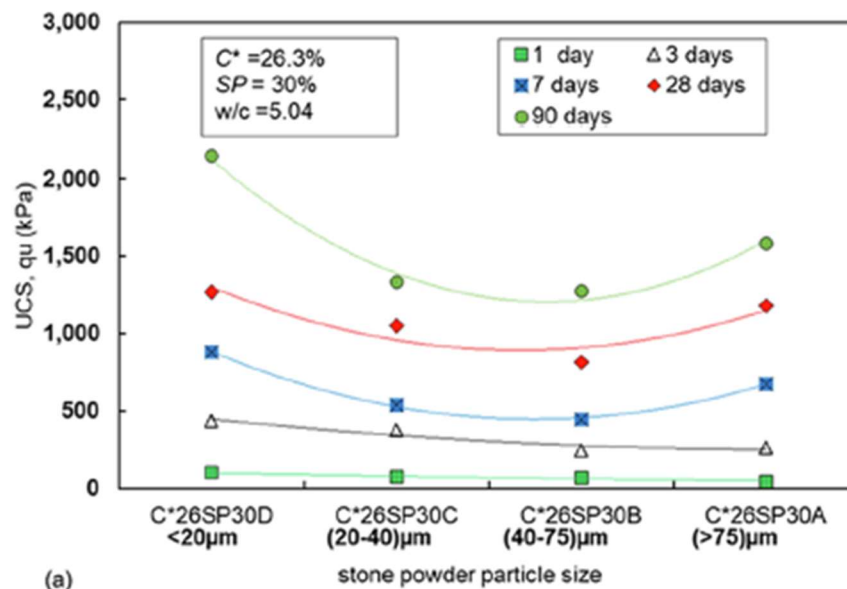
* Produtos cimentícios (Cementitious products); Pó de pedra (Stone powder D).
Fonte: Nakayenga et al, 2021

2.3.1.5 Resistência à compressão simples

Continuando com o trabalho de Nakayenga et al (2021) que estudaram o efeito do tamanho dos grãos do pó de pedra em misturas de solo-cimento, sendo um solo argiloso, os autores concluíram que o tamanho das partículas influenciou na resistência à compressão simples do solo (Figura 12).

Já em casos onde foi adicionado cimento nas misturas de solo e pó de pedra, os autores concluíram que há um aumento na resistência à compressão simples do solo.

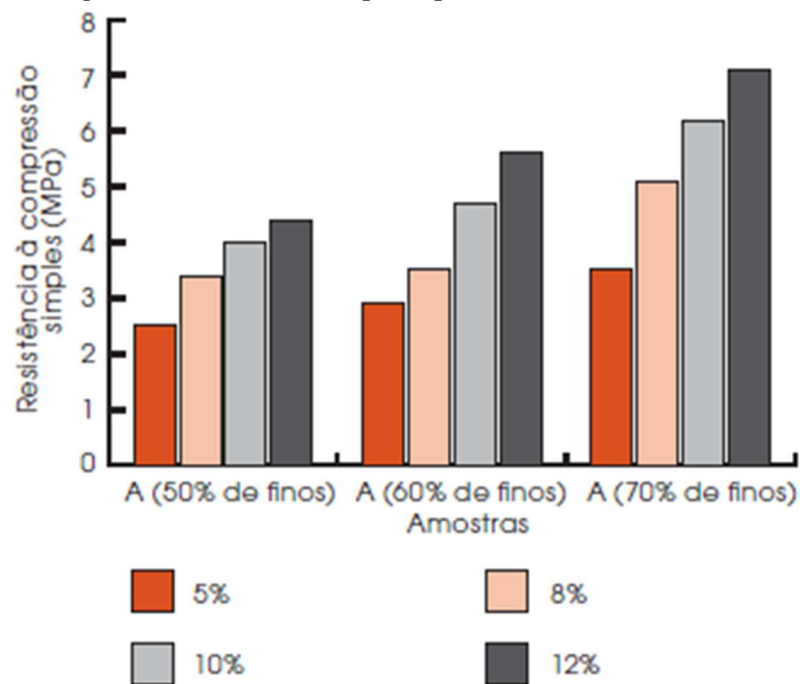
Figura 12 - Resistência à compressão simples com relação ao tamanho das partículas do pó de pedra



* Resistência à compressão não-confinada (UCS); Tamanho das partículas de pó de pedra (Stone powder particle size).

Fonte: Nakayenga et al, 2021.

Na pesquisa de Pissato e Soares (2006), o acréscimo de finos de pedreira no solo fez com que a resistência à compressão simples aumentasse, como é possível observar na Figura 13. O estudo foi realizado com misturas de solo-cimento, porém é nítido observar, pelo gráfico, que o acréscimo de pó de pedra fez com que a mistura de solo-cimento ganhasse resistência.

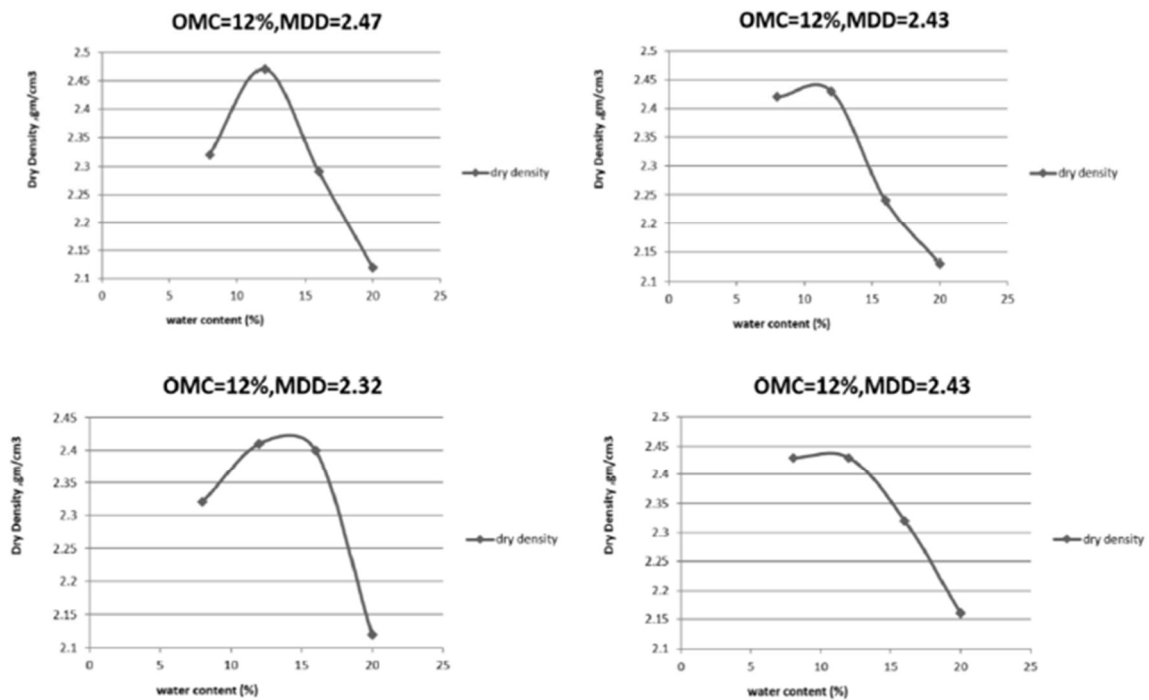
Figura 13 - Influência do pó de pedra na resistência do solo

Fonte: Pissato e Soares, 2006.

2.4 ESTABILIZAÇÃO POR MEIO DE CAL E PÓ DE PEDRA

Em relação a incorporação de cal e pó de pedra no solo, há diversas pesquisas na literatura que estudam várias propriedades diferentes. Na pesquisa de Samal e Mishra (2020) foi estudado o efeito desses dois materiais nas propriedades geotécnicas de um solo argiloso. Os resultados obtidos foram os seguintes: a umidade ótima das misturas não sofre variação. Porém, o peso específico aparente seco das misturas varia de acordo com o teor de cal e de pó de pedra. No caso da cal, o aumento faz o peso específico cair de $2,47\text{g/cm}^3$ para $2,32\text{g/cm}^3$, o mesmo acontece quando há aumento do teor de pó de pedra, o peso específico cai de $2,47\text{g/cm}^3$ para $2,43\text{g/cm}^3$ (Figura 14).

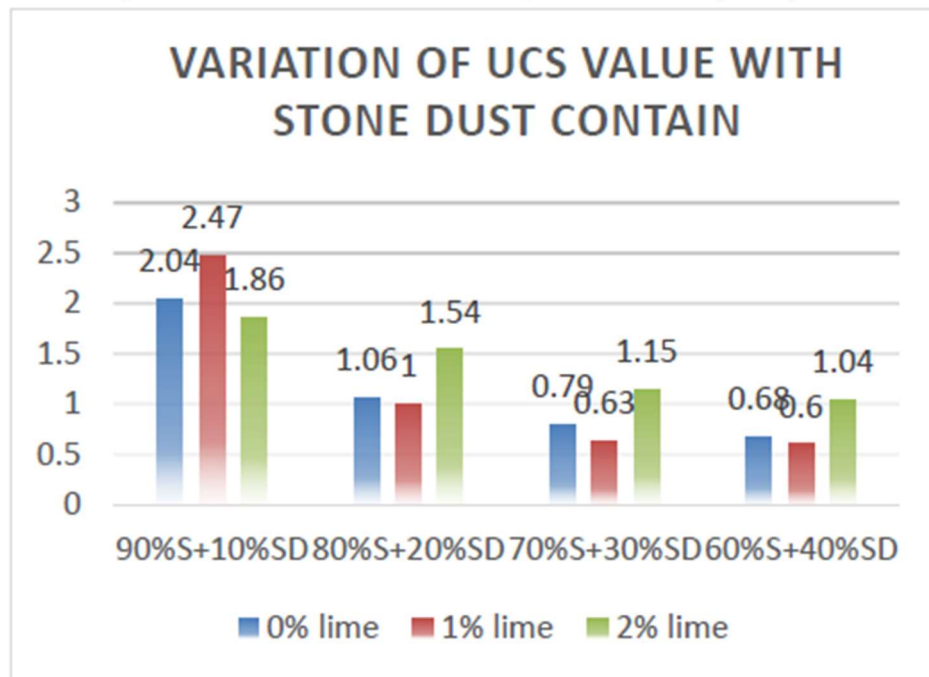
Figura 14 - Influência da cal e do pó de pedra na curva de compactação do solo



* Densidade seca (Dry Density); Teor de umidade (Water content); Máxima densidade seca (MDD); Teor de umidade ótima (OMC).

Fonte: Samal e Mishra, 2020

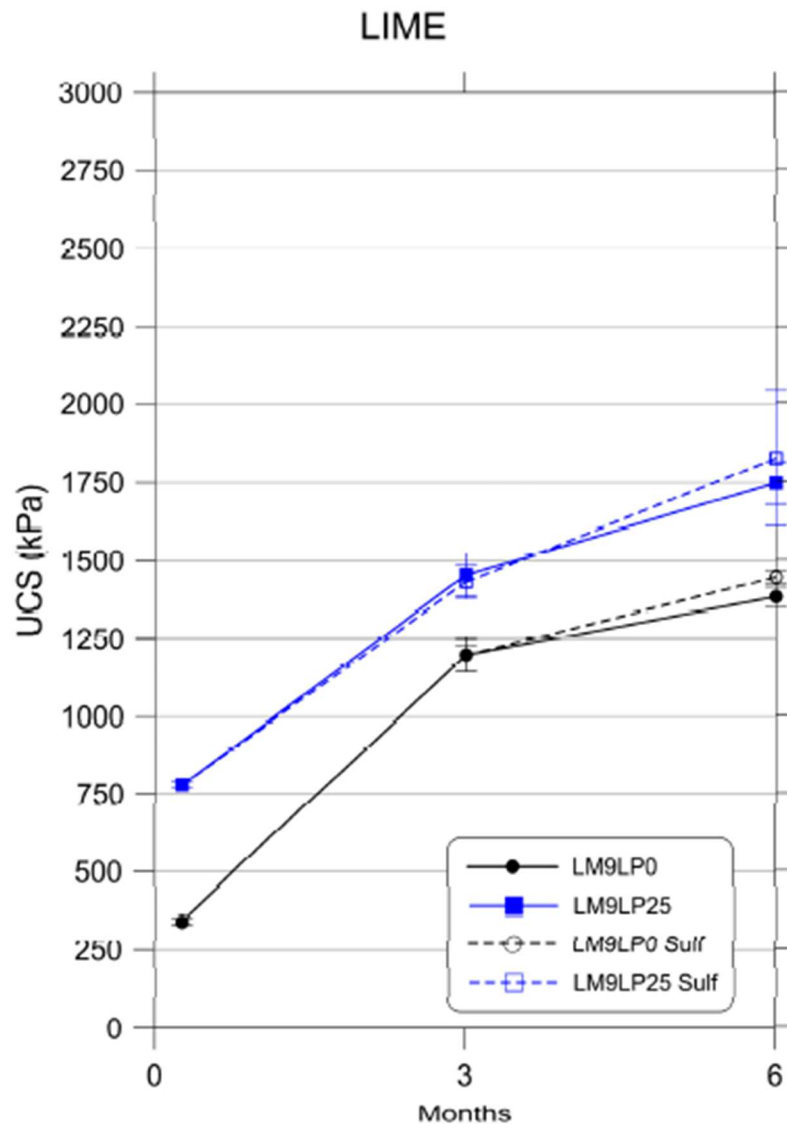
Os autores também observaram o comportamento da resistência à compressão simples com a variação desses dois materiais, o resultado apresentou um aumento na resistência quando se acrescenta cal e uma diminuição quando vai se diminuindo a quantidade de solo e aumentando a quantidade de pó de pedra (Figura 15). Isso ocorreu devido a diminuição do peso específico aparente seco da mistura à medida que os pesquisadores foram acrescentando pó de pedra ao solo, logo, é possível concluir que houve um aumento na porosidade da mistura conforme o acréscimo de pó de pedra.

Figura 15 - RCS em solo com incorporação de cal e pó de pedra

* Variação do valor da resistência à compressão não-confinada segundo a quantidade de pó de pedra (Variation of UCS value with stone dust contain); Cal (Lime).

Fonte: Samal e Mishra, 2020

Em um outro estudo feito por Pastor, Chai e Sánchez (2023) os autores pesquisaram a tensão e a microestrutura de solos argilosos estabilizados com pó de pedra e cal. Os resultados que eles obtiveram foram que a resistência à compressão não confinada apresentou um acréscimo quando se acrescentou 25% de pó de pedra a mistura solo-cal (Figura16). Isso se deve, principalmente, a diminuição da porosidade do solo em relação a mistura de solo com 25% de pó de pedra (Figura 17).

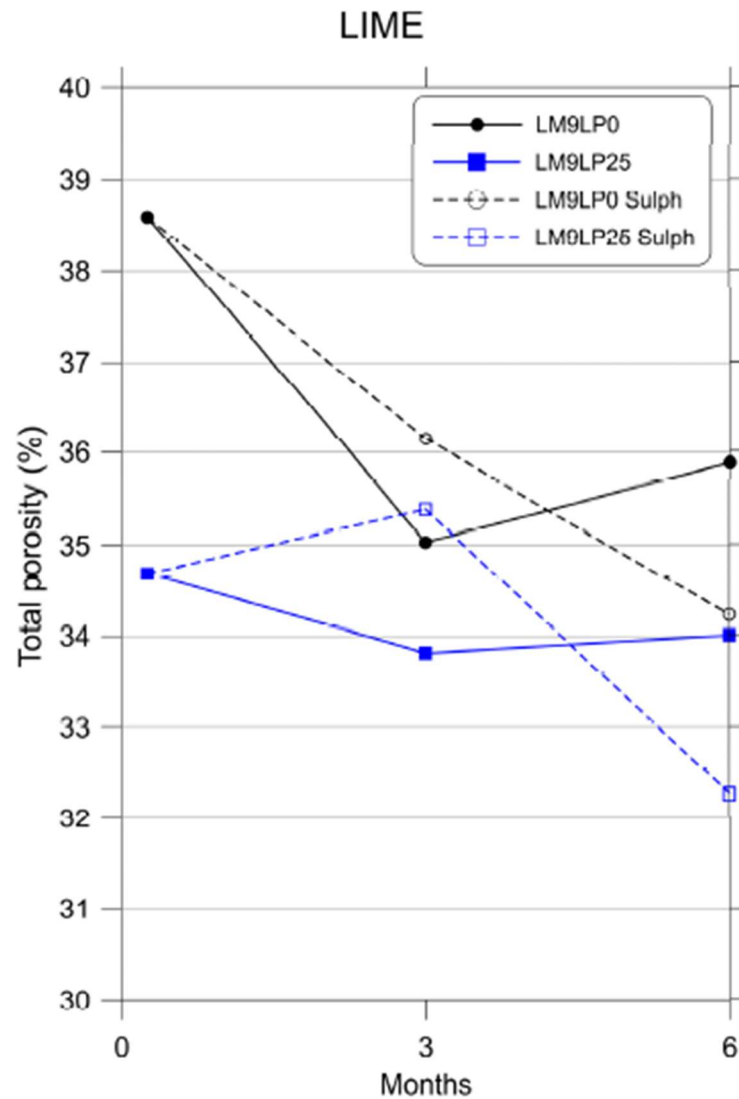
Figura 16 - Influência do pó de pedra na mistura solo-cal

* Resistência à compressão não-confinada (UCS); Cal (Lime); Meses (Months).

Fonte: Pastor, Chai e Sánchez, 2023.

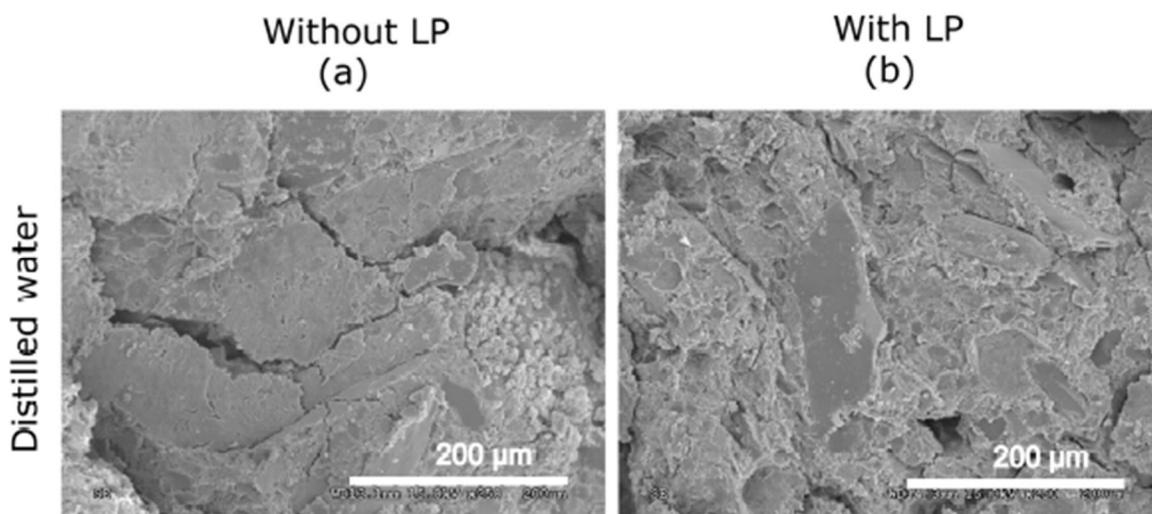
Em relação a porosidade, eles observaram que um acréscimo de 25% de pó de pedra fez com que a porosidade total do solo caísse (Figura 17). De acordo com os próprios autores, isso ocorreu devido a grande parte das partículas de pó de pedra (70%) estarem na faixa entre 0,002mm e 0,06mm e 30%, na faixa de partículas do tamanho dos grãos de argila, ou seja, menores que 0,002mm.

Figura 17 - Porosidade em misturas de solo-cal e pó de pedra



* Porosidade total (Total porosity); Cal (Lime); Meses (Months).
 Fonte: Pastor, Chai e Sánchez, 2023

Analisando a microestrutura do solo, os autores observaram que em misturas de cal e pó de pedra há um maior aglomeramento de partículas quando comparada com as misturas de solo-cal, estas apresentam uma estrutura menos compacta (Figura 18). Como o pó de pedra apresenta tamanhos de grãos como os do silte e os da argila, a adição de cal melhora a ligação entre eles, funcionando como um gel cimentante.

Figura 18 - MEV em solo-cal com e sem pó de pedra

* Sem pó de pedra (Without LP); Com pó de pedra (With LP); Água destilada (Distilled water).

Fonte: Pastor, Chai e Sánchez, 2023

No trabalho de Santos (2016), sobre o comportamento e melhoramento de solos compactados para a aplicação em obras de engenharia, o autor estudou separadamente os efeitos de cal e de pó de pedra incorporados ao solo. No primeiro caso a resistência apresentada aos 14 dias de cura se mostrou maior que a de 24 horas de cura. O mesmo não foi observado para as misturas de solo e pó de pedra. Houve um acréscimo na resistência com relação ao tempo de cura, porém a resistência com 10% de pó de pedra se mostrou inferior à do teor de 5% (Tabela 9).

Com relação as misturas curadas com 24 horas, o autor afirma, com base na literatura, que o tempo de cura é desfavorável para analisar a resistência à compressão das misturas. Já para o aumento dos valores de resistência aos 14 dias de cura o autor não apresenta informações, muito menos comenta o motivo para tal.

Tabela 8 - RCS para teores diferentes de cal e de pó de pedra

Tempo de Cura	(%) Cal	RCS (kPa)	Tempo de Cura	(%) Pó de Pedra	RCS (kPa)
24 horas	0	242,32	24 horas	0	242,32
	5	212,34		5	184,86
	10	239,82		10	217,33
14 dias	0	243,56	14 dias	0	243,56
	5	244,81		5	327,25
	10	282,28		10	207,34

Fonte: Santos, 2016.

CAPÍTULO III: PROGRAMA DE PESQUISA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este programa de pesquisa possuiu três objetivos fundamentais. O primeiro consistiu na realização da caracterização geotécnica, química e mineralógica do solo, da cal, do pó de pedra e das misturas de solo-cal, solo-pó de pedra e solo-cal-pó de pedra. O segundo foi analisar a resistência à compressão simples do solo e das misturas de solo-cal, solo-pó de pedra e solo-cal-pó de pedra, em diferentes teores e tempo de cura, e por fim, avaliar a microestrutura dos materiais estudados e o módulo de elasticidade dinâmico dos mesmos.

Assim, o programa de pesquisa foi dividido em três etapas. A primeira etapa consistiu na caracterização geotécnica, química e mineralógica do solo, da cal, do pó de pedra e das misturas solo-cal, solo-pó de pedra e solo-cal-pó de pedra. A caracterização foi feita por meio dos ensaios de: massa específica dos grãos, análise granulométrica, limites de Atterberg, difração de raio X, pH e compactação. Com estes resultados, foram desenvolvidas as etapas seguintes.

A segunda etapa consistiu na moldagem de corpos de prova confeccionados utilizando os parâmetros das curvas de compactação e utilizando diferentes teores de cal, solo e pó de pedra. Os corpos de prova foram submetidos a cura em câmara úmida nos períodos de 7, 14, 21 e 28 dias. Foram estabelecidos os seguintes teores de pó de pedra: 25%, 50% e 75%; e os seguintes teores de cal: 7%, 9% e 11%.

A terceira etapa compreendeu a determinação do módulo de elasticidade dinâmico do solo e das misturas de solo-cal, solo-pó de pedra e solo-cal-pó de pedra, por meio da técnica de excitação por impulso realizada no equipamento Sonelastic, (descrito no item 3.6), e utilizando as mesmas variações de cal e pó de pedra. Na sequência, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão simples (RCS). A microestrutura das misturas foi avaliada utilizando fragmentos dos corpos de prova por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Na Tabela 10 são apresentadas, de forma esquemática, as etapas do programa de pesquisa, bem como o tipo e o número de ensaios que serão feitos em cada etapa.

Tabela 9 - Etapas e Ensaio do Programa de Pesquisa

Etapas	Material	Tipo de ensaio	Número de Ensaio
Caracterização	Solo	Granulometria	1
		Massa específica dos sólidos	1
		Limite de Liquidez	1
		Limite de Plasticidade	1
		DRX	1
		pH	2
		Compactação	1
		MEV	1
	Cal	DRX	1
		pH	2
		Massa específica dos sólidos	1
		Granulometria	1
	Pó de pedra	Granulometria	1
		Massa específica dos sólidos	1
		DRX	1
		pH	2
	Solo + cal	Compactação	3
		pH	6
		MEV	3
	Solo + pó de pedra	Granulometria	3
		Massa específica dos sólidos	3
		Limite de Liquidez	3
		Limite de Plasticidade	3
		pH	6
		Compactação	3
		MEV	3
	Solo+cal+pó de pedra	Compactação	9
		pH	18
		MEV	9
Resistência mecânica	Solo	Resistência à compressão simples	4
	Solo + Cal		48
	Solo + pó de pedra		48
	Solo+cal+pó de pedra		144
Módulo de elasticidade dinâmico	Solo	Sonelastic	2
	Solo + Cal		24
	Solo + pó de pedra		24
	Solo+cal+pó de pedra		72
Microestrutura	Solo+Cal	MEV	1
	Solo+cal+pó de pedra		3

Fonte: Autora

3.2 MATERIAIS

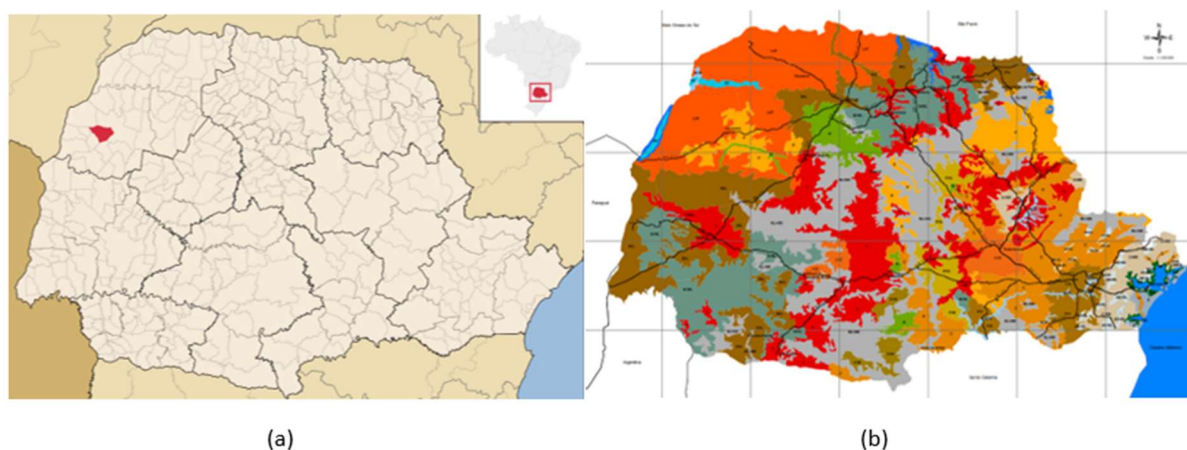
Os materiais que foram utilizados para a realização dos ensaios são apresentados a seguir.

3.2.1 Solo

O solo utilizado no presente trabalho foi retirado do município de Xambrê – PR (Figura 19). A cidade localiza-se na Mesorregião do Noroeste Paranaense, a aproximadamente 22 km da cidade de Umuarama, apresentando solos de textura arenosa e média, associados aos arenitos da Formação Caiuá do Cretáceo Superior. De acordo com o mapa fornecido pelo Embrapa (2012), o município de Xambrê encontra-se em uma região onde predomina o Latossolo com Argissolo, ambos possuem facilidade para infiltração de água, sendo o Argissolo sujeito a erosões devido a presença de areia.

A rocha mãe deste solo é o Arenito Caiuá. Segundo Gobbi *et al* (2018), os solos provenientes dessa rocha são arenosos, que possuem baixa capacidade de retenção de água, alta suscetibilidade à erosão hídrica e eólica, baixos teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio e material orgânica, assim como uma capacidade de troca de cátions (CTC) altamente dependente da matéria orgânica.

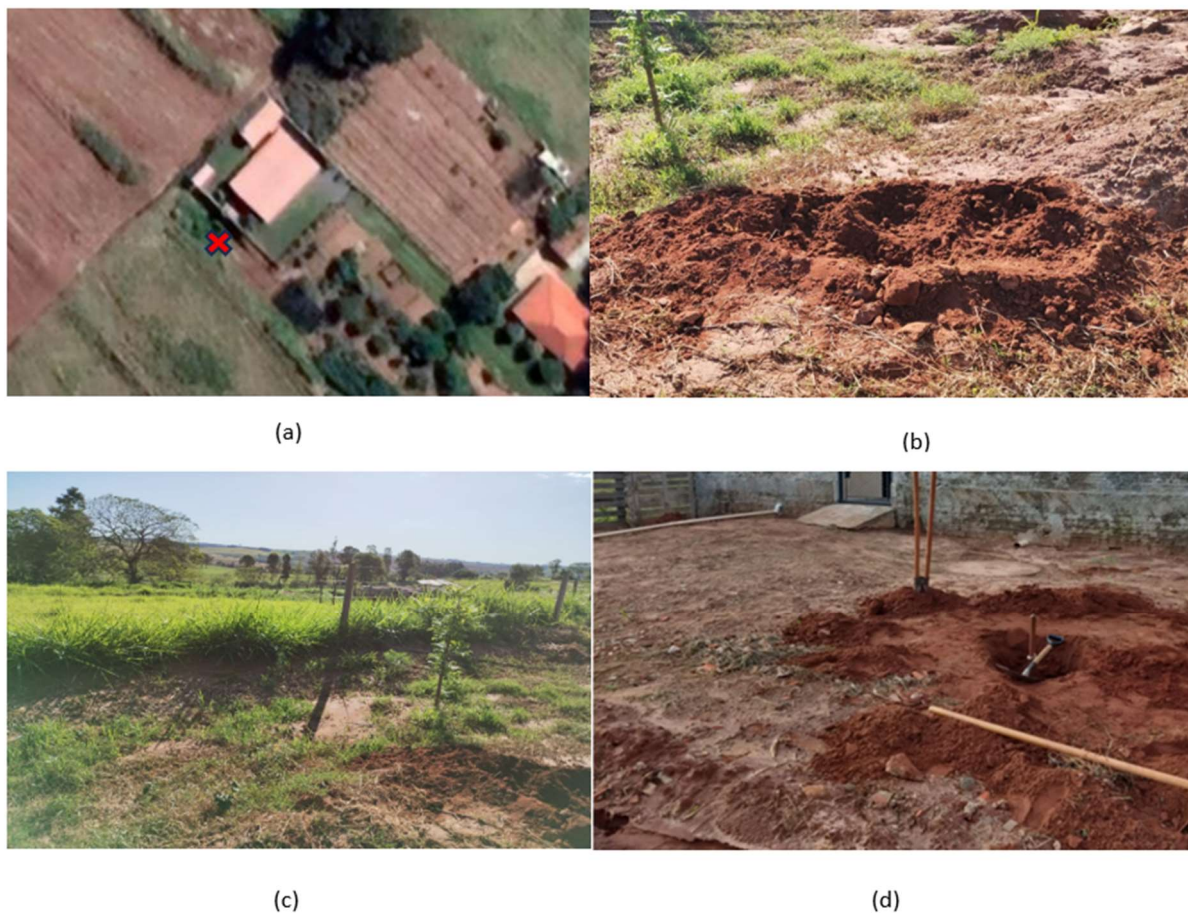
Figura 19 - Xambrê - Pr (a); Solos do Paraná (b)



Fonte: Wikipédia, 2023 e Embrapa, 2012.

A jazida de onde o solo foi retirada encontra-se em uma propriedade particular e possui as seguintes coordenadas (Latitude:-23°44'47.6"S e Longitude:-53°29'23.6"W). A Figura 20 apresenta a localização e o entorno do local de retirada.

Figura 20 - Localização da jazida do solo



Fonte: Autora

3.2.2 Cal

A cal utilizada para a pesquisa foi uma cal hidratada do tipo CHIII, da marca CALPONTA, produzida pela empresa Calcário Calponta LTDA. Sua confecção, de acordo com o fabricante, segue em conformidade com a norma NBR 7175.

A norma NBR 7175/2003 descreve que a cal hidratada deve ser denominada segundo seus teores de óxido não hidratados e de carbonados. As exigências físicas e químicas estão presentes nos Quadros 1 e 2.

A escolha da cal hidratada se deve a grande quantidade de trabalhos, encontrados na literatura, que utilizam este material para pesquisa.

Quadro 1 - Exigências químicas

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO ₂)	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxidos de cálcio e magnésio não tratado calculado (CaO + MgO) ⁽¹⁾		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base de não-voláteis (CaO _t +MgO _t) ⁽²⁾		≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%

Fonte: ABNT NBR 7175, 2003

Quadro 2 - Exigências físicas

Determinação		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Finura(% retirada acumulada)	Peneira 0,600 mm (nº30)	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 0,075 mm (nº200)	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Estabilidade		Ausência de cavidade ou protuberâncias	Ausência de cavidade ou protuberâncias	Ausência de cavidade ou protuberâncias
Retenção de água		≥ 75%	≥ 75%	≥ 70%
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110
Incorporação de areia		≥ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2

Fonte: ABNT NBR 7175, 2003

3.2.3 Pó de pedra

Nesta pesquisa, foi utilizado o pó de pedra proveniente da cidade de Maringá – Pr, fornecido pela empresa EXTRACON Mineração e Obras Ltda. O material tem origem na acumulação de sedimentos, lavas basálticas e sills de diabásio e está presente em, aproximadamente, 75% da Bacia do Paraná. A Figura 21 apresenta a distribuição dos grupos litológicos do Paraná e a cidade de Maringá-Pr, que se encontra no grupo de derrames basálticos. (MINEROPAR, 2001)

Figura 21 - Localização de Maringá-Pr nos grupos litológicos



Fonte: MINEROPAR, 2001

3.2.4 Misturas

Para fins de avaliação do comportamento das misturas solo, pó de pedra e cal hidratada foram estabelecidas o estudo de 16 misturas com materiais em diferentes proporções. A Tabela 11 apresenta as diferentes proporções de materiais utilizadas para os ensaios.

3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A primeira etapa da pesquisa consistiu na realização de ensaios de caracterização física e química dos diferentes materiais estudados. Os ensaios realizados foram: análise granulométrica, massa específica dos grãos, limites de Atterberg, ensaio de compactação, difratometria por raio-X e ensaio de pH.

. Em cada mistura, utilizada nesta pesquisa, adicionou-se o solo, em seguida, acrescentou-se o pó de pedra, nas misturas de 25%, 50% e 75%, somou-se a cal, nas proporções de 7%, 9% e 11%, e, somente após a mistura dos materiais em pó se acrescentou a água. Estas frações, de massa seca, foram adotadas para conseguir obter variações significativas nos resultados dos ensaios e que viabilizassem a análise do comportamento das misturas propostas neste trabalho.

Tabela 10 - Proporções dos materiais para as misturas adotadas.

