

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

HELOISA VALERIO SCHWEISS

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO-RCD  
ESTABILIZADAS COM CAL PARA APLICAÇÃO EM OBRAS GEOTÉCNICAS**

PONTA GROSSA

2022

HELOISA VALERIO SCHWEISS

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO-RCD  
ESTABILIZADAS COM CAL PARA APLICAÇÃO EM OBRAS GEOTÉCNICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger

PONTA GROSSA

2022

**HELOISA VALERIO SCHWEISS**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO-RCD  
ESTABILIZADAS COM CAL PARA APLICAÇÃO EM OBRAS GEOTÉCNICAS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

---

Prof. Me. Bianca Penteado de Almeida Tonus

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

---

Prof. Dr. Lúcio Marcos de Geus

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Ponta Grossa, 16 de dezembro de 2022

## **AGRADECIMENTOS**

Obrigada, Deus, por estar comigo sempre! De todas as suas promessas, essa é uma das que me encorajam a buscar o que faz meu coração vibrar: “coisas que os olhos não viram, nem os ouvidos ouviram, nem o coração humano imaginou, tais são os bens que Deus tem preparado para aqueles que o amam”. A certeza que tenho é que em Ti tudo se realiza perfeitamente.

Agradeço ao meu orientador e professor Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger pela dedicação e oportunidade de pesquisa. Muito obrigada pela confiança, interesse, disponibilidade, incentivo, paciência, respeito e tranquilidade. Meus agradecimentos e admiração.

Ao Nilson, laboratorista do Laboratório de Mecânica dos Solos e Rochas, por todo auxílio e companhia nos dias de preparação dos materiais e corpos de prova.

Ao Milton, laboratorista do Laboratório de Ensaios Mecânicos do departamento de Engenharia de Materiais, por todo auxílio e atenção nos dias de ensaio.

Aos meus pais Cristiane e Cesar por se fazerem presentes em todos os momentos, me incentivando e me apoiando sempre. Obrigada pelas idas e vindas à UEPG e pelo incentivo e compreensão da rotina da faculdade.

À minha irmã Gabriela por se fazer sempre presente e me ajudar tanto. Obrigada pelas idas e vindas à UEPG, pelo cuidado que tem por nossa casa, pelo incentivo e compreensão da rotina da faculdade.

Ao meu namorado João Pedro por viver esses anos de faculdade e a engenharia juntos. Obrigada por todo incentivo, compreensão e auxílio no TCC.

Aos meus companheiros de tema de TCC Lucas e Vitor, foi mais leve com a companhia de vocês no laboratório.

Aos meus amigos, que não me deixam desistir.

Aos meus professores e colegas de turma que me ajudaram a construir o conhecimento que tenho.

Muito obrigada!

Um pequeno barco que se deixa levar pelo Amor.

## RESUMO

A falta de resistência dos solos para determinadas aplicações e não cumprimento de parâmetros necessários para viabilizar a execução de obras de engenharia e geotecnia, atrelado ao elevado nível de geração de resíduos de construção e demolição (RCD) e baixa porcentagem de reutilização desse resíduo têm fomentado o estudo por alternativas de melhoramento e estabilização de solos que utilizem o RCD como parte integrante da mistura. A cal é utilizada como aditivo químico há décadas e aplicada na estabilização de solos e compactação proporciona melhorias significativas na textura e estrutura do solo, redução da plasticidade e aumento da resistência mecânica; fatores como porosidade, teor de cal e nível de compactação são determinantes na obtenção de resistência de solos com o uso da cal como aglomerante. Dessa forma, faz-se necessário o estudo de novas alternativas e tecnologias, tecnicamente e economicamente viáveis, que promovam o aumento da resistência dos solos de maneira sustentável. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar o comportamento mecânico de uma mistura de solo laterítico, presente na região de Ponta Grossa – PR, e RCD, com e sem adição de cal, analisando a viabilidade da utilização dessa mistura em aplicações geotécnicas. A pesquisa foi balizada em conformidade com estudos de mesmo solo e RCD já realizados na universidade. Foram realizados ensaios de Compressão Simples para misturas de solos, solo + RCD e solo + RCD + cal (3%, 5% e 7%), variando o peso específico aparente seco da mesma em 15,5kN/m<sup>2</sup>, 16kN/m<sup>2</sup> e 16,5kN/m<sup>2</sup> e o tipo de cura ao qual o corpo de prova foi submetido após a compactação, hermética ou ambiente. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão demonstraram que uma mistura com substituição em massa de 45% de solo por RCD apresenta baixa capacidade de suporte se comparada com o solo puro, para os três níveis de compactação analisados e que, com o acréscimo de cal, há aumento dessa resistência, superando a resistência do solo natural somente com a adição de 7% de cal, independente do nível de compactação e do tipo de cura. A partir desses resultados, pode-se observar que a cura hermética reduziu em 3,5 vezes a possibilidade de acréscimo de tensão resistente que a cal poderia promover aos corpos de prova, comparando com a cura ambiente; que corpos de prova com  $\gamma_d$  teórico igual a 16kN/m<sup>2</sup> promoveram os melhores aumentos de resistência à compressão em decorrência do ar disponível para a cura da cal; e que com a redução da relação vazios/ volume de cal, há acréscimo exponencial da resistência à compressão simples.

**Palavras chaves:** solo-RCD, solo-cal, resíduo de construção e demolição, ensaio de compressão simples.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resistência à compressão simples x relação vazios/ cal ajustados do SRAB -CAL (90 dias de cura).....	31
Figura 2 - Resistência à compressão simples x relação vazios/ cal ajustados do SRAB -25%RBR-CAL (90 dias de cura).....	32
Figura 3 - Resistência à compressão simples x relação vazios/ cal ajustados do SRAB -25%CV-CAL (90 dias de cura) .....	32
Figura 4 - Resistência à compressão simples x relação vazios/ cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para amostras de caulim-cal com 20% de umidade e 90 dias de cura .....	33
Figura 5 - Metodologia e estratégia de ação .....	34
Figura 6 - Curva granulométrica do solo .....	35
Figura 7 - Curva de compactação do solo.....	36
Figura 8 - Curva granulométrica do RCD .....	37
Figura 9 - Cal hidratada III.....	37
Figura 10 - Curvas de compactação - Pereira e Vargas (2019) .....	39
Figura 11 - Influência do peso específico aparente seco nas misturas solo-cimento - Pereira e Vargas (2019) .....	40
Figura 12 - Influência do peso específico aparente seco nas misturas solo-cimento + RCD - Pereira e Vargas (2019) .....	40
Figura 13 - Shimadzu Autograph AG-I .....	42
Figura 14 - Moldagem do Corpo de Prova de Sc .....	45
Figura 15 - Corpos de prova submetidos à saturação.....	46
Figura 16 - Tensão axial x deformação Sa.....	47
Figura 17 - Tensão axial x deformação Sb.....	48
Figura 18 - Tensão axial x deformação SRa .....	49
Figura 19 - Tensão axial x deformação SRb .....	49
Figura 20 - Tensão axial x deformação SRc .....	50
Figura 21 - Tensão axial x deformação SRC3%a .....	50
Figura 22 - Tensão axial x deformação SRC3%b .....	51
Figura 23 - Tensão axial x deformação SRC3%c.....	51
Figura 24 - Tensão axial x deformação SRC5%a .....	52
Figura 25 - Tensão axial x deformação SRC5%b .....	52

Figura 26 - Tensão axial x deformação SRC5%c.....	53
Figura 27 - Tensão axial x deformação SRC7%a .....	53
Figura 28 - Tensão axial x deformação SRC7%b .....	54
Figura 29 - Tensão axial x deformação SRC7%c.....	54
Figura 30 - Corpos de prova após ensaio de Compressão Simples .....	55
Figura 31 - Tensão axial x deformação SRC5%c - cura ambiente.....	56
Figura 32 - Tensão axial x deformação SRC7%a - cura ambiente.....	57
Figura 33 - Tensão axial x deformação SRC7%b - cura ambiente.....	57
Figura 34 - Tensão axial x deformação SRC7%c - cura ambiente.....	58
Figura 35 - Corpos de prova após ensaio de Compressão Simples – cura ambiente .....	58
Figura 36 - Influência do peso específico teórico para diferentes teores de cal .....	60
Figura 37 - Influência do peso específico obtido para diferentes teores de cal .....	61
Figura 38 - Influência de peso específico teórico para diferentes teores de cal – cura ambiente.....	61
Figura 39 - Influência do peso específico obtido para diferentes teores de cal - cura ambiente.....	62
Figura 40 - Influência do teor de cal para diferentes pesos específicos .....	63
Figura 41 - Relação vazios x cal .....	64
Figura 42 - Relação vazios x cal - expoente $x = 0,177$ .....	64
Figura 43 - Relação vazios x cal - cura ambiente.....	65
Figura 44 - Relação vazios cal - expoente $x = 0,151$ - cura ambiente.....	65

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Normas brasileiras para gestão de RCD .....	25
Quadro 2 - Classificação dos resíduos da construção civil – CONAMA 2002, 2004 e 2011. ....	26