Misturas	Porcentagem de solo	Porcentagem de cal	Porcentagem de pó de pedra
S	100,00	0	0
SC ₇	93,00	7	0
SC ₉	91,00	9	0
SC ₁₁	89,00	11	0
S ₇₅ P ₂₅	75,00	0	25,00
S ₇₅ P ₂₅ C ₇	69,75	7	23,25
S ₇₅ P ₂₅ C ₉	68,25	9	22,75
S ₇₅ P ₂₅ C ₁₁	66,75	11	22,25
S ₅₀ P ₅₀	50,00	0	50,00
S ₅₀ P ₅₀ C ₇	46,50	7	46,50
S ₅₀ P ₅₀ C ₉	45,50	9	45,50
S ₅₀ P ₅₀ C ₁₁	44,50	11	44,50
S ₂₅ P ₇₅	25,00	0	75,00
S ₂₅ P ₇₅ C ₇	23,25	7	69,75
S ₂₅ P ₇₅ C ₉	22,75	9	68,25
S ₂₅ P ₇₅ C ₁₁	22,25	11	66,75

Fonte: Autora

3.3.1 Ensaios de caracterização geotécnica

A análise granulométrica foi realizada para o solo, para o pó de pedra e para as misturas S₇₅P₂₅, S₅₀P₅₀ e S₂₅P₇₅ e seguiu a NBR 7181 (ABNT, 2016). No caso da cal hidratada, a granulometria foi feita por meio da difração a *laser*, uma vez que a técnica de sedimentação não apresenta precisão para quantificar partículas com diâmetros inferiores a 0,002 mm.

A análise granulométrica a *laser*, foi realizada no Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP) da Universidade Estadual de Maringá, sob a orientação dos técnicos do Grupo de Estudos Multidisciplinares do Meio Ambiente (GEMA). O ensaio foi realizado utilizando um granulômetro a laser da marca Bettersize modelo S2-WD. A amostra de cal foi diluída em álcool absoluto, utilizando os parâmetros estabelecidos para a cal hidratada no software de análise.

O ensaio de massa específica dos sólidos foi realizado de acordo com a NBR 6508 (ABNT, 1984), para grãos de solo que passam pela peneira 4,8 mm, utilizando o método do

picnômetro. A massa específica real dos grãos foi realizada para o solo, cal hidratada, pó de pedra e nas misturas S₇₅P₂₅, S₅₀P₅₀ e S₂₅P₇₅.

Os ensaios de limites de Atterberg, estabelecem a determinação do limite de plasticidade e do limite de liquidez. Os ensaios foram realizados seguindo as recomendações da NBR 7180 (ABNT, 2016) e da NBR 6459 (ABNT, 2016). Os ensaios foram realizados para o solo e para as misturas S₇₅P₂₅, S₅₀P₅₀ e S₂₅P₇₅.

3.3.2 Ensaio de difração de raio X (DRX)

Os ensaios de DRX foram realizados em um difratômetro Shimadzu utilizando como base os seguintes parâmetros de análise: theta inicial igual a 5° e theta final igual a 70°, velocidade de 1° por minuto, modo de passo de 0,01, voltagem de 40kV e corrente igual a 30 mA. Os ensaios foram realizados no Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP) da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

Os ensaios foram realizados para o solo, a cal hidratada e o pó de pedra utilizando o método do pó para o preparo das amostras. As amostras foram passadas na peneira n° 200 e na sequência deixados na estufa por um período de 24 horas a uma temperatura média de 105°C. Após a secagem, as amostras foram colocadas em frascos de plástico, cerca de 5g de cada material; etiquetadas, sendo (1a) para o solo, (2b) para a cal e (3c) para o pó de pedra; e levadas ao laboratório do COMCAP para análise.

3.3.3 Compactação – Proctor Normal

O procedimento para a realização do ensaio foi baseado na norma NBR 12023 (ABNT, 2012) que estabelece a execução do ensaio para se determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo. A norma fornece dois métodos para o procedimento, de acordo com a granulometria do solo: o primeiro para solos com 100% dos grãos com diâmetro menor que 4,75mm; e o segundo para solos com até 30% das partículas com diâmetro maior que 19 mm. Neste trabalho, devido a granulometria do solo e das misturas, foi realizado o primeiro método ou o método A. A compactação foi feita para o solo e para as misturas de solo-pó de pedra e de solo-cal-pó de pedra. Para a execução dos ensaios foi estabelecido o uso da energia normal de compactação (600 kJ/m³), utilizando o cilindro pequeno, com três camadas e aplicando-se 26 golpes por camada.

3.3.4 pH dos materiais

O ensaio de pH dos materiais e das misturas seguiu a norma ASTM D 4972/17. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Saneamento Ambiental da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

O ensaio foi feito em água destilada e em Cloreto de Cálcio (CaCl_2). Para o ensaio de pH em água destilada, foram separados 10g de material seco (solo, cal, pó de pedra, solo-cal, solo-pó de pedra e solo-cal-pó de pedra), passados na peneira nº 200. Acrescentou-se 10 ml de água destilada, e depois da homogeneização deixou-se a mistura em descanso durante uma hora. Após esse tempo, com o auxílio do pHmetro, foi aferido a valor de pH do material. O procedimento foi repetido para a aferição do valor do pH utilizando a solução de Cloreto de Cálcio (CaCl_2).

3.4 MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA

Para a moldagem dos corpos de prova foi utilizado um molde cilíndrico bipartido, com 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro, obedecendo a relação 2:1. A compactação foi realizada manualmente em três camadas, não sendo controlado o número de golpes por camada, mas a massa úmida estimada para corpo de prova e o teor de umidade ótimo. O aparelho utilizado para a confecção dos corpos de prova encontra-se na Figura 22a.

Depois de compactados, os corpos de prova foram retirados do molde (Figura 22b), pesados e medidos. Os corpos de prova que não obtiveram uma massa de $\pm 2\%$ em relação a massa úmida estimada, foram rejeitados.

Durante o processo de moldagem do corpo de prova, foi aferido o teor de umidade da amostra através do método da estufa. Os corpos de prova que não obtiveram uma umidade dentro de uma margem de $\pm 0,5\%$ de sua umidade ótima foram descartados.

Seguidamente, os corpos de prova foram embalados em sacos plásticos (Figura 22c), identificados e levados para a câmara úmida, onde permaneceram, à temperatura entre 21°C e 25°C, por 7, 14, 21 e 28 dias. Após o período de cura, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e novamente pesados e medidos para, posteriormente, serem ensaiados.

Figura 22 - Confeção dos corpos de prova



(a)

(b)



(c)

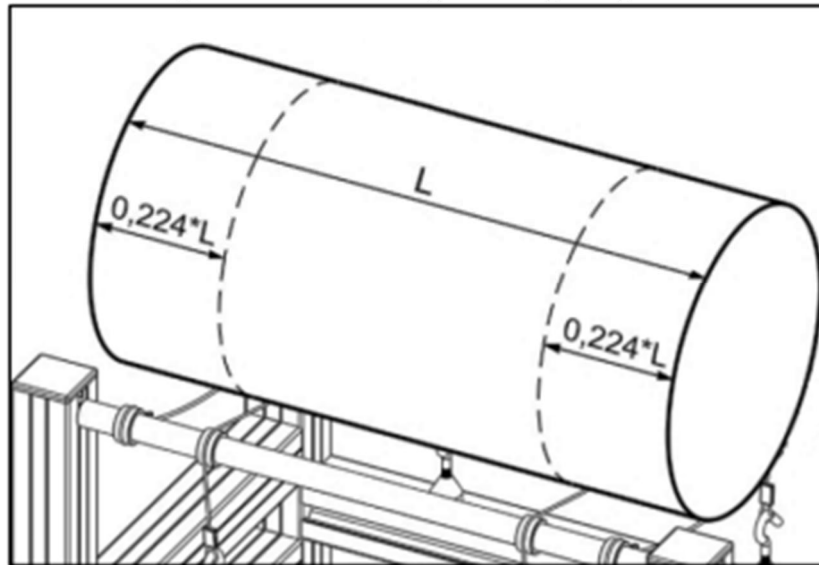
Fonte: Autora

3.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

O módulo de elasticidade dinâmico foi estimado utilizando o aparelho Sonelastic, apresentado na Figura. Para medir o módulo de elasticidade das misturas, primeiramente foi

aferido o peso e a altura dos corpos de prova, para a entrada de dados do programa. Em seguida, foram feitas marcações nos corpos de prova para indicar onde eles seriam apoiados no equipamento. Essas marcações foram feitas de acordo com a recomendação do Manual que acompanha o equipamento Sonelastic, sendo as mesmas estabelecidas em $0,224 L$, onde L representa a altura do corpo de prova (Figura 23).

Figura 23 - Marcações para o corpo de prova



Fonte: Alves e Otani, 2022

Logo após posicionar o corpo de prova no equipamento, foi posicionado, em uma das extremidades, um microfone para captar a onda sonora produzida durante o ensaio. Esta, por sua vez, é oriunda do contato de uma haste com a outra extremidade do corpo de prova. A sequência do ensaio pode ser vista na Figura 24. O ensaio foi realizado em metade do total de corpos de prova e para cada corpo de prova foram feitas três leituras.

Com os valores do módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}) foi estimado, então, o módulo de deformação tangencial inicial (E_{ci}), por meio da Equação 1.

$$E_{ci} = 0,107 E_{cd}^{1,4} \cdot \rho^{-1}$$

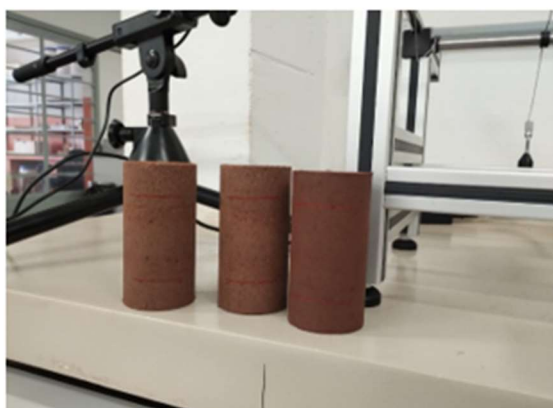
Em que,

E_{ci} [Pa] é o módulo de deformação tangencial inicial;

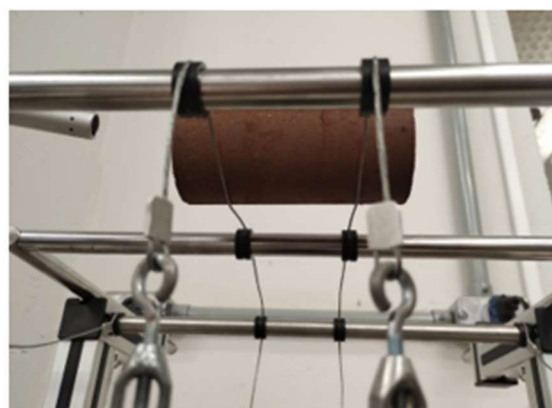
E_{cd} [Pa] é o módulo de elasticidade dinâmico;

ρ [kg/m³] é a densidade do corpo de prova.

Figura 24 - Esquema do ensaio de propagação de onda (Sonelastic).



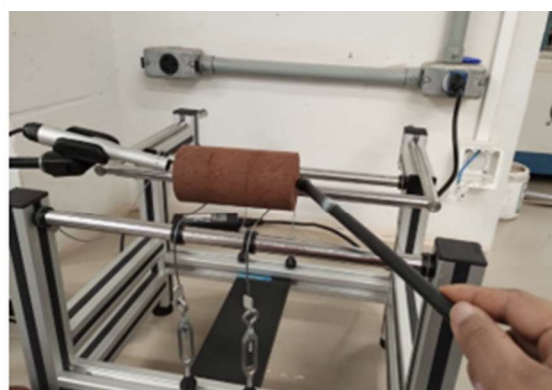
(a) Corpos de prova com as marcações recomendadas



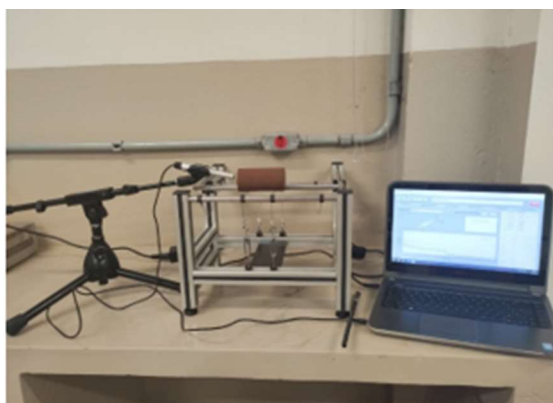
(b) Posicionamento do corpo de prova no aparelho



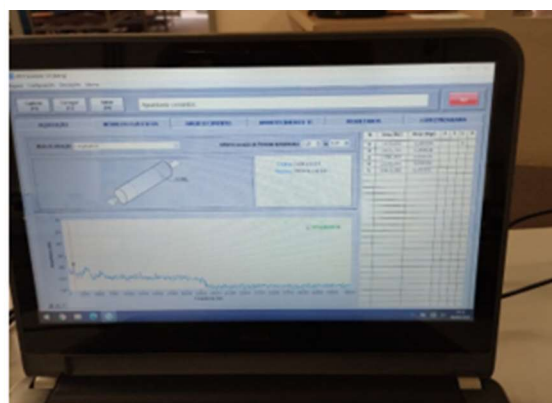
(c) Disposição do microfone



(d) Contato da haste com a extremidade do CP



(e) Todo o sistema



(f) Leitura feita pelo programa

Fonte: Autora

3.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de resistência a compressão simples foi realizado com todas as misturas propostas nesse trabalho, conforme apresentado na Tabela 4, com períodos de cura de 7, 14, 21 e 28 dias. Foram feitos 64 corpos de prova por tempo de cura, sendo 4 corpos de prova para cada mistura analisada.

O ensaio de resistência à compressão não confinada é amplamente utilizado para análises da eficiência da estabilização com cimento e/ou cal permitindo avaliar os fatores determinantes da resistência dessas misturas. Apresenta como vantagem a rapidez, simplicidade e a confiabilidade dos resultados.

Os ensaios foram realizados utilizando uma prensa manual, uma célula de carga com capacidade máxima de 20 kN e dois transdutores de deslocamento variável linear (LVDTs) com capacidade máxima de 5 mm. Os LVDTs foram posicionados no prato metálico da prensa e o conjunto foi considerado rígido. Os dados obtidos eram transmitidos ao sistema de aquisição de dados e enviados a um computador, cuja leitura era feita pelo software CatEasyman. Ao final de cada ensaio, um arquivo Excel foi gerado contendo a força aplicada ao corpo de prova, os deslocamentos, e o tempo do ensaio. A Figura 25 ilustra o sistema montado para a realização dos ensaios.

Figura 25 - Ensaio de resistência à compressão simples.



Fonte: Autora

3.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A análise da microestrutura foi realizada através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) no Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP) da UEM. As amostras utilizadas no MEV foram retiradas de fragmentos dos corpos de prova após o ensaio de resistência à compressão não confinada. As amostras foram deixadas secar em estufa para garantir a qualidade das imagens.

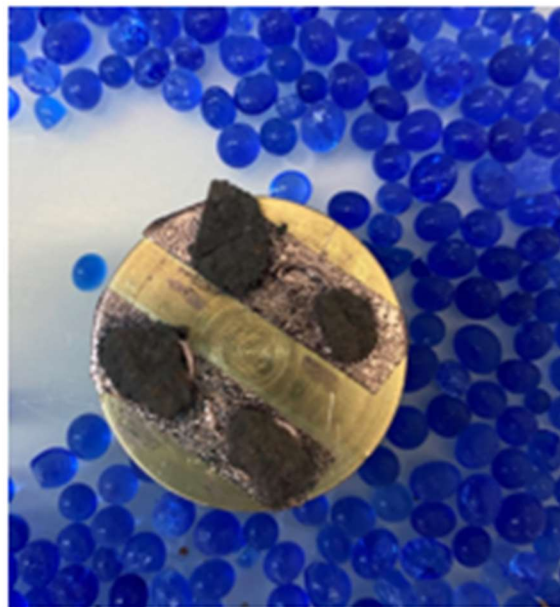
O preparo das amostras consistiu em colocar os fragmentos sobre uma fita de carbono em um stub metálico (Figura 26a), que depois foram submetidas a um processo de metalização utilizando um banho de ouro (Figura 26b). O equipamento utilizado foi o Shimadzu Superscan SS-550, que trabalha com uma tensão de aceleração de 10 kV e tem capacidade de magnificação de 20 a 300.000 vezes.

A análise da microestrutura foi realizada somente para as misturas com 9% de cal e submetidas a 28 dias de cura. Para fins de comparação todas as imagens das diferentes misturas foram feitas mantendo a mesma magnificação.

Figura 26 - Preparo das amostras para o ensaio de MEV



(a) processo de montagem das amostras



(b) amostras após o processo de metalização

CAPÍTULO IV: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos experimentos laboratoriais realizados nas 15 misturas estudadas (solo-cal, solo-pó de pedra e solo-cal-pó de pedra) e no solo puro, coletado no município de Xambrê – Pr. Inicialmente, serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica, química e mineralógica dos materiais e de suas misturas: ensaio de granulometria, massa específica dos grãos, limites de Atterberg, pH, compactação e DRX.

Após a discussão da caracterização, serão apresentados e discutidos os resultados do ensaio de resistência à compressão simples e do ensaio no equipamento Sonelastic, posteriormente, esses resultados foram correlacionados com os resultados da caracterização geotécnica dos materiais e suas misturas e com a microscopia eletrônica de varredura (MEV).

4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

A caracterização geotécnica realizada nas matrizes confeccionadas e nos materiais teve por objetivo verificar algumas propriedades apresentadas por eles e, posteriormente, compreender melhor os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples e no módulo de elasticidade dinâmico.

4.1.1 Caracterização do solo

A Tabela 12 apresenta a análise química do solo, realizada no Laboratório Agrisolum, e que serão utilizados para avaliar o comportamento do solo no que se refere aos objetivos propostos neste trabalho.

Tabela 11 - Análise química realizada no Agrisolum

Item analisado	Resultado	Item analisado	Resultado
pH em H ₂ O	7,7	Fósforo (P)	1,79 mg/dm ³
pH em CaCl ₂	6,8	Enxofre (S)	ns
Matéria orgânica	0,27%	Boro (B)	ns
CTC	4,06 cmol/Kg	Cobre (Cu)	2,28 mg/dm ³
Cálcio (Ca ²⁺)	1,03 cmol/dm ³	Ferro (Fe)	36,42 mg/dm ³
Magnésio (Mg ²⁺)	1,02 cmol/dm ³	Manganês (Mn)	39,12 mg/dm ³
Potássio (K ⁺)	0,32 cmol/dm ³	Zinco (Zn)	0,96 mg/dm ³

* onde CTC é a capacidade de troca catiônica (CTC).

Fonte: Autora

Observando os dados apresentados é possível perceber que o solo apresenta uma baixa porcentagem de matéria orgânica (MO). O baixo valor de MO é desejável no que se refere ao emprego de solos para fins de estabilização química uma vez que esse material inibe a hidratação, o que conduz à uma retardação da presa e endurecimentos significativos e abaixamentos da resistência das misturas (SANTOS, 2008).

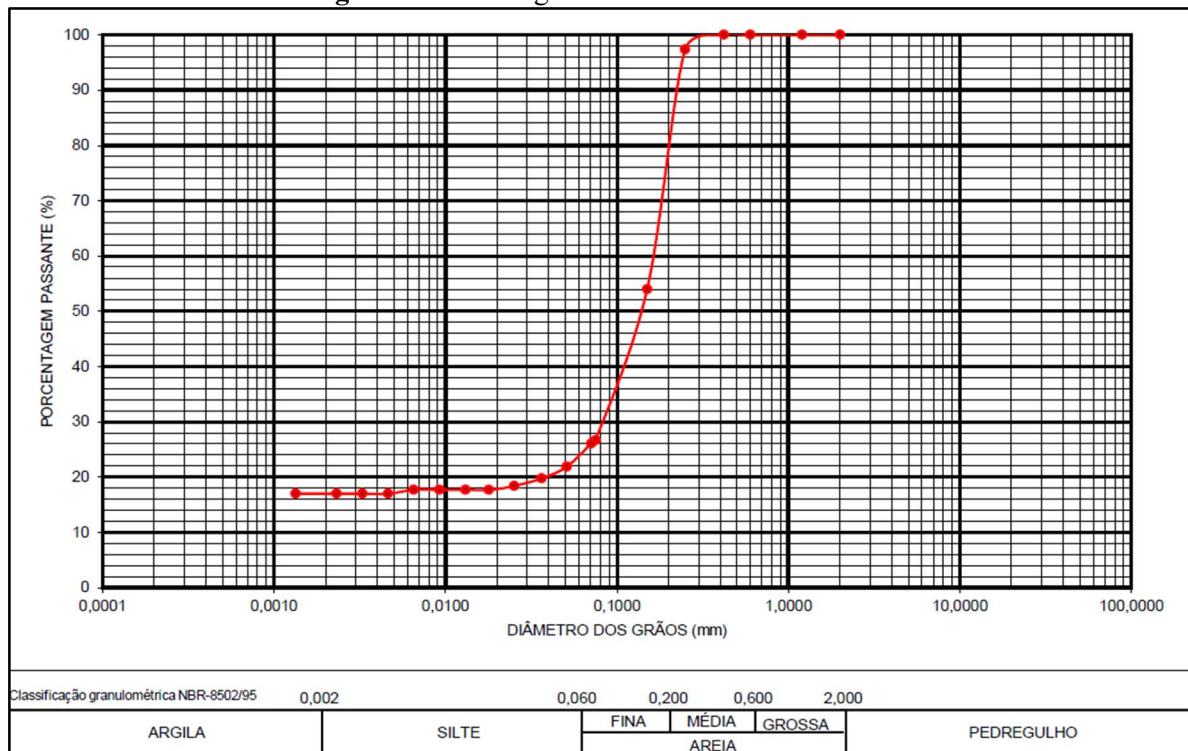
Outro ponto importante para se destacar é o valor da capacidade de troca catiônica (CTC), que pode ser um indicativo da presença de argilominerais de baixa atividade, uma vez que resultados da literatura apontam que a caulinita apresenta valores próximos aos valores encontrados para o solo estudado (WOOLTORTON, 1955). Além disso, a concentração de ferro se apresentou alta, podendo ser um indicativo de que o solo apresenta comportamento laterítico. Porém, a avaliação do comportamento laterítico deve ser realizada utilizando uma metodologia adequada para essa análise, o que não foi feito neste trabalho.

Há, também, uma alta concentração de Manganês, 39,12mg/dm³. O pH do solo é de 7,7 em água e de 6,8 em CaCl₂, ou seja, o solo possui um pH equilibrado, mais tendendo para o um comportamento neutro.

4.1.2 Análise granulométrica

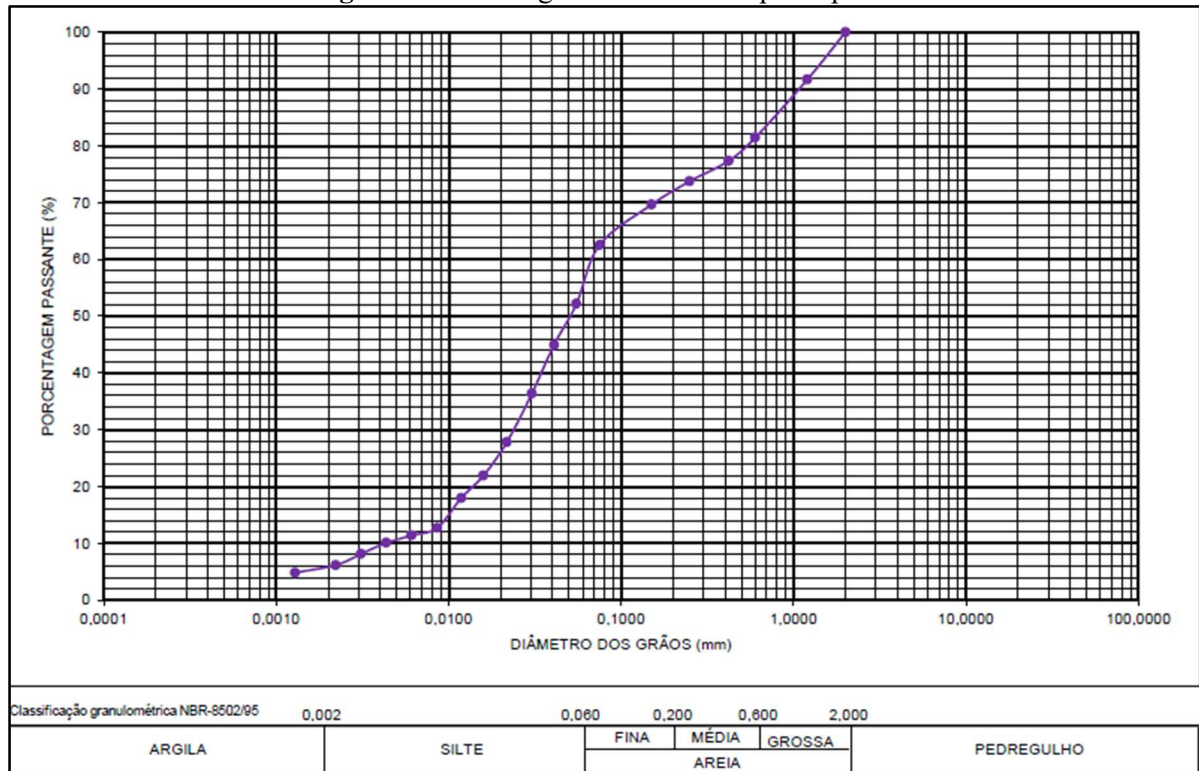
Os resultados dos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação do solo natural estão apresentados na Figura 27. A amostra do solo estudado indica um solo com a seguinte composição: 17% de argila (inferior a 0,002 mm), 7% de silte (de 0,002 mm a 0,06 mm) e 76% de areia (de 0,06 mm a 2 mm), dentre os quais 54% é areia fina e 22% é areia média (para melhor compreensão, ver Figura 30). Considerando a NBR 8502 (ABNT, 1995), a amostra do solo natural é classificada como uma areia média com uma pequena presença de argila e silte, analisando-a granulometricamente.

Figura 27 - Curva granulométrica do solo natural



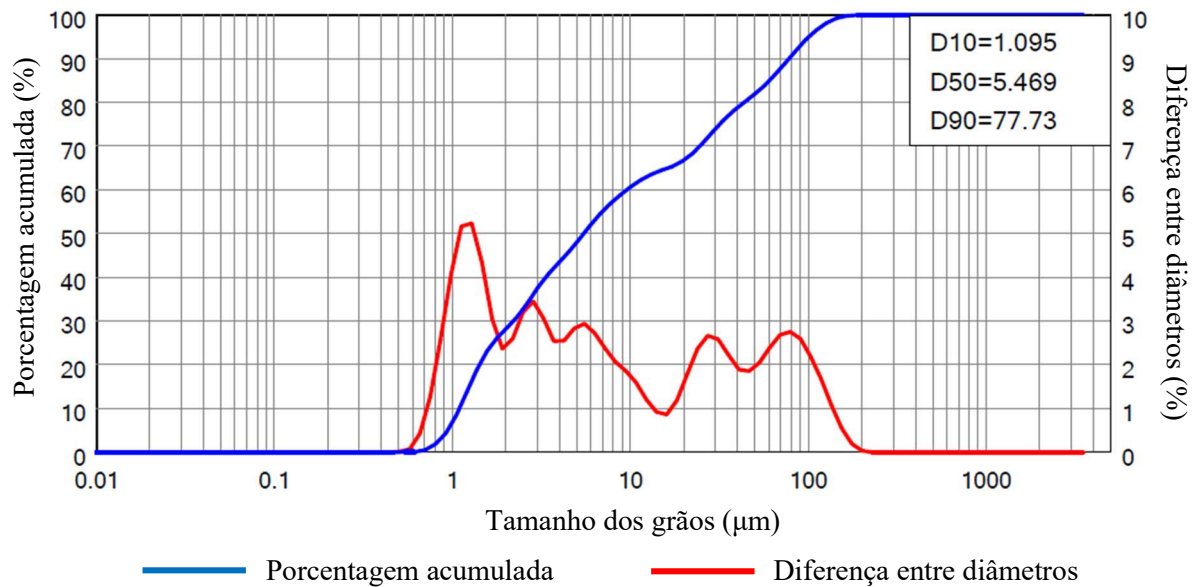
Fonte: Autora

A Figura 28 apresenta os resultados dos ensaios granulométricos para o pó de pedra. Na curva é possível observar a seguinte composição granulométrica: 6% do material possui diâmetro inferior a 0,002 mm, 55% do material encontra-se no intervalo entre 0,002 mm e 0,06 mm e o restante, 44%, está no intervalo entre 0,06 mm e 2 mm de diâmetro (para melhor compreensão, ver Figura 30). Considerando a NBR 8502 (ABNT, 1995), norma referente ao solo, percebe-se que o pó de pedra possui grande parte de seus grãos com dimensões que compreendem as parcelas de silte e areia, isso significa que o material o pó de pedra fará mais diferença na fração de silte.

Figura 28 - Curva granulométrica do pó de pedra

Fonte: Autora

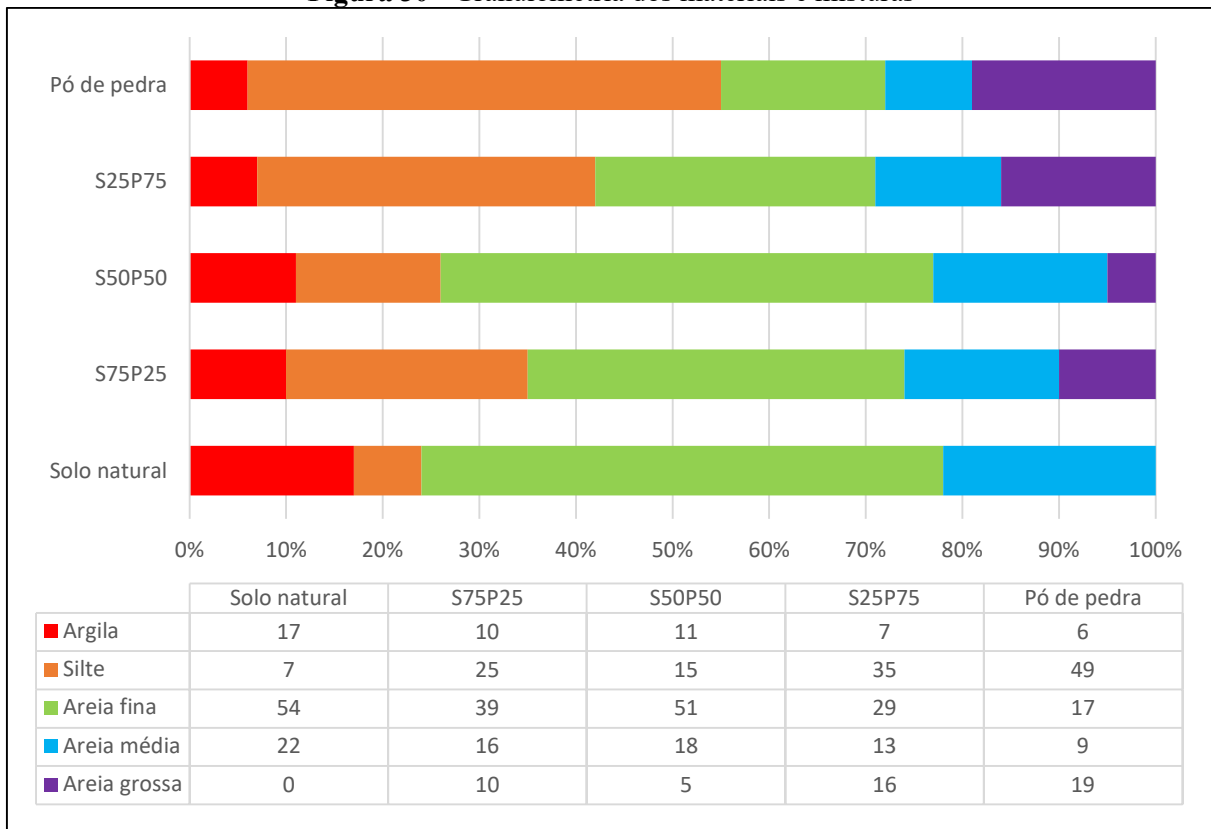
A Figura 29 apresenta os resultados do ensaio de granulometria a laser da cal. Observa-se que 6,82% do material possui diâmetro inferior a $1\mu\text{m}$, já no intervalo de $1\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$ o material retido é de 53,79%, mais grãos do tamanho de silte incorporado. No intervalo de $10\mu\text{m}$ a $100\mu\text{m}$ o material retido é de 34,35% e o restante, 5,04%, encontrasse com partículas superiores a $100\mu\text{m}$.

Figura 29 - Curva granulométrica da cal

Fonte: Autora

Considerando as misturas de solo e pó de pedra percebe-se que as curvas vão do solo natural em direção a curva do pó de pedra puro (Figura 31). Para compreender melhor a distribuição granulométrica da Figura 31, foi feito um gráfico de barras que mostra a porcentagem da fração de cada material (Figura 30) e uma tabela com os valores exatos das porcentagens dessas frações. Nota-se que a mistura com melhor distribuição granulométrica é a S₂₅P₇₅, pois é a que melhor apresentou uma distribuição mais igualitária entre as frações de argila, silte e areia fina, média e grossa.

Para uma melhor compreensão da graduação do solo os coeficientes de curvatura e de uniformidade foram calculados (Tabela 13). Com relação ao coeficiente de uniformidade, todas as misturas apresentaram um coeficiente maior que 15, o que mostra que são misturas não uniformes, ou seja, bem graduadas. Já com relação ao coeficiente de curvatura, tem-se que a mistura S₂₅P₇₅ apresenta um valor entre 1 e 3, o que mostra que essa mistura é a mais bem graduada, comparada com as demais, inclusive o solo.

Figura 30 - Granulometria dos materiais e misturas

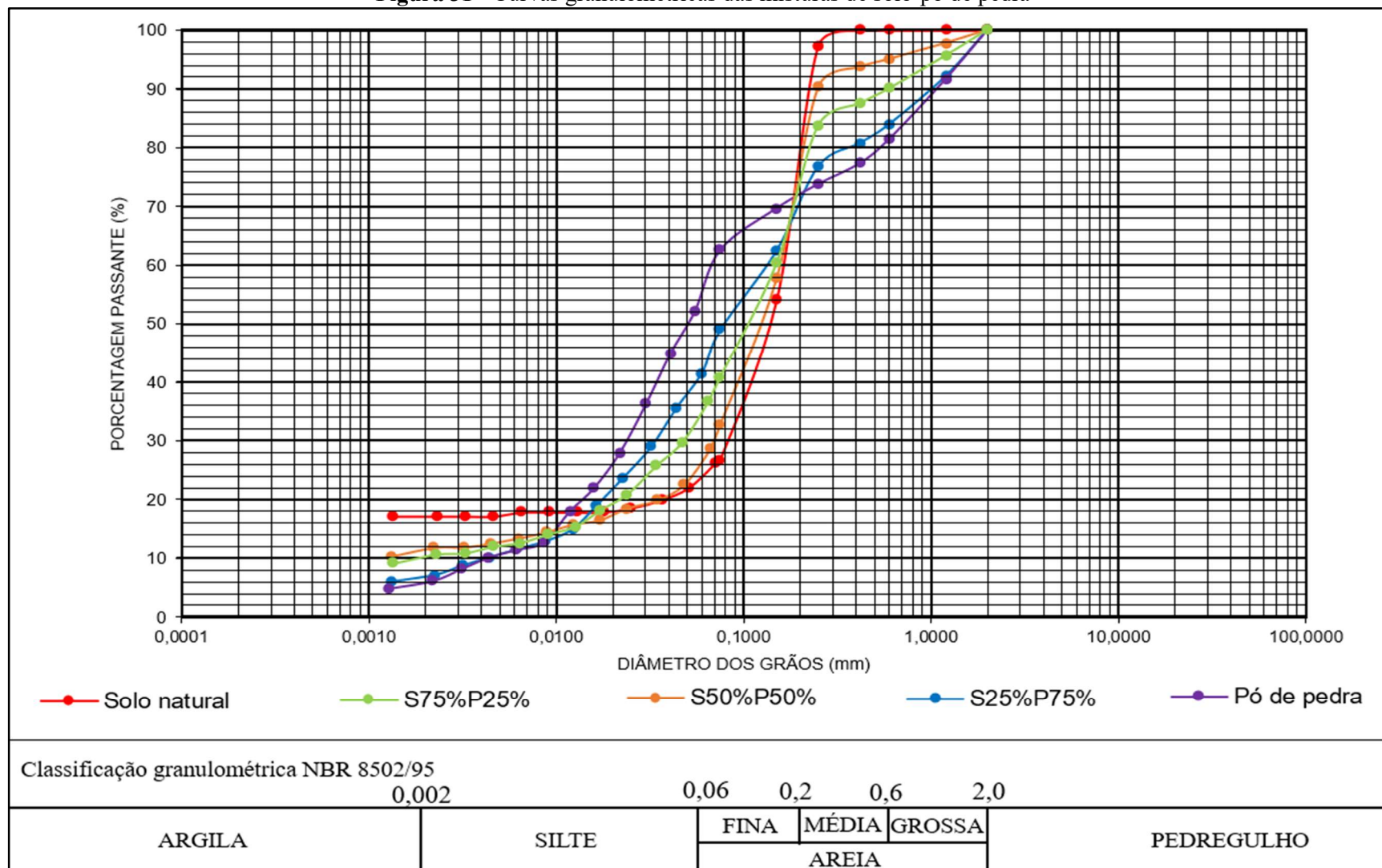
Fonte: Autora

Tabela 12 - Coeficiente de uniformidade e de curvatura

Material	D10	D30	D60	Cu	Cc
Solo	0,0003	0,082	0,165	550,0	135,84
S75P25	0,002	0,048	0,15	75,0	7,68
S50P50	0,0014	0,07	0,16	114,3	21,88
S25P75	0,0045	0,035	0,14	31,1	1,94
Pó de pedra	0,004	0,025	0,069	17,3	2,26
Coeficiente de uniformidade: $C_{NU} = D_{60}/D_{10}$					
$C_{NU} < 5$ muito uniforme $5 < C_{NU} < 15$ uniformidade média $C_{NU} > 15$ não uniforme					
Coeficiente de curvatura: $C_C = D_{30}^2/(D_{60} \times D_{10})$					
$1 < CC < 3$ – solo bem graduado $CC < 1$ ou $CC > 3$ – solo mal graduado					

Fonte: Autora

Figura 31 - Curvas granulométricas das misturas de solo-pó de pedra



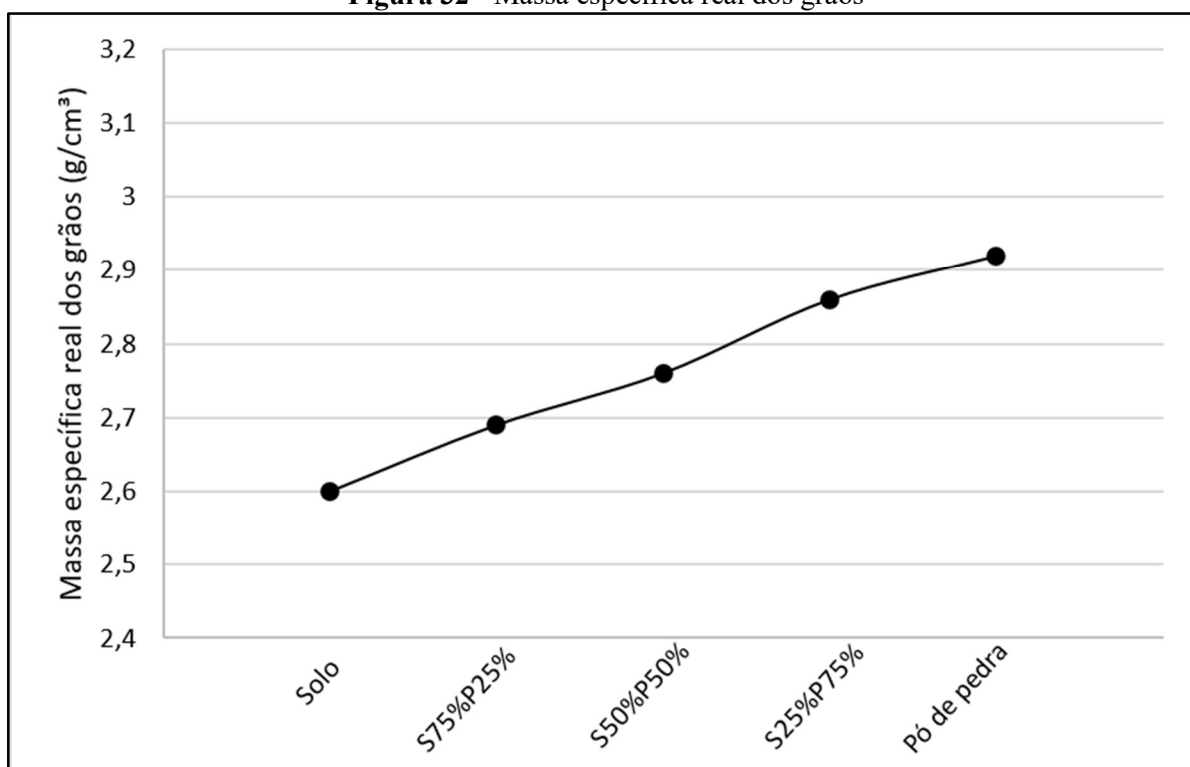
Fonte: Autora

4.1.3 Massa específica real dos grãos

A Figura 32 apresenta a influência da adição de pó de pedra na massa específica do grão do solo natural. Os resultados indicam que a adição de pó de pedra aumentou a massa específica dos grãos de forma gradual. O solo natural apresentou uma massa específica de $2,60 \text{ g/cm}^3$ enquanto o pó de pedra apresentou uma massa específica de $2,92 \text{ g/cm}^3$. Adicionalmente, observou-se que os valores de massa específica dos grãos para as misturas S₇₅P₂₅, S₅₀P₅₀ e S₂₅P₇₅ foram $2,69 \text{ g/cm}^3$, $2,76 \text{ g/cm}^3$ e $2,86 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. O aumento da massa específica pode estar associado com a presença de óxidos de ferro na composição do pó de pedra.

A massa específica da cal foi de $2,43 \text{ g/cm}^3$. Essa massa específica é um pouco elevada em comparação a maioria encontrada na literatura, no entanto, em um estudo de Hameed, Shaban e Almuhanha (2020), a massa específica seca da cal encontrada foi de $2,3 \text{ g/cm}^3$, o que mostra a possibilidade de a massa específica ser mais alta que o normal.

Figura 32 - Massa específica real dos grãos



Fonte: Autora

4.1.4 Limites de Atterberg

Os resultados para os limites de plasticidade (LP), limites de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP), apresentados na Tabela 14, indicam que tanto o solo quanto as misturas de

solo- pó de pedra ($S_{75}P_{25}$, $S_{50}P_{50}$ e $S_{25}P_{75}$) apresentaram comportamento “não plástico” (NP), mesmo o solo apresentando 18% de argila, logo o índice de plasticidade é nulo para todas as misturas.

Tabela 13 - Limites de consistência

Material	LL	LP	IP
Solo natural	NP	NP	0
$S_{75}P_{25}$	NP	NP	0
$S_{50}P_{50}$	NP	NP	0
$S_{25}P_{75}$	NP	NP	0

Fonte: Autora

4.1.5 pH dos materiais e das misturas

O ensaio de pH foi realizado com o objetivo de analisar a alteração dos potenciais hidrogeniônicos dos materiais e das misturas além de permitir avaliar o teor mínimo de cal necessário para a estabilização das misturas. Foram realizadas medidas pH em água e em $CaCl_2$, apresentadas na Tabela 15.

Tabela 14 - Resultado dos ensaios de pH em H_2O e $CaCl_2$

Misturas	H_2O	$CaCl_2$	Misturas	H_2O	$CaCl_2$
S	7,7	6,8	$S_{50}P_{50}$	11,46	11,63
SC_7	12,43	12,4	$S_{50}P_{50}C_7$	12,30	12,37
SC_9	12,45	12,41	$S_{50}P_{50}C_9$	12,35	12,39
SC_{11}	12,48	12,47	$S_{50}P_{50}C_{11}$	12,39	12,36
$S_{75}P_{25}$	11,38	11,52	$S_{25}P_{75}$	11,65	11,91
$S_{75}P_{25}C_7$	12,35	12,36	$S_{25}P_{75}C_7$	12,33	12,35
$S_{75}P_{25}C_9$	12,40	12,39	$S_{25}P_{75}C_9$	12,32	12,36
$S_{75}P_{25}C_{11}$	12,43	12,4	$S_{25}P_{75}C_{11}$	12,35	12,38
P	9,82	10,29	Cal	12,2	12,26

Fonte: Autora

O solo natural, estudado na pesquisa, apresentou um valor de pH considerado neutro, tanto em água quanto em $CaCl_2$.

O método de estabilização de misturas solo-cal apresentado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (2019) indica que o teor necessário de cal para a estabilização é quando a mistura atinge um valor de pH de 12,4, sendo esse valor observado para a mistura de solo com 7%, 9% e 11% e para as misturas de S_{75} e P_{25} com 9% e 11%. As demais misturas não atingiram esse valor. Observando o comportamento do pH em

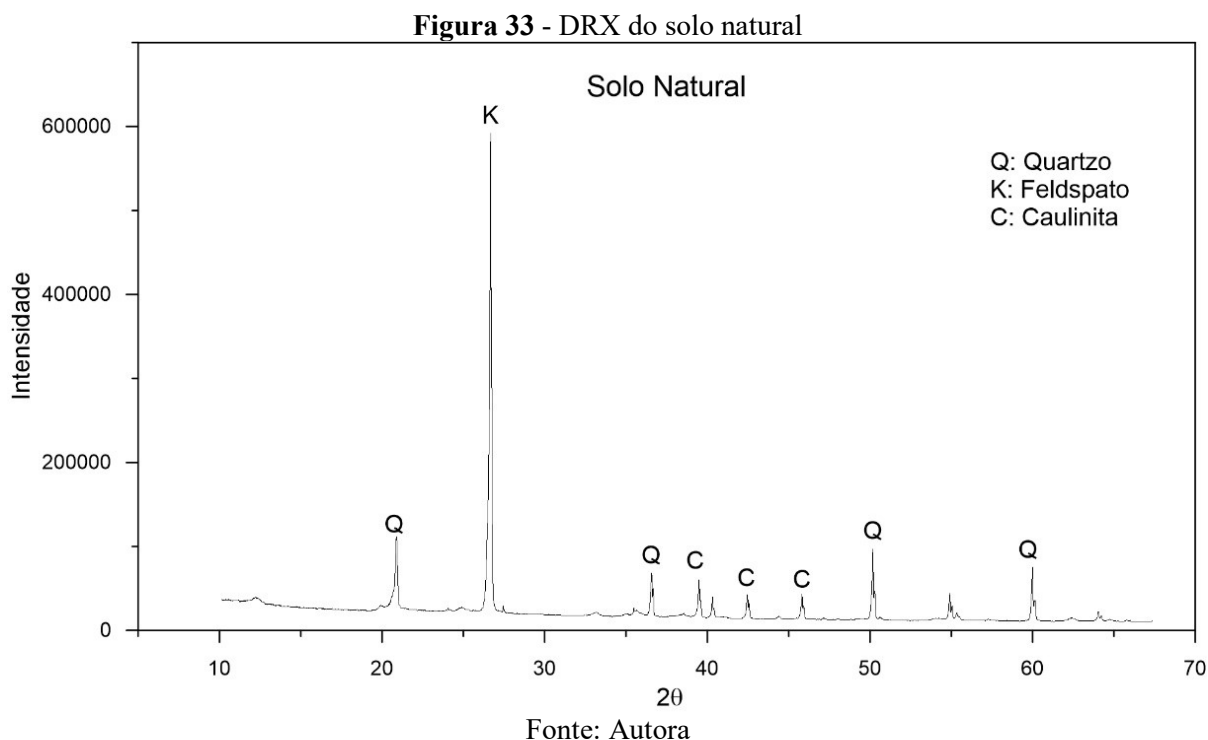
relação as misturas de solo e pó de pedra, observa-se que os valores, em questão, tendem a elevar o pH do solo, porém este sozinho não é capaz de elevar o valor acima de 12. Já em misturas de solo e cal, os valores de pH são acima de 12,43. Considerando o Método de pH, sugerido por Eades e Grimm (1966), todos teores de cal estariam estabilizando o solo, principalmente o teor de 11%.

Em misturas de solo, cal e pó de pedra, observa-se que o teor de cal de 11% é a que mais eleva o pH das misturas, já observando as proporções de solo e pó de pedra, percebe-se que a proporção de S₇₅P₂₅ é a que mais apresentou pH elevado, podendo considerar, de acordo com o método de Eades e Grimm (1966), a mistura de S₇₅P₂₅C₁₁ a que melhor estabiliza o solo.

Considerando as faixas desenvolvidas por Castro (1981) para a análise de pH para misturas de solo-cal, todas as dezesseis matrizes utilizadas nesse trabalho encontram-se na faixa de pH > 10,0, faixa com ocorrência de reações pozolânicas, podendo-se concluir, assim, que as misturas apresentam condições favoráveis para o desenvolvimento das reações responsáveis pela melhoria das características mecânicas das misturas, após a adição da cal.

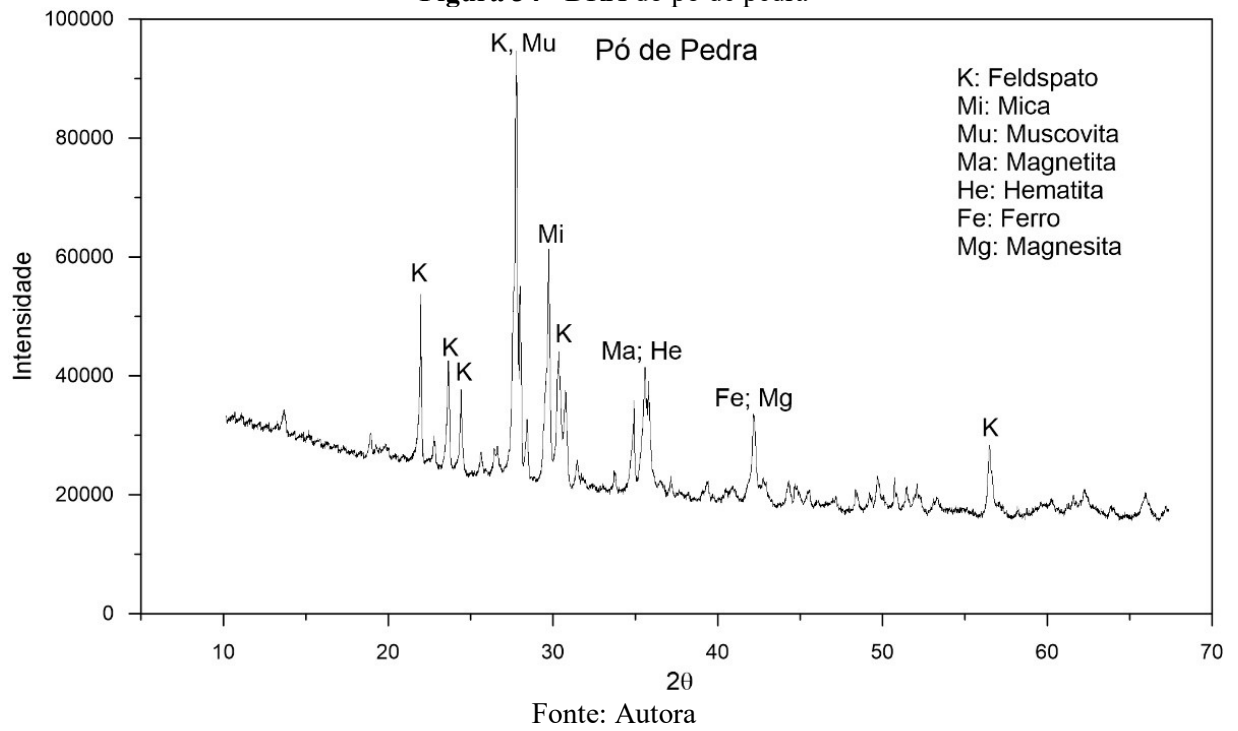
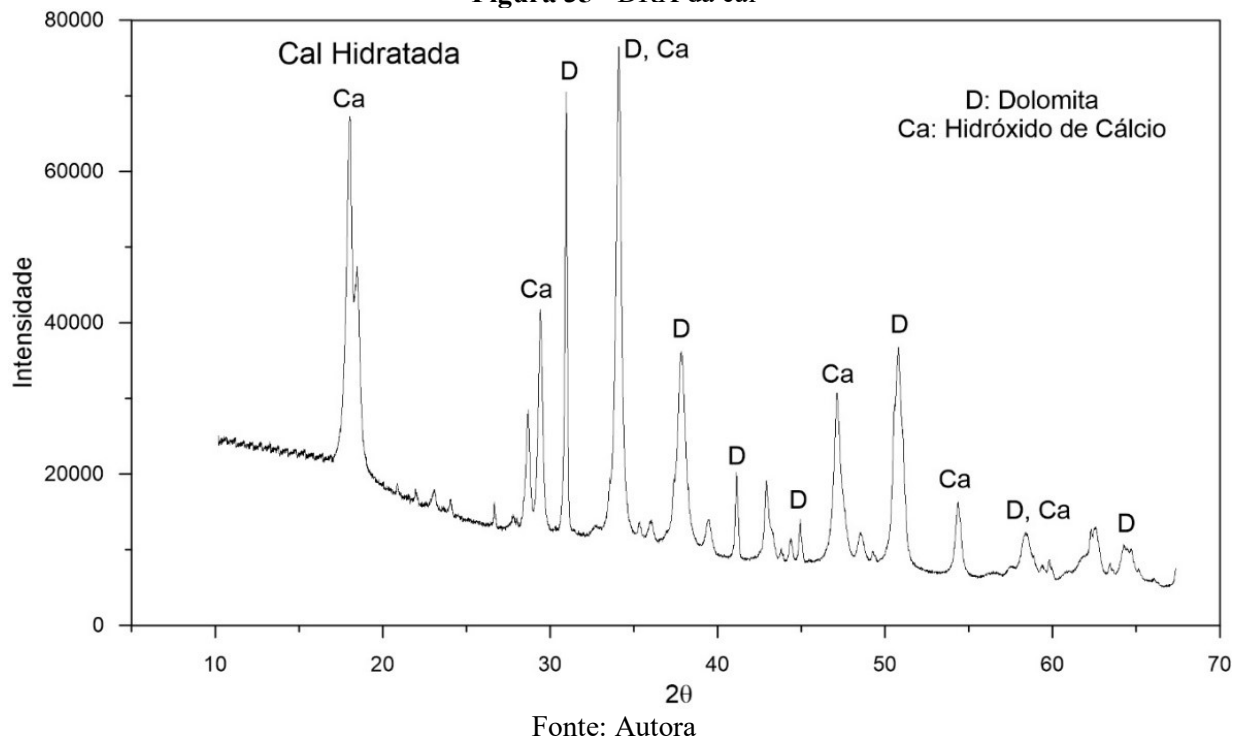
4.1.5 Difratometria por raio X (DRX)

Os difratogramas de raio X são apresentados nas Figuras 33,34 e 35. Com relação a amostra de solo (Figura 33) pode-se observar a presença de minerais como o quartzo, o feldspato e a caulinita. A predominância é de feldspato e quartzo com possibilidade de presença do argilomineral caulinita, que é um argilomineral de baixa atividade. A identificação mineralógica confirma a ausência de óxidos de ferro e reitera o valor de massa específica obtido para o solo natural. A presença de caulinita pode ser confirmada através da realização de outros ensaios.



O difratograma do pó de pedra (Figura 34) indicou a predominância do feldspato, mineral abundante em rochas ígneas. Foram detectados óxidos de ferro (magnetita, hematita, ferro e magnesita) provenientes de rochas basálticas. A presença de mica e muscovita justifica-se pelo fato de que são minerais que podem ser encontrados em rochas ígneas. Os minerais identificados no DRX justificam o valor ligeiramente superior da massa específica do pó de pedra determinada em laboratório. Souza (2020) caracterizou o mesmo pó de pedra e obteve um difratograma com os mesmos minerais apresentados e discutidos neste trabalho.

O difratograma da cal hidratada (Figura 35) indicou a predominância de dolomita e de hidróxido de cálcio, que são materiais que confirmam as informações comerciais do produto.

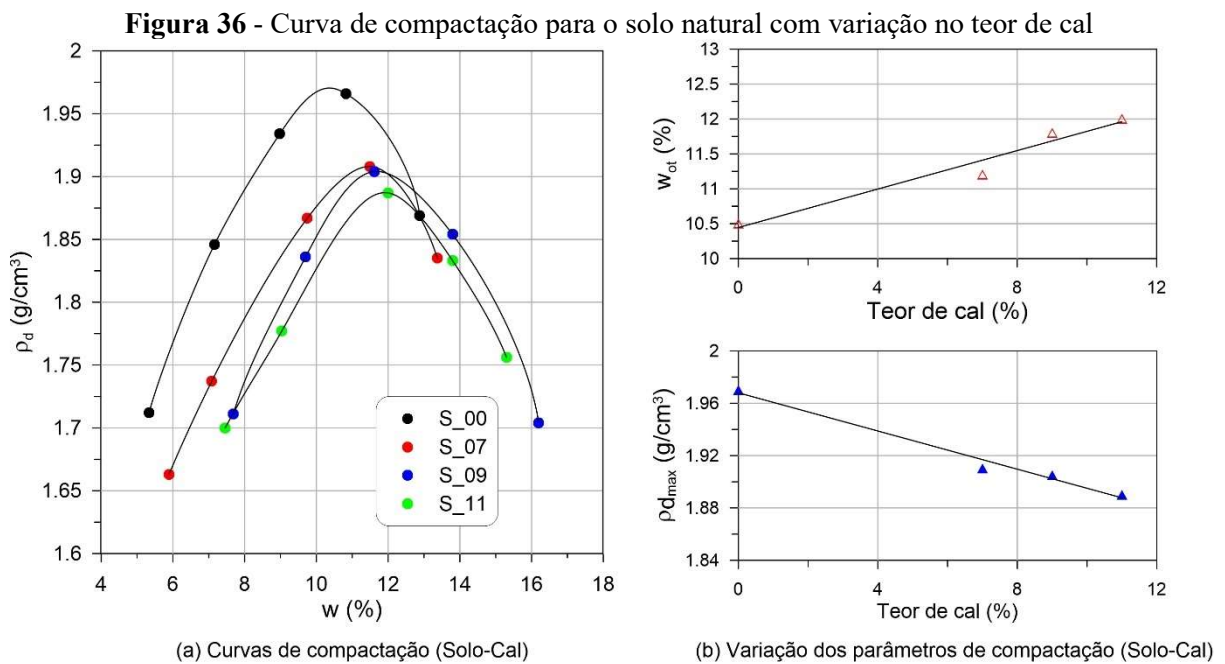
Figura 34 - DRX do pó de pedra**Figura 35 - DRX da cal**

4.1.4 Compactações

Os resultados dos ensaios de compactação serão discutidos sob duas óticas, a primeira levará em consideração a influência do teor de cal e a segunda a influência da adição do pó de pedra nos parâmetros de compactação dos materiais.

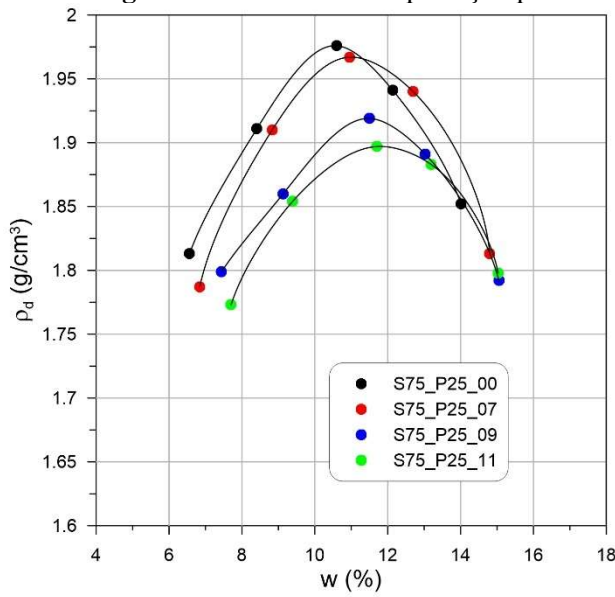
4.1.4.1 Influência do teor de cal

Nesta análise os parâmetros de compactação dos materiais estudados, solo e misturas de solo e pó de pedra, foram comparados na sua condição sem cal e após a adição da cal hidratada. A Figura 36 apresenta a influência do teor de cal nas curvas de compactação do solo natural, onde observa-se um aumento do teor de umidade ótimo e uma diminuição da massa específica seca máxima com o aumento do teor de cal. Apesar de pequenas dispersões, esse mesmo comportamento foi observado para as misturas de solo, pó de pedra e cal (Figuras 37, 38 e 39).

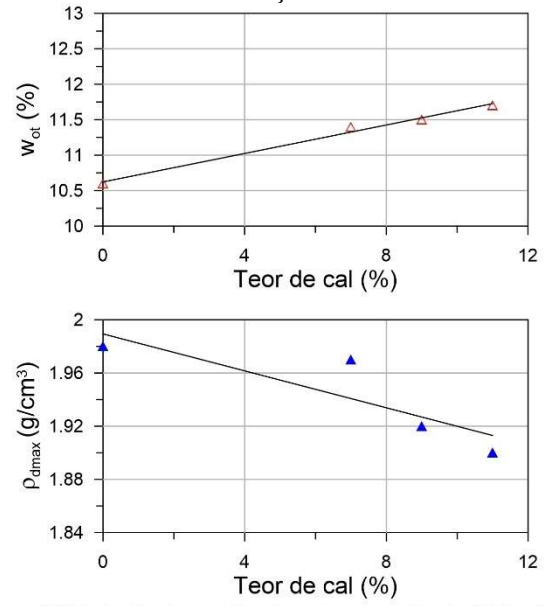


Fonte: Autora

Figura 37 - Curva de compactação para a mistura S75-P25 com variação no teor de cal



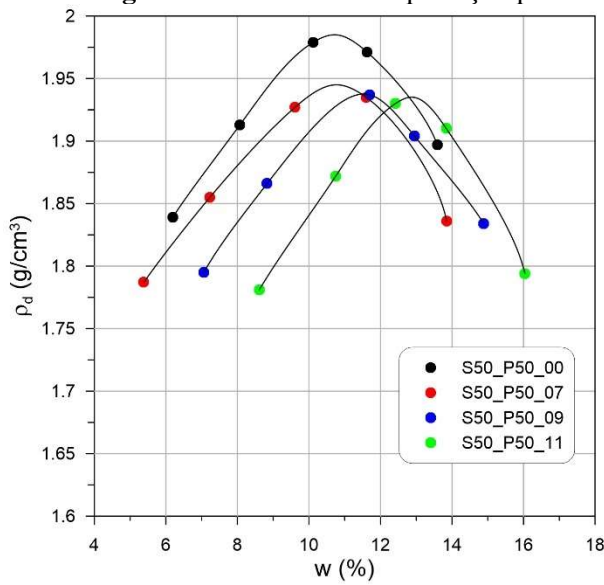
(a) Curvas de compactação (S75_P25)



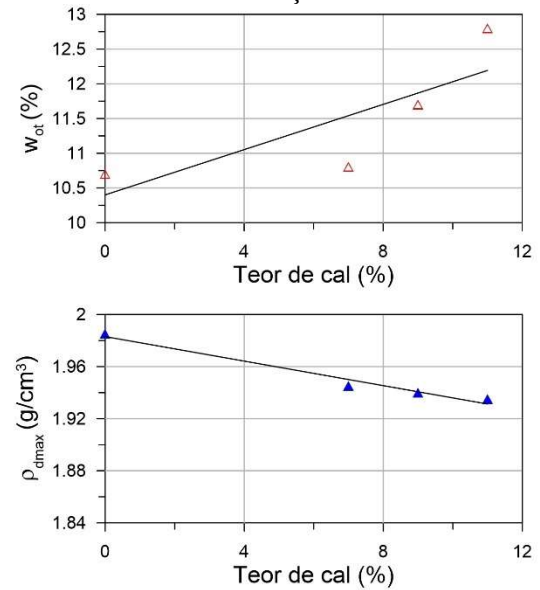
(b) Variação dos parâmetros de compactação (S75_P25)

Fonte: Autora

Figura 38 - Curva de compactação para a mistura S50-P50 com variação no teor de cal

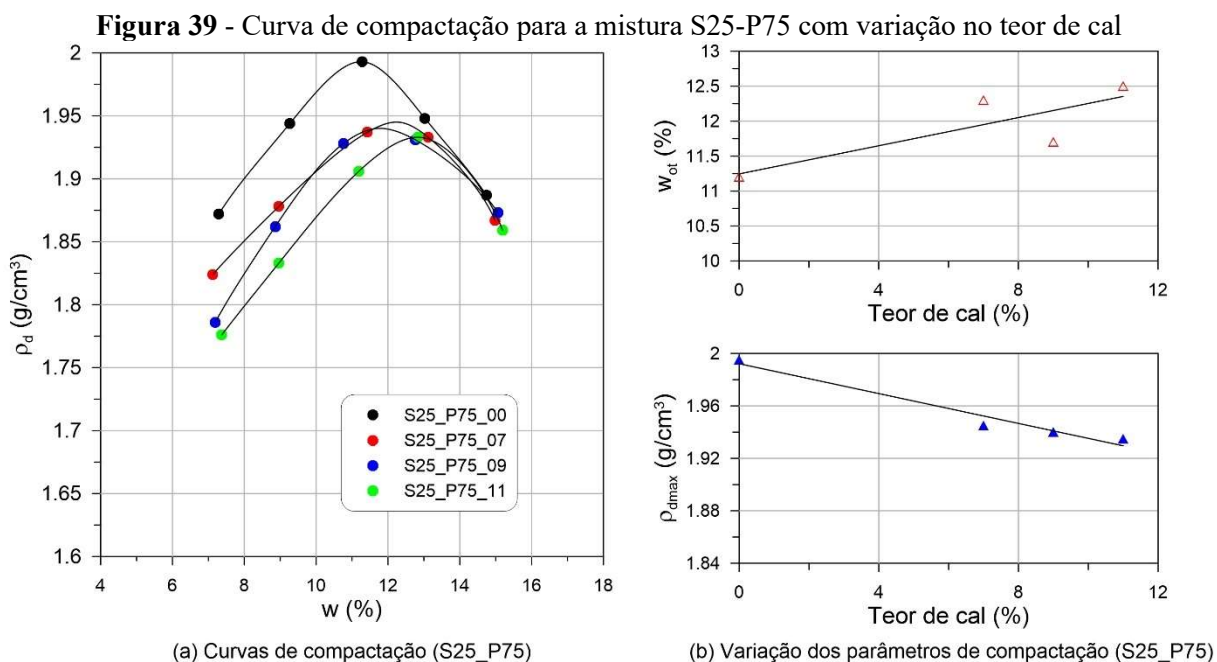


(a) Curvas de compactação (S50_P50)



(b) Variação dos parâmetros de compactação (S50_P50)

Fonte: Autora

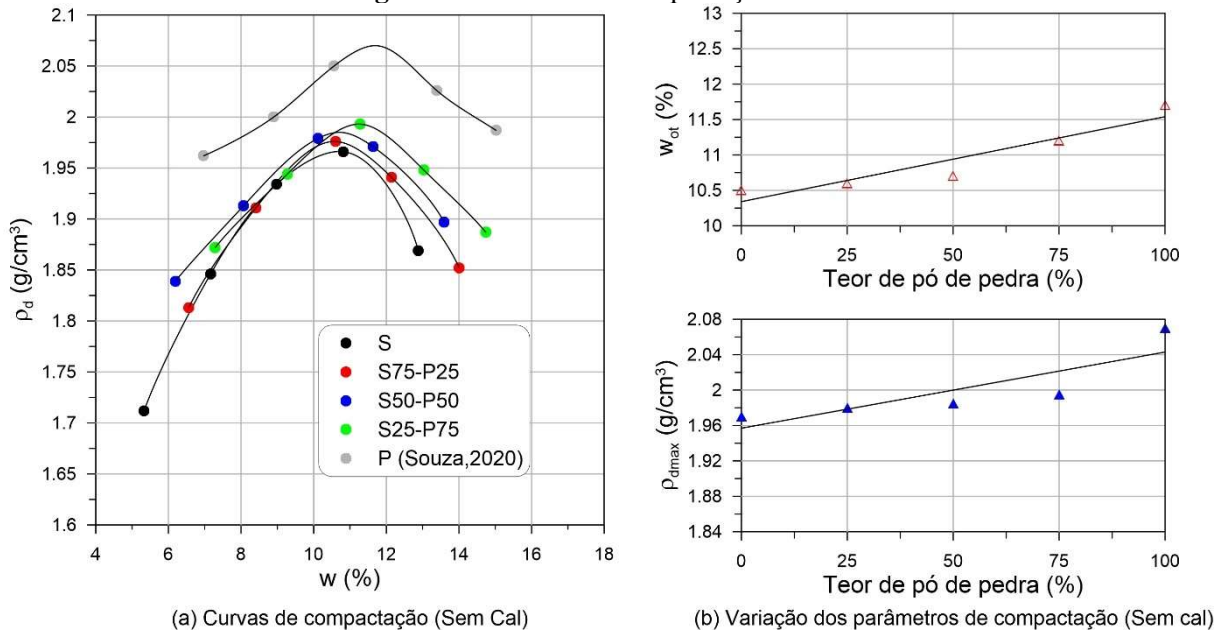


Fonte: Autora

O comportamento dos parâmetros de compactação, através da adição de cal, é coerente com outros trabalhos de pesquisa (Osinubi et al., 2006; Sales et al., 2017; Portelinha et al., 2012) sobretudo devido ao efeito das partículas finas da cal hidratada. De acordo com Sales, Ribeiro e Nery (2017), quando se adiciona materiais finos ao solo, obtém-se um aumento da umidade ótima na compactação, pois para que se envolva completamente todas as superfícies de contato e para que se aconteça as reações de hidratação faz-se necessário uma maior quantidade de água.