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio de Compactação: definição de valores para ensaio à Compressão Simples .....	41
Tabela 2 - Planejamento do Ensaio de Compressão Simples.....	43
Tabela 3 - Planejamento do Ensaio à Compressão Simples (cura ambiente) .....	43
Tabela 4 - Misturas realizadas .....	44
Tabela 5 - Comparação do modelo de cura .....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Relação água/cimento
CAP	Concreto asfáltico de petróleo
$C_{av}$	Teor volumétrico de agente cimentante
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CEEG-PG	Campo Experimental Geotécnico da Universidade Estadual de Ponta Grossa
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CV	Cinza Volante
h	Teor de umidade
$h_{ot}$	Umidade ótima
IP	Índice de plasticidade
$N_{SPT}$	Índice de resistência à penetração do solo
RBR	Resíduos de britagem
RCD	Resíduos de construção e demolição
RCS	Resistência à compressão simples
Sisnama	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
$SiO_2$	Dióxido de Silício
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
$\eta$	Porosidade
$\gamma_d$	Peso específico aparente seco
$\gamma_d \text{ máx}$	Peso específico aparente seco máximo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS .....	17
1.1.1	Objetivo geral .....	17
1.1.2	Objetivos específicos .....	17
1.2	JUSTIFICATIVA .....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>20</b>
2.1	SOLO .....	20
2.1.1	Aspectos sobre a Geologia da região de Ponta Grossa .....	21
2.1.2	Comportamento dos solos lateríticos .....	22
2.2	SOLO + RCD.....	23
2.2.1	Resíduo da Construção Civil .....	24
2.2.2	Comportamento de solos misturados com RCD.....	26
2.3	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS .....	28
2.3.1	Solo estabilizado com cal.....	29
2.3.2	Cal.....	30
2.3.3	Dosagem da cal .....	30
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>34</b>
3.1	MATERIAIS .....	35
3.1.1	Solo .....	35
3.1.2	RCD .....	36
3.1.3	Cal.....	37
3.2	MÉTODOS .....	38
3.2.1	Ensaio de Compactação.....	38
3.2.2	Ensaio de Compressão Simples .....	41
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>44</b>
4.1	ENSAIO À COMPRESSÃO SIMPLES .....	46

<b>4.1.1</b>	<b>Corpos de prova com cura hermética .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Corpos de prova com cura ambiente .....</b>	<b>55</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Comparação do modelo de cura.....</b>	<b>59</b>
<b>4.2</b>	<b>ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....</b>	<b>59</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Influência do peso específico aparente seco (<math>\gamma_d</math>).....</b>	<b>59</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Influência do teor de cal .....</b>	<b>62</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Influência do volume de vazios x agente cimentante .....</b>	<b>63</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>66</b>
<b>5.1</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>66</b>
<b>5.2</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>68</b>
	<b>ANEXO A.....</b>	<b>73</b>
	<b>ANEXO B.....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil tem significativa responsabilidade sobre o crescimento socioeconômico do país, bem como a responsabilidade de desenvolver novas tecnologias para reduzir os impactos negativos causados por sua atuação. A geração de resíduos é inerente às atividades desse setor e, dessa forma, é orientada pela Resolução CONAMA nº 307 e pela Política e Plano Nacional de Resíduos Sólidos a gerir com critério e promover a redução e reciclagem do resíduo da construção civil e demolição.

Estudos apontam que os resíduos de construção e demolição possuem aplicabilidade viável em diversas frentes da engenharia civil e geotécnica, podendo substituir agregados virgens, melhorar características físicas e mecânicas e até atuar de maneira que não acarrete alterações significativas à aplicação, mas promova melhor alternativa de descarte deste resíduo.

Uma das possibilidades de aplicação do RCD gerado em obras da construção civil é atrelada ao processo de estabilização química de solos com agentes cimentantes como o cimento e a cal. A estabilização química de solos é uma das técnicas da engenharia geotécnica que objetiva viabilizar a execução de obras da engenharia civil quando o solo sob a obra dispõe de baixa capacidade de suporte.

Estudos com enfoque no tratamento de solos utilizando cal como estabilizante químico comprovam a melhora de propriedades geotécnicas como capacidade de suporte e redução de recalques (LOPES JUNIOR, 2007; LOVATO, 2004; THOMÉ, 1994). A alteração da composição de um solo com substituição parcial da sua massa por RCD aliada ao procedimento de estabilização química do solo com cal pode resultar em ganhos significativos de resistência além do previsto pela ação do agente cimentante, visto que as propriedades do solo e do RCD influenciam diretamente no comportamento da mistura, podendo esta ter suas características granulométricas melhoradas e conseqüentemente atingir valores elevados de resistência (PEREIRA e VARGAS, 2019). À vista disso, torna-se necessário o estudo das características do solo e da interferência da adição de RCD, bem como a definição das possibilidades de dosagem para viabilizar a aplicação desse resíduo e da cal na estabilização de solos.

Ambientalmente, a construção civil promove elevados níveis de extração de recursos naturais e geração de resíduos de construção e demolição (RCD), sendo necessário o estudo de novas alternativas de substituição do emprego de agregados virgens nas obras e de utilização viável do RCD.

O Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2021, divulgado pela Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, aponta que em 2020 foram coletadas 46.997.400 toneladas de RCD nos municípios brasileiros, valor equivalente a 221,2kg de RCD por habitante/ano. Em comparação com valores obtidos no ano anterior pela associação, a coleta aumentou em 5,5%. A região Sudeste é responsável pela maior parte do total coletado, cerca de 50%, seguida das regiões Nordeste, Sul, Centro-Oeste e Norte (ABRELPE, 2021).

Dados divulgados pelo SINIR (Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos) no Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos de 2019 apontam que 61% dos resíduos gerados na construção civil estão classificados como Classe A (reutilizáveis ou reciclados como agregados), 25% como Classe B (reciclados para outras destinações), 9% como Classe C (sem tecnologias ou aplicações economicamente viáveis para reciclagem ou recuperação), 3% como Classe D (perigosos) e 2% não especificado. Quanto ao tipo de destinação adotada para esse resíduo aponta que apenas 10% vão para a reciclagem e que 35%, 33% e 22% vão para aterros sanitários, aterros inertes ou outras destinações, respectivamente (SINIR, 2021).

Estudos apontam que a reciclagem e posterior reutilização do RCD em obras da engenharia civil e geotécnica têm se mostrado uma alternativa viável para a redução do acúmulo desse resíduo. Dos potenciais usos, tem-se o emprego no próprio canteiro de obras como agregado (EVANGELISTA; COSTA; ZANTA, 2010), cobertura de aterro sanitário (DIAS, 2014; OLIVEIRA e BRAGA, 2019), estruturas de solo reforçado (SANTOS, 2007; PEREIRA e VARGAS, 2019), camadas estruturais de pavimentos (TEIXEIRA, 2019; BEJA, 2014; PEREIRA; AMORIM e MOTTA, 2022), base de fundações superficiais (FERREIRA e THOMÉ, 2011), elementos estruturais (GERIN *et al.*, 2019), obras de recuperação ambiental (SCARABELOT e SILVA, 2019), entre outros. Os autores comprovam o atendimento às normas vigentes e melhoria de características específicas e fundamentais para cada aplicação.

Além do elevado nível de geração de RCD e baixa porcentagem de reutilização desse resíduo, outro problema enfrentado pela engenharia é a falta de resistência dos solos para determinadas aplicações, não atingindo os parâmetros necessários para viabilizar a execução da obra e aumentando a demanda por estudos alternativos de melhoramento e estabilização do solo.

A estabilização do solo consiste na alteração de suas propriedades a fim de melhorar seu comportamento, podendo alcançar o aumento da resistência, redução da compressibilidade, redução da sensibilidade às ações externas, aumento ou redução da permeabilidade e permanência das propriedades durante o uso do solo (VILLIBOR, 1982). No caso da estabilização química, a combinação entre o aditivo e o solo é responsável por definir as características alteradas (BRITO, 2017).

A cal é utilizada como aditivo químico há décadas e aplicada na estabilização de solos e compactação proporciona melhorias significativas na textura e estrutura do solo, redução da plasticidade e aumento da resistência mecânica (CRISTELO, 2001). Estudo mostra que a cal é mais eficiente no tratamento de solos argilosos e que a adição de até 8% desse material aumenta linearmente a resistência à compressão do solo (INGLÊS e METCALF, 1972). Além da quantidade de cal, a porosidade também é um fator determinante da resistência à compressão, sendo a relação quantidade de cal/ porosidade um método de dosagem coerente para estabilização de solos com cal (JOHANN, 2013; LOPES JUNIOR, 2011).

Buscando responder às três problemáticas apresentadas: elevado nível de geração de RCD, baixa porcentagem de reutilização desse resíduo e falta de resistência dos solos para obras de engenharia, faz-se necessário o estudo de novas alternativas e tecnologias, tecnicamente e economicamente viáveis, que promovam o aumento da resistência dos solos de maneira sustentável.

Teixeira (2019) realizou estudo do comportamento mecânico de uma mistura solo + cal e solo + RCD + cal para uso na pavimentação, com solo natural da Formação Geológica de Guabirota; observou que, para o solo ensaiado, apesar da mistura solo + cal apresentar maiores valores de resistência à compressão que a mistura solo + RCD + cal, a substituição parcial em massa do solo por RCD não deixou de atender aos limites determinados por norma para a aplicação estudada.

Em outro estudo, Pereira e Vargas (2019) dosaram misturas solo-cimento e RCD e ensaiaram à compressão simples, com solo do Campo Experimental Geotécnico da Universidade Estadual de Ponta Grossa, o mesmo solo estudado na presente pesquisa; observaram que a mistura solo-cimento e RCD apresentou maiores valores de resistência à compressão que a mistura solo-cimento. Isso se deu em função das características do solo e do RCD, os quais são classificados respectivamente em solo argilo siltoso e solo arenoso; a mistura resultou em uma melhor graduação e conseqüentemente menor compressibilidade e maior resistência.

Dessa forma, a hipótese da pesquisa foi a de que a adição de cal em misturas de solo laterítico de Ponta Grossa - PR com RCD iria promover o aumento da resistência e melhoria das propriedades mecânicas do solo quando comparado à misturas sem o agente cimentante. Também, a possibilidade de uma destinação viável e sustentável para o uso de RCD.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo do trabalho é avaliar o comportamento mecânico de uma mistura de solo laterítico, presente na região de Ponta Grossa – PR, e resíduos de construção e demolição (RCD), com e sem adição de cal, analisando a viabilidade da utilização dessa mistura em aplicações geotécnicas.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- 1) Realizar ensaios de compressão simples em corpos de prova de solo para os valores de peso específico aparente seco de  $15,5\text{kN/m}^3$ ,  $16\text{kN/m}^3$  e  $16,5\text{kN/m}^3$ ;
- 2) Realizar ensaios de compressão simples em corpos de prova de solo + RCD para os valores de peso específico aparente seco de  $15,5\text{kN/m}^3$ ,  $16\text{kN/m}^3$  e  $16,5\text{kN/m}^3$ ;
- 3) Realizar ensaios de compressão simples em corpos de prova de solo + RCD com adição de cal para os valores de peso específico aparente seco de  $15,5\text{kN/m}^3$ ,  $16\text{kN/m}^3$  e  $16,5\text{kN/m}^3$ ;

- 4) Analisar a resistência à compressão simples e o comportamento tensão x deformação das misturas propostas;
- 5) Analisar o efeito da cura úmida (hermética) e da cura ao ar livre (ambiente);
- 6) Analisar a influência da adição de RCD e RCD + cal ao solo laterítico, para o uso em aplicações geotécnicas.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Fundamentada no percentual elevado da geração do RCD em relação aos resíduos sólidos urbanos, cerca de 41% a 71% em cidades brasileiras de médio e grande porte (GOMES, et al., 2019 apud QUAGLIO e ARANA, 2020), e também respondendo às diretrizes estabelecidas pela Resolução CONAMA nº 307 e Políticas e Planos Nacionais de Resíduos Sólidos sobre a necessidade da redução dos impactos ambientais provocados pela destinação incorreta do resíduo da construção civil, atribuição de responsabilidade aos geradores e viabilidade técnica, econômica e ambiental da reciclagem desse resíduo, a pesquisa se faz atual; buscando desenvolver cientificamente a viabilidade do emprego do RCD em obras geotécnicas e reduzindo conseqüentemente o descarte incorreto ou improdutivo.

Outro fator que fundamenta a pesquisa é a relevância econômica, ambiental e técnica que, se viabilizada a estabilização da mistura solo + RCD com cal, a aplicação dessa solução traz à engenharia. De forma a reduzir custos energéticos, de extração de recursos naturais e de transporte; minimizar a extração de recursos naturais e o acúmulo de RCD em aterros e até locais impróprios; e proporcionar o atendimento às especificações técnicas que assegurem a execução de obras sobre solos que antes não atingiam parâmetros necessários, utilizando a cal como agente estabilizador.

Quanto à contribuição que esta pesquisa proporciona, pode-se destacar a abrangência do tipo de solo estudado (laterítico do Campo Experimental Geotécnico da Universidade Estadual de Ponta Grossa). Solos com comportamento laterítico são encontrados em cerca de 19% da superfície terrestre e em mais de 80% do território brasileiro (ARAÚJO e DANTAS, 2014); apresentam características particulares do seu comportamento, sendo necessário o desenvolvimento de pesquisas e metodologias específicas para as diferentes aplicações desse tipo solo.

A pesquisa também contribui para o desenvolvimento científico de metodologias referentes à utilização de RCD e cal para a estabilização de solos.

Dessa forma, a presente pesquisa se justifica no âmbito da atualidade; da relevância econômica, ambiental e técnica; e de contribuição científica e desenvolvimento da cidade de Ponta Grossa e regiões que possuem solos com características semelhantes.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo serão apresentados fundamentos teóricos sobre os materiais utilizados na pesquisa - solo, RCD e cal - bem como suas combinações e comportamentos. Além disso, serão relatadas experiências de outros autores que também trabalharam com a inclusão de RCD e cal para que seus resultados sirvam base para as decisões tomadas no decorrer do estudo.

### 2.1 SOLO

As características determinantes de um tipo de solo se dão pelos processos pedogenéticos gerados pela interação dos fatores de formação desse solo, como material de origem, relevo, clima, organismos e tempo (TULLIO, 2019).

O material que origina o solo pode ser proveniente de rochas ou sedimentos. Quando o material de origem são rochas, sua composição química e mineralógica, bem como cor e textura irão influenciar as características do solo (BRADY E WEIL, 2013); rochas ácidas (65% ou mais de  $\text{SiO}_2$ ) são compostas por minerais félsicos e originam solos arenosos, rochas básicas (menos que 52% de  $\text{SiO}_2$ ) são compostas por minerais ferromagnesianos ou máficos e originam solos argilosos (TULLIO, 2019). Quando o material de origem do solo são sedimentos, além das características de composição da sua rocha matriz, o processo erosivo, de intemperismo e o transporte e deposição desses sedimentos influenciam nas características do solo (TULLIO, 2019).

O relevo tem as suas características topográficas de altitude, inclinação e posição da paisagem como agentes de retardo ou aceleração das ações climáticas atuantes no processo de formação do solo (BRADY E WEIL, 2013). Opera no controle dos fluxos de água na paisagem, nas condições de drenagem e infiltração, influenciando nos processos erosivos (TULLIO, 2019). O clima exerce influência no intemperismo e desenvolvimento do perfil do solo baseado no volume de precipitações pluviométricas, temperatura da região e taxas de evaporação (KÄMPF E CURI, 2012). Os organismos favorecem o intemperismo bioquímico, além de proporcionarem matéria orgânica e formação de agregados estáveis, caracterizando solos escuros. Quanto ao tempo, este caracteriza o grau de intemperismo e de desenvolvimento do perfil do solo (TULLIO, 2019).

Isto posto, os aspectos geológicos da cidade de Ponta Grossa e demais fatores de influência determinaram o comportamento da porção de solo estudada nessa pesquisa, retirada do Campo Experimental Geotécnico da Universidade Estadual de Ponta Grossa (CEEG-PG), o qual é classificado como laterítico.

### **2.1.1 Aspectos sobre a Geologia da região de Ponta Grossa**

A cidade de Ponta Grossa está localizada no Segundo Planalto do estado do Paraná, região sul do Brasil e pertence à Bacia do Paraná.

A Bacia do Paraná possui característica sedimentar e extensão de 1,5 milhão de km<sup>2</sup>; compreende o centro-sul do Brasil (Mato Grosso até Rio Grande do Sul), nordeste da Argentina, leste do Paraguai e norte do Uruguai; é formada por seis supersequências que definem o arcabouço estratigráfico da bacia: Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru (MILANI, 2007). Também, é subdividida em seis sub-bacias definidas a partir do período de sedimentação: Grupo Paraná, Grupo Itararé, Grupo Passa Dois, Grupo Guatá (cobertura sedimentar paleozoica); Grupo São Bento (sedimentação e magmatismo mesozoico); Grupo Bauru (cobertura sedimentar mesozoica) (PARANÁ, 2022).

Ponta Grossa está estabelecida predominantemente na Formação Ponta Grossa e Formação Furnas, do Grupo Paraná, e parte na Formação Campo Mourão e Formação Taciba, do Grupo Itararé (MILANI, *et al*, 2007). A Formação Furnas é formada por arenitos quartzosos de granulometria média a grossa, com abundância de caulinita e estratificações cruzadas, próxima à face de transição com a Formação Ponta Grossa, apresenta arenitos de granulometria fina e sílico-argilosos (ASSINE, 1996). A Formação Ponta Grossa é formada predominantemente por folhelhos e arenitos sílticos com granulometria fina; no Paraná, é subdividida em três membros: Jaguaíva, Tibagi e São Domingos (GUIMARÃES, 2007). A Formação Campo Mourão apresenta base arenosa e sobreposta por diamictitos, ritmitos, folhelhos e arenitos de granulometria muito fina (MINEROPAR, 2007 *apud* MACENHAN e OJCZENASZ, 2019). A Formação Taciba apresenta base arenosa e um membro lamítico, sobreposta por diamictitos (FRANÇA, 1988).

Macenhan e Ojczenasz (2019) elaboraram um mapa geológico-geotécnico da região central da cidade de Ponta Grossa por meio de dados de boletins sondagens a percussão e indicaram, para os 276 furos analisados, o nível do lençol

freático, a resistência à penetração  $N_{SPT}$  (m/m) e o tipo de solo, classificando este em argila, areia, silte, pedregulho ou impenetrável. Dessa maneira, identificaram solos finos, argila e silte na região da Formação Ponta Grossa; areia na transição entre a Formação Lagoa Azul e Formação Ponta Grossa; e espesso corpo arenoso, com solos granulares e solos finos e superfície resistente em profundidades menores que 8m na região da Formação Campo Mourão. Os solos identificados pelos autores são concordantes com as características geológicas da região, fator de influência na formação do solo.