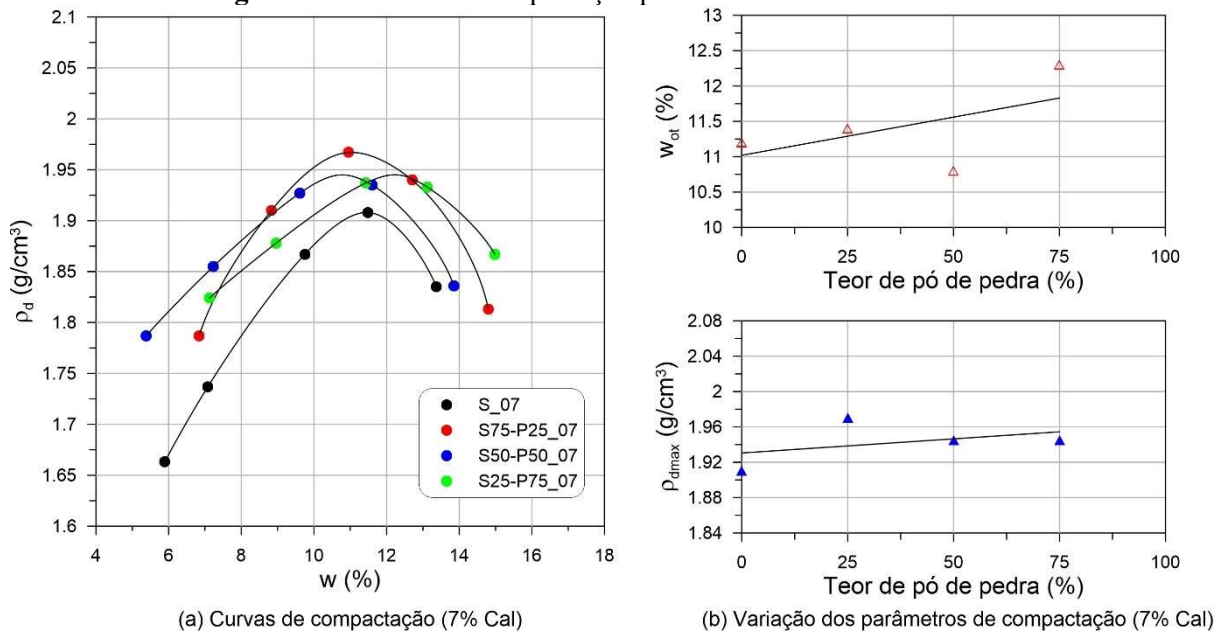
4.1.4.2 Influência do teor de pó de pedra

Nesta análise os parâmetros de compactação dos materiais estudados, solo e misturas de solo e pó de pedra, foram comparados na sua condição sem pó de pedra e após a adição do pó de pedra. A Figura 40 apresenta a influência da adição do pó de pedra nas curvas de compactação dos materiais sem a adição de cal, onde observa-se que o teor de umidade ótimo e a massa específica seca máxima aumentam com o teor de pó de pedra. Esse comportamento está associado com o comportamento da curva de compactação do pó de pedra puro, apresentada por Souza (2020) que indicou o teor de umidade ótimo de 11,8% e a massa específica seca máxima de 2,1 g/cm³. De maneira geral, o mesmo comportamento foi observado para as curvas de compactação com 7%, 9% e 11% de cal (Figuras 41, 42 e 43).

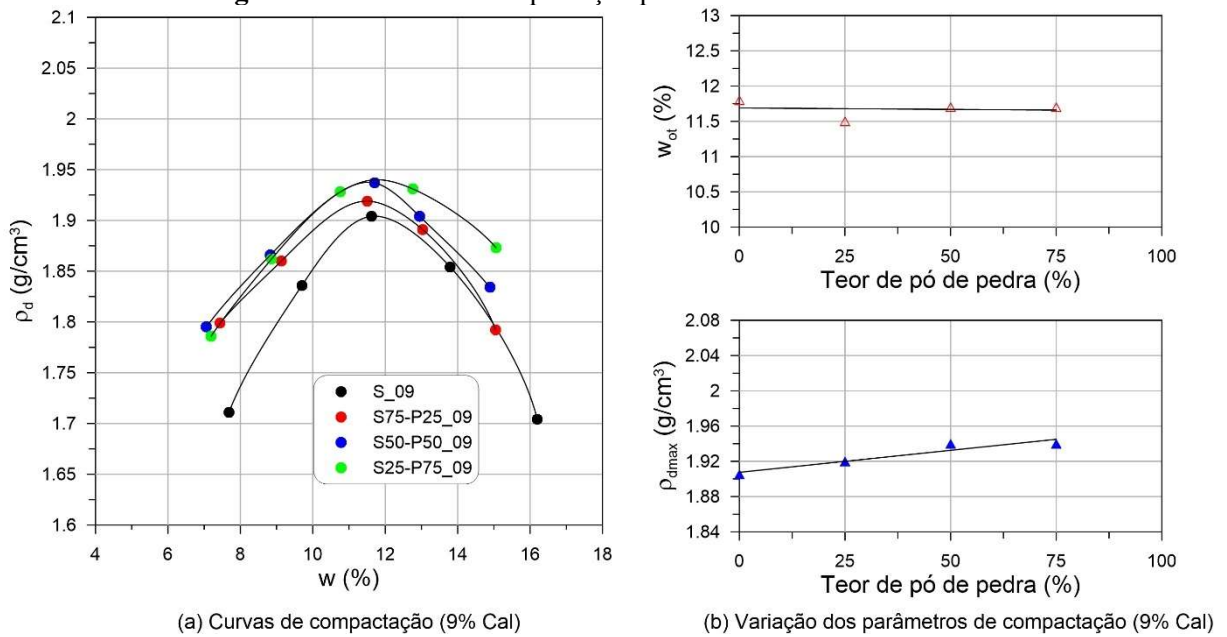
Figura 40 - Curvas de compactação sem cal

Fonte: Autora

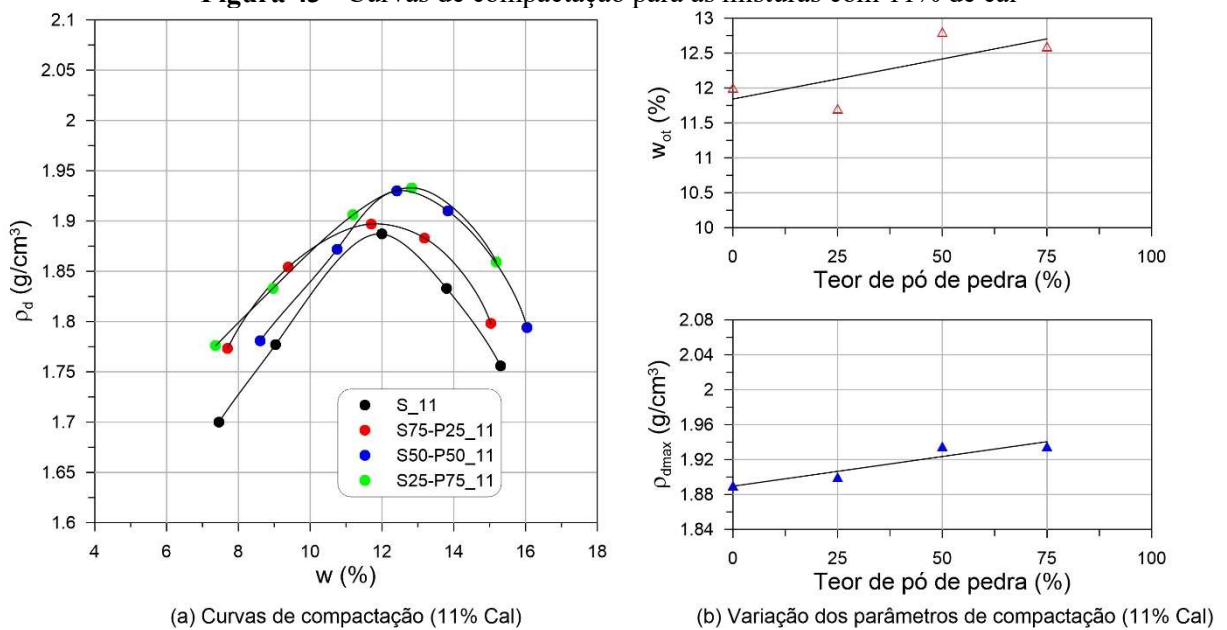
Os resultados indicam ainda que os maiores valores de massa específica seca máxima foram obtidos para os materiais que não tiveram a adição de cal (Figura 40) enquanto que os maiores valor do teor de umidade ótimo foi observado para os materiais que tiveram a adição de 11% de cal (Figura 43), confirmando o comportamento discutido no item 4.1.4.1.

Figura 41 - Curvas de compactação para as misturas com 7% de cal

Fonte: Autora

Figura 42 - Curvas de compactação para as misturas com 9% de cal

Fonte: Autora

Figura 43 - Curvas de compactação para as misturas com 11% de cal

Fonte: Autora

4.1.5 Porosidade

As Tabelas A.1 a A.4 do apêndice A, apresentam os índices físicos de todos os corpos de prova ensaiados, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental. Os corpos de prova com 28 dias de cura são apresentados na Tabela A.1, os com 21 dias de cura são apresentados na Tabela A.2, os com 14 dias de cura são

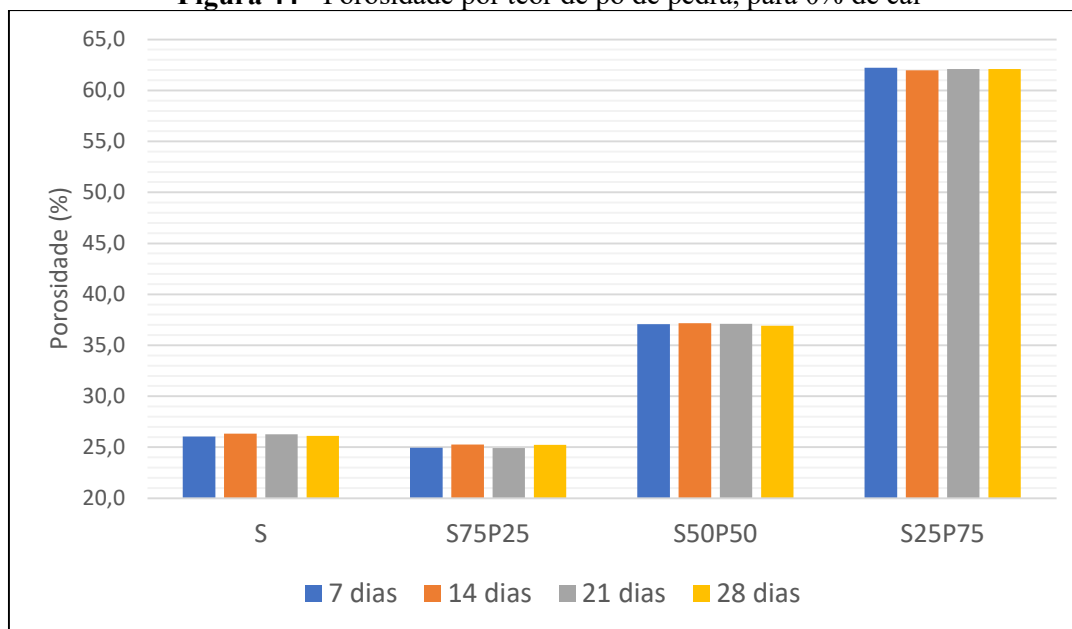
apresentados na Tabela A.3 e os com 7 dias de cura, na Tabela A.4. Pode-se observar que nestas tabelas os dados foram agrupados a cada quatro linhas, de acordo com o teor de cal presente na mistura e depois, foram organizados a cada dezesseis linhas, segundo o teor de pó de pedra.

4.1.5.1 Efeito do pó de pedra

A partir dos dados presentes nas Tabela A.1 a A.4 do Apêndice, foram elaboradas as Figuras 44 a 47, a partir das quais alguns aspectos relevantes do comportamento solo-pó de pedra e solo-cal-pó de pedra, em estudo, são evidenciados.

Na Figura 44, que apresenta a porosidade por teor de pó de pedra, é possível perceber que, independentemente do tempo de cura dos corpos de prova, a porosidade ficou em torno de 26% para o solo natural, 25% para misturas S₇₅P₂₅, 37% para misturas S₅₀P₅₀ e 62% para misturas S₂₅P₇₅. O acréscimo de pó de pedra aumenta a porosidade nos corpos de prova, apenas as misturas S₇₅P₂₅ apresentaram uma redução da porosidade em relação ao solo natural, porém esta variação foi de apenas 1 ponto percentual.

Figura 44 - Porosidade por teor de pó de pedra, para 0% de cal

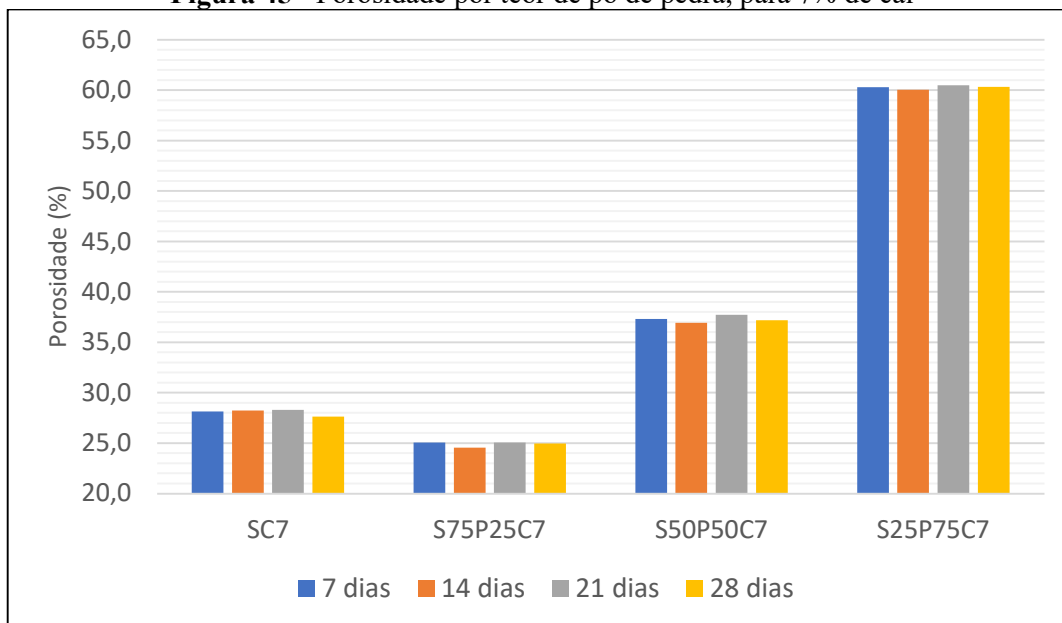


Fonte: Autora

Na Figura 45, a porosidade ficou em torno de 28% para o solo natural, 25% para misturas S₇₅P₂₅, 37% para misturas S₅₀P₅₀ e 60% para misturas S₂₅P₇₅. Neste caso, foram analisadas misturas de solo e solo-pó de pedra com 7% de cal, novamente, o gráfico mostrou que o aumento do teor de pó de pedra fez com que a porosidade aumentasse. A mistura S₇₅P₂₅,

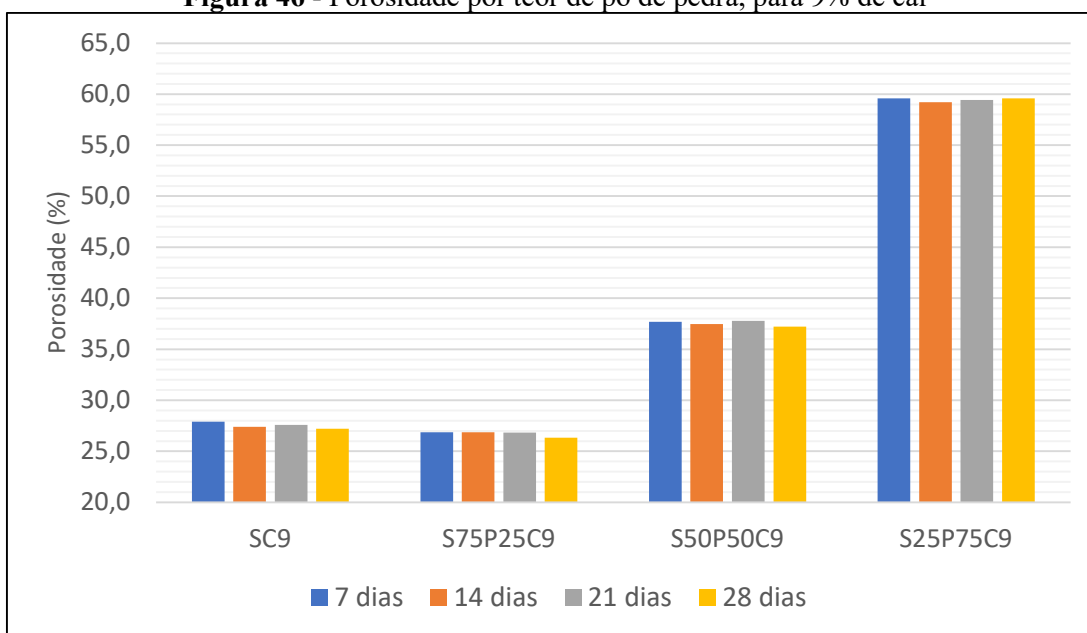
para esse caso, também apresentaram um decréscimo de porosidade em relação ao solo natural, cerca de a variação foi de 3 pontos percentuais.

Figura 45 - Porosidade por teor de pó de pedra, para 7% de cal



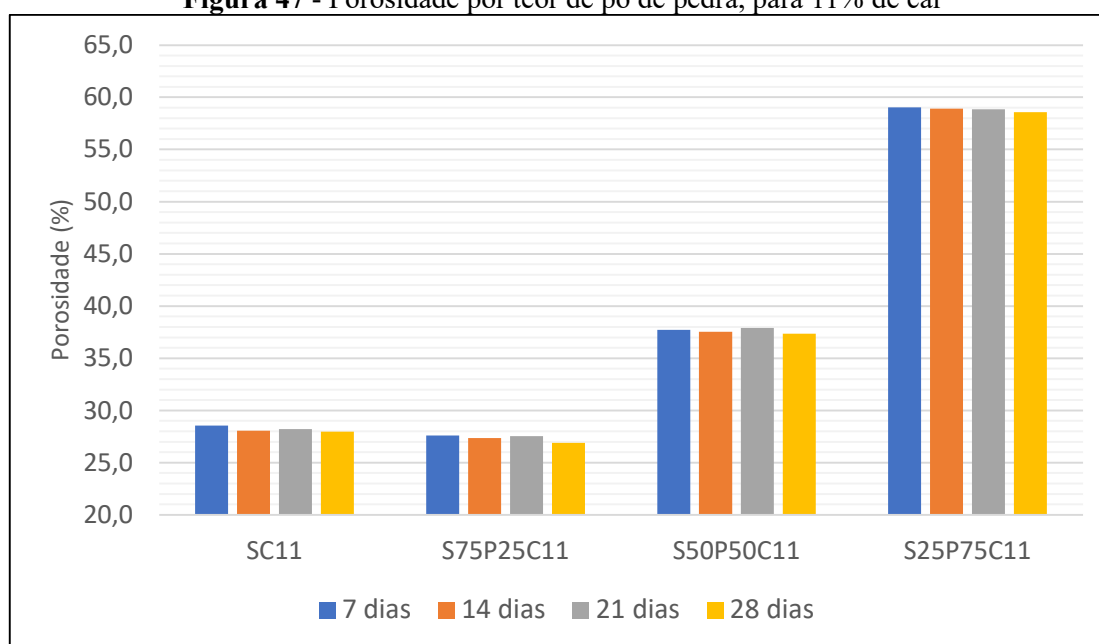
Fonte: Autora

Ao analisar a porosidade com a cal em 9% (Figura 46), é possível perceber que a porosidade apresentou valores em torno de 28% para o solo natural, 26% para misturas $S_{75}P_{25}$, 37% para misturas $S_{50}P_{50}$ e 59% para misturas $S_{25}P_{75}$. O acréscimo de pó de pedra, novamente, aumenta os valores da porosidade nos corpos de prova, apenas as misturas $S_{75}P_{25}$ apresentaram uma redução da porosidade em relação ao solo natural, porém esta variação foi de apenas 2 ponto percentual.

Figura 46 - Porosidade por teor de pó de pedra, para 9% de cal

Fonte: Autora

Por fim, para teores de 11% de cal, a porosidade apresentou os seguintes valores: 28% para o solo natural, 27% para misturas $S_{75}P_{25}$, 37% para misturas $S_{50}P_{50}$ e 58% para misturas $S_{25}P_{75}$ (Figura 47). Isso confirma a tendência que se mostrou presente até aqui, o aumento no teor do pó de pedra faz com que os corpos de prova apresentem um aumento na porosidade, destoando apenas os valores das misturas $S_{75}P_{25}$, que se mostram inferiores ao solo natural, neste caso 1 ponto percentual.

Figura 47 - Porosidade por teor de pó de pedra, para 11% de cal

Fonte: Autora

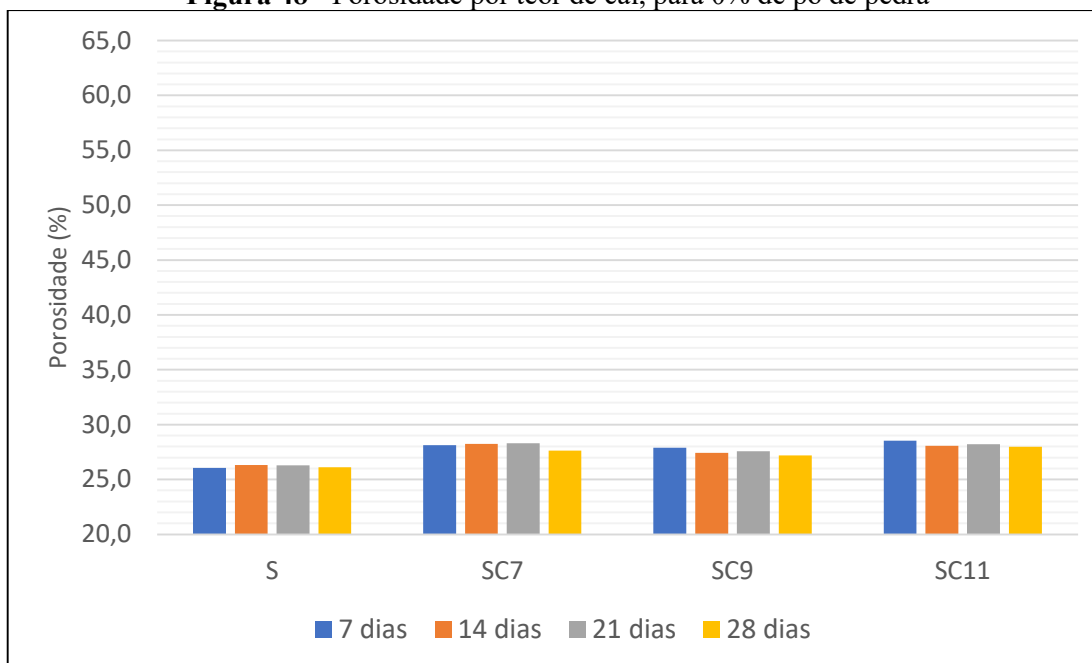
Para justificar esse comportamento é fundamental observar a granulometria dos materiais: solo natural e pó de pedra e de suas misturas: S₇₅P₂₅, S₅₀P₅₀ e S₂₅P₇₅, apresenta na Figura 30.

De acordo com Kiehl (1979) e Troeh e Thompson (2007), o espaço poroso em solos arenosos é menor, mas com presença maior de macroporos, logo, é possível que a água que entra no perfil do solo seja drenada. Com isso, ao analisar a Figura 47 pode-se concluir que o solo natural pode possuir um maior número de macroporos. Já para o pó de pedra pode acontecer o contrário, ou seja, a presença de microporos, assim o arranjo das partículas faz com que a água seja armazenada nos microporos, causando um aumento do volume de vazios.

4.1.5.2 Efeito da cal

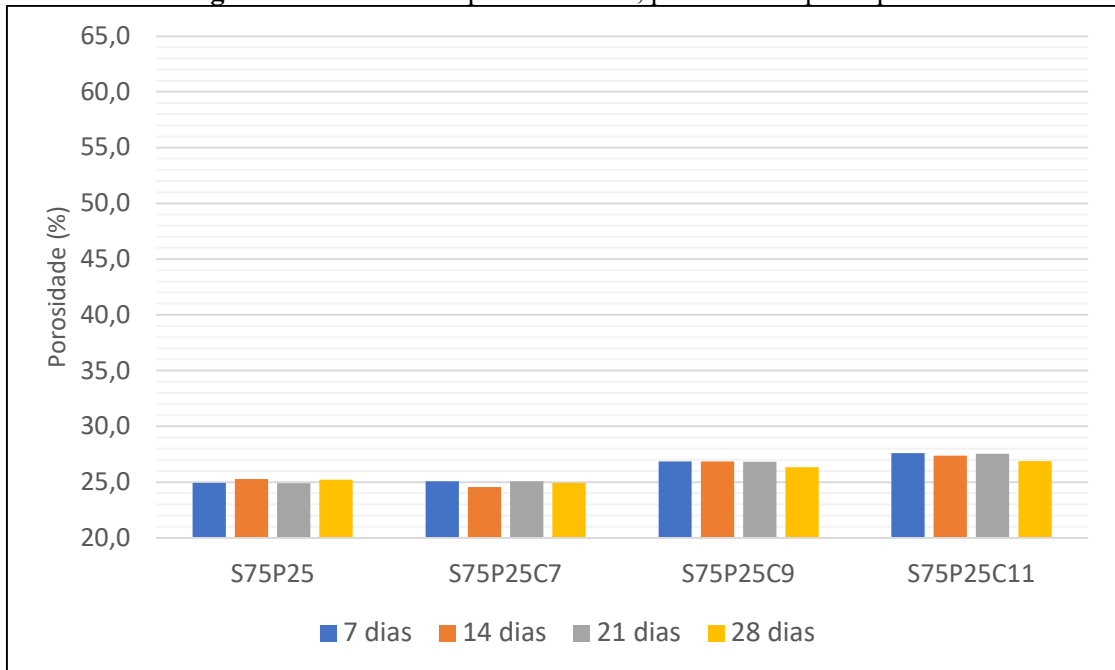
Para uma análise do efeito da cal na porosidade, foram confeccionadas as Figuras 48 a 51. Essas figuras apresentam a porosidade por teor de cal acrescentado nas misturas de solo natural, S₇₅P₂₅, S₅₀P₅₀ e S₂₅P₇₅.

Figura 48 - Porosidade por teor de cal, para 0% de pó de pedra



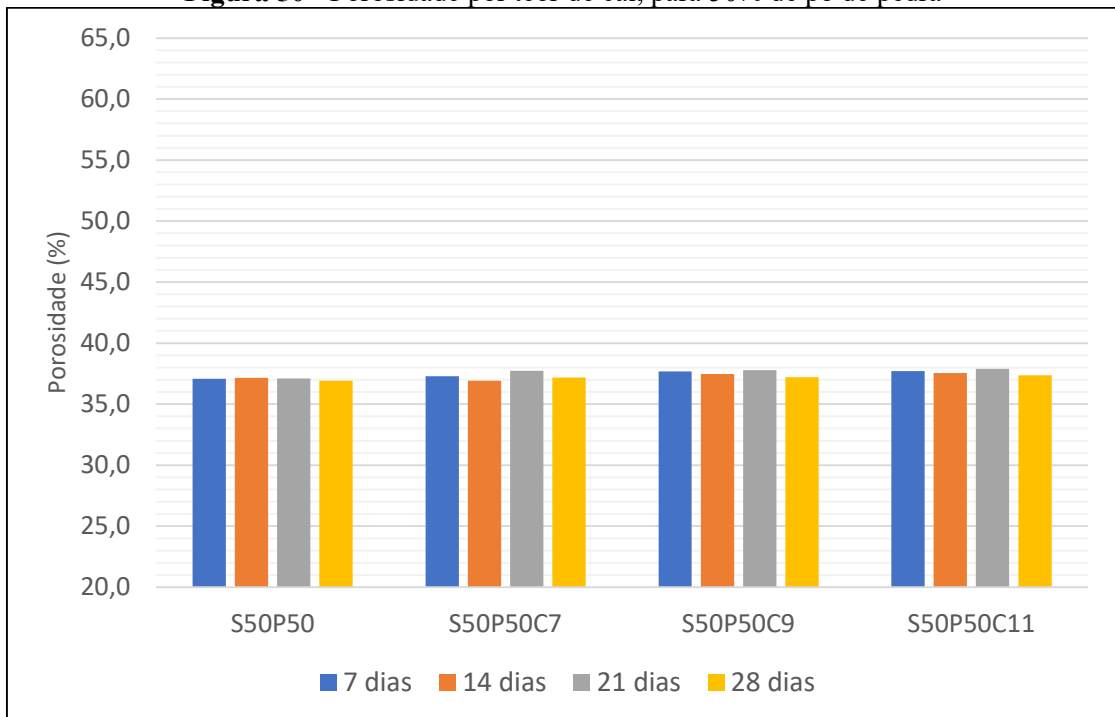
Fonte: Autora

Figura 49 - Porosidade por teor de cal, para 25% de pó de pedra

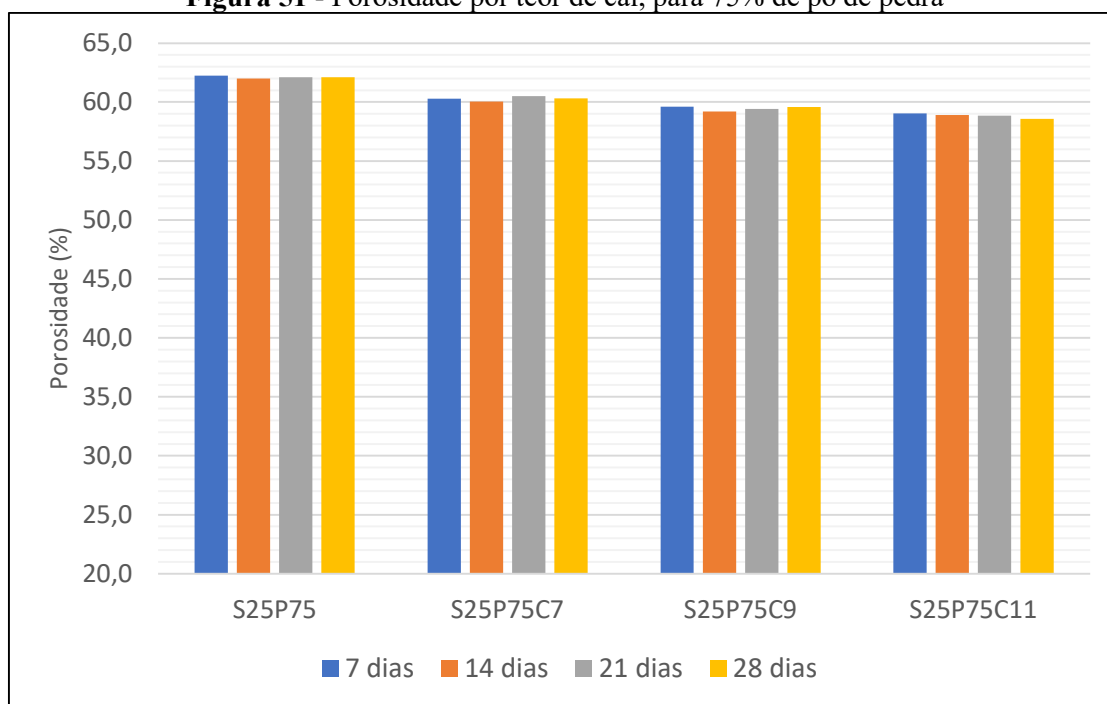


Fonte: Autora

Figura 50 - Porosidade por teor de cal, para 50% de pó de pedra



Fonte: Autora

Figura 51 - Porosidade por teor de cal, para 75% de pó de pedra

Fonte: Autora

As Figuras de 48 a 51 apresentam as variações da porosidade pelo acréscimo de cal. Essas variações são baixas quando comparada as apresentadas pela variação do teor de pó de pedra. Para as misturas $S_{50}P_{50}$ e $S_{25}P_{75}$, elas chegam a 0 e 4 pontos percentuais, respectivamente. Já para o solo natural e para a mistura $S_{75}P_{25}$, esses valores chegam a 3 e 4 pontos percentuais. Essa baixa variação ocorre pelo fato de os teores de cal serem de apenas 2 pontos percentuais uns dos outros, enquanto que os teores de pó de pedra variam 25 pontos percentuais. Com relação a cal, a diferença de porosidade mais nítida encontra-se do solo natural para o primeiro teor de cal, 7%, porém está só é visível no solo e na mistura $S_{75}P_{25}$.

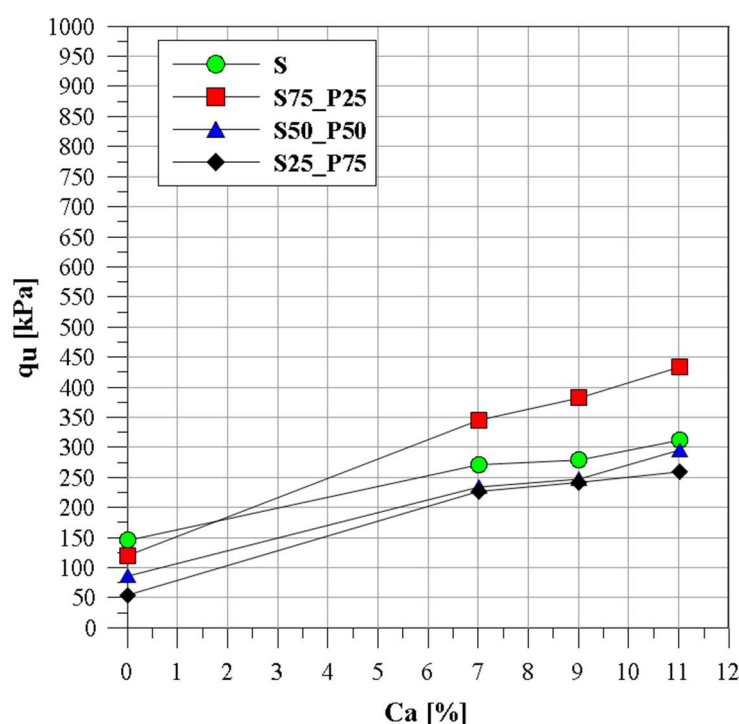
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

As Tabelas A1 a A4 do apêndice A, apresentam as características de todos os corpos de prova ensaiados à compressão simples, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental. Os corpos de prova com 28 dias de cura são apresentados na Tabela A1, os com 21 dias de cura são apresentados na Tabela A2, os corpos de prova com 14 dias de cura são apresentados na Tabela A3 e os com 7 dias de cura, na Tabela A4. Pode-se observar que nestas tabelas os dados foram agrupados a cada quatro linhas, de acordo com o teor de cal presente na mistura e depois, foi organizado a cada dezesseis linhas, segundo o teor de pó de pedra.

4.2.1 Efeito da cal

A partir dos dados presentes da Tabela A1, foram elaboradas as Figuras 31 a 34, a partir das quais alguns aspectos relevantes do comportamento solo-cal e solo-cal-pó de pedra, em estudo, são evidenciados. Na Figura 52, são apresentadas as curvas de resistência à compressão simples em função da quantidade de cal, para 7 dias de cura.