O clima da região do Paraná é subtropical úmido, com a particularidade de verões quentes e invernos frios, com chuvas distribuídas durante o ano. Sendo o clima um dos fatores determinantes do tipo de solo formado, processos geológicos e pedológicos típicos de regiões tropicais úmidas formam solos tropicais, os quais são divididos em solos de comportamento lateríticos e saprolíticos (NOGAMI e VILLIBOR, 1995). Tonus, *et al.* (2020) realizaram ensaios do Método das Pastilhas no Campo Experimental Geotécnico da Universidade Estadual de Ponta Grossa, aplicando a metodologia MCT desenvolvida por Nogami e Villibor para classificação de solos tropicais, e identificaram comportamento laterítico do solo em até 13m de profundidade e comportamento não laterítico em camadas mais profundas. O Sítio Experimental está localizado na Formação Ponta Grossa, próximo à Formação Furnas; o solo desse Sítio também será objeto de estudo do presente Trabalho de Conclusão de Curso, sendo estudada a parcela referente ao solo com comportamento laterítico.

### **2.1.2 Comportamento dos solos lateríticos**

Os solos lateríticos são solos superficiais decorrentes de processos de intemperismos intensos em partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas (VILLIBOR e NOGAMI, 2009). As elevadas temperaturas e níveis de precipitações dessas regiões favorecem o intemperismo químico por meio da infiltração da água das chuvas e processo de lixiviação, o qual carrega partículas finas de solo e deixa as pesadas como ferro e alumínio; as partículas pesadas se juntam às partículas de solo, originando partículas maiores chamadas lateritas (DIAS, 2014; SANTOS, 2006). Dessa forma, a fração argilosa de um solo laterítico é constituída principalmente de argilo-minerais do grupo caulinita e de hidróxidos e óxidos hidratados de ferro e de alumínio (SANTOS, 2006).

Por apresentar índice de vazios elevado, o solo laterítico apresenta em seu estado natural características de boa drenagem quando não saturados, resultando em uma boa trabalhabilidade e podendo apresentar baixa capacidade de suporte quando a estrutura porosa decorrente do processo de intemperismo for muito aberta. No entanto, passando por processo de compactação coerente, podem atingir alta resistência; justificando seu emprego em larga escala para construção de estradas e execução de aterros. Após a compactação, o solo laterítico não apresenta expansão na presença de água, mas com a diminuição do teor de umidade apresenta contração (PINTO, 2006 *apud* ARRUDA, 2020). Da mesma forma, Santos (2006) afirma que quando devidamente compactado o solo laterítico apresenta aumento de sua resistência e capacidade de suporte, sendo que na presença de água há baixa permeabilidade, deformabilidade e perda da capacidade de suporte (SANTOS, 2006).

## 2.2 SOLO + RCD

A reutilização de resíduos de construção e demolição como material de base e sub-base de pavimentos ou como agregados em concretos sem funções estruturais é uma prática comum na engenharia, contudo não se faz suficiente baseado no grande volume gerado, constantemente, nas obras da construção civil. Dessa forma, soluções vêm sendo estudadas para suprir a demanda ambiental e atender econômica e tecnicamente obras de engenharia civil e geotécnicas.

Estudos e aplicações da utilização do RCD misturado com solos de diferentes tipos e funções na engenharia se mostram viáveis tecnicamente em função das boas características que o RCD pode agregar ao solo como a redução do número de vazios por, além da predominância da fração arenosa, apresentar quantidades significativas de massa cimentícia e outros materiais classificados como Classe A pela Resolução CONAMA nº 307, os quais após a compactação são fracionados e melhoram o arranjo granulométrico (SCARABELOT e SILVA, 2019).

Kruger, Pereira e Chinelatto (2017) estudaram bibliografias relacionadas à influência do RCD em concretos e apontaram que há conhecimento científico comprovado da influência desse material e que o processo de beneficiamento, ou seja, transformação do RCD em agregado reciclado, controlado pode produzir

agregados reciclados de boa qualidade e que promovam boa durabilidade ao concreto. Das características analisadas, envolvendo o RCD e o agente cimentante, tem-se que a porosidade afeta o desempenho mecânico do concreto e que quanto maior a porosidade, maior será a relação água/ cimento (a/c) e maior o enfraquecimento da matriz cimentícia, fator esse que pode ser controlado no processo de beneficiamento. Lopes Junior (2011) e Johann (2013) estudaram influência da relação volume de vazios e quantidade de cal no comportamento mecânico de solos e atestam esse comportamento apontando que quanto menor a porosidade do material maior é a carga suportada à compressão simples do mesmo.

### **2.2.1 Resíduo da Construção Civil**

O Conselho Nacional de Meio Ambiente por meio da Resolução CONAMA nº 307 de 2002 (e suas atualizações) estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil; definindo, assim, resíduos da construção civil como sendo “provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos” (CONAMA, 2002).

A Lei nº 12.305/2010 regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos trazendo inovações para a gestão e gerenciamento, enfatizando a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos. Também, exige transparência no gerenciamento dos resíduos utilizando-se dos planos de resíduos sólidos e fiscalização. Empresas de construção civil “nos termos de regulamento ou de normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama” (Lei nº 12.305/2010) ficam submetidas à elaboração do plano de gerenciamento de resíduos sólidos quanto à geração de RCD. A Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Plano Nacional de resíduos sólidos foram atualizados pela Lei nº 11.043 em abril de 2022.

No âmbito normativo, a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – estabelece limites a serem respeitados e potencialidades de uso de RCD por meio de normas específicas de gestão desse resíduo (Quadro 1). As normas determinam diretrizes de projeto, implantação e operação de áreas de transbordo e triagem, aterros e áreas de reciclagem, as quais devem receber resíduos da construção civil e resíduos volumosos, resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes e resíduos sólidos da construção civil, respectivamente. Também, os procedimentos para a execução de camadas de pavimentação com agregados reciclados de

resíduos sólidos da construção civil e requisitos para a utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural de agregados de resíduos sólidos da construção civil.

Quadro 1 - Normas brasileiras para gestão de RCD

<b>Norma Técnica</b>	<b>Instrução Técnica</b>
NBR 15.112/2004	Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15.113/2004	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15.114/2004	Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15.115/2004	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.
NBR 15.116/2004	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

Fonte: NBR 15.112; 15.113; 15.114; 15.115; 15.116 (2004).

O RCD é subdividido em quatro classes, segundo a Resolução CONAMA: Classe A, reutilizáveis ou reciclados como agregados; Classe B, reciclados para outras destinações; Classe C, sem tecnologias ou aplicações economicamente viáveis para reciclagem ou recuperação; e Classe D, perigosos (Quadro 2). Para cada uma das classes a Resolução define a forma de destinação, devendo os resíduos classificados em Classe A ser reutilizáveis ou reciclados na forma de agregados ou armazenados em aterros específicos para reuso futuro (CONAMA, 2012). Entende-se por agregado reutilizado o resíduo que é reaplicado sem transformação e por reciclado o resíduo proveniente do processo de beneficiamento para obtenção de características técnicas para aplicações em obras de engenharia.

Quadro 2 - Classificação dos resíduos da construção civil – CONAMA 2002, 2004 e 2011.

Classe	Definição	Exemplos
Classe A	Reutilizáveis ou reciclados como agregados	Componentes cerâmicos, argamassa e concreto, solos, blocos, resíduos da pavimentação.
Classe B	Reciclados para outras destinações	Plásticos, papéis, papelões, metais, vidros, madeiras e gesso.
Classe C	Sem tecnologias ou aplicações economicamente viáveis para reciclagem ou recuperação	
Classe D	Perigosos	Tintas, solventes, óleos, resíduos contaminados ou nocivos à saúde e amianto.

Fonte: CONAMA (2002,2004 e 2011).

### 2.2.2 Comportamento de solos misturados com RCD

Pereira e Vargas (2019) estudaram o comportamento mecânico à compressão simples de misturas de solo-cimento com RCD (95%, 5% e 0%), (90%, 10% e 0%), (85%, 15% e 0%), (50%, 5% e 45%), (45%, 10% e 45%) e (40%, 15% e 45%), variando o peso específico aparente seco em 15, 16 e 17kN/m<sup>3</sup>, a fim de estabelecer uma metodologia de dosagem coerente e que atenda à viabilidade da utilização de RCD à essa mistura. Observaram que o solo classificado como argilo-siltoso misturado com o resíduo, o qual é classificado como arenoso, os mesmos solo e resíduo estudados na presente pesquisa, resulta em uma mistura com melhor granulometria, diminuindo a compressibilidade e aumentando a resistência, consequentemente. Definiram, após análise do ensaio de compactação, a porção de RCD da mistura em 45% para moldagem com corpos de prova ensaiados à compressão e concluíram que, além de resistências superiores quanto maior o teor de cimento, a adição de RCD deixa a mistura mais rígida quando comprimida. Comparando os corpos de prova de solo-cimento e solo-cimento + RCD, a resistência à compressão simples alcançou valores 400 vezes maiores com o acréscimo do RCD.