Figura 52 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 7 dias de cura



Fonte: Autora

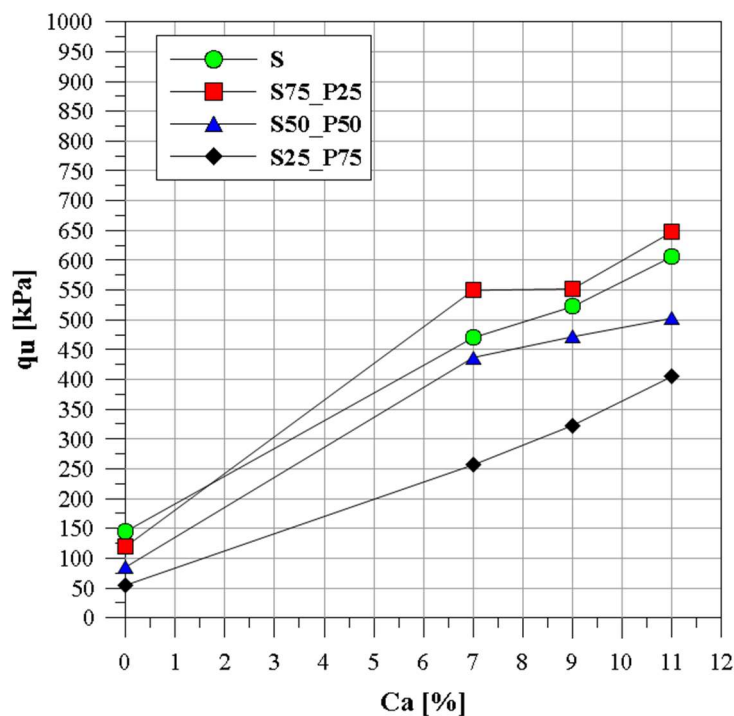
Ao analisar, separadamente, cada curva, é possível notar que ao aumentar o teor de cal, há um ganho na resistência média obtida. No caso do solo natural um acréscimo de 11% de cal fez com que a resistência fosse elevada em 2,14 vezes seu valor inicial, para a mistura de S75P25, o acréscimo de 11% de cal causou um aumento de 3,6 vezes no valor da resistência inicial.

Para a mistura S50P50 o acréscimo de cal gerou um aumento de 4,7 vezes o valor da resistência inicial. Por fim, o acréscimo de cal, também acarretou no aumento de 4,7 vezes o valor da resistência à compressão simples quando se observa o acréscimo de cal para um mesmo tempo de cura, para misturas de S25P75.

Outro ponto importante percebido é que para as misturas de solo natural, $S_{50}P_{50}$ e $S_{25}P_{75}$, as curvas apresentaram um ganho de resistência à compressão simples menor entre os teores de 7%, 9% e 11% (40,4kPa para o solo natural, 61,3kPa para $S_{50}P_{50}$ e 32,4kPa para $S_{25}P_{75}$), quando comparadas com a curva da mistura $S_{75}P_{25}$, que apresenta um ganho maior de resistência para a mesma faixa de teores de cal, 88,2kPa, mais especificamente, este valor é mais que o dobro do solo natural e do $S_{25}P_{75}$ e 50% maior que a mistura $S_{50}P_{50}$.

Para o período de 14 dias de cura, as resistências obtidas podem ser observadas na Figura 53, as variáveis são mostradas com relação aos teores de cal utilizados.

Figura 53 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 14 dias de cura



Fonte: Autora

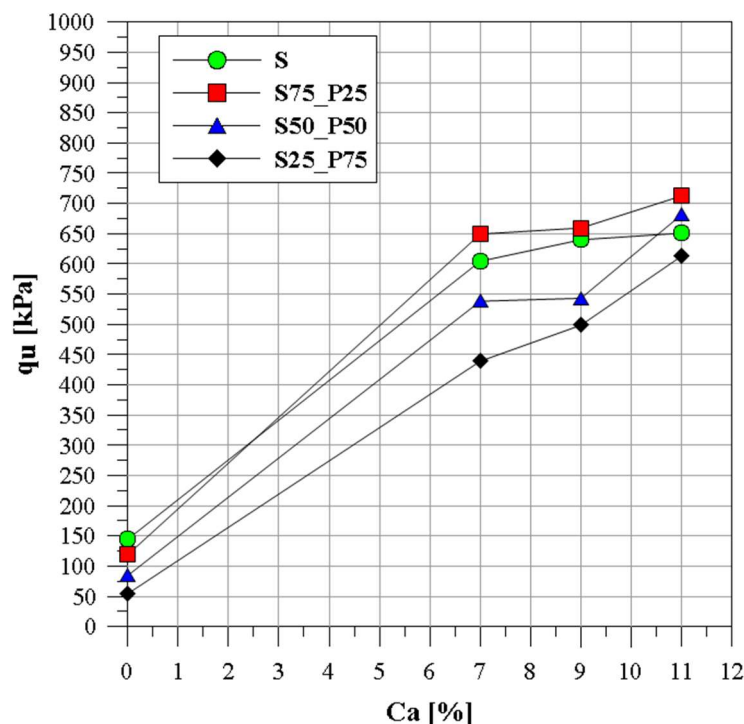
Observando cada curva, é possível notar um aumento na resistência média obtida em relação ao teor de cal utilizado. Para o solo natural, o acréscimo de resistência chegou a 4,18 vezes mais do que o inicial. Já para a mistura de $S_{75}P_{25}$, esse acréscimo foi de 3,6 vezes o valor da mistura sem acréscimo de cal. Para a mistura $S_{50}P_{50}$ houve um acréscimo de 3,45 vezes a resistência da mistura sem a cal. Por fim, a resistência à compressão simples teve seu valor aumentado em 4,7 vezes.

Outro ponto importante percebido é que para as misturas de solo natural, $S_{50}P_{50}$ e $S_{25}P_{75}$, as curvas apresentaram um ganho de resistência à compressão simples mais linear, ou seja, o

crescimento da resistência à compressão simples não apresentou uma suavização a partir do teor de 7% de cal como apresentaram as curvas das misturas S₅₀P₅₀, S₂₅P₇₅ e do solo natural para o tempo de cura de 7 dias.

Na Figura 54, são apresentadas as curvas de resistência à compressão simples em função da quantidade de cal, para 21 dias de cura.

Figura 54 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 21 dias de cura



Fonte: Autora

Ao verificar as curvas separadamente, é possível notar que o aumento no teor de cal, causa um ganho na resistência média obtida. No caso do solo natural um acréscimo de 11% de cal fez com que a resistência fosse elevada em 4,5 vezes seu valor da resistência do solo natural, para a mistura de S₇₅P₂₅, o acréscimo de 11% de cal causou um aumento de quase 6 vezes no valor da resistência inicial.

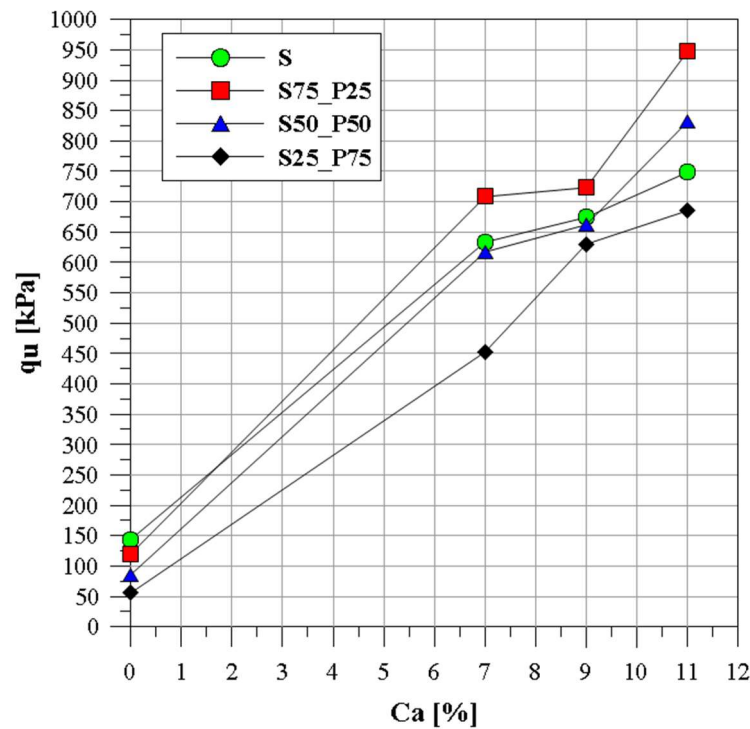
Para a mistura S₅₀P₅₀ o acréscimo de cal gerou um aumento de 8 vezes o valor da resistência inicial. Por fim, o acréscimo de cal em misturas S₂₅P₇₅, também acarretou no aumento de 11 vezes o valor da resistência à compressão simples quando se observa o acréscimo de cal para um mesmo tempo de cura.

Outro ponto importante percebido é que há um aumento significativo entre as misturas de solo puro, S₇₅P₂₅, S₅₀P₅₀ e S₂₅P₇₅ em relação as mesmas misturas com 7% de cal, já entre os

teores de 7%, 9% e 11% não houve uma variação tão expressiva, quando comparada ao intervalo de 0% a 7% de cal.

Por fim, para o período de 28 dias de cura, as resistências obtidas podem ser observadas na Figura 55.

Figura 55 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 28 dias de cura



Fonte: Autora

Assim como no gráfico anterior, para 21 dias, a variação da resistência a compressão simples apresenta um grande aumento quando comparado aos valores apresentados com 0 dias de cura. No entanto, diferente daquele, este gráfico apresenta uma variação significativa entre os teores de 7%, 9% e 11% de cal, o que significa que as misturas ainda poderão ganhar resistência ao passar dos dias, pois elas não estão apresentando uma constância entre tais teores.

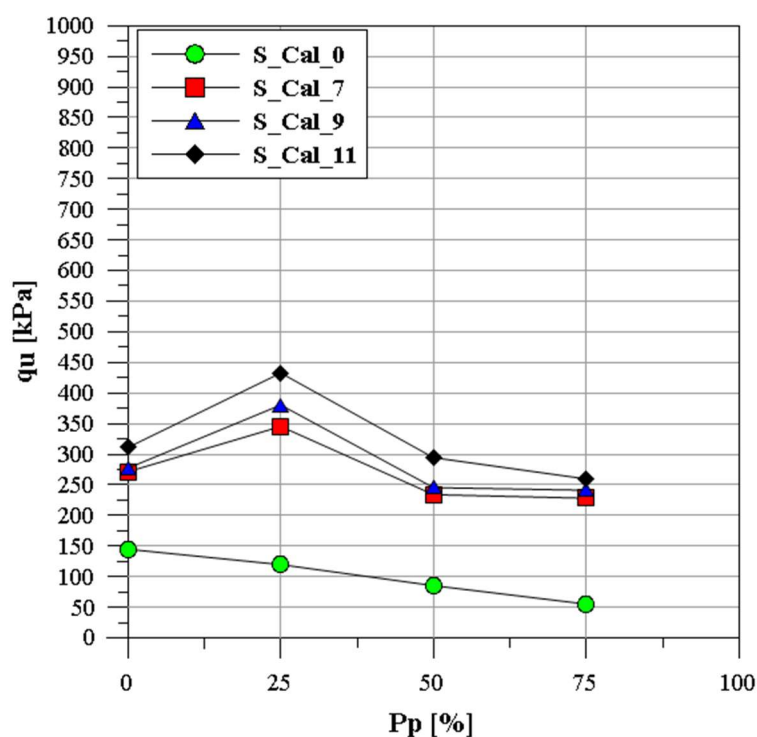
Ao estudar cada curva, é possível notar um aumento na resistência média obtida em relação ao teor de cal utilizado. Para o solo natural, o acréscimo de resistência chegou a 4,18 vezes mais do que o inicial. Já para a mistura S₇₅P₂₅, esse acréscimo foi de 3,6 vezes o valor da mistura sem acréscimo de cal. Para a mistura S₅₀P₅₀ houve um acréscimo de 3,45 vezes a resistência da mistura sem a cal. Por fim, a resistência à compressão simples teve seu valor aumentado em 4,7 vezes.

Os resultados vão ao encontro com o que foi exposto na fundamentação teórica. Um exemplo são os resultados obtidos por Bordignon (2015), na Tabela 6, em que a resistência a compressão simples aumenta com o aumento do teor da cal.

4.2.2 Efeito do pó de pedra

A resistência à compressão simples será analisada, nesse momento, a partir dos teores de pó de pedra utilizados para a confecção dos corpos de prova, as Figuras 56 a 59 foram construídas com base nas Tabelas A.1 a A.4 do Apêndice deste trabalho e se dividirão, assim como na seção sobre a cal, pelo tempo de cura.

Figura 56 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de pó de pedra das amostras com 7 dias de cura



Fonte: Autora

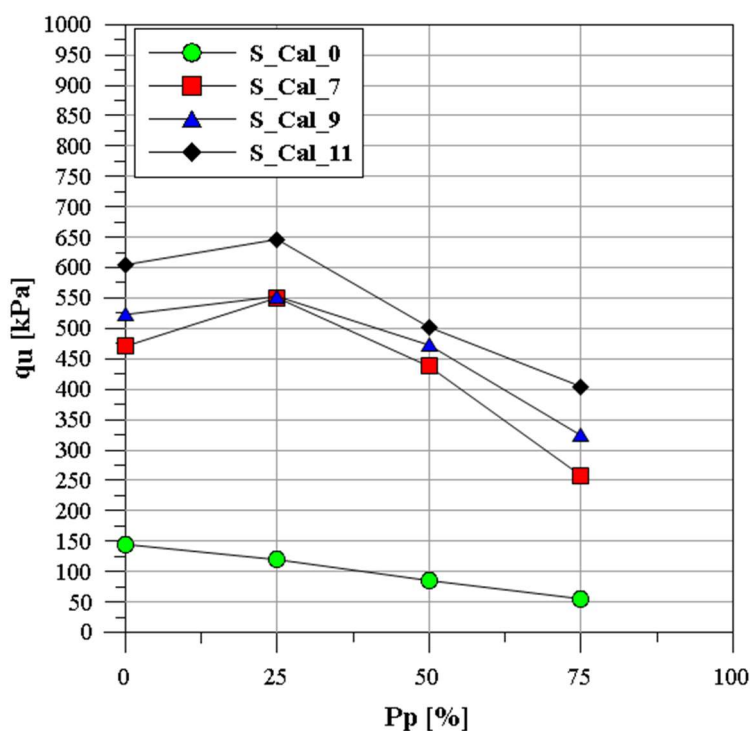
Ao considerar a curva com 0% de cal, ou seja, os corpos de prova de solo e solo-pó de pedra, que foram rompidos logo após sua confecção, podem-se notar que ao acrescentar pó de pedra ao solo, este perde resistência, neste caso, um acréscimo de 75% de pó de pedra fez com que o solo perdesse 89,6kPa, ou seja, 2,6 vezes seu valor inicial.

Assim que se acrescenta a cal, os corpos de prova ganham resistência, porém, não importa o teor de cal utilizado, assim que os teores de pó de pedra vão aumentando, a resistência

das misturas começa a diminuir. Uma ressalva ocorre apenas para as misturas $S_{75}P_{25}$, em que, ao adicionar a cal, sua resistência fica superior ao do material sem pó de pedra. Esse aumento chega a 1,27, 1,37 e 1,39 vezes o valor da mistura sem pó de pedra, para os teores de 7%, 9% e 11% de cal, respectivamente.

Na Figura 57, são apresentados os valores de resistência para os corpos de prova curados com 14 dias.

Figura 57 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de pó de pedra das amostras com 14 dias de cura



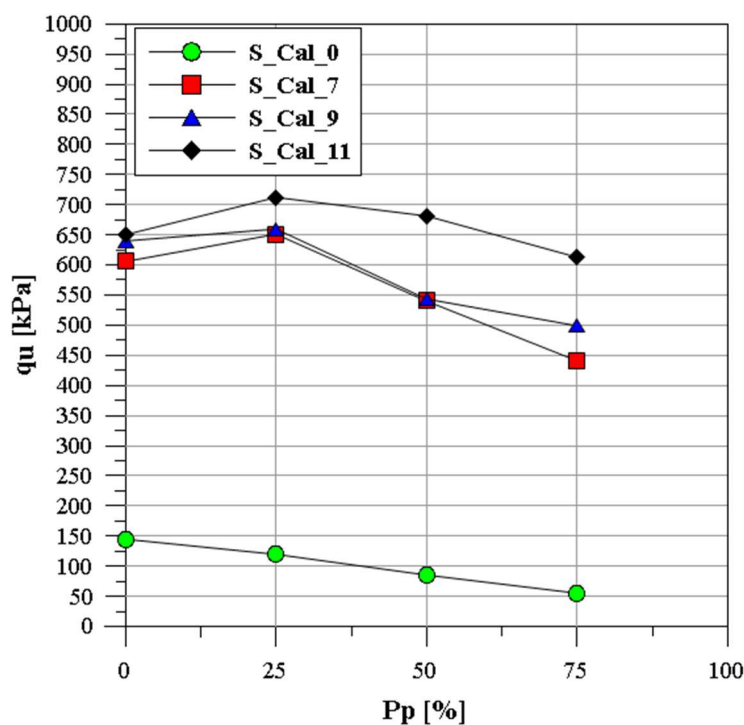
Fonte: Autora

Com 14 dias de cura, vê-se que as curvas com presença de cal adquirem um ganho de resistência, porém as curvas para as misturas permanecem apresentando um decréscimo de resistência à medida que se adiciona pó de pedra. Assim como nas curvas de 7 dias de cura, a mistura $S_{75}P_{25}$, continua apresentando um valor mais alto que o do solo sem pó de pedra, neste caso, esse valor chega a uma diferença de 1,17, 1,06 e 1,07 vezes o valor da mistura sem pó de pedra, para os teores de 7%, 9% e 11% de cal, respectivamente.

Percebe-se, também, que as curvas começam a adquirir uma forma mais parabólica, diferente da curva com 7 dias de cura, em que a partir do teor de 50% de pó de pedra, as resistências começam a ficarem mais constantes.

Na Figura 58, são apresentadas as curvas de resistência à compressão simples em função da quantidade de pó de pedra, para 21 dias de cura.

Figura 58 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de pó de pedra das amostras com 21 dias de cura

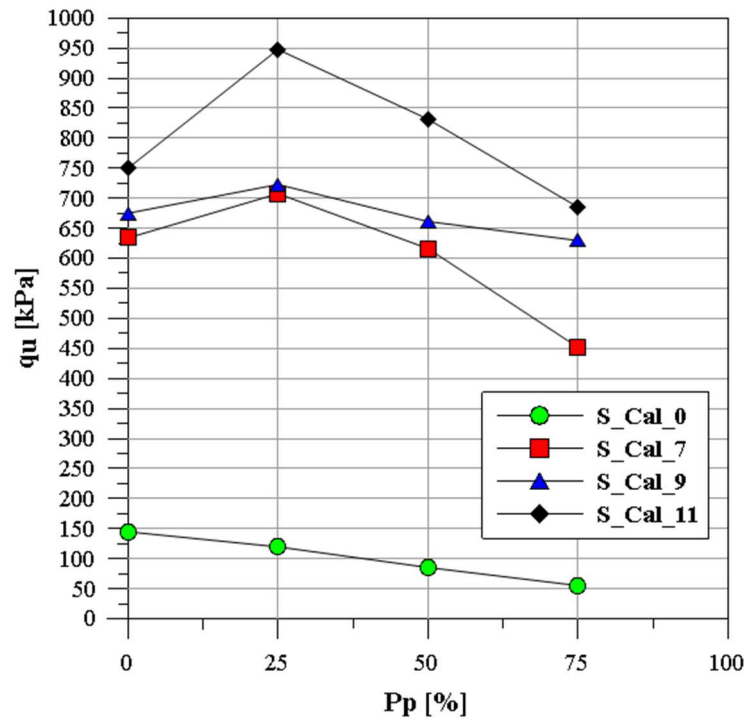


Fonte: Autora

Com 21 dias de cura, vê-se que as curvas de resistência com presença de cal possuem um valor mais elevado do que a curva sem a cal, porém as curvas para as misturas permanecem mostrando um decréscimo de resistência à medida que se adiciona pó de pedra. Neste caso, assim como nos anteriores, a mistura S₇₅P₂₅, continua apresentando um valor mais alto que o do solo sem pó de pedra, esse valor chega a uma diferença de 45,4kPa, 19,8kPa e 61,9kPa, para os teores de 7%, 9% e 11% de cal, respectivamente.

Por fim, a Figura 59 mostra os valores de resistência à compressão simples para um tempo de cura de 28 dias.

Figura 59 - Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de pó de pedra das amostras com 28 dias de cura



Fonte: Autora

Ao considerar a curva com 28 dias de cura, percebe-se que todas as curvas de resistência por teor de pó de pedra, apresentaram a mesma configuração, ou seja, um valor acima do da mistura sem pó de pedra, porém a partir deste, os demais valores decaem.

Logo, ao se acrescentar pó de pedra, a resistência das misturas começa a diminuir. No caso da mistura $S_{75}P_{25}$, o aumento da resistência em relação as misturas sem pó de pedra chegam a 1,12, 1,07 e 1,26 vezes o valor da mistura sem pó de pedra, para os teores de 7%, 9% e 11% de cal, respectivamente.

Uma justificativa para esse comportamento é a porosidade presente no solo natural e nas misturas $S_{75}P_{25}$, $S_{50}P_{50}$ e $S_{25}P_{75}$. Quando se observa a Figura 26, nota-se que para o solo natural as frações maiores são as arenosas, isso pode significar a presença de macroporos no material. Já as misturas com 50% e 75% de pó de pedra, além de aumentar a fração fina do solo, a areia grossa começa a se fazer presente, assim, pode não existir uma distribuição granulometria contínua suficiente para que os vazios do solo sejam reduzidos.

A mistura $S_{75}P_{25}$ não é a que mais possui as frações bem distribuídas, porém, com o acréscimo da cal, a fração fina do solo aumenta, o que pode estar preenchendo os vazios do solo e consequentemente diminuindo a porosidade da mistura.

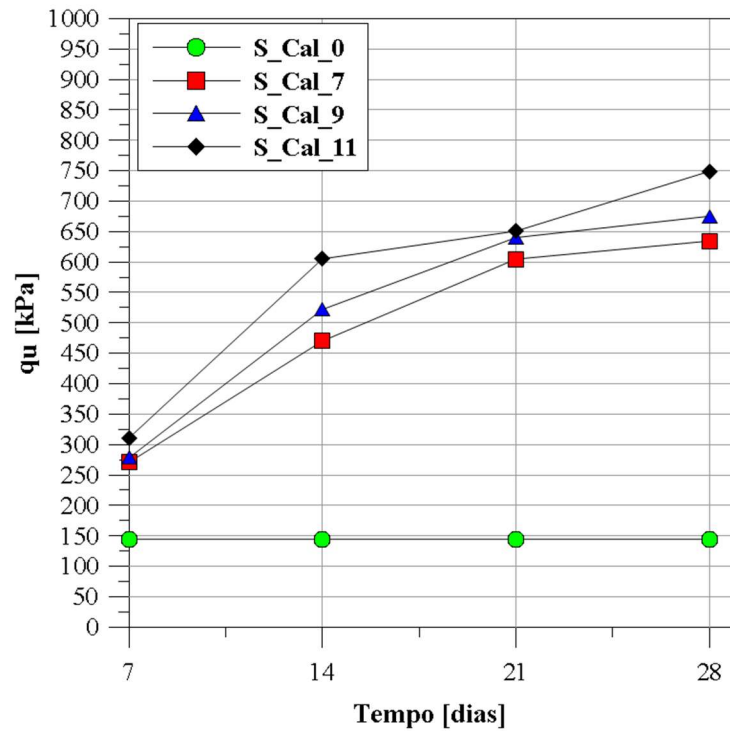
Na pesquisa de Pissato e Soares (2006) o pó de pedra apresentou um crescimento na resistência à compressão simples, independente do teor de pó de pedra utilizado, resultado não obtido neste trabalho. Porém a pesquisa não mostra resultados somente com solo e pó de pedra, a pesquisa estudou esses dois materiais com a incorporação de cimento, o que deve ter contribuído para o constante aumento da resistência. Outra coisa que se mostrou importante na incorporação de pó de pedra é o tamanho dos grãos deste material, o trabalho de Nakayenga et al. (2021), mostrou que o tamanho dos grãos influencia na resistência à compressão do solo, logo, isso pode ser uma explicação para que os resultados apresentados aqui não seguissem o mesmo comportamento dos apresentados na pesquisa de Pissato e Soares (2006).

4.2.3 Efeito do tempo de cura

A resistência à compressão simples será analisada, nesse momento, a partir tempos de cura utilizados nesse estudo, as Figuras 39 a 42 foram construídas com base nas Tabelas A1 a A4 do Apêndice, como as variações de resistência à compressão simples para os teores de pó de pedra estão apresentando um comportamento peculiar, optou-se por agrupar as curvas por teor de pó de pedra.

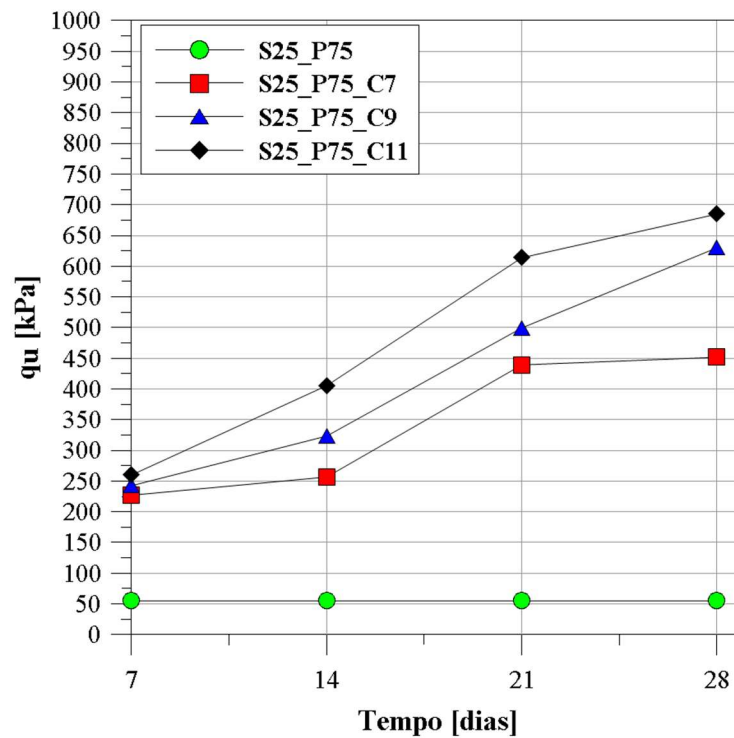
As Figuras 60 a 63, apresentam as curvas de resistência para as misturas de solo e cal, sem a presença do pó de pedra., com 25%, 50% e 75%.

Figura 60 - Variação da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura das amostras com 0% de pó de pedra



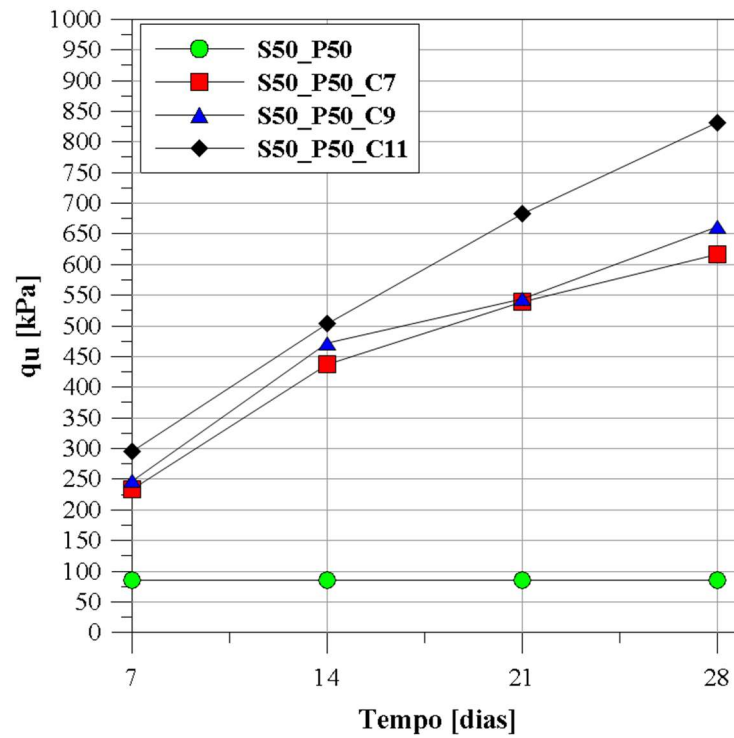
Fonte: Autora

Figura 61 - Variação da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura das amostras com 25% de pó de pedra



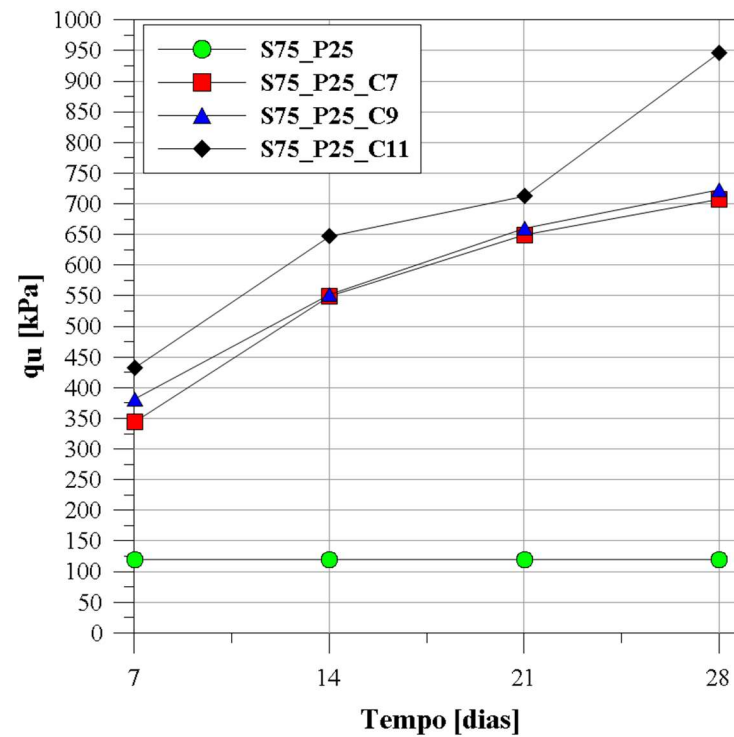
Fonte: Autora

Figura 62 - Variação da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura das amostras com 50% de pó de pedra



Fonte: Autora

Figura 63 - Variação da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura das amostras com 75% de pó de pedra



Fonte: Autora

Nas curvas com a presença de cal, é possível observar um aumento na resistência à compressão simples. Nas Figuras 61, 62 e 63, observa-se que para as misturas com 7% e 9% de cal, a resistência está ficando constante, o que mostra uma estabilização do solo natural, S₇₅P₂₅ e S₅₀P₅₀ com 28 dias de cura. Já para as demais curvas destas figuras e para todas as curvas da Figura 42, seria mais indicado analisar a resistências com mais tempo de cura, para estabelecer a resistência máxima que estas misturas podem adquirir.

Os resultados apresentados vão ao encontro de trabalhos como os de Bordignon (2015) e Gidday e Mittal (2020), que também apresentaram um aumento na resistência à compressão simples conforme o aumento no tempo de cura dos materiais.

4.3 TÉCNICA DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO (SONELASTIC)

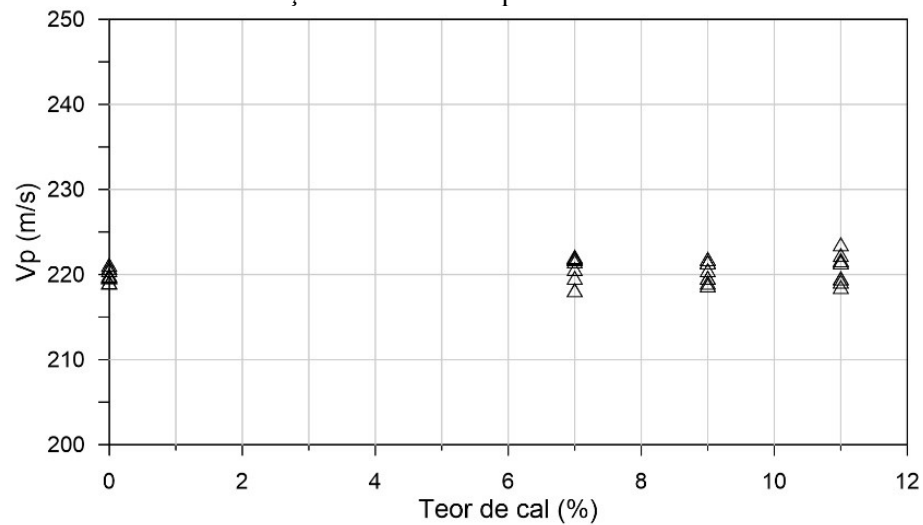
Na sequência serão apresentados os resultados da determinação não destrutiva do módulo elástico dinâmico através da técnica de excitação por impulso a partir de frequências naturais de vibração. Essas frequências são excitadas através de um impacto mecânico de curta duração, seguido da captação da resposta acústica por um sensor acústico. As diretrizes para realização do ensaio são apresentadas na NBR 8522-2 (2021).

4.3.1 Efeito da cal

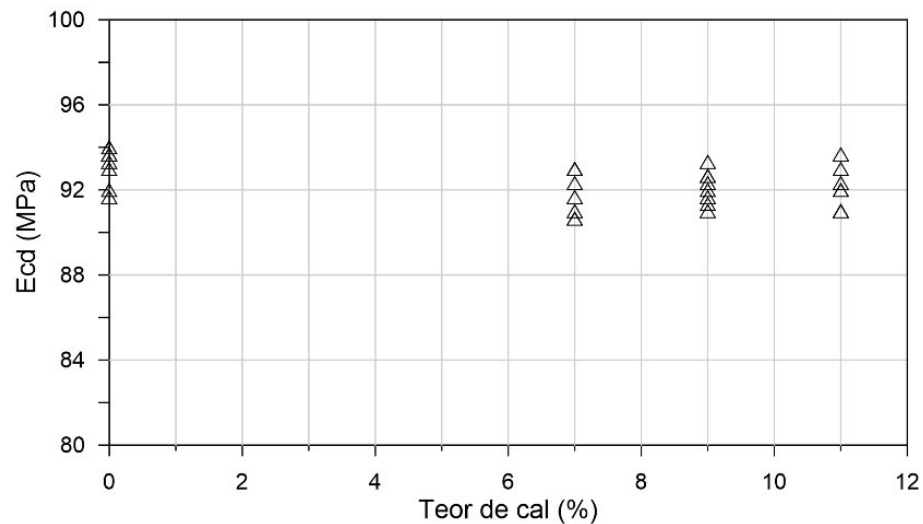
As Figuras 64, 65, 66 e 67 apresentam a variação da velocidade de propagação (V_p) e do módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}) em função do teor de cal para todas as misturas estudadas. A avaliação dos resultados não indicou nenhuma influência do tempo de cura das amostras e, portanto, todos os resultados foram avaliados em conjunto. Conforme se observa os resultados também não indicam influência evidente do teor de cal.

A velocidade de propagação para todas as amostras avaliadas indicou um valor médio de 220 m/s, enquanto o módulo elástico dinâmico para as amostras de solo natural, S₇₅P₂₅, e S₅₀P₅₀ indicou um valor médio de 92 MPa. Observou-se que as amostras com 75% de pó de pedra (S₂₅P₇₅) demonstraram uma tendência ao aumento do módulo E_{cd} (Figura 64) com valor médio de 94 MPa. Embora esse aumento não seja tão significativo, o acréscimo do teor de pó de pedra pode indicar uma mudança de comportamento do material, uma vez que os valores foram consistentes entre si.

Figura 64 - Variação da velocidade de propagação (V_p) e do módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}) em função do teor de cal para o solo natural.



(a) V_p versus teor de cal (Solo natural)

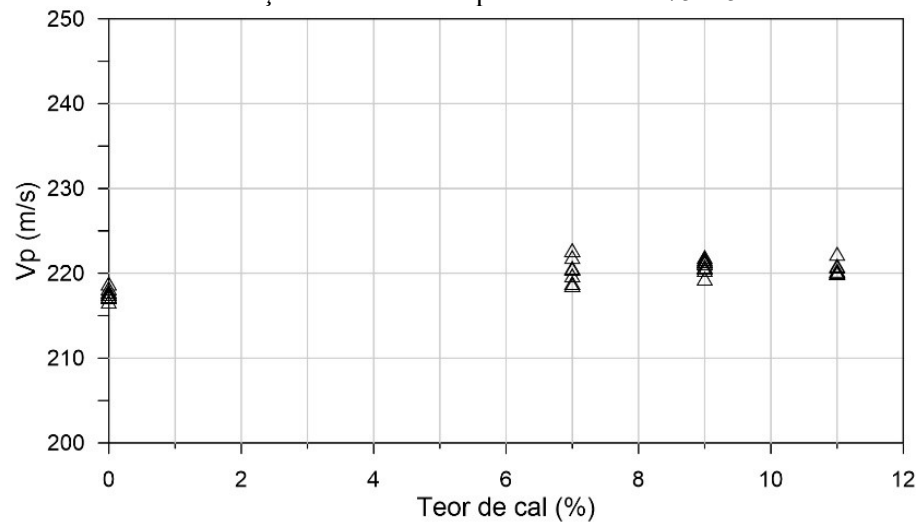


(b) E_{cd} versus teor de cal (Solo natural)

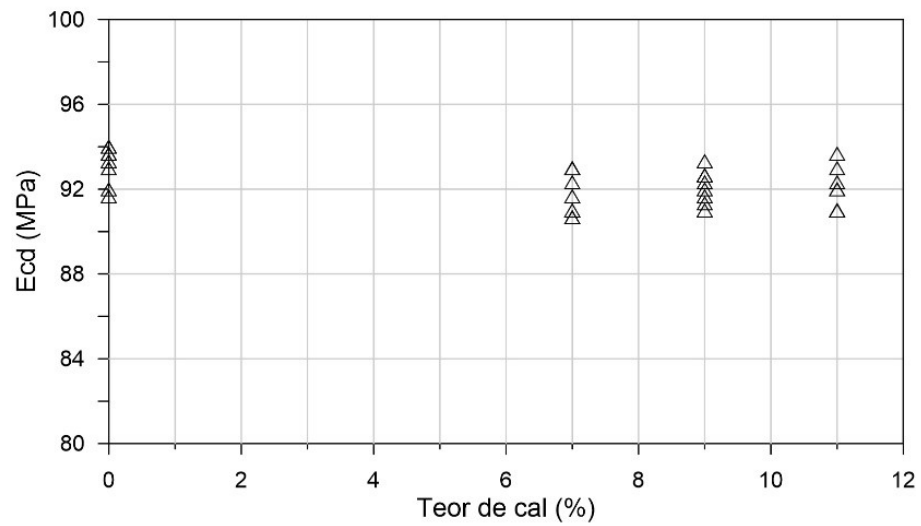
Fonte: Autora

A baixa variação dos valores de velocidade e módulo elástico dinâmico não permitiram estabelecer uma correlação com os valores de resistência à compressão simples. Esse comportamento pode estar associado aos baixos valores de resistência das amostras analisadas, uma vez que o equipamento é destinado a análise de concreto e outros materiais com resistência superior ao solo e as misturas solo-cal. Portanto, acredita-se que possa existir uma limitação do equipamento em captar variações muito pequenas. Relatos de uso dessa técnica para fins de aplicação em geotecnia utilizaram amostras de corpos de prova de rocha, com menos poros, que apresentam resistência à compressão simples igual a 22,3 MPa, V_p e E_{cd} iguais a 1667 m/s e 3,54 GPa (Ribeiro et al., 2019).

Figura 65 - Variação da velocidade de propagação (V_p) e do módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}) em função do teor de cal para a mistura S75P25.



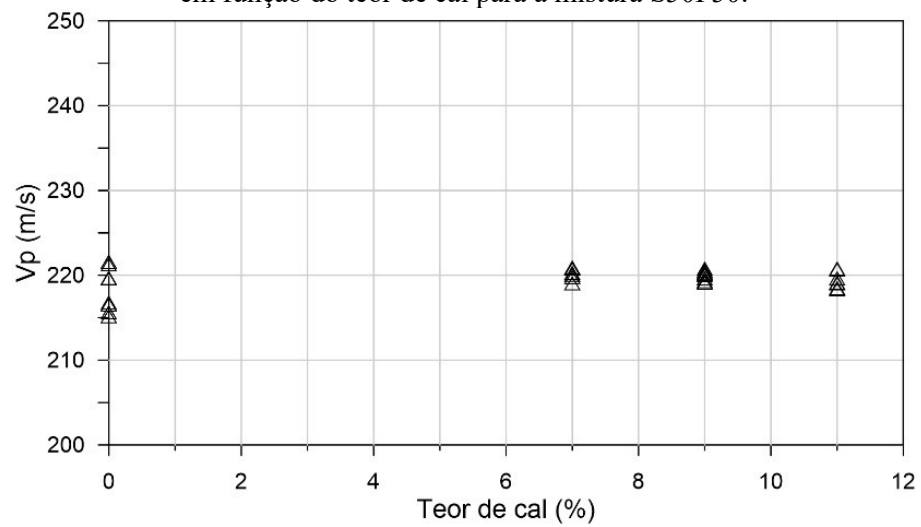
(a) V_p versus teor de cal ($S_{75}P_{25}$)



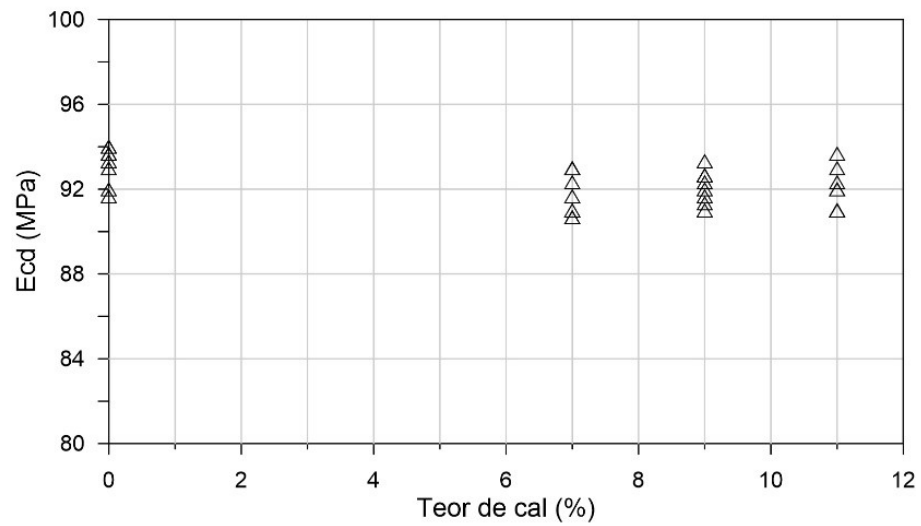
(b) E_{cd} versus teor de cal ($S_{75}P_{25}$)

Fonte: Autora

Figura 66 - Variação da velocidade de propagação (V_p) e do módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}) em função do teor de cal para a mistura S50P50.



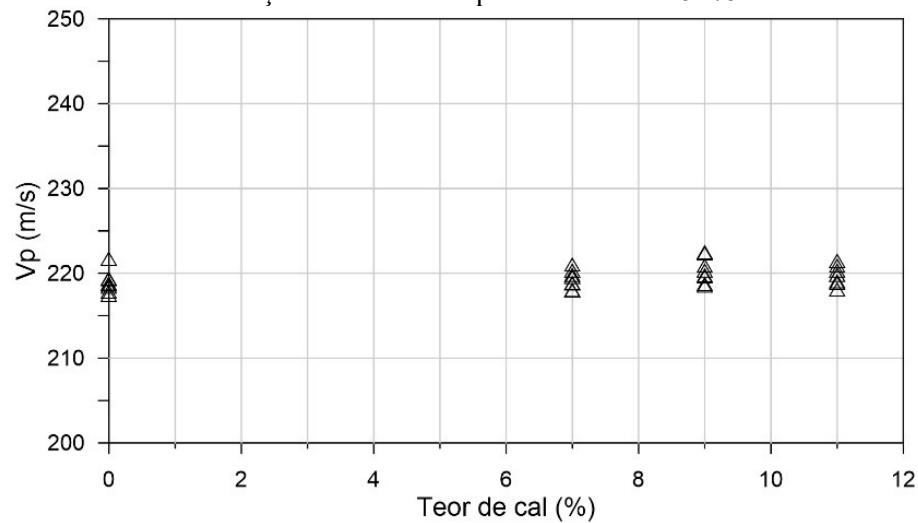
(a) V_p versus teor de cal ($S_{50}P_{50}$)



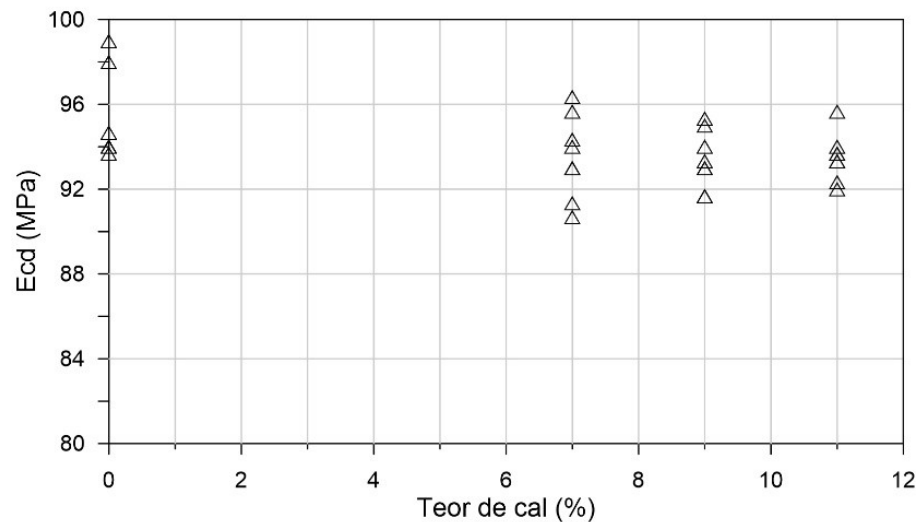
(b) E_{cd} versus teor de cal ($S_{50}P_{50}$)

Fonte: Autora

Figura 67 - Variação da velocidade de propagação (V_p) e do módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}) em função do teor de cal para a mistura S25P75.



(a) V_p versus teor de cal (S₂₅P₇₅)



(b) E_{cd} versus teor de cal (S₂₅P₇₅)

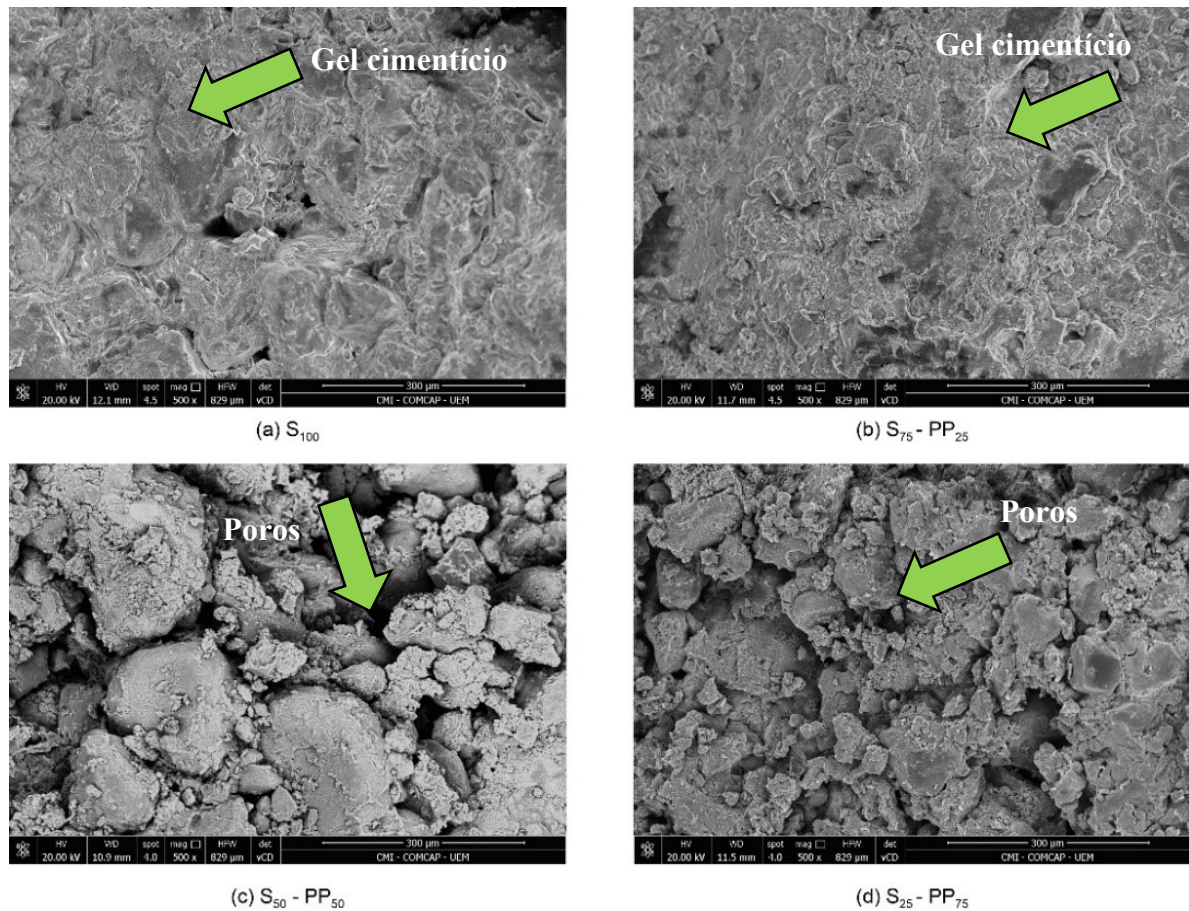
Fonte: Autora

4.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A seguir serão apresentadas e discutidas as imagens de microestrutura obtidas para os materiais analisados neste trabalho. A microestrutura foi realizada nas misturas com teor de 9% de cal e submetidas ao período de 28 dias de cura. A Figura 68 apresenta a comparação dos materiais considerando uma magnificação de 500 vezes onde nitidamente se observa que as misturas de solo natural e S₇₅P₂₅ se apresentam com uma estrutura mais fechada e interconectada enquanto as misturas S₅₀P₅₀ e S₂₅P₇₅ se apresentam com uma estrutura mais porosa, confirmando os resultados de porosidade dos corpos de prova discutidos no item 4.1.5. Analogamente, a Figura 69 apresenta a comparação dos materiais considerando uma

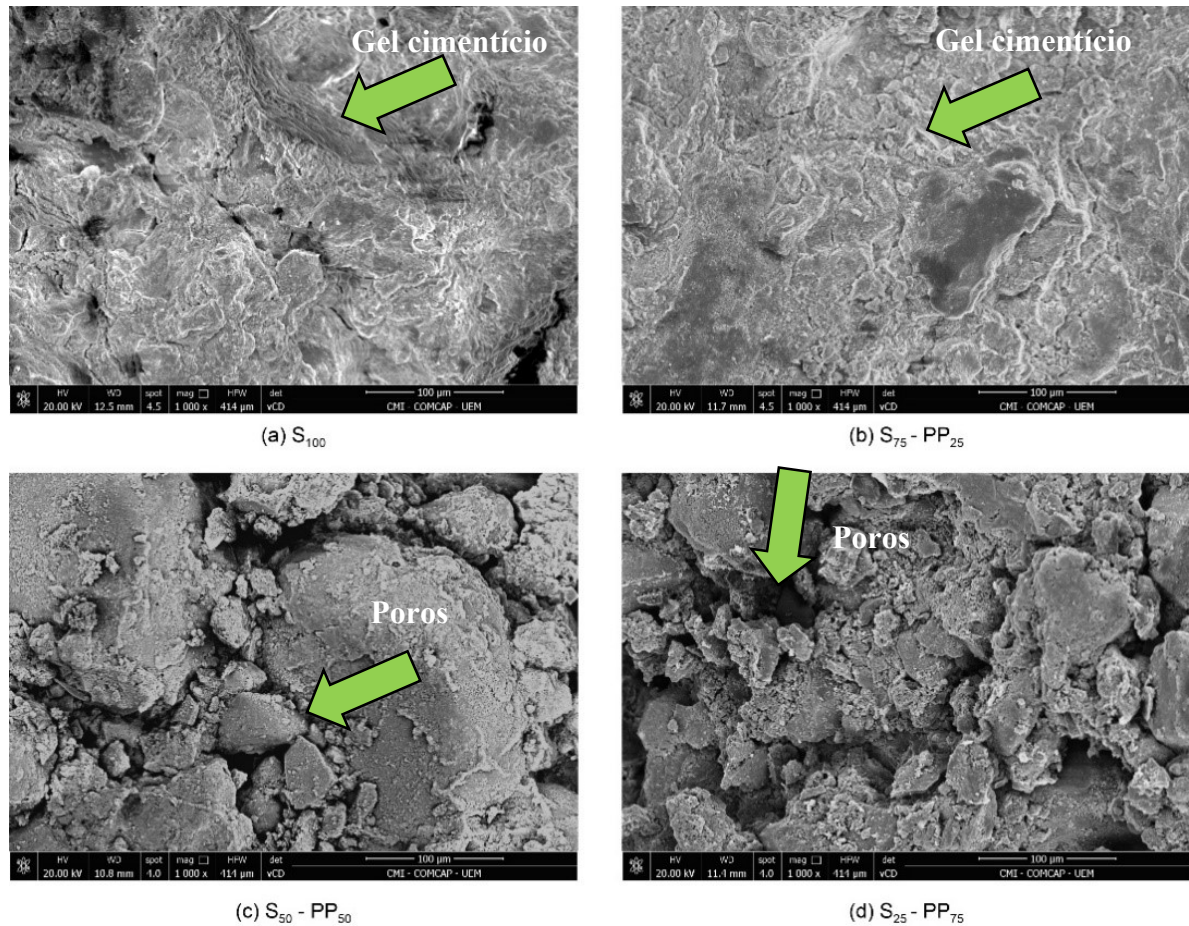
magnificação de 1000 vezes onde novamente se observa a maior porosidade das amostras S₅₀P₅₀ e S₂₅P₇₅ indicando que as misturas de cal com solo natural e com S₇₅P₂₅ se apresentam com uma estrutura mais interconectada. As imagens da microestrutura indicam que os valores de resistência à compressão simples apresentados neste trabalho estão coerentes com o comportamento esperado para os materiais.

Figura 68 - Micrografia para as amostras com 9% de cal e 28 dias de cura (×500)



Fonte: Autora

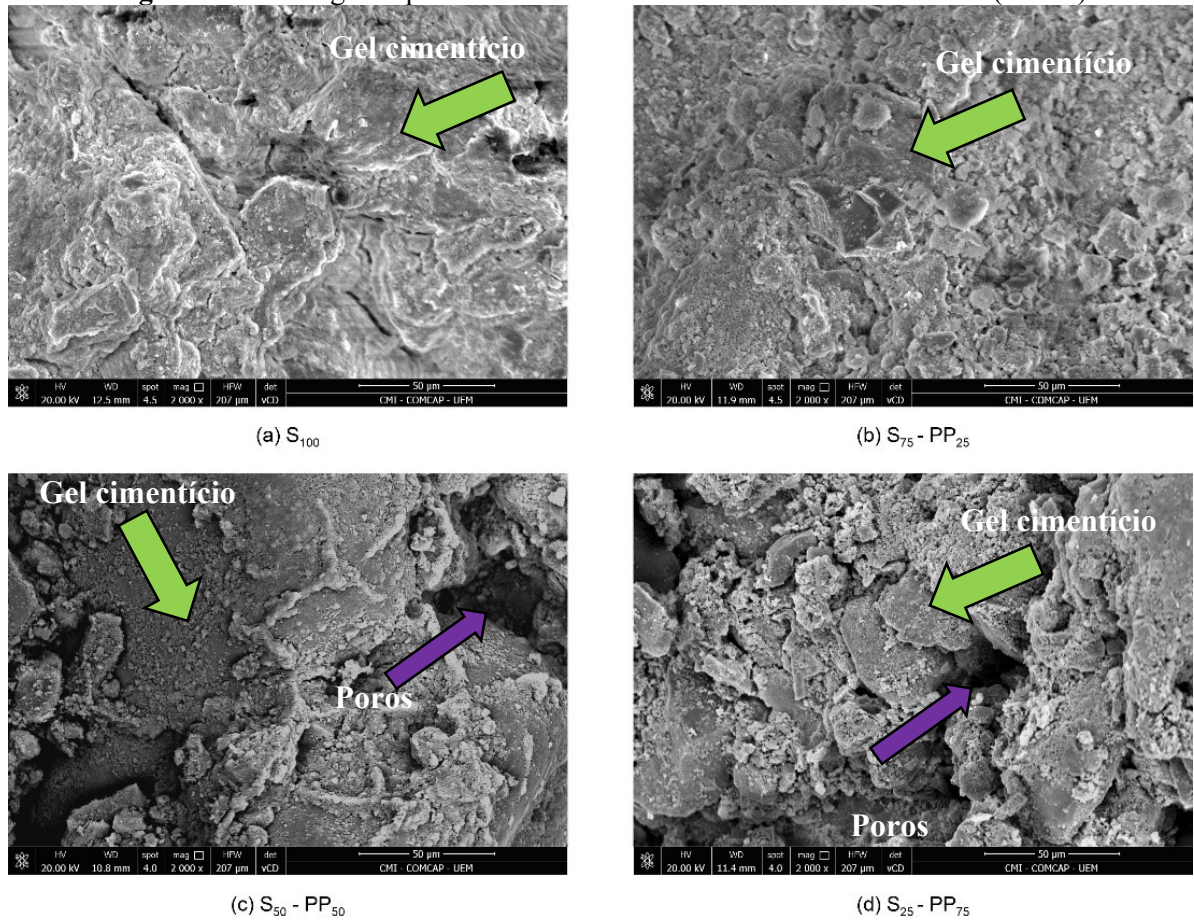
Figura 69 - Micrografia para as amostras com 9% de cal e 28 dias de cura ($\times 1000$)



Fonte: Autora

A Figura 70 apresenta a comparação dos materiais considerando uma magnificação de 2000 vezes onde é possível visualizar a impregnação da cal hidratada na superfície dos grãos formando um gel. A reação da cal é visualizada para todos os materiais, porém no caso das misturas $S_{50}P_{50}$ e $S_{25}P_{75}$ existe a predominância de uma estrutura mais porosa associada à estabilização granulométrica das proporções utilizadas.

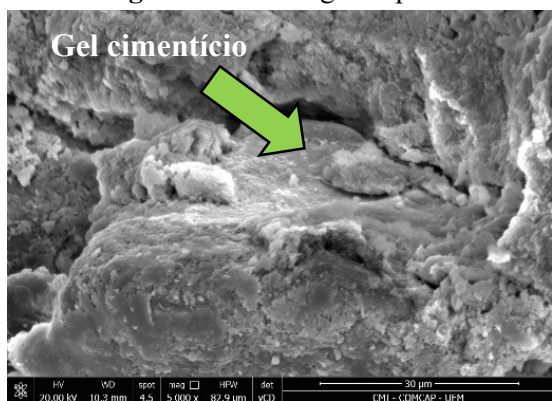
Figura 70 - Micrografia para as amostras com 9% de cal e 28 dias de cura ($\times 2000$)



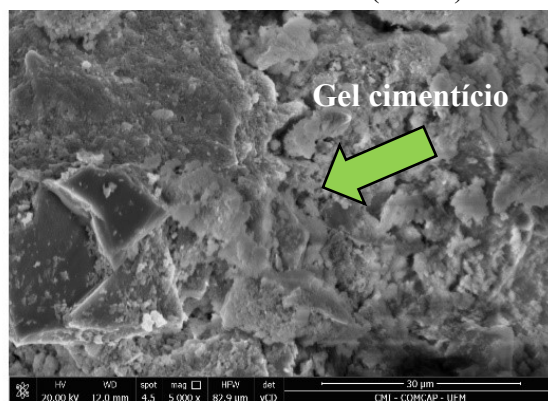
Fonte: Autora

Por fim, a Figura 71 apresenta a comparação dos materiais considerando uma magnificação de 5000 vezes onde é possível visualizar com detalhe a impregnação da cal hidratada na superfície dos grãos, evidente para todos os materiais estudados. A adição de cal e a consequente dispersão de cálcio juntamente com o pH contribuem com a formação dos compostos pozolânicos e que são responsáveis pelo aumento de resistência no solo. Esse comportamento foi observado para todos os materiais, conforme discutido nos resultados de resistência à compressão simples.

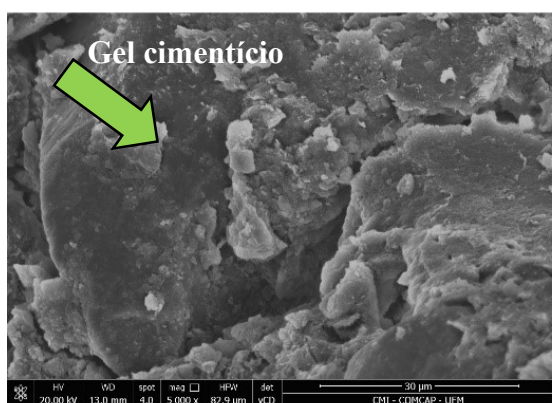
Figura 71 - Micrografia para as amostras com 9% de cal e 28 dias de cura ($\times 5000$)



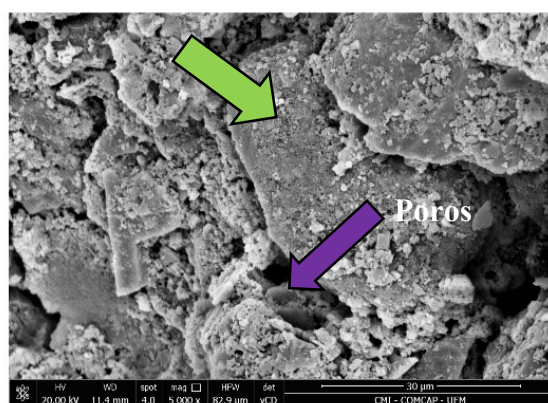
(a) S_{100}



(b) $S_{75} - PP_{25}$



(c) $S_{50} - PP_{50}$



(d) $S_{25} - PP_{75}$

Fonte: Autora

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES

Com base nos resultados, as principais conclusões foram:

1 – Com base nos ensaios de caracterização física, química e mineralógicas, o solo natural foi classificado como sendo arenoso, assim como as misturas S₇₅P₂₅, S₅₀P₅₀ e S₂₅P₇₅. A mistura S₂₅P₇₅ foi a que se apresentou com melhor distribuição granulométrica;

2 – A massa específica real dos grãos mostrou uma tendência crescente com o aumento do teor de pó de pedra ao solo. O Solo e as misturas de solo e pó de pedra não apresentaram plasticidade;

3 - O pH do solo, tanto em H₂O quanto em CaCl, se mostrou neutro, com um valor de 7,7 e 6,8, respectivamente, classificando-o como um solo neutro. Nas misturas de solo-pó de pedra e cal, o maior teor deste, 11%, foi o que apresentou maior pH;

4 – O mineral mais presente no solo é o feldspato, assim como no pó de pedra;

5 – Os parâmetros de compactação demonstraram que com o aumento do teor de cal, o peso específico aparente seco diminui, enquanto que a umidade ótima aumenta.

6 – Para o aumento do teor de pó de pedra, o peso específico aparente seco aumenta e o mesmo ocorre para a umidade ótima;

7 – Com relação a porosidade, percebe-se um decréscimo nos valores desta para a mistura S₇₅P₂₅ com cal quando comparada com o solo natural e o solo-pó de pedra. Todas as outras misturas apresentam um ganho de porosidade.

8 – Analisando a porosidade em relação ao teor de cal, percebe-se um leve aumento na quantidade de poros com o aumento do teor de cal, no entanto, esse valor não é tão expressivo quanto os valores apresentados pela variação do pó de pedra;

9 – O aumento do teor de cal, também, fez com que a resistência à compressão simples do solo aumentasse. No entanto, misturas de solo-pó de pedra, que não possuíam a cal incorporada, apresentaram um decréscimo na resistência à compressão simples. Isso se deve a quantidade de poros presente com o aumento do teor de pó de pedra.

10 – O tempo de cura causou aumento na resistência a compressão simples em todas as misturas com incorporação de cal, devido as reações que vão ocorrendo a longo prazo;

11 – Analisando todas as misturas, percebe-se que os piores resultados estão nas misturas de solo com pó de pedra. Adicionando a cal, as misturas solo-pó de pedra, ficou evidente que as piores misturas ocorreram na mistura S₂₅P₇₅, provavelmente pela grande quantidade de pó de pedra presente na mistura;

12 – A melhor mistura se mostrou ser a S₇₅P₂₅ e quando adicionada a cal, os melhores resultados ocorreram com um teor de cal de 11%;

13 - Com relação a técnica de excitação por impulso (Sonelastic) a velocidade de propagação apresentou um valor médio de 220m/s. Em relação o módulo de elasticidade dinâmico o solo natural, e as misturas S₇₅P₂₅, S₅₀P₅₀ apresentaram um valor médio inferior ao da mistura com 75% de pó de pedra, o que pode indicar uma mudança no comportamento do material, mesmo a variação sendo baixa;

14 - Com a microscopia foi possível observar que a mistura S₇₅P₂₅ se apresentou mais fechada e interconectada, já as demais se mostraram mais porosas. Esse resultado mostra que os resultados obtidos na resistência à compressão simples estão coerentes.

No geral, a pesquisa contribuiu para compreender que há um limite para a adição do pó de pedra no solo, pois para valores muito elevados ocorre perdas na resistência do solo e aumento da porosidade. Em um contexto mais sustentável, é possível perceber que o pó de pedra contribui para a melhoria da granulometria do solo e conseqüentemente para o seu ganho de resistência, quando incorporado a cal, pois esta gerou a coesão necessária à mistura.

Para completar, a mistura formada pelo solo, pó de pedra e a cal resultou em um comportamento mecânico superior ao do solo natural o que demonstra que a incorporação da cal e do pó de pedra neste solo contribui para a estabilização do mesmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULRASOOL; A. S. Strength improvement of clay soil by using stone powder. **Journal of Engineering**. 5 (5): Iraq, 2015. p. 72-84.

ALMEIDA, S. L. M.; SAMPAIO, J. A. Obtenção de areia artificial com base em finos de pedreiras. **XIX ENTMME** – Recife, 2002.

ALVES, H.; OTANI, L.B. **Determinação dos módulos de elasticidade do concreto empregando a Técnica de Excitação por Impulso (ABNT NBR 8522 – 1&2: 2021)**. ATCP Engenharia Física – Divisão Sonelastic, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6453**: cal virgem para construção civil – requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **ABNT NBR 6508: 1984**. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7175**: cal hidratada para argamassas – requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **ABNT NBR 7180: 2016**. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **ABNT NBR 7181: 2016**. Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **ABNT NBR 7225: 1993**. Materiais de pedra e agregados naturais. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 8522-2**: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 2: Modulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **ABNT NBR 10004: 2004**. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **ABNT NBR 12023: 2012**. Solo cimento - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM: D4972**. Standard test methods for pH of soils. West Conshohocken, 2017.

ARAÚJO, A. F., BARROSO, S. H. A.; RABÊLO, A. N.; VASCONCELOS, M. A. G. O uso da técnica de solo-cal para melhoramento das propriedades tecnológicas de um solo da região do baixo Jaguaribe no Estado do Ceará. **COBRAMSEG**. Búzios, 2008.

BORDIGNON, Vitor Reinaldo. **Efeitos da adição da cal hidratada na estabilização de um solo sedimentar para pavimentação urbana na região de Curitiba**. 2015. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

CASTRO, F. J. C. de O. **Um Estudo Difratométrico (RX) da Interação Pozolânica: Argilominerais do Solo e Hidróxido de Cálcio.** In: SIMPÓSIO 169 BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA. Rio de Janeiro. **Anais...** p.453-468. 1981.

D'AGOSTINO, L. Z. SOARES, L. O uso de finos de pedreira de rocha granítico-gnáissica em substituição às areias naturais na elaboração de argamassa. **Geociências**, UNESP, vol. 22, nº 1, p. 65-73, 2003.

DASH, S. K.; HUSSAIN, M. Lime Stabilization of Soils: Reappraisal. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Vol.24, nº 6, p. 707-714, Web, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 414: Pavimentação – Solo-Cimento - Dosagem físico-química de solo-cimento – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2019.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. **Highway Research Record**, v. 139, p. 61–72, 1966.

EMBRAPA. **Mapa simplificado de solos do estado do Paraná.** 2012. Disponível em: <http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/janeiro2013/geografia_artigos/mapa_simplificado_solos_PR.pdf> Acesso em: ago./ 2019.

GIDDAY, B. G.; MITTAL, S. Improving the characteristics of dispersive subgrade soils using lime, **Heliyon**, Uttarakhand, vol. 6, nº. 2, p.1 – 7, 2020.

GOBBI, K. F. et al. Massa de forragem e características morfológicas de gramíneas do gênero brachiaria na região do Arenito Caiuá/Pr. Bol. Ind. Anim., **Nova Odessa**, v.75, p.1-9, 2018.

GONDIM, L.M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do Agropólo do baixo Jaguaribe - CE.** 2008. 213f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

GUÉRIOS, E. M. **Estudo do melhoramento de solo com adição de cal hidratada para seu uso em pavimento urbano.** 2012. 69 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Produção Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil.** 2ª Ed. São Paulo: PINI, 2002.

GURGEL L. L.; FILHO, J. L. O. P. Impactos socioambientais das indústrias da cal, no distrito de Soledade do município de Apodi – RN. **Revista de Gestão Social e Ambiental – RGSA**, São Paulo, v.6, n.1, p.87-101, jan./ abr. 2012.

HAMEED, A.; SHABAN, A.M.; ALMUHANNA, R.R. Performance of Lime-Treated Sandy Soils after Sustainable Reinforcement Using Waste Plastic Fibre. **IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.** 2021.

INGLES, O G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization – Principles and Practice.** Austrália: Butterworths Pty. Limited, 1972.