Comparando dois estudos com enfoque na aplicação de solos misturados com RCD em camadas estruturais de pavimentos, é comprovada a possibilidade de viabilidade desta aplicação, buscando cumprir com análises e parâmetros estabelecidos por normas vigentes. Pereira, Amorim e Motta (2022) estudaram o desempenho mecânico de misturas de solo areno-siltoso + RCD (85% e 15%), (70% e 30%), (55% e 45%) e (40% e 60%) comparado com misturas de solo areno-siltoso

+ brita nas mesmas proporções, para uso em camadas de base, analisando o módulo de resiliência e a deformação permanente. Os ensaios mostraram um maior módulo de resiliência para as misturas de solo + brita (70% e 30%) e solo + RCD (70% e 30%), respectivamente; também, um desempenho crescente do módulo de resiliência na aplicação de até 30% dos agregados estudados e média superior em todas as proporções se comparado com o solo puro. Dimensionando o pavimento pelo método MeDiNa, comprovaram a viabilidade do uso, levando em conta as novas características de projeto e espessuras específicas. Teixeira (2019) estudou o comportamento mecânico de misturas de solo tropical silto-arenoso estabilizado com cal e melhorado com RCD (45%, 5% e 50%) e (35%, 5% e 60%), para uso em pavimentos, ensaiando à compressão simples, tração por compressão diametral, Índice de Suporte Califórnia (CBR) e módulo de resiliência. Observou, com a adição de RCD à mistura de solo + cal, a redução de 4% e 8% do limite de liquidez, aumento do limite de plasticidade de 11% e 28%, queda do índice de plasticidade de 50% e 80%, aumento do módulo de resiliência de 94% e 220% e aumento do Índice de Suporte Califórnia de 815% e 3366% (comparado ao solo puro), para as duas misturas estudadas, respectivamente; também, a redução da umidade ótima e aumento do peso específico aparente seco máximo, conforme cresce a porcentagem de resíduo. Concluindo, dessa forma, que a adição de cal e/ou RCD à solos com baixa capacidade de suporte é uma técnica viável para a utilização em camadas estruturais de pavimentos.

Ferreira e Thomé (2011) estudaram a utilização de RCD como reforço de um solo residual de basalto, servindo como base de fundações superficiais; realizaram ensaios em laboratório de compactação e de Índice de Suporte Califórnia (CBR) para solo (100%) e solo e RCD (75% e 25%), (50% e 50%) e (25% e 75%); e ensaios em campo de placa para solo (100%) e solo e RCD (50% e 50%). Os resultados comprovaram a viabilidade técnica do reforço de um solo residual de basalto com RCD para a finalidade estudada e apontaram que, com a adição do RCD, houve o aumento da densidade máxima (RCD com maior massa específica), redução da umidade ótima (RCD com maior superfície específica que o solo) e aumento da elasticidade. Também, concluíram que a mistura solo + RCD (50% e 50%) apresentou maior capacidade de suporte que as demais com 24% de CBR, 0,15% de expansão. Os ensaios de placa mostraram que uma camada de solo +

RCD compactada aplicada como base de fundação superficial aumenta em 264% a capacidade de suporte.

Silva e Silva (2020) tiveram como foco de estudo o comportamento geotécnico de misturas de solo argiloso e resíduos de construção civil para aplicação como barreira hidráulica em áreas degradadas; analisaram índices físicos, índices de consistência, compactação, Índice de Suporte Califórnia (CBR), expansão e permeabilidade para solo (100%) e solo e RCD (75% e 25%) e (50% e 50%). Concluíram que a aplicação do RCD é uma alternativa viável econômica e ambientalmente em função da possibilidade de substituição do solo argiloso em até 50% de RCD, e tecnicamente para as características geotécnicas avaliadas. Observaram que, com a adição do RCD, o solo deixou de ter comportamento argiloso e passou a ser uma mistura de comportamento areno-argiloso, reduzindo a permeabilidade e favorecendo, dessa forma, a impermeabilização da barreira hidráulica. Além disso, observaram a redução do índice de plasticidade na mistura solo + RCD (50% e 50%) devido ao acréscimo de componentes como sílica e detritos de blocos cerâmicos oriundos do RCD, aumento do peso específico seco, redução da umidade ótima, redução da expansão e aumento do CBR. A mistura com substituição de apenas 25% de solo por RCD não apresentou características significativamente distintas do solo puro.

### 2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A estabilização de um solo consiste na atribuição de resistência a deformações e ruptura necessária para que o solo atenda às especificidades da função a qual foi destinado (SENÇO, 2001). Também, a técnica acarreta melhorias de propriedades de durabilidade e permeabilidade. (INGLES e METCALF, 1972).

O solo pode ser estabilizado adicionando novos agregados para correção granulométrica; ou mecanicamente, sendo submetido ao processo de compactação, dessa forma, é conferido ao solo a diminuição do volume de vazios e percolação de água, aumento da densidade, compactidade, durabilidade e resistência mecânica; ou quimicamente com a adição de agentes estabilizadores químicos como cimento, cal, pozolana, emulsão asfáltica, aditivos fluídos e CAP, que provocam reações químicas em contato com os minerais presentes no solo e, assim, promovem o preenchimento

dos poros e melhoram as propriedades físicas e mecânicas (BRITO e PARANHOS, 2017).

### **2.3.1 Solo estabilizado com cal**

A cal aplicada como agente estabilizador atribui ao solo o aumento da trabalhabilidade e fragilidade, aumento da resistência ao cisalhamento, pouca variação do limite de liquidez, redução do índice de plasticidade, aglomeração da colóides e formação de partículas maiores, desintegração de torrões e formação de partículas menores, aumento do intercepto de coesão, redução da umidade higroscópica do solo e aumento de propriedades de resistência com o tempo de cura (TEIXEIRA, 2019 *apud* HOWARD e BARA, 1976).

A estabilização de um solo com cal acontece em duas fases: troca iônica e reações pozolânicas. A primeira fase decorre imediatamente após a mistura e é caracterizada pela troca iônica entre as partículas de argila por íons de valência superior resultando na floculação; propriedades como granulometria, compactação, plasticidade, trabalhabilidade e resistência mecânica imediata são definidas nessa fase (CRISTELO, 2001). Castro (1995, *apud* JOHANN, 2013) afirma que mistura da cal com solo fino, na etapa rápida, causa fenômenos como troca catiônica, floculação-aglomeração, compressão da dupla camada elétrica, adsorção da cal e reações químicas. A segunda fase efetua-se lentamente e é marcada por reações pozolânicas, nas quais os minerais do solo reagem com a cal, causando a cimentação e resultando no aumento da resistência do solo (CASTRO, 1995, *apud* JOHANN, 2013).

Segundo Ingles e Metcalf (1972), para solos argilosos, a adição de até 8% de cal é suficiente para promover o aumento da resistência à compressão simples do solo, a qual, geralmente, aumenta de forma linear com o aumento do teor de cal até 8%; a adição de teores mais altos de cal apresenta redução da resistência à compressão simples devido à cimentação lenta da cal. Johann (2013), por sua vez, afirma que a adição de baixos teores de cal já é suficiente para promover o acréscimo de resistência e rigidez ao solo estabilizado e que a redução da porosidade favorece o aumento da resistência, visto que possibilita a união das partículas e melhor distribuição das tensões. Herrin e Mitchell (1961) não apontam um teor ótimo de cal capaz de resultar na máxima resistência do solo estabilizado, mas afirmam que além do teor, o tipo de cal, tipo de solo, peso específico, tempo e

tipo de cura são fatores fundamentais de influência no aumento da resistência do solo.

A correta execução da estabilização de solos com agente cimentante cal, pode acarretar ao solo estabilizado um comportamento mecânico, bem como outras características, significativamente, distintas do comportamento do solo natural, não cimentado.

### **2.3.2 Cal**

A cal pode ser classificada como aglomerante hidráulico, o qual reage em contato com a água (cal hidráulica e cimentos) e como aglomerante aéreo, o qual reage em contato com o ar (hidróxido de cálcio). Santos (2008) assegura que para o uso na estabilização de solos somente a cal aérea possui as propriedades necessárias para a finalidade, como granulometria, superfície específica, reatividade, peso específico, solubilidade e teor em cálcio; e que a cal hidráulica não é usada na estabilização de solos.

A cal aérea misturada com água sofre lenta de carbonatação na presença do ar, reagindo com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o qual promove seu endurecimento (MATTOS e GONÇALVES, 2019). Subdivide-se a cal aérea em cal viva/ virgem e cal hidratada/ apagada. Silva (2010) afirma que o teor de água presente no solo define o tipo de cal aérea a ser utilizado na estabilização.

A cal viva é obtida por meio do cozimento do calcário (carbonato de calcário) a uma temperatura de cerca de  $894^\circ\text{C}$ , quando a pressão de dissociação do carbonato de cálcio é superior à pressão atmosférica, resultando em óxido de cálcio e dióxido de carbono (calcinação). A cal hidratada é obtida através da hidratação com água da cal viva (extinção ou hidratação). A cal hidratada na presença do ar atmosférico reage com o dióxido de carbono, formando carbonato de cálcio e água (carbonatação) (BAUER, 2000).