KANAZAWA, N. M. **Durabilidade, rigidez e análise do ciclo de vida de um solo dispersivo estabilizado com cal**. 2015. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFRGS, Porto Alegre, 2015.

KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia: Relações Solo – Planta**. Editora Agronômica CERES Ltda, São Paulo, SP, 262 p. 1979.

KLINSKY, L. M. G. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição residual em camadas de pavimentos**. 2013. 313f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2013.

LOPES, L. S. E. **Análise do comportamento mecânico e ambiental de misturas solo-cinzas de carvão mineral para camadas de base de pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica – PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2011.

MENDES, K. S. SOARES, L. **O emprego de finos de pedreira em pavimentos de concreto compactado a rolo**. Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na construção civil: Práticas recomendadas. São Paulo. Meio Ambiente. IBRACON 206. p. 73. 2000.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G. **Apostila de estabilização de solos**. Escola de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MINEROPAR. **Atlas comentado da geologia e dos recursos minerais do Estado do Paraná**. 2021. Disponível em: <http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/MapasPDF/atlasgeo.pdf> Acesso em: ago./2019.

MUKHTAR, M. A.; KHATTAB, S; ALCOVER, J. F. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. **Engineering Geology**. Vol 139-140, p.17-27, Web, 2012.

NAKAYENGA, J.; CIKMIT A. A.; TSUCHIDA T.; HATA T. Influence of Stone Powder Content and Particle Size on the Strength of Cement-treated Clay. **Construction & Building Materials**. Vol.305, Web, 2021.

NEUBAUER, C. H; THOMPSON, M.R. Stability properties of uncured lime-treated fine grained soils. **Highway Research Record**. nº281, Washington, D. C., 1972.

NUNES, W. P. **Estabilização físico-químico de um solo residual de Arenito Botucatu, visando seu emprego em pavimentação**. 1991. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

OSINUBI, K. J. et al. Compaction delay effects on properties of lime-treated soil. **Journal of material in civil engineering**. vol.18, nº2, p.250-258, 2006.

PASTOR, J. L.; CHAI, J.; SÁNCHEZ, I. Strength and Microstructure of a Clayey Soil Stabilized with Natural Stone Industry Waste and Lime or Cement. **Applied Science**. Vol.13, nº4, Web, 2023.

PISSATO, E. SOARES, L. Utilização de finos de pedreira em misturas de solo-cimento: correção granulométrica de um solo argiloso. **Exacta**, vol. 4, n° 1, p. 143-148, São Paulo, 2006.

PORTELINHA, F. H. M. et al. Modification of a lateritic soil with lime and cement: an economical alternative for flexible pavement layers. **Soils and Rocks**, São Paulo, vol.31, n°1, p.51-63, 2012.

RIBEIRO, R. P. Metodologias de preparação de corpos de prova para estudos geológico-geotécnicos de siltitos laminados (Grupo Itararé). São Paulo, UNESP, **Geociências**, v.38, n.1, p.269-278, 2019.

ROOHBAKHSHAN, A.; KALANTARI, B. Influence of lime and waste stone powder on the pH values and Atterberg limits of clayey soil. **Annals of faculty engineering Hunedoara**. Iran, fascículo 4, 2013.

SALES, A. W.; RIBEIRO, D. D.; NERY, K. D. **Efeitos da adição de cimento e de cal em um solo da região de Curitiba para fins de pavimentação**. 2017. 91f. Monografia (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba, 2017.

SALOMÃO, D. A. **Estabilização de solos com cal para uso em pavimentação**. 2005. 63f. Projeto Final (Graduação) - Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2005.

SAMAL, R., MISHRA, A. Effect of Stone dust and Lime in the Geotechnical Properties of Clayey Soil. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. vol.970, Web, 2020.

SANTOS, Y. R. P. **Comportamento e melhoramento de solos compactados para aplicação em obras de engenharia civil**. 2016. 78f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru-PE, 2016.

SALIH, N. B. Na experimental study of compaction and strength of stabilized cohesive soil by stone powder. **Journal of Engineering**. vol.28, n°12, p.125–136, Sulaimani City, Iraq, 2022.

SALIH T. A. A.; SALIH N. B. Hydrated lime effects on geotechnical properties of clayey Soil. **Journal of Engineering**. vol.26, n°11, p.150–169, Sulaimani City, Iraq, 2020.

SILVA, M. T. M. G. **Estabilização de Solos Finos com Cal para Fins de Pavimentação Rodoviária – Efeito da Carbonatação**. 2006. 89f. Projeto Final (Graduação) - Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2006.

THOMÉ, A. **Estudo do comportamento de um solo mole tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais**. 1994. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

TROEH, F.R.; THOMPSON, L.M. **Solos e fertilidade do solo**. 6. ed. São Paulo: Andrei, 2007. 718p.

VIZCARRA, G.O.C. **Aplicabilidade de cinzas de resíduos sólidos urbanos em camadas de bases de pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro, 2010.

WIKIPÉDIA. 2023. Disponível em: < <https://pt.wikipedia.org/wiki/Xambr%C3%AA> > Acesso em: ago./ 2019.

WOOLTORTON, F. L. D. Engineering Pedology and Soil Stabilization. **Highway Research Board**, Washington, v. 107, p. 29-57, 1955.

APÊNDICE A

Tabela A.1 - Índices Físicos dos corpos de prova com 7 dias de cura

CP	γ_d (g/cm³)	Mcp (g)	W (%)	Altura (mm)	V _t (cm³)	V _a (cm³)	Vgrãos (cm³)	V _v (cm³)	e	η (%)	s (%)
S_1	2,18	422,15	10,4	100,30	196,84	43,97	145,45	51,38	0,35	26,11	85,57
S_2	2,18	424,37	11,0	99,60	195,47	46,53	145,32	50,14	0,35	25,65	92,80
S_3	2,18	421,21	10,4	100,20	196,64	43,91	145,11	51,53	0,36	26,20	85,22
S_4	2,18	422,09	10,6	100,35	196,94	44,59	145,19	51,75	0,36	26,28	86,18
SC7_1	2,12	414,25	11,6	100,40	197,04	47,88	141,60	55,43	0,39	28,13	86,28
SC7_2	2,12	416,14	11,6	100,20	196,64	48,43	142,12	54,52	0,38	27,73	88,83
SC7_3	2,12	413,11	11,7	100,05	196,35	48,42	140,95	55,40	0,39	28,21	87,41
SC7_4	2,12	412,19	11,6	100,26	196,76	48,02	140,75	56,01	0,40	28,47	85,74
SC9_1	2,13	416,07	11,8	99,93	196,11	49,12	142,02	54,09	0,38	27,58	90,81
SC9_2	2,13	416,17	12,2	99,57	195,41	50,63	141,48	53,93	0,38	27,60	93,88
SC9_3	2,13	413,24	11,9	99,65	195,56	49,03	140,96	54,60	0,39	27,92	89,80
SC9_4	2,13	413,31	12,1	100,17	196,58	50,07	140,59	56,00	0,40	28,48	89,41
SC11_1	2,12	411,87	12,4	99,87	195,99	51,23	139,78	56,22	0,40	28,68	91,12
SC11_2	2,12	414,15	12,0	100,32	196,88	49,56	141,30	55,57	0,39	28,23	89,19
SC11_3	2,12	410,71	12,1	100,15	196,54	49,75	139,90	56,64	0,40	28,82	87,82
SC11_4	2,12	412,55	12,4	99,78	195,82	51,00	140,13	55,69	0,40	28,44	91,57
S75P25_1	2,19	429,04	11,0	99,98	196,21	47,38	147,37	48,84	0,33	24,89	96,99
S75P25_2	2,19	429,17	11,0	99,31	194,90	47,34	147,43	47,47	0,32	24,35	99,74
S75P25_3	2,19	427,87	11,0	99,77	195,80	47,23	146,97	48,83	0,33	24,94	96,74
S75P25_4	2,19	425,86	11,0	100,15	196,54	46,94	146,31	50,24	0,34	25,56	93,44
S75P25C7_1	2,19	428,78	11,5	100,20	196,64	49,45	147,14	49,50	0,34	25,17	99,90
S75P25C7_2	2,19	430,14	11,6	100,38	197,00	49,78	147,54	49,46	0,34	25,11	100,66
S75P25C7_3	2,19	427,91	11,1	100,17	196,58	47,32	147,63	48,95	0,33	24,90	96,66
S75P25C7_4	2,19	429,43	11,4	100,35	196,94	49,16	147,50	49,43	0,34	25,10	99,46
S75P25C9_1	2,14	421,47	12,0	99,85	195,96	50,68	144,02	51,94	0,36	26,50	97,57
S75P25C9_2	2,14	422,58	11,9	100,30	196,84	50,46	144,53	52,31	0,36	26,57	96,47
S75P25C9_3	2,14	418,31	12,0	99,78	195,82	50,06	143,03	52,79	0,37	26,96	94,84
S75P25C9_4	2,14	413,74	11,6	99,75	195,76	47,98	142,06	53,70	0,38	27,43	89,36
S75P25C11_1	2,12	416,63	12,1	100,23	196,70	50,46	142,41	54,29	0,38	27,60	92,94
S75P25C11_2	2,12	415,58	12,2	99,99	196,23	50,57	141,96	54,27	0,38	27,66	93,17
S75P25C11_3	2,12	418,37	12,1	99,81	195,88	50,55	143,05	52,83	0,37	26,97	95,69
S75P25C11_4	2,12	412,81	11,8	100,47	197,17	48,87	141,54	55,63	0,39	28,21	87,84
S50P50_1	2,20	425,91	11,2	99,35	194,97	47,70	121,98	72,99	0,60	37,44	65,34
S50P50_2	2,20	430,74	11,2	100,00	196,25	48,04	123,43	72,82	0,59	37,11	65,97
S50P50_3	2,20	428,37	10,7	99,80	195,86	45,97	123,33	72,53	0,59	37,03	63,38
S50P50_4	2,20	431,16	11,2	99,40	195,07	48,28	123,48	71,59	0,58	36,70	67,44
S50P50C7_1	2,16	420,12	11,2	100,08	196,41	47,13	122,62	73,79	0,60	37,57	63,87
S50P50C7_2	2,16	421,27	11,3	100,10	196,45	47,76	122,79	73,66	0,60	37,49	64,84
S50P50C7_3	2,16	421,35	11,0	99,85	195,96	46,46	123,24	72,71	0,59	37,11	63,90
S50P50C7_4	2,16	424,56	11,3	100,17	196,58	47,96	123,81	72,78	0,59	37,02	65,90
S50P50C9_1	2,17	423,27	11,9	100,52	197,27	50,38	123,25	74,02	0,60	37,52	68,06
S50P50C9_2	2,17	421,76	12,1	100,87	197,96	51,18	122,49	75,47	0,62	38,12	67,81
S50P50C9_3	2,17	425,58	12,2	100,63	197,49	52,02	123,47	74,02	0,60	37,48	70,28
S50P50C9_4	2,17	425,11	12,2	100,74	197,70	51,69	123,42	74,28	0,60	37,57	69,59
S50P50C11_1	2,18	424,86	13,3	100,52	197,27	56,34	122,46	74,81	0,61	37,92	75,31
S50P50C11_2	2,18	426,44	13,0	100,87	197,96	55,59	123,23	74,72	0,61	37,75	74,40
S50P50C11_3	2,18	428,53	13,2	100,80	197,82	56,64	123,58	74,24	0,60	37,53	76,29
S50P50C11_4	2,18	427,13	13,1	100,83	197,88	55,96	123,34	74,54	0,60	37,67	75,08
S25P75_1	2,22	429,93	11,5	99,63	195,52	49,36	73,76	121,77	1,65	62,28	40,54
S25P75_2	2,22	430,78	11,7	99,82	195,90	50,29	73,74	122,15	1,66	62,36	41,17
S25P75_3	2,22	431,07	11,3	99,87	195,99	48,82	74,08	121,91	1,65	62,20	40,05
S25P75_4	2,22	432,58	11,2	100,15	196,54	48,31	74,47	122,07	1,64	62,11	39,58
S25P75C7_1	2,18	426,24	12,4	100,75	197,72	53,03	78,02	119,70	1,53	60,54	44,30
S25P75C7_2	2,18	434,36	12,5	100,35	196,94	54,39	79,43	117,50	1,48	59,67	46,29
S25P75C7_3	2,18	426,49	12,3	100,25	196,74	52,57	78,17	118,57	1,52	60,27	44,34
S25P75C7_4	2,18	424,51	12,3	100,89	198,00	52,10	77,85	120,15	1,54	60,68	43,37
S25P75C9_1	2,17	420,72	11,4	100,25	196,74	48,16	79,51	117,23	1,47	59,59	41,08
S25P75C9_2	2,17	418,65	11,6	100,35	196,94	48,67	78,95	117,98	1,49	59,91	41,26
S25P75C9_3	2,17	422,29	11,8	100,10	196,45	49,81	79,49	116,96	1,47	59,54	42,59
S25P75C9_4	2,17	422,33	11,5	99,90	196,05	48,75	79,72	116,33	1,46	59,34	41,90
S25P75C11_1	2,18	419,97	12,6	100,49	197,21	52,87	79,94	117,27	1,47	59,47	45,09
S25P75C11_2	2,18	425,52	12,9	99,98	196,21	54,95	80,69	115,52	1,43	58,87	47,57
S25P75C11_3	2,18	424,83	13,0	99,83	195,92	55,24	80,48	115,44	1,43	58,92	47,86
S25P75C11_4	2,18	424,07	13,0	99,67	195,60	54,99	80,37	115,23	1,43	58,91	47,72

Tabela A.2 - Índices Físicos dos corpos de prova com 14 dias de cura

CP	γ_d (g/cm³)	Mcp (g)	W (%)	Altura (mm)	V _t (cm³)	V _a (cm³)	V _{grãos} (cm³)	V _v (cm³)	e	η (%)	s (%)
S_1	2,18	418,26	10	100,35	196,94	41,83	144,78	52,15	0,36	26,48	80,20
S_2	2,18	418,12	10,3	100,01	196,27	43,07	144,25	52,02	0,36	26,50	82,80
S_3	2,18	419,39	10,3	99,95	196,15	43,20	144,69	51,46	0,36	26,24	83,94
S_4	2,18	419,99	10,4	99,8	195,86	43,68	144,74	51,12	0,35	26,10	85,44
SC7_1	2,12	415,87	11,7	100,35	196,94	48,66	141,93	55,01	0,39	27,93	88,45
SC7_2	2,12	415,74	11,3	100,6	197,43	46,98	142,53	54,90	0,39	27,81	85,57
SC7_3	2,12	407,56	11,4	100,28	196,80	46,46	139,56	57,24	0,41	29,08	81,18
SC7_4	2,12	413,25	11,6	100,06	196,37	47,94	141,19	55,17	0,39	28,10	86,88
SC9_1	2,13	415,42	11,5	99,93	196,11	47,77	142,29	53,82	0,38	27,44	88,77
SC9_2	2,13	413,72	11,7	99,75	195,76	48,41	141,39	54,37	0,38	27,77	89,03
SC9_3	2,13	414,93	11,3	100,05	196,35	46,89	142,45	53,90	0,38	27,45	86,99
SC9_4	2,13	418,83	11,9	99,67	195,60	49,84	142,81	52,79	0,37	26,99	94,41
SC11_1	2,12	411,76	11,6	100	196,25	47,76	141,08	55,17	0,39	28,11	86,57
SC11_2	2,12	413,14	11,66	100,05	196,35	48,17	141,45	54,90	0,39	27,96	87,75
SC11_3	2,12	413,47	11,7	100,2	196,64	48,38	141,50	55,14	0,39	28,04	87,73
SC11_4	2,12	411,31	11,7	99,8	195,86	48,12	140,76	55,10	0,39	28,13	87,35
S75P25_1	2,19	422,58	11	99,55	195,37	46,48	145,22	50,15	0,35	25,67	92,70
S75P25_2	2,19	429,67	11,1	100,4	197,04	47,69	147,49	49,55	0,34	25,15	96,26
S75P25_3	2,19	424,34	11	99,78	195,82	46,68	145,82	50,00	0,34	25,53	93,36
S75P25_4	2,19	429	11,1	99,72	195,70	47,62	147,26	48,44	0,33	24,75	98,30
S75P25C7_1	2,19	424,08	10,9	100,22	196,68	46,22	146,57	50,11	0,34	25,48	92,24
S75P25C7_2	2,19	430,04	11	100,37	196,98	47,30	148,46	48,51	0,33	24,63	97,51
S75P25C7_3	2,19	432,19	11,3	99,97	196,19	48,84	148,70	47,49	0,32	24,21	102,83
S75P25C7_4	2,19	431,55	11,1	99,67	195,60	47,90	148,82	46,79	0,31	23,92	102,38
S75P25C9_1	2,14	418,43	11,5	100,27	196,78	48,12	143,83	52,95	0,37	26,91	90,88
S75P25C9_2	2,14	419,38	11,4	99,92	196,09	47,81	144,32	51,77	0,36	26,40	92,34
S75P25C9_3	2,14	418,91	11,9	100,2	196,64	49,85	143,34	53,30	0,37	27,10	93,53
S75P25C9_4	2,14	417,61	11,8	99,85	195,96	49,28	143,06	52,89	0,37	26,99	93,16
S75P25C11_1	2,12	415,87	11,6	100,5	197,23	48,24	142,98	54,26	0,38	27,51	88,91
S75P25C11_2	2,12	414,58	11,5	100,3	196,84	47,68	142,69	54,15	0,38	27,51	88,05
S75P25C11_3	2,12	416,44	11,2	99,7	195,66	46,64	143,82	51,84	0,36	26,50	89,97
S75P25C11_4	2,12	409,73	11,3	99,93	196,11	46,30	141,34	54,77	0,39	27,93	84,53
S50P50_1	2,20	428,75	11,1	99,72	195,70	47,59	122,93	72,77	0,59	37,18	65,40
S50P50_2	2,20	428,38	11,1	99,55	195,37	47,55	122,82	72,54	0,59	37,13	65,55
S50P50_3	2,20	431,16	11,2	99,86	195,98	48,29	123,48	72,49	0,59	36,99	66,61
S50P50_4	2,20	429,42	11,1	100,08	196,41	47,67	123,12	73,29	0,60	37,31	65,04
S50P50C7_1	2,16	417,44	10,3	99,85	195,96	43,00	123,10	72,86	0,59	37,18	59,01
S50P50C7_2	2,16	419,66	11	99,85	195,96	46,16	122,79	73,17	0,60	37,34	63,09
S50P50C7_3	2,16	420,69	10,8	99,5	195,27	45,43	123,36	71,90	0,58	36,82	63,19
S50P50C7_4	2,16	423,33	10,5	99,75	195,76	44,45	124,56	71,20	0,57	36,37	62,43
S50P50C9_1	2,17	428,81	11,6	99,9	196,05	49,74	125,29	70,76	0,56	36,09	70,30
S50P50C9_2	2,17	420,4	11,7	99,88	196,01	49,19	122,70	73,32	0,60	37,40	67,09
S50P50C9_3	2,17	416,62	12,1	100,25	196,74	50,41	121,04	75,70	0,63	38,48	66,59
S50P50C9_4	2,17	418,11	11,8	99,95	196,15	49,34	121,89	74,26	0,61	37,86	66,43
S50P50C11_1	2,18	422,18	12,4	100,13	196,51	52,35	122,90	73,61	0,60	37,46	71,12
S50P50C11_2	2,18	421,16	12,4	100,08	196,41	52,22	122,60	73,81	0,60	37,58	70,76
S50P50C11_3	2,18	422,43	12,5	100,4	197,04	52,80	122,83	74,21	0,60	37,66	71,16
S50P50C11_4	2,18	422,53	12,4	100,25	196,74	52,39	123,00	73,74	0,60	37,48	71,05
S25P75_1	2,22	427,26	10,7	99,81	195,88	45,72	73,95	121,93	1,65	62,25	37,49
S25P75_2	2,22	435,01	10,8	99,71	195,68	46,98	75,20	120,48	1,60	61,57	38,99
S25P75_3	2,22	433,22	11	99,9	196,05	47,65	74,73	121,33	1,62	61,88	39,28
S25P75_4	2,22	430,3	11	100,15	196,54	47,33	74,22	122,32	1,65	62,24	38,70
S25P75C7_1	2,18	424,23	11,8	99,9	196,05	50,06	78,22	117,83	1,51	60,10	42,48
S25P75C7_2	2,18	425,27	11,9	99,62	195,50	50,61	78,32	117,18	1,50	59,94	43,10
S25P75C7_3	2,18	424,11	12,1	99,47	195,21	51,32	77,93	117,28	1,50	60,08	43,76
S25P75C7_4	2,18	428,77	11,8	100,8	197,82	50,59	79,06	118,76	1,50	60,04	42,60
S25P75C9_1	2,17	423,29	11,2	99,98	196,21	47,41	80,21	116,00	1,45	59,12	40,87
S25P75C9_2	2,17	422,17	11,5	100,53	197,29	48,55	79,73	117,56	1,47	59,59	41,30
S25P75C9_3	2,17	424,68	11,2	99,83	195,92	47,56	80,48	115,44	1,43	58,92	41,20
S25P75C9_4	2,17	421,36	11,2	99,67	195,60	47,19	79,85	115,75	1,45	59,18	40,77
S25P75C11_1	2,18	421,31	13	99,93	196,11	54,77	79,82	116,30	1,46	59,30	47,10
S25P75C11_2	2,18	426,88	12,9	99,95	196,15	55,07	80,97	115,19	1,42	58,72	47,81
S25P75C11_3	2,18	423,96	12,6	100,05	196,35	53,42	80,69	115,66	1,43	58,91	46,19
S25P75C11_4	2,18	427,39	12,7	100,25	196,74	54,28	81,25	115,49	1,42	58,70	46,99

Tabela A.3 - Índices Físicos dos corpos de prova com 21 dias de cura

CP	γ_d (g/cm³)	Mcp (g)	W (%)	Altura (mm)	V _t (cm³)	V _a (cm³)	Vgrãos (cm³)	V _v (cm³)	e	η (%)	s (%)
S_1	2,18	422,09	10,9	99,87	195,99	46,01	144,65	51,35	0,35	26,20	89,60
S_2	2,18	422,58	11	99,92	196,09	46,48	144,65	51,44	0,36	26,23	90,36
S_3	2,18	422,56	11	100,2	196,64	46,48	144,65	52,00	0,36	26,44	89,39
S_4	2,18	421,13	10,8	99,8	195,86	45,48	144,48	51,38	0,36	26,23	88,53
SC7_1	2,12	407,49	11	100,2	196,64	44,82	140,17	56,47	0,40	28,72	79,37
SC7_2	2,12	411,72	10,9	101,1	198,41	44,88	141,78	56,62	0,40	28,54	79,25
SC7_3	2,12	410,97	11	100,55	197,33	45,21	141,37	55,96	0,40	28,36	80,78
SC7_4	2,12	413,2	10,7	100,33	196,90	44,21	142,61	54,28	0,38	27,57	81,45
SC9_1	2,13	410,89	11,3	99,88	196,01	46,43	141,06	54,96	0,39	28,04	84,49
SC9_2	2,13	415,24	11,3	100,16	196,56	46,92	142,55	54,01	0,38	27,48	86,87
SC9_3	2,13	415,63	11,3	99,97	196,19	46,97	142,69	53,50	0,37	27,27	87,78
SC9_4	2,13	415,71	11,4	100,25	196,74	47,39	142,55	54,19	0,38	27,54	87,46
SC11_1	2,12	411,75	11,6	99,95	196,15	47,76	141,07	55,08	0,39	28,08	86,72
SC11_2	2,12	413,26	11,5	100,17	196,58	47,52	141,75	54,83	0,39	27,89	86,67
SC11_3	2,12	409,09	11,5	100,35	196,94	47,05	140,32	56,62	0,40	28,75	83,09
SC11_4	2,12	410,59	11,5	99,85	195,96	47,22	140,83	55,12	0,39	28,13	85,66
S75P25_1	2,19	427,54	10,4	100,18	196,60	44,46	147,91	48,69	0,33	24,77	91,32
S75P25_2	2,19	429,97	10,9	99,6	195,47	46,87	147,92	47,54	0,32	24,32	98,58
S75P25_3	2,19	426,62	11,1	99,85	195,96	47,35	146,44	49,51	0,34	25,27	95,64
S75P25_4	2,19	428,06	11,1	100,23	196,70	47,51	146,94	49,77	0,34	25,30	95,48
S75P25C7_1	2,19	427,15	11	100,7	197,62	46,99	147,46	50,16	0,34	25,38	93,67
S75P25C7_2	2,19	429,68	10,9	100,78	197,78	46,84	148,50	49,28	0,33	24,91	95,05
S75P25C7_3	2,19	429,37	10,9	100,56	197,35	46,80	148,40	48,95	0,33	24,80	95,60
S75P25C7_4	2,19	429,53	11,2	100,76	197,74	48,11	147,95	49,79	0,34	25,18	96,62
S75P25C9_1	2,14	418,46	11	100,4	197,04	46,03	144,65	52,38	0,36	26,59	87,88
S75P25C9_2	2,14	417,17	11,1	100,43	197,09	46,31	144,05	53,05	0,37	26,92	87,29
S75P25C9_3	2,14	417,87	11,4	99,97	196,19	47,64	143,80	52,39	0,36	26,70	90,93
S75P25C9_4	2,14	416,92	11,4	100,35	196,94	47,53	143,47	53,46	0,37	27,15	88,90
S75P25C11_1	2,12	413,17	11,6	100,08	196,41	47,93	142,05	54,36	0,38	27,68	88,17
S75P25C11_2	2,12	412,83	11,6	99,99	196,23	47,89	141,93	54,30	0,38	27,67	88,20
S75P25C11_3	2,12	411,97	11,3	99,7	195,66	46,55	142,12	53,55	0,38	27,37	86,94
S75P25C11_4	2,12	413,51	11,6	99,85	195,96	47,97	142,16	53,79	0,38	27,45	89,17
S50P50_1	2,20	430,12	11,2	99,67	195,60	48,17	123,18	72,42	0,59	37,02	66,52
S50P50_2	2,20	429,16	11,2	99,8	195,86	48,07	122,91	72,95	0,59	37,25	65,89
S50P50_3	2,20	430,3	10,7	100,15	196,54	46,04	123,93	72,62	0,59	36,95	63,41
S50P50_4	2,20	427,88	10,8	99,93	196,11	46,21	123,09	73,02	0,59	37,23	63,29
S50P50C7_1	2,16	415,95	10,4	99,92	196,09	43,26	122,52	73,57	0,60	37,52	58,80
S50P50C7_2	2,16	416,21	10,6	99,95	196,15	44,12	122,32	73,83	0,60	37,64	59,76
S50P50C7_3	2,16	416,56	11	100,1	196,45	45,82	121,88	74,57	0,61	37,96	61,45
S50P50C7_4	2,16	416,64	11,1	99,74	195,74	46,25	121,77	73,97	0,61	37,79	62,52
S50P50C9_1	2,17	419,81	11,6	100,7	197,62	48,70	122,66	74,96	0,61	37,93	64,96
S50P50C9_2	2,17	419,83	11,5	100,27	196,78	48,28	122,81	73,97	0,60	37,59	65,27
S50P50C9_3	2,17	419,62	11,8	100,45	197,13	49,52	122,33	74,80	0,61	37,95	66,19
S50P50C9_4	2,17	419,47	11,6	100,12	196,49	48,66	122,56	73,92	0,60	37,62	65,82
S50P50C11_1	2,18	420,94	12,8	100,5	197,23	53,88	121,98	75,25	0,62	38,16	71,60
S50P50C11_2	2,18	422,63	12,9	100,4	197,04	54,52	122,33	74,71	0,61	37,92	72,98
S50P50C11_3	2,18	421,58	12,8	100,28	196,80	53,96	122,16	74,64	0,61	37,93	72,30
S50P50C11_4	2,18	424,26	12,8	100,34	196,92	54,31	122,94	73,98	0,60	37,57	73,41
S25P75_1	2,22	429,53	11,3	99,18	194,64	48,54	73,84	120,80	1,64	62,06	40,18
S25P75_2	2,22	432,32	11,5	99,67	195,60	49,72	74,15	121,45	1,64	62,09	40,94
S25P75_3	2,22	433,11	11,5	99,55	195,37	49,81	74,29	121,08	1,63	61,98	41,14
S25P75_4	2,22	430,87	11,5	99,92	196,09	49,55	73,90	122,19	1,65	62,31	40,55
S25P75C7_1	2,18	420,67	12	100,06	196,37	50,48	77,39	118,98	1,54	60,59	42,42
S25P75C7_2	2,18	422,55	12,1	99,4	195,07	51,13	77,65	117,43	1,51	60,20	43,54
S25P75C7_3	2,18	421,15	12,1	99,8	195,86	50,96	77,39	118,47	1,53	60,49	43,01
S25P75C7_4	2,18	420,2	12,1	100,15	196,54	50,84	77,21	119,33	1,55	60,71	42,61
S25P75C9_1	2,17	416,87	11,2	100,15	196,54	46,69	79,00	117,55	1,49	59,81	39,72
S25P75C9_2	2,17	422,14	11,4	100,29	196,82	48,12	79,82	117,00	1,47	59,45	41,13
S25P75C9_3	2,17	423,42	11,3	99,85	195,96	47,85	80,15	115,81	1,44	59,10	41,32
S25P75C9_4	2,17	422,21	11,3	100,2	196,64	47,71	79,92	116,72	1,46	59,36	40,90
S25P75C11_1	2,18	429,1	12,9	100,15	196,54	55,35	81,39	115,16	1,41	58,59	48,07
S25P75C11_2	2,18	428,03	13	100,3	196,84	55,64	81,09	115,75	1,43	58,80	48,07
S25P75C11_3	2,18	425,64	13	100,27	196,78	55,33	80,64	116,14	1,44	59,02	47,64
S25P75C11_4	2,18	425,02	12,9	100,08	196,41	54,83	80,61	115,79	1,44	58,96	47,35

Tabela A.4 - Índices Físicos dos corpos de prova com 28 dias de cura

CP	γ_d (g/cm³)	Mcp (g)	W (%)	Altura (mm)	V_t (cm³)	V_a (cm³)	Vgrãos (cm³)	V_v (cm³)	e	η (%)	s (%)
S_1	2,18	422,71	11	100,05	196,35	46,50	144,70	51,65	0,36	26,31	90,02
S_2	2,18	422,53	10,9	100,18	196,60	46,06	144,80	51,81	0,36	26,35	88,90
S_3	2,18	421,81	10,4	100,22	196,68	43,87	145,36	51,32	0,35	26,09	85,48
S_4	2,18	422,92	10,5	99,87	195,99	44,41	145,58	50,41	0,35	25,72	88,09
SC7_1	2,12	415,26	10,9	100,43	197,09	45,26	143,00	54,09	0,38	27,44	83,68
SC7_2	2,12	416,84	11,3	100,33	196,90	47,10	142,90	53,99	0,38	27,42	87,24
SC7_3	2,12	416,72	11,5	100,3	196,84	47,92	142,54	54,30	0,38	27,59	88,26
SC7_4	2,12	414,04	11,5	100,37	196,98	47,61	141,62	55,35	0,39	28,10	86,02
SC9_1	2,13	420,15	11,3	100,85	197,92	47,48	144,24	53,68	0,37	27,12	88,44
SC9_2	2,13	420,18	11,9	100,5	197,23	50,00	143,27	53,96	0,38	27,36	92,68
SC9_3	2,13	419,57	11,9	100,3	196,84	49,93	143,06	53,77	0,38	27,32	92,85
SC9_4	2,13	420,09	12	99,9	196,05	50,41	143,08	52,97	0,37	27,02	95,16
SC11_1	2,12	412,12	12	100,33	196,90	49,45	140,56	56,34	0,40	28,61	87,78
SC11_2	2,12	413,25	11,8	100,8	197,82	48,76	141,27	56,55	0,40	28,59	86,22
SC11_3	2,12	416,97	11,5	100,15	196,54	47,95	143,02	53,52	0,37	27,23	89,59
SC11_4	2,12	415,82	11,8	99,84	195,94	49,07	142,14	53,79	0,38	27,45	91,22
S75P25_1	2,19	427,51	11	100,03	196,31	47,03	146,91	49,40	0,34	25,16	95,20
S75P25_2	2,19	427,63	10,9	99,95	196,15	46,61	147,12	49,03	0,33	25,00	95,06
S75P25_3	2,19	427,42	11	100,12	196,49	47,02	146,88	49,60	0,34	25,25	94,78
S75P25_4	2,19	426,59	11,1	100,17	196,58	47,35	146,43	50,15	0,34	25,51	94,41
S75P25C7_1	2,19	429,1	11,4	100,18	196,60	48,92	147,47	49,13	0,33	24,99	99,56
S75P25C7_2	2,19	430,48	11,3	100,35	196,94	48,64	148,11	48,82	0,33	24,79	99,63
S75P25C7_3	2,19	428,87	11,3	100,27	196,78	48,46	147,56	49,22	0,33	25,01	98,46
S75P25C7_4	2,19	429,29	11,2	100,45	197,13	48,08	147,87	49,26	0,33	24,99	97,60
S75P25C9_1	2,14	418,57	11,2	99,87	195,99	46,88	144,37	51,63	0,36	26,34	90,80
S75P25C9_2	2,14	418,57	11,2	99,87	195,99	46,88	144,37	51,63	0,36	26,34	90,80
S75P25C9_3	2,14	418,57	11,2	99,87	195,99	46,88	144,37	51,63	0,36	26,34	90,80
S75P25C9_4	2,14	418,57	11,2	99,87	195,99	46,88	144,37	51,63	0,36	26,34	90,80
S75P25C11_1	2,12	417,87	11,4	100,02	196,29	47,64	143,99	52,30	0,36	26,64	91,08
S75P25C11_2	2,12	417,34	11,8	100,36	196,96	49,25	143,16	53,80	0,38	27,32	91,54
S75P25C11_3	2,12	418,26	11,5	99,77	195,80	48,10	143,96	51,84	0,36	26,48	92,79
S75P25C11_4	2,12	417,95	11,8	100,25	196,74	49,32	143,37	53,38	0,37	27,13	92,40
S50P50_1	2,20	430,56	10,8	100,17	196,58	46,50	123,87	72,72	0,59	36,99	63,95
S50P50_2	2,20	430,28	10,8	99,85	195,96	46,47	123,78	72,17	0,58	36,83	64,39
S50P50_3	2,20	432,73	10,8	100,16	196,56	46,73	124,49	72,07	0,58	36,67	64,84
S50P50_4	2,20	426,84	10,7	99,71	195,68	45,67	122,93	72,75	0,59	37,18	62,78
S50P50C7_1	2,16	421,14	11,2	99,92	196,09	47,17	122,94	73,15	0,60	37,30	64,48
S50P50C7_2	2,16	424,45	11,2	100,08	196,41	47,54	123,91	72,50	0,59	36,91	65,57
S50P50C7_3	2,16	419,21	10,8	100,22	196,68	45,27	122,93	73,75	0,60	37,50	61,39
S50P50C7_4	2,16	421,74	10,9	99,99	196,23	45,97	123,53	72,70	0,59	37,05	63,23
S50P50C9_1	2,17	424,56	11,5	100,13	196,51	48,82	124,19	72,31	0,58	36,80	67,52
S50P50C9_2	2,17	423,71	11,7	100,35	196,94	49,57	123,66	73,27	0,59	37,21	67,66
S50P50C9_3	2,17	422,32	11,8	100,21	196,66	49,83	123,12	73,55	0,60	37,40	67,76
S50P50C9_4	2,17	419,86	11,5	100,08	196,41	48,28	122,82	73,59	0,60	37,47	65,61
S50P50C11_1	2,18	426,52	12,4	100,6	197,43	52,89	124,16	73,27	0,59	37,11	72,19
S50P50C11_2	2,18	424,85	12,6	100,62	197,47	53,53	123,39	74,07	0,60	37,51	72,27
S50P50C11_3	2,18	425,13	12,9	101,05	198,31	54,84	123,05	75,26	0,61	37,95	72,87
S50P50C11_4	2,18	428,98	12,6	100,55	197,33	54,05	124,59	72,74	0,58	36,86	74,31
S25P75_1	2,22	432,61	11,1	99,97	196,19	48,02	74,54	121,65	1,63	62,01	39,47
S25P75_2	2,22	428,78	11	100,53	197,29	47,17	73,96	123,33	1,67	62,51	38,24
S25P75_3	2,22	434,05	11,1	100,55	197,33	48,18	74,79	122,54	1,64	62,10	39,32
S25P75_4	2,22	434,59	11,4	99,45	195,17	49,54	74,63	120,54	1,62	61,76	41,10
S25P75C7_1	2,18	425,6	11,8	100,75	197,72	50,22	78,47	119,25	1,52	60,31	42,11
S25P75C7_2	2,18	427,45	11,9	100,35	196,94	50,87	78,72	118,21	1,50	60,03	43,03
S25P75C7_3	2,18	422,22	12	99,87	195,99	50,67	77,67	118,32	1,52	60,37	42,82
S25P75C7_4	2,18	421,89	11,8	100,43	197,09	49,78	77,79	119,30	1,53	60,53	41,73
S25P75C9_1	2,17	424,18	11,2	100,57	197,37	47,51	80,38	116,99	1,46	59,27	40,61
S25P75C9_2	2,17	424,75	11,4	100,9	198,02	48,42	80,31	117,71	1,47	59,44	41,14
S25P75C9_3	2,17	417,25	11,4	100,81	197,84	47,57	78,89	118,95	1,51	60,12	39,99
S25P75C9_4	2,17	424,12	11,4	100,78	197,78	48,35	80,19	117,59	1,47	59,45	41,12
S25P75C11_1	2,18	429,13	12,6	100,6	197,43	54,07	81,67	115,76	1,42	58,63	46,71
S25P75C11_2	2,18	428,5	12,4	100,13	196,51	53,13	81,74	114,77	1,40	58,40	46,30
S25P75C11_3	2,18	425,26	12,1	100,09	196,43	51,46	81,40	115,03	1,41	58,56	44,73
S25P75C11_4	2,18	425,18	12,2	100,25	196,74	51,87	81,29	115,45	1,42	58,68	44,93