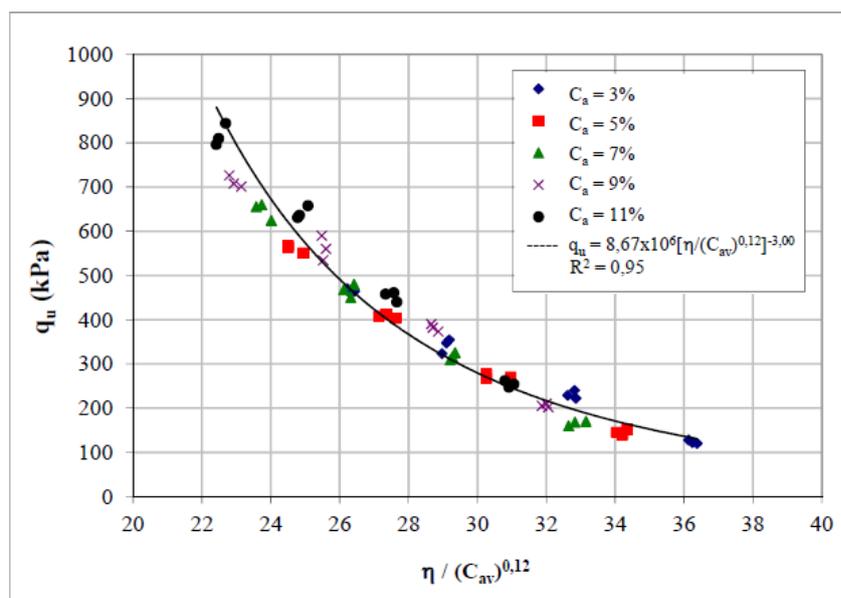
### **2.3.3 Dosagem da cal**

Metodologias de dosagem de cal têm sido desenvolvidas baseadas em critérios racionais, onde a relação volume de vazios/ volume de cal desempenham papel fundamental na obtenção da resistência desejada. Lopes Junior (2011) e Johann (2013) estudaram a influência da quantidade de cal, volume de vazios do solo e teor de umidade no comportamento mecânico em mistura de solo tratado com

cal, variando o tempo de cura. Definiram então, parâmetros de estimativa de compressão simples baseados na relação vazios/ cal que auxiliem na dosagem do teor de cal e escolha da energia de compactação para o solo obter a resistência de projeto.

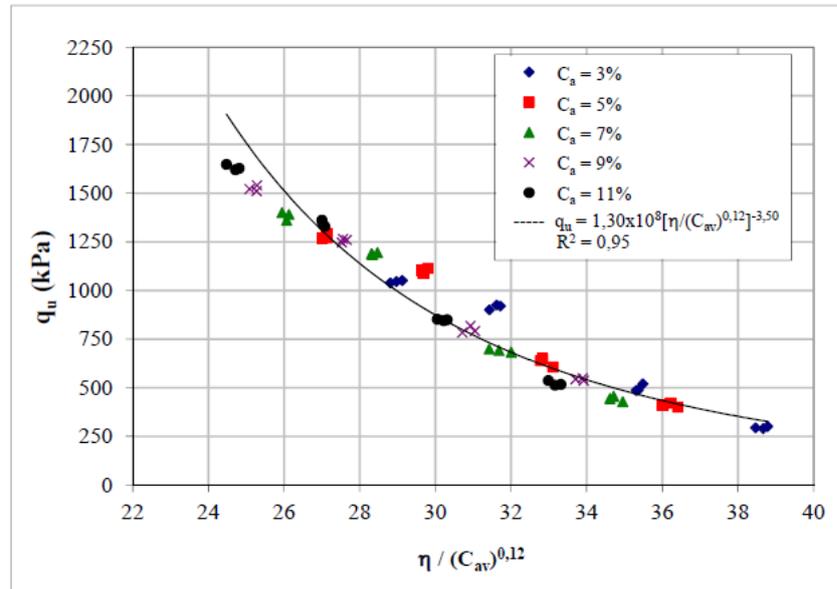
Lopes Junior (2011) estudou um solo arenoso tratado com cal e também com a adição de resíduo de britagem (RBR) e cinza volante (CV); observou que a cal promoveu o aumento da resistência nas três misturas estudadas e que alterando o teor de cal de 3% até 11% a resistência à compressão simples aumentou de maneira não linear; também, que a redução da porosidade das três misturas compactadas resulta em aumento potencial da resistência à compressão simples, independente do teor de cal. Definiu como parâmetros de relação entre a resistência à compressão e o fator vazios/ cal as seguintes equações:  $[\eta/(C_{av})^{0,12}]^{-3,00}$ , para solo + cal (Figura 1),  $[\eta/(C_{av})^{0,12}]^{-3,50}$ , para solo + cal + RBR (Figura 2) e  $[\eta/(C_{av})^{0,12}]^{-4,00}$ , para solo + cal + CV (Figura 3). Em que  $\eta$  corresponde à porosidade e  $C_{av}$  ao teor volumétrico de agente cimentante (cal). As equações foram definidas após análise individual das relações resistência à compressão x teor de cal e resistência à compressão x porosidade; análise da relação resistência à compressão x  $\eta/(C_{av})$ ; e ajuste da equação pela potência 0,12.

Figura 1 - Resistência à compressão simples x relação vazios/ cal ajustados do SRAB -CAL (90 dias de cura)



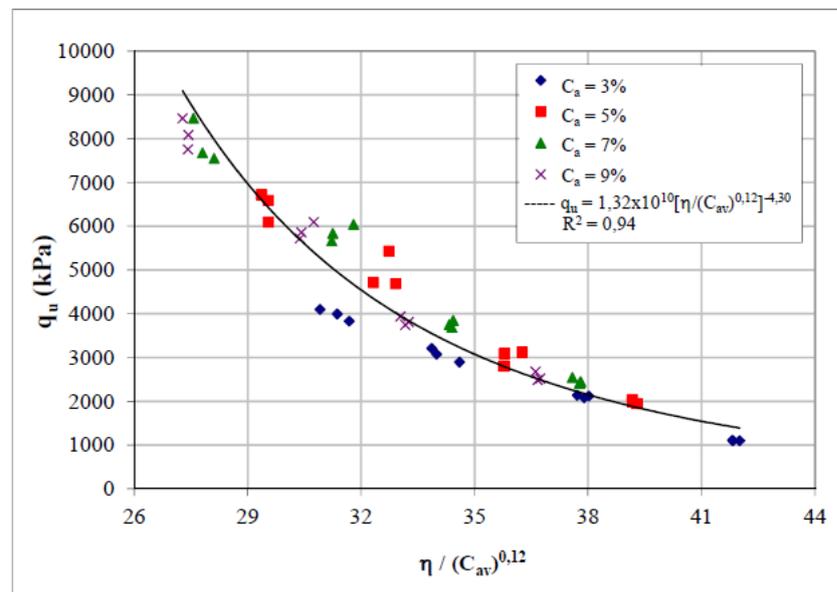
Fonte: Lopes Junior (2011).

Figura 2 - Resistência à compressão simples x relação vazios/ cal ajustados do SRAB -25%RBR-CAL (90 dias de cura)



Fonte: Lopes Junior (2011).

Figura 3 - Resistência à compressão simples x relação vazios/ cal ajustados do SRAB -25%CV-CAL (90 dias de cura)

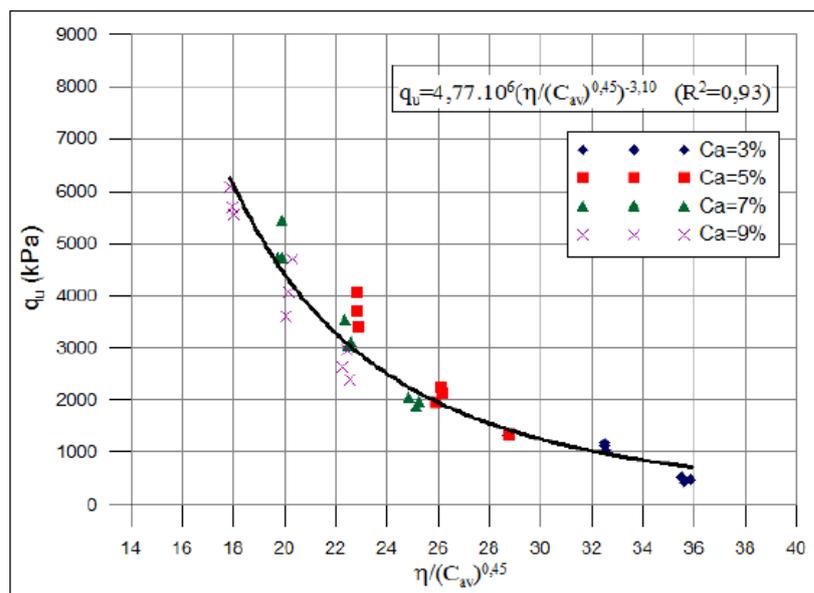


Fonte: Lopes Junior (2011).

Johann (2013) estudou um solo siltoso tratado com cal e observou que ao aumentar o teor de cal de 3% para 9% a resistência à compressão simples aumentou linearmente com o aumento da quantidade de cal; que, ao reduzir a porosidade do material, a resistência à compressão simples aumenta

exponencialmente devido à aproximação das partículas de solo que favorece a ação da cal e à capacidade de distribuição de tensões e mobilização do atrito interno; e que o teor de umidade altera a resistência à compressão simples influenciando no processo de hidratação da cal, sugerindo que as maiores resistências são obtidas no lado seco da curva de compactação. Definiu como parâmetro eficaz de estimativa da resistência à compressão e de controle de execução de camada tratada com cal a relação  $[\eta/(C_{av})^{0,45}]$  (Figura 4).