APÊNDICE B

σ _{máx} (kPa)					
		σ _{máx} (kPa)	σ _{máx} (kPa)	σ _{máx} (kPa)	σ _{máx} (kPa)
Corpo	Nº	07 dias	14 dias	21 dias	28 dias
S	1	147,47	147,47	147,47	147,47
	2	142,11	142,11	142,11	142,11
	3	133,93	133,93	133,93	133,93
	4	156,13	156,13	156,13	156,13
SC7	1	286,43	438,91	606,46	625,84
	2	253,32	501,27		646,28
	3	272,51		632,12	610,48
	4			575,46	654,93
SC9	1	262,94	524,25	676,61	649,28
	2	274,14	559,85		747,95
	3	257,81		603,86	
	4	318,72	482,38		628,59
SC11	1	326,47	612,65	667,84	767,45
	2	305,96	598,80	634,55	771,75
	3	293,24			712,05
	4	319,57			746,66
S75P25	1	122,36	122,36	122,36	122,36
	2	123,55	123,55	123,55	123,55
	3	116,64	116,64	116,64	116,64
	4	116,73	116,73	116,73	116,73
S75P25C7	1			618,68	698,04
	2		518,15	681,45	702,68
	3	346,41	524,75		720,08
	4	343,13	607,04		711,63
S75P25C9	1		568,80	619,33	703,10
	2	380,31	535,18	705,38	743,11
	3	379,60		677,96	
	4	384,83		637,40	
S75P25C11	1	447,18	707,18		1000,86
	2	427,67		764,34	970,34
	3	424,07	587,84	696,55	
	4			678,26	870,73

Tabela B.1 - Resultados do ensaio de resistência à compressão simples para o solo natural e S75P25

σ _{máx_média} (kPa) - Desvio Padrão - Coeficiente de Variação (%)													
		σ _{máx_média} (kPa)	Desvio Padrão	CV (%)	σ _{máx_média} (kPa)	Desvio Padrão	CV (%)	σ _{máx_média} (kPa)	Desvio Padrão	CV (%)	σ _{máx_média} (kPa)	Desvio Padrão	CV (%)
Corpo	Nº	07 dias			14 dias			21 dias			28 dias		
S	1	144,9 kPa	9,33	6,4%	144,9 kPa	9,33	6,4%	144,9 kPa	9,33	6,4%	144,9 kPa	9,33	6,4%
	2												
	3												
	4												
SC7	1	270,8 kPa	16,63	6,1%	470,1 kPa	44,10	9,4%	604,7 kPa	28,37	4,7%	634,4 kPa	20,07	3,2%
	2												
	3												
	4												
SC9	1	278,4 kPa	27,73	10,0%	522,2 kPa	38,78	7,4%	640,2 kPa	51,44	8,0%	675,3 kPa	63,78	9,4%
	2												
	3												
	4												
SC11	1	311,3 kPa	14,76	4,7%	605,7 kPa	9,80	1,6%	651,2 kPa	23,54	3,6%	749,5 kPa	27,25	3,6%
	2												
	3												
	4												
S75P25	1	119,8 kPa	3,65	3,0%	119,8 kPa	3,65	3,0%	119,8 kPa	3,65	3,0%	119,8 kPa	3,65	3,0%
	2												
	3												
	4												
S75P25C7	1	344,8 kPa	2,32	0,7%	550,0 kPa	49,53	9,0%	650,1 kPa	44,39	6,8%	708,1 kPa	9,77	1,4%
	2												
	3												
	4												
S75P25C9	1	381,6 kPa	2,84	0,7%	552,0 kPa	23,77	4,3%	660,0 kPa	38,93	5,9%	723,1 kPa	28,29	3,9%
	2												
	3												
	4												
S75P25C11	1	433,0 kPa	12,44	2,9%	647,5 kPa	84,39	13,0%	713,1 kPa	45,35	6,4%	947,3 kPa	68,05	7,2%
	2												
	3												
	4												

*Os espaços vazios nas tensões de alguns corpos de prova são devido a rejeição dos mesmos por quebra ou por não atingirem valores aceitáveis de umidade, massa ou tensão.

Tabela B.2 - Resultados do ensaio de resistência à compressão simples para S50P50 e S25P75

σ _{máx} (kPa)					
		σ _{máx} (kPa)	σ _{máx} (kPa)	σ _{máx} (kPa)	σ _{máx} (kPa)
Corpo	Nº	07 dias	14 dias	21 dias	28 dias
S50P50	1	88,41	88,41	88,41	88,41
	2	85,30	85,30	85,30	85,30
	3	82,04	82,04	82,04	82,04
	4	85,98	85,98	85,98	85,98
S50P50C7	1		405,56	603,13	
	2		436,74		617,37
	3	231,98	430,05	503,73	640,40
	4	234,77	475,80	510,20	592,60
S50P50C9	1	259,48	497,75		642,06
	2	261,65	441,53	586,31	677,81
	3	242,01	496,04	544,06	673,06
	4	223,31	452,08	501,07	652,93
S50P50C11	1	327,46		722,30	798,42
	2		477,01	708,22	864,04
	3	276,43	520,44	616,26	
	4	280,29	511,19		
S25P75	1	56,10	56,10	56,10	56,10
	2	55,18	55,18	55,18	55,18
	3	54,33	54,33	54,33	54,33
	4	55,72	55,72	55,72	55,72
S25P75C7	1	230,91	244,70		467,85
	2		279,19	460,27	472,40
	3	240,18		419,32	
	4	211,48	247,75		416,25
S25P75C9	1	221,95	332,27	473,86	646,07
	2		334,26	524,86	676,54
	3	243,38	301,86		587,14
	4	261,85	324,68		609,56
S25P75C11	1	271,15	402,73	628,62	704,89
	2	280,03	408,13	606,74	735,96
	3	228,39			686,87
	4			605,83	611,44

σ _{máx_média} (kPa) - Desvio Padrão - Coeficiente de Variação (%)														
		σ _{máx_média} (kPa)	Desvio Padrão	CV (%)	σ _{máx_média} (kPa)	Desvio Padrão	CV (%)	σ _{máx_média} (kPa)	Desvio Padrão	CV (%)	σ _{máx_média} (kPa)	Desvio Padrão	CV (%)	
Corpo	Nº	07 dias			14 dias			21 dias			28 dias			
S50P50	1	85,4 kPa	2,63	3,1%	85,4 kPa	2,63	3,1%	85,4 kPa	2,63	3,1%	85,4 kPa	2,63	3,1%	
	2													
	3													
	4													
S50P50C7	1	233,4 kPa	1,97	0,8%	437,0 kPa	29,11	6,7%	539,0 kPa	55,61	10,3%	616,8 kPa	23,91	3,9%	
	2													
	3													
	4													
S50P50C9	1	246,6 kPa	17,85	7,2%	471,9 kPa	29,25	6,2%	543,8 kPa	42,62	7,8%	661,5 kPa	16,84	2,5%	
	2													
	3													
	4													
S50P50C11	1	294,7 kPa	28,42	9,6%	502,9 kPa	22,88	4,5%	682,3 kPa	57,59	8,4%	831,2 kPa	46,40	5,6%	
	2													
	3													
	4													
S25P75	1	55,3 kPa	0,77	1,4%	55,3 kPa	0,77	1,4%	55,3 kPa	0,77	1,4%	55,3 kPa	0,77	1,4%	
	2													
	3													
	4													
S25P75C7	1	227,5 kPa	14,65	6,4%	257,2 kPa	19,09	7,4%	439,8 kPa	28,96	6,6%	452,2 kPa	31,19	6,9%	
	2													
	3													
	4													
S25P75C9	1	242,4kPa	19,97	8,2%	323,3 kPa	14,86	4,6%	499,4 kPa	36,06	7,2%	629,8 kPa	39,49	6,3%	
	2													
	3													
	4													
S25P75C11	1	259,9 kPa	27,61	10,6%	405,4 kPa	3,82	0,9%	613,7 kPa	12,90	2,1%	684,8 kPa	52,94	7,7%	
	2													
	3													
	4													

*Os espaços vazios nas tensões de alguns corpos de prova são devido a rejeição dos mesmos por quebra ou por não atingirem valores aceitáveis de umidade, massa ou tensão.

APÊNDICE C

Tabela C.1 - Resultados do Sonelastic para 7 dias de cura

Dia do teste	Tempo de cura [dias]	Mistura	n°	Altura média [mm]	Massa [g]	Densidade [kg/m³]	E1 [GPa]	Vp1 [m/s]	E2 [GPa]	Vp2 [m/s]	E3 [GPa]	Vp3 [m/s]	Ecd [Pa]	Vpm [m/s]	Eci [Pa]
30/jul	7	S	1	100,30	421,89	2140	0,094	221,19	0,094	221,37	0,094	220,85	94000,0	221,14	458,51
30/jul	7	S	2	99,60	423,27	2160	0,094	219,35	0,093	218,29	0,094	219,80	93666,7	219,15	452,01
30/jul	7	SC7	1	100,40	414,57	2110	0,091	218,87	0,090	217,36	0,091	218,25	90666,7	218,16	442,11
30/jul	7	SC7	2	100,20	416,96	2120	0,091	218,64	0,090	217,90	0,091	218,04	90666,7	218,19	440,02
30/jul	7	SC9	1	99,93	415,62	2120	0,093	220,92	0,094	222,56	0,093	220,92	93333,3	221,46	458,25
30/jul	7	SC9	2	99,57	415,86	2120	0,093	220,02	0,092	219,76	0,092	219,08	92333,3	219,62	451,39
30/jul	7	SC11	1	99,87	410,19	2090	0,091	219,37	0,091	219,43	0,091	219,88	91000,0	219,56	448,64
30/jul	7	SC11	2	100,32	413,55	2100	0,090	218,62	0,091	219,38	0,092	220,66	91000,0	219,55	446,50
30/jul	7	S75P25	1	99,98	428,66	2180	0,093	219,30	0,093	217,59	0,093	217,85	93000,0	218,24	443,41
30/jul	7	S75P25	2	99,31	428,02	2200	0,092	216,27	0,093	216,83	0,093	216,78	92666,7	216,63	437,17
30/jul	7	S75P25C7	1	100,20	427,57	2180	0,093	217,75	0,094	219,56	0,094	219,37	93666,7	218,89	447,86
30/jul	7	S75P25C7	2	100,38	430,12	2190	0,095	219,22	0,093	217,16	0,095	219,49	94333,3	218,62	450,27
30/jul	7	S75P25C9	1	99,85	420,62	2140	0,094	221,19	0,093	220,25	0,093	219,86	93333,3	220,43	453,96
30/jul	7	S75P25C9	2	100,30	421,89	2150	0,094	220,25	0,092	218,05	0,094	219,91	93333,3	219,40	451,85
06/ago	7	S75P25C11	1	100,23	411,36	2090	0,093	222,23	0,093	222,74	0,093	222,01	93000,0	222,33	462,50
06/ago	7	S75P25C11	2	99,99	417,18	2120	0,094	222,57	0,092	219,76	0,092	220,13	92666,7	220,82	453,67
06/ago	7	S50P50	1	99,35	423,14	2170	0,091	215,59	0,091	216,34	0,090	215,08	90666,7	215,67	429,88
06/ago	7	S50P50	2	100,00	429,05	2190	0,092	215,76	0,091	214,69	0,091	215,05	91333,3	215,16	430,35
06/ago	7	S50P50C7	1	100,08	419,43	2130	0,094	221,70	0,093	220,13	0,094	220,88	93666,7	220,91	458,38
06/ago	7	S50P50C7	2	100,10	420,61	2140	0,095	222,23	0,094	220,45	0,093	219,76	94000,0	220,81	458,51
06/ago	7	S50P50C9	1	100,52	422,14	2150	0,094	220,29	0,094	220,82	0,093	218,95	93666,7	220,02	454,11
06/ago	7	S50P50C9	2	100,87	419,72	2140	0,094	221,40	0,093	219,72	0,094	220,42	93666,7	220,51	456,24
06/ago	7	S50P50C11	1	100,52	423,30	2180	0,094	219,23	0,094	218,61	0,094	219,59	94000,0	219,14	450,10
06/ago	7	S50P50C11	2	100,87	426,00	2170	0,095	220,57	0,095	219,85	0,093	218,55	94333,3	219,65	454,42
30/jul	7	S25P75	1	99,63	428,37	2190	0,094	218,13	0,094	218,05	0,093	217,38	93666,7	217,85	445,82
30/jul	7	S25P75	3	99,87	428,14	2180	0,094	218,47	0,094	218,82	0,094	219,14	94000,0	218,81	450,10
29/jul	7	S25P75C7	1	100,75	427,39	2170	0,095	220,11	0,096	221,35	0,096	221,60	95666,7	221,02	463,44
29/jul	7	S25P75C7	2	100,35	433,25	2200	0,096	219,90	0,097	221,18	0,096	219,87	96333,3	220,32	461,58
29/jul	7	S25P75C9	1	100,25	418,56	2130	0,092	218,64	0,092	219,21	0,091	217,84	91666,7	218,56	444,73
29/jul	7	S25P75C9	2	100,35	417,83	2130	0,093	219,85	0,091	218,09	0,091	218,29	91666,7	218,75	444,74
24/jul	7	S25P75C11	1	100,49	423,28	2160	0,093	218,99	0,091	216,27	0,093	219,11	92333,3	218,12	443,03
24/jul	7	S25P75C11	2	99,98	424,34	2150	0,094	220,91	0,093	219,62	0,093	218,98	93333,3	219,84	451,85

Tabela C.2 - Resultados do Sonelastic para 14 dias de cura

Dia do teste	Tempo de cura [dias]	Mistura	n°	Altura média [mm]	Massa [g]	Densidade [kg/m³]	E1 [GPa]	Vp1 [m/s]	E2 [GPa]	Vp2 [m/s]	E3 [GPa]	Vp3 [m/s]	Ecd [Pa]	Vpm [m/s]	Eci [Pa]
26/jul	14	S	1	100,35	412,83	2100	0,092	221,40	0,091	219,86	0,092	221,21	91666,7	220,83	451,10
26/jul	14	S	2	100,01	415,26	2110	0,093	221,27	0,092	219,56	0,091	218,36	92000,0	219,73	451,24
05/ago	14	SC7	1	100,35	412,40	2090	0,094	223,70	0,092	220,60	0,093	222,04	93000,0	222,11	462,50
05/ago	14	SC7	2	100,60	413,57	2100	0,093	222,24	0,093	221,76	0,093	221,55	93000,0	221,85	460,30
29/jul	14	SC9	1	99,93	408,04	2080	0,091	220,73	0,090	219,55	0,092	221,23	91000,0	220,50	450,79
29/jul	14	SC9	2	99,75	414,18	2110	0,090	218,30	0,091	218,60	0,093	222,03	91333,3	219,65	446,67
29/jul	14	SC11	1	100,00	410,52	2080	0,094	224,04	0,094	224,00	0,093	222,66	93666,7	223,57	469,40
29/jul	14	SC11	2	100,05	412,64	2100	0,093	222,45	0,093	222,21	0,093	222,30	93000,0	222,32	460,30
06/ago	14	S75P25	1	99,55	421,22	2150	0,092	217,86	0,091	216,85	0,092	217,27	91666,7	217,32	440,60
06/ago	14	S75P25	2	100,40	428,64	2170	0,094	219,32	0,093	218,58	0,093	218,46	93333,3	218,79	447,69
05/ago	14	S75P25C7	1	100,22	423,06	2140	0,094	220,68	0,094	221,20	0,093	219,67	93666,7	220,52	456,24
05/ago	14	S75P25C7	2	100,37	428,33	2170	0,095	221,04	0,094	219,64	0,096	221,25	95000,0	220,64	458,92
05/ago	14	S75P25C9	1	100,27	416,26	2120	0,092	219,56	0,093	221,56	0,093	221,20	92666,7	220,78	453,67
05/ago	14	S75P25C9	2	99,92	417,84	2120	0,094	222,40	0,092	219,97	0,092	219,85	92666,7	220,74	453,67
29/jul	14	S75P25C11	1	100,50	408,94	2090	0,091	219,90	0,091	220,12	0,091	220,42	91000,0	220,15	448,64
29/jul	14	S75P25C11	2	100,30	415,82	2100	0,092	220,68	0,091	219,40	0,091	219,94	91333,3	220,01	448,79
29/jul	14	S50P50	1	99,72	427,47	2180	0,092	216,31	0,092	216,39	0,093	217,15	92333,3	216,62	438,96
29/jul	14	S50P50	2	99,55	427,56	2190	0,093	217,18	0,092	216,69	0,092	216,42	92333,3	216,77	436,96
29/jul	14	S50P50C7	1	99,85	416,65	2110	0,092	219,80	0,092	219,23	0,093	220,30	92333,3	219,78	453,53
29/jul	14	S50P50C7	2	99,85	418,86	2130	0,092	218,75	0,092	219,73	0,092	218,77	92000,0	219,08	446,99
29/jul	14	S50P50C9	1	99,90	417,56	2120	0,091	218,13	0,093	221,06	0,092	219,75	92000,0	219,65	449,11
29/jul	14	S50P50C9	2	99,88	419,49	2130	0,093	220,36	0,093	220,59	0,093	220,03	93000,0	220,33	453,82
29/jul	14	S50P50C11	1	100,13	420,55	2140	0,093	219,27	0,095	222,11	0,094	221,05	94000,0	220,81	458,51
29/jul	14	S50P50C11	2	100,08	421,69	2150	0,096	222,70	0,094	220,99	0,092	218,44	94000,0	220,71	456,39
26/jul	14	S25P75	1	99,81	425,62	2170	0,093	218,55	0,095	220,15	0,094	219,20	94000,0	219,30	452,17
26/jul	14	S25P75	4	100,15	427,63	2180	0,094	218,62	0,094	218,87	0,094	218,52	94000,0	218,67	450,10
26/jul	14	S25P75C7	1	99,90	423,44	2150	0,093	218,90	0,094	220,55	0,092	217,22	93000,0	218,89	449,60
26/jul	14	S25P75C7	2	99,62	424,75	2160	0,094	220,89	0,091	215,99	0,094	221,77	93000,0	219,55	447,51
26/jul	14	S25P75C9	1	99,98	413,50	2100	0,093	220,66	0,093	220,33	0,093	221,71	93000,0	220,90	460,30
26/jul	14	S25P75C9	2	100,53	421,24	2150	0,093	219,75	0,095	221,25	0,094	220,08	94000,0	220,36	456,38
26/jul	14	S25P75C11	1	99,93	420,18	2140	0,095	222,16	0,093	219,73	0,094	220,91	94000,0	220,93	458,51
26/jul	14	S25P75C11	2	99,95	424,94	2180	0,094	220,69	0,093	219,38	0,093	219,37	93333,3	219,81	445,63

Tabela C.3 - Resultados do Sonelastic para 21 dias de cura

Dia do teste	Tempo de cura [dias]	Mistura	nº	Altura média [mm]	Massa [g]	Densidade [kg/m³]	E1 [GPa]	Vp1 [m/s]	E2 [GPa]	Vp2 [m/s]	E3 [GPa]	Vp3 [m/s]	Ecd [Pa]	Vpm [m/s]	Eci [Pa]
31/jul	21	S	1	99,87	420,08	2140	0,093	219,34	0,093	219,18	0,094	221,38	93333,3	219,97	453,96
31/jul	21	S	2	99,92	425,27	2170	0,094	219,83	0,094	218,96	0,093	218,49	93666,7	219,09	449,93
02/ago	21	SC7	1	100,20	405,96	2060	0,090	220,61	0,092	222,27	0,091	221,68	91000,0	221,52	455,17
02/ago	21	SC7	2	101,10	411,26	2070	0,092	222,41	0,092	222,51	0,091	220,98	91666,7	221,97	457,62
02/ago	21	SC9	1	99,88	414,83	2090	0,093	222,30	0,092	221,35	0,093	221,99	92666,7	221,88	460,18
02/ago	21	SC9	2	100,16	413,39	2090	0,093	221,61	0,093	222,47	0,092	220,37	92666,7	221,48	460,18
02/ago	21	SC11	1	99,95	411,26	2090	0,092	220,97	0,092	221,60	0,093	221,95	92333,3	221,50	457,87
02/ago	21	SC11	2	100,17	412,84	2090	0,092	221,92	0,092	221,61	0,092	221,70	92000,0	221,74	455,55
30/jul	21	S75P25	1	100,18	427,95	2180	0,093	218,28	0,093	217,37	0,092	217,14	92666,7	217,60	441,18
30/jul	21	S75P25	2	99,60	429,25	2190	0,093	217,25	0,094	218,41	0,093	217,25	93333,3	217,64	443,60
31/jul	21	S75P25C7	1	100,70	426,51	2160	0,095	221,14	0,094	220,14	0,094	220,27	94333,3	220,51	456,52
31/jul	21	S75P25C7	2	100,78	428,45	2170	0,095	220,12	0,094	219,75	0,094	219,43	94333,3	219,77	454,42
31/jul	21	S75P25C9	1	100,40	418,03	2110	0,094	221,72	0,093	221,12	0,093	220,84	93333,3	221,23	460,42
31/jul	21	S75P25C9	2	100,43	416,73	2110	0,094	222,28	0,092	220,54	0,093	221,61	93000,0	221,48	458,12
31/jul	21	S75P25C11	1	100,08	412,15	2090	0,09	219,06	0,092	221,32	0,091	219,79	91000,0	220,06	448,64
31/jul	21	S75P25C11	2	99,99	410,68	2080	0,092	221,67	0,090	219,12	0,091	220,19	91000,0	220,32	450,79
30/jul	21	S50P50	1	99,67	429,7	2200	0,096	220,53	0,096	220,46	0,094	217,99	95333,3	219,66	454,89
30/jul	21	S50P50	2	99,80	428,66	2190	0,095	220,07	0,095	219,34	0,095	219,70	95000,0	219,70	454,73
31/jul	21	S50P50C7	1	99,92	414,66	2100	0,091	219,96	0,091	219,73	0,092	220,48	91333,3	220,06	448,79
31/jul	21	S50P50C7	2	99,95	415,96	2100	0,092	220,98	0,092	221,01	0,092	220,60	92000,0	220,86	453,39
31/jul	21	S50P50C9	1	100,70	419,19	2120	0,091	217,92	0,093	220,43	0,092	219,67	92000,0	219,34	449,11
31/jul	21	S50P50C9	2	100,27	418,73	2130	0,093	219,81	0,092	218,64	0,092	218,91	92333,3	219,12	449,27
31/jul	21	S50P50C11	1	100,50	420,28	2140	0,092	217,98	0,092	218,76	0,092	218,71	92000,0	218,48	444,91
31/jul	21	S50P50C11	2	100,40	421,74	2150	0,093	219,66	0,091	216,64	0,092	218,72	92000,0	218,34	442,84
30/jul	21	S25P75	1	99,18	433,5	2230	0,094	216,87	0,095	217,69	0,095	217,86	94666,7	217,48	444,38
30/jul	21	S25P75	2	99,67	427,32	2180	0,094	218,26	0,094	218,47	0,094	218,50	94000,0	218,41	450,10
31/jul	21	S25P75C7	1	100,06	418,32	2130	0,090	217,22	0,091	218,32	0,091	218,39	90666,7	217,97	437,96
31/jul	21	S25P75C7	2	99,40	420,89	2140	0,092	218,40	0,092	219,03	0,09	216,75	91333,3	218,06	440,40
02/ago	21	S25P75C9	1	100,15	422,97	2150	0,093	219,42	0,094	220,67	0,093	219,26	93333,3	219,78	451,85
02/ago	21	S25P75C9	2	100,29	421,30	2140	0,093	219,60	0,093	219,47	0,093	219,91	93000,0	219,66	451,70
30/jul	21	S25P75C11	1	100,15	426,55	2170	0,094	219,41	0,094	219,66	0,093	218,05	93666,7	219,04	449,93
30/jul	21	S25P75C11	2	100,30	427,17	2170	0,094	219,62	0,093	218,43	0,094	218,65	93666,7	218,90	449,93

Tabela C.4 - Resultados do Sonelastic para 28 dias de cura

Dia do teste	Tempo de cura [dias]	Mistura	n°	Altura média [mm]	Massa [g]	Densidade [kg/m³]	E1 [GPa]	Vp1 [m/s]	E2 [GPa]	Vp2 [m/s]	E3 [GPa]	Vp3 [m/s]	Ecd [Pa]	Vpm [m/s]	Eci [Pa]
25/jul	28	S	3	100,22	421,67	2140	0,092	218,28	0,095	221,70	0,095	221,56	94000,0	220,51	458,51
25/jul	28	S	2	100,18	421,46	2140	0,092	218,78	0,094	220,97	0,093	219,75	93000,0	219,83	451,70
24/jul	28	SC7	1	100,43	419,66	2130	0,093	220,69	0,093	220,52	0,093	220,70	93000,0	220,64	453,82
24/jul	28	SC7	2	100,33	420,51	2130	0,093	220,20	0,092	219,18	0,092	219,55	92333,3	219,64	449,27
24/jul	28	SC9	1	100,85	420,06	2140	0,092	218,80	0,092	218,29	0,092	219,11	92000,0	218,74	444,91
24/jul	28	SC9	2	100,50	418,17	2120	0,092	219,23	0,092	219,20	0,091	218,78	91666,7	219,07	446,83
24/jul	28	SC11	1	100,33	416,73	2120	0,091	219,05	0,092	219,32	0,09	217,38	91000,0	218,58	442,29
24/jul	28	SC11	2	100,80	417,22	2130	0,093	219,94	0,092	219,49	0,091	218,13	92000,0	219,19	446,99
05/ago	28	S75P25	1	100,03	426,48	2170	0,093	217,84	0,092	217,44	0,092	216,45	92333,3	217,24	440,99
05/ago	28	S75P25	2	99,95	425,82	2170	0,093	218,48	0,092	216,92	0,093	218,13	92666,7	217,84	443,22
01/ago	28	S75P25C7	1	100,18	429,99	2180	0,097	222,74	0,098	223,04	0,097	222,47	97333,3	222,75	472,60
01/ago	28	S75P25C7	2	100,35	428,57	2180	0,097	222,47	0,097	222,00	0,096	221,29	96666,7	221,92	468,07
01/ago	28	S75P25C9	1	99,87	417,56	2130	0,094	222,06	0,094	221,46	0,094	221,45	94000,0	221,66	460,66
01/ago	28	S75P25C9	2	99,87	419,87	2130	0,095	222,47	0,094	221,72	0,094	221,65	94333,3	221,95	462,95
01/ago	28	S75P25C11	1	100,02	416,32	2120	0,093	220,86	0,094	221,33	0,093	220,48	93333,3	220,89	458,25
01/ago	28	S75P25C11	2	100,36	416,81	2130	0,092	219,26	0,093	220,09	0,093	220,68	92666,7	220,01	451,54
05/ago	28	S50P50	3	100,17	438,28	2230	0,098	221,37	0,098	220,84	0,099	221,74	98333,3	221,32	468,66
05/ago	28	S50P50	2	99,85	431,56	2200	0,097	221,06	0,098	221,88	0,097	221,84	97333,3	221,59	468,30
05/ago	28	S50P50C7	1	99,92	420,31	2130	0,093	220,53	0,094	221,15	0,093	220,70	93333,3	220,79	456,01
05/ago	28	S50P50C7	2	100,08	422,48	2150	0,093	219,70	0,094	220,43	0,094	220,69	93666,7	220,27	454,11
05/ago	28	S50P50C9	1	100,13	423,44	2160	0,093	219,29	0,095	221,59	0,094	219,51	94000,0	220,13	454,26
05/ago	28	S50P50C9	2	100,35	421,77	2140	0,094	220,70	0,094	220,74	0,094	221,01	94000,0	220,82	458,51
05/ago	28	S50P50C11	1	100,60	425,13	2170	0,094	219,13	0,093	218,39	0,094	219,75	93666,7	219,09	449,93
05/ago	28	S50P50C11	2	100,62	424,99	2170	0,093	218,23	0,095	220,47	0,093	218,59	93666,7	219,10	449,93
05/ago	28	S25P75	4	99,97	439,67	2250	0,098	219,42	0,098	219,46	0,098	219,35	98000,0	219,41	462,29
05/ago	28	S25P75	2	100,53	441,64	2240	0,099	221,71	0,099	221,73	0,099	221,74	99000,0	221,73	471,00
05/ago	28	S25P75C7	1	100,75	425,99	2170	0,094	219,61	0,095	220,36	0,094	219,49	94333,3	219,82	454,42
05/ago	28	S25P75C7	2	100,35	425,82	2180	0,095	219,86	0,094	218,87	0,093	217,66	94000,0	218,80	450,10
05/ago	28	S25P75C9	1	100,57	423,47	2150	0,096	223,19	0,095	222,11	0,095	222,15	95333,3	222,48	465,47
05/ago	28	S25P75C9	2	100,90	422,91	2140	0,096	223,47	0,094	221,63	0,095	222,00	95000,0	222,37	465,35
05/ago	28	S25P75C11	1	100,60	428,31	2170	0,096	221,82	0,095	221,16	0,096	221,41	95666,7	221,46	463,44
05/ago	28	S25P75C11	2	100,13	427,44	2170	0,095	220,76	0,095	220,08	0,095	220,16	95000,0	220,33	458,92

ANEXO A – Análise química do solo

 AgriSolum ANÁLISES AGRONÔMICAS		Avenida Dr. Mário Clapier Urbinatti, 1181 Jardim Canadá CEP 87.080-120 Maringá - PR Tel: (44)3262-9585 E-mail: contato@agrisolum.com.br www.agrisolum.com.br		CHAVE DE ACESSO 14e39c0ed1	
SOLICITANTE	JULIANA AZOIA LUKIANTCHUKI	Nº AMOSTRA	7146	Nº DO LAUDO	296 1/2023
PROPRIETÁRIO	JULIANA AZOIA LUKIANTCHUKI				
PROPRIEDADE	PROPRIEDADE CAMPO MOURÃO				
MUNICÍPIO / UF	Campos Mourão - PR	DATA ENTRADA	25/08/2023	DATA SAÍDA	30/08/2023
MATRÍCULA		ÁREA	0 ha		
DESCRIÇÃO DA AMOSTRA	AMOSTRA 4			PROFUNDIDADE	00 - 20 CM

ANÁLISE QUÍMICA DE SOLO

ATRIBUTOS QUÍMICOS

DETERMINAÇÃO	RESULTADO	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
pH em CaCl ₂	6,80					
pH em H ₂ O	7,70					
C (g dm ⁻³)	1,56					
MO (%)	0,27					

MACRONUTRIENTES

ELEMENTOS	cmol _d dm ⁻³	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
Cálcio (Ca ²⁺)	1,03					
Magnésio (Mg ²⁺)	1,02					
Potássio (K ⁺)	0,32					
Fósforo (P)	1,79					
Enxofre (S)	ns					

MICRONUTRIENTES

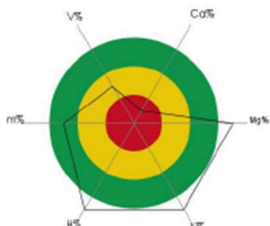
ELEMENTOS	mg dm ⁻³	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
Boro (B)	ns					
Cobre (Cu)	2,28					
Ferro (Fe)	36,42					
Manganês (Mn)	39,12					
Zinco (Zn)	0,96					

ATRIBUTOS QUÍMICOS

DETERMINAÇÃO	cmol _d dm ⁻³	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
SB	2,37					
CTC	4,06					
CTC efetiva	2,37					
Acidez Potencial (H + Al)	1,69					
Acidez Não-Trocável (H)	1,69					
Acidez Trocável (Al ³⁺)	0,00					

ÍNDICES DE SATURAÇÃO

Ca %	25,37
Mg %	25,12
K %	7,88
H %	41,63
m %	0,00
V %	58,37



LEGENDA

- EQUILIBRADO
- LIMITE DE TOLERÂNCIA
- Desequilíbrio
- EXCESSIVO

FÓSFORO REMANESCENTE E NÍVEL CRÍTICO

P-rem	Fósforo	Enxofre	Zinco
ns	ns	ns	ns

ASSINATURA



Eng. Agr. Simone Lemes de Souza
 REG. 7154/S/O
 Responsável Técnico

OBSERVAÇÃO

MB= Muito Baixo; B= Baixo; M: Médio; A= Alto e MA: Muito Alto.
 - Determinações Analíticas: Mehlich I: K, P, Cu, Fe, Mn e Zn; KCl 1 M: Al, Ca e Mg; SMP: H + Al; Água quente: B; Fósforo de Cálcio Monobásico: S; Walkley-Black: C. - Os valores analíticos referem-se a amostra disponibilizada pelo interessado.