Figura 4 - Resistência à compressão simples x relação vazio/ cal expresso em termos da porosidade e teor volumétrico da cal para amostras de caulim-cal com 20% de umidade e 90 dias de cura



Fonte: Johann (2013).

Dessa forma, os autores definem a relação porosidade/ teor volumétrico de agente cimentante como instrumento de controle ao atendimento da resistência e da deformabilidade requerida em projeto por meio da escolha da quantidade de cal e da energia de compactação. Ou seja, para obter a resistência de projeto, é possível atingir a relação porosidade/ teor volumétrico de agente cimentante balanceando o efeito da compacidade da mistura e da ação do agente cimentante.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os materiais empregados nesta pesquisa, bem como a descrição dos ensaios e equipamentos que foram utilizados na condução do programa experimental.

A fim de cumprir com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico de uma mistura de solo laterítico e RCD, com e sem adição de cal, foram realizados ensaios de Compressão Simples para diferentes combinações de solo, resíduo e cal. Para tanto, foram utilizados solo, RCD, cal e água destilada. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Rochas (bloco E) e Laboratório de Ensaio Mecânicos do departamento de Engenharia de Materiais (bloco L), da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Na sequência está apresentado um fluxograma (Figura 5) das atividades realizadas para cumprir com o objetivo da pesquisa.

Figura 5 - Metodologia e estratégia de ação



Fonte: A autora (2022).

### 3.1 MATERIAIS

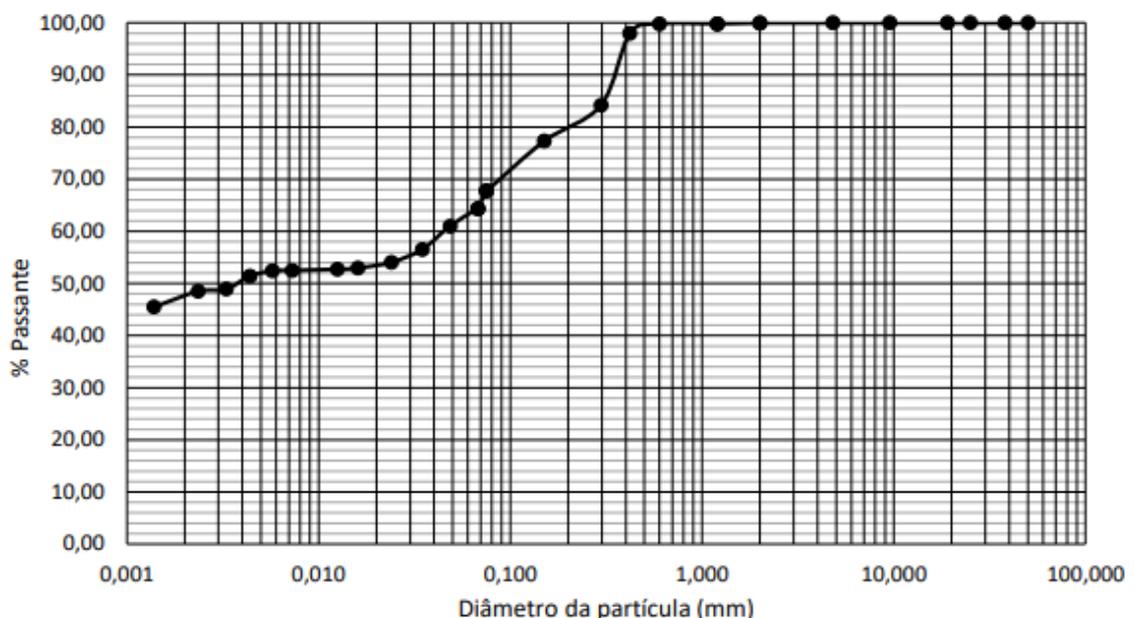
#### 3.1.1 Solo

A amostra de solo estudada foi coletada no Campo Experimental Geotécnico da Universidade Estadual de Ponta Grossa (CEEG-PG), localizado na cidade de Ponta Grossa, estado do Paraná, Brasil.

Tonus, *et al.* (2022); Tonus, *et al.* (2020); Anibele, *et al.* (2020); e Pereira e Vargas (2019) descreveram as características físicas, mineralógicas, térmicas e mecânicas do solo do Campo Experimental, e os dados compreendidos nos estudos serviram como parâmetros para a realização dos ensaios propostos pela pesquisa.

O Campo possui 11419 m<sup>2</sup> de área e é composto por uma camada de aproximadamente 12 metros de solo argilo-arenoso laterítico sobre uma camada de areia siltosa, decorrente da formação geológica da região (TONUS, *et al.*, 2022). A curva granulométrica do solo estudado (Figura 6) mostra que cerca de 50% da sua composição são grãos de argila e cerca de 30% grãos de silte (ANIBELE, 2020; PEREIRA e VARGAS, 2019).

Figura 6 - Curva granulométrica do solo



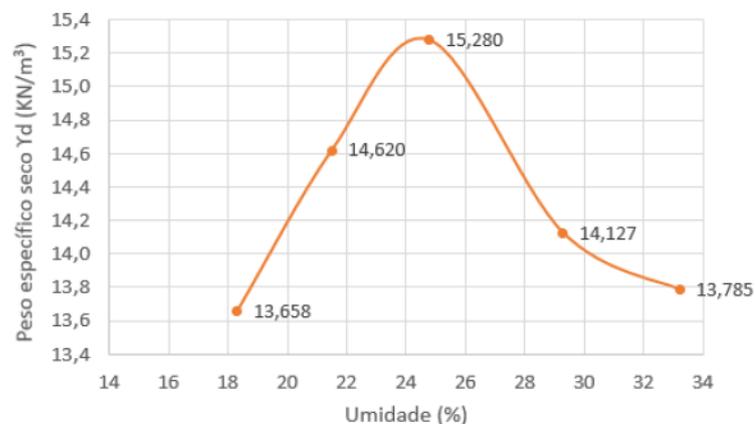
Fonte: Anibele (2019).

O solo possui uma densidade real dos grãos de 2,669, limite de liquidez de 37% e comportamento não plástico, devido ao IP nulo (ANIBELE, 2020). De acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) é caracterizado como

silte de baixa plasticidade, com o método das pastilhas como solo argiloso laterítico (TONUS, *et al.*, 2020) e com a NBR 7181 (ABNT, 1984) como solo argilo-siltoso (PEREIRA e VARGAS, 2019).

Balizada pelas normas NBR 7182/86 ou DNER-ME 162/94, a curva de compactação do solo (Figura 7) define 15,280kN/m<sup>3</sup> como peso específico aparente seco máximo e 24,3% como umidade ótima de compactação do solo (PEREIRA e VARGAS, 2019).

Figura 7 - Curva de compactação do solo



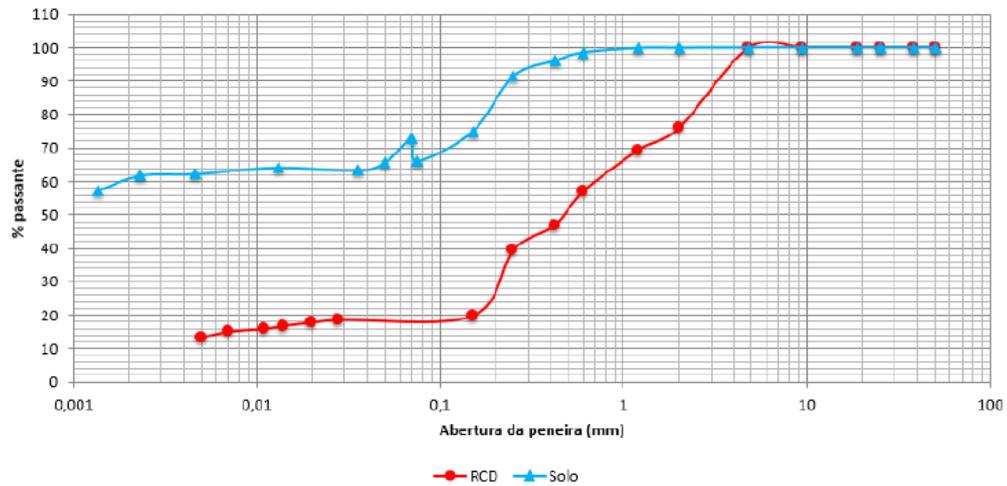
Fonte: Pereira e Vargas (2019).

### 3.1.2 RCD

O RCD utilizado no trabalho foi coletado na cooperativa Cooperconcre, localizada no Distrito Industrial de Ponta Grossa. É originado de obras da cidade e sua composição é formada principalmente por argamassas e concretos, materiais classificados em Classe A - reutilizáveis ou reciclados como agregados – pela Resolução CONAMA nº 307. O material passa pelo processo de beneficiamento e é comercializado pela empresa.

O RCD possui uma densidade real dos grãos de 2,533, composição granulométrica predominante de cerca de 40% areia grossa e 30% silte (Figura 8) e é classificado de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984) como solo arenoso (PEREIRA e VARGAS, 2019). A distribuição granulométrica de solo representada no gráfico da Figura 8 corresponde, também, ao solo utilizado nessa pesquisa; no entanto foi escolhida a representação de Anibeles (2020) para ilustrar a curva granulométrica do solo anteriormente, pois está visualmente melhor representada.

Figura 8 - Curva granulométrica do RCD



Fonte: Pereira e Vargas (2019).

A granulometria do resíduo foi selecionada em passante na peneira nº4 (4,76mm) para que não diferisse consideravelmente da granulometria do solo, respeitasse o tamanho máximo aconselhável para o tamanho do molde tripartido e fosse aproveitado em quase a totalidade da maneira que é comercializado, ou seja, após o processo de britagem.

### 3.1.3 Cal

A cal utilizada no trabalho é do tipo hidratada dolomítica, variedade RendiMax da empresa Calponta Aglomerantes. A caracterização da cal e o boletim de análise foram fornecidos pelo fabricante (Anexo A) e comparados com as exigências da NBR 7175.

Figura 9 - Cal hidratada III



Fonte: A autora (2022).

O peso específico da cal foi determinado baseado em ensaio de massa específica do cimento Portland e outros materiais em pó, instruído pela norma NBR 16605 (ABNT, 2017). A norma indica o uso de líquidos não reagentes com o agente cimentante, no caso do cimento usa-se o querosene; para a cal foi utilizado água, visto que não reage na presença da mesma. Para uma massa de 50g de cal, foi observado um acréscimo de 19,4cm<sup>3</sup> ao volume de água; dessa forma fica definido que massa específica da cal é de 2,577g/cm<sup>3</sup> e o peso específico aparente seco 2,627gf/cm<sup>3</sup>. Esse valor foi utilizado em cálculos para determinação da porosidade dos corpos de prova.

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Ensaio de Compactação

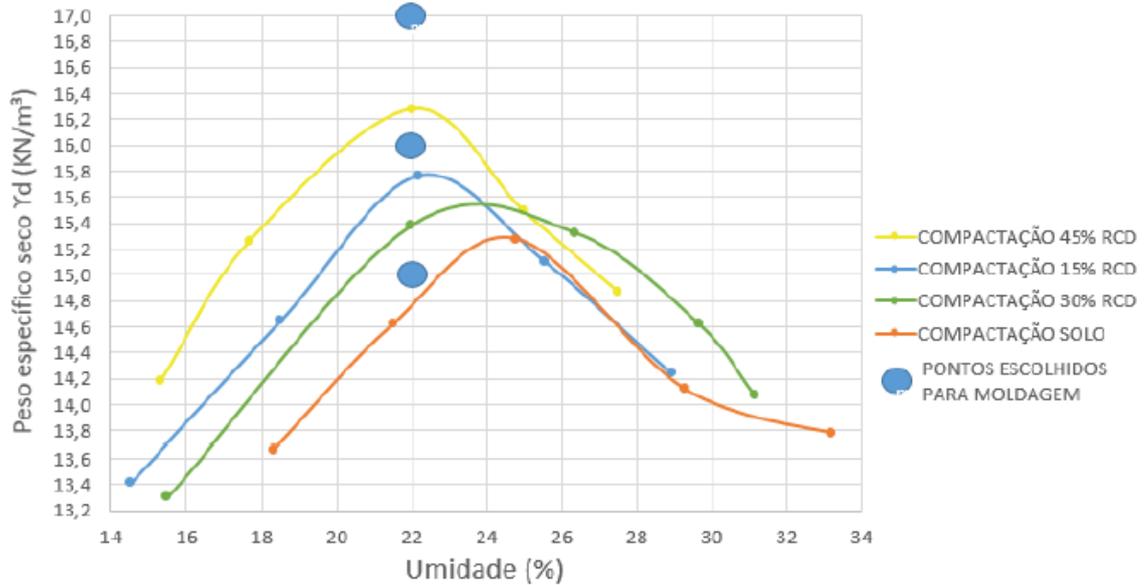
O Ensaio de Compactação, conforme a norma ABNT NBR 7182/2016, modelo de Proctor Normal, consiste na compactação de uma amostra de solo em molde cilíndrico de 1000 cm<sup>3</sup>, em três camadas, com a aplicação de 26 golpes com altura de queda de 30,5 cm e cilindro de 2,5 kg em cada camada. O teor de umidade do ensaio deve ser variado em pelo menos cinco porcentagens distintas ( $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ ,  $h_4$  e  $h_5$ ) para a plotagem da curva de compactação. Por meio do ensaio, é possível analisar a relação entre o teor de umidade ( $h$ ) e o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de um solo para determinada energia de compactação e, assim, determinar o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ ) e a umidade ótima ( $h_{ot}$ ) do solo ou mistura.

Pereira e Vargas (2019) realizaram o Ensaio de Compactação seguindo a norma apresentada e utilizando amostras do solo do CEEG-PG e mais três amostras com substituição parcial da massa de solo por RCD em 15%, 30% e 45%, baseando-se em literaturas sobre o assunto. O solo e o RCD utilizado pelos autores são os mesmo estudados nessa pesquisa, dessa forma, os resultados obtidos no Ensaio de Compactação foram replicados e fundamentaram as próximas etapas do programa experimental.

As curvas de compactação obtidas por Pereira e Vargas (2019) para a amostra de solo e as amostras de solo + RCD (15%, 30% e 45%) (Figura 10) definiram os pontos de peso específico aparente seco (15kN/m<sup>3</sup>, 16kN/m<sup>3</sup> e

17kN/m<sup>3</sup>) e o ponto de umidade ótima (22%) que serviram de parâmetros de moldagem para os autores.

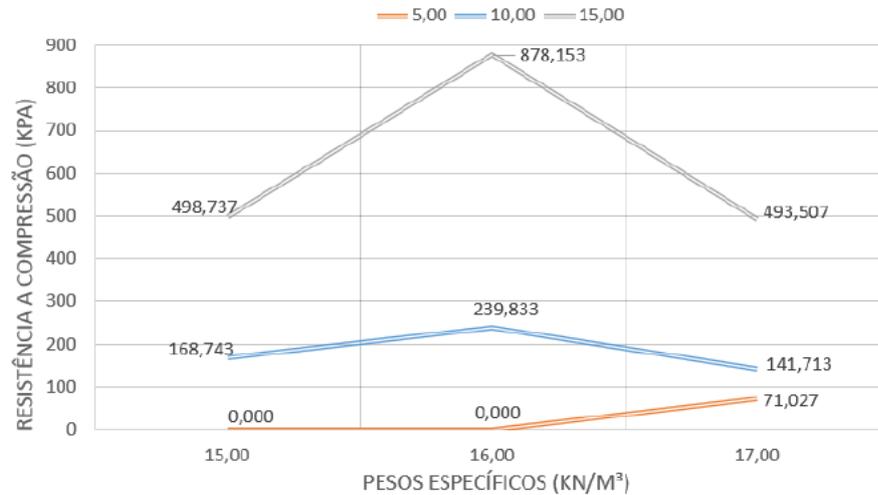
Figura 10 - Curvas de compactação - Pereira e Vargas (2019)



Fonte: Pereira e Vargas (2019).

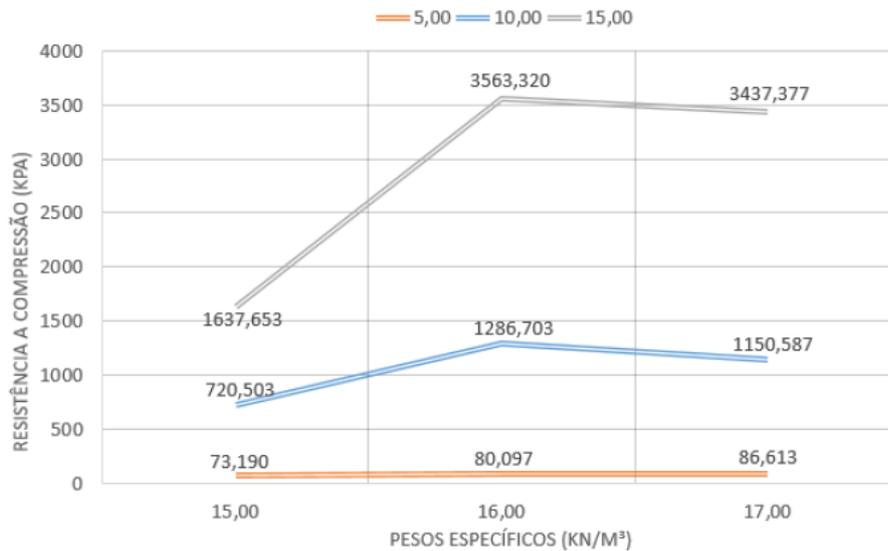
Analisando os resultados dos demais ensaios que realizaram a partir dos valores definidos, o valor de 22% de umidade ótima foi mantido para balizar a presente pesquisa e os valores de pesos específicos aparentes secos alterados para 15,5kN/m<sup>3</sup>, 16kN/m<sup>3</sup> e 16,5kN/m<sup>3</sup>, visto que, houve aumento da resistência à compressão simples com o aumento do valor de peso específico de 15kN/m<sup>3</sup> para 16kN/m<sup>3</sup> e que houve redução da resistência à compressão simples para o aumento de 16kN/m<sup>3</sup> para 17kN/m<sup>3</sup> (Figura 11 e 12), para misturas solo-cimento e solo-cimento + RCD. O aumento do peso específico em associação aos teores de cimento não resultou em ganhos de resistência para as amostras estudadas por eles pois a água disponível nos vazios das amostras mais compactas não foi suficiente para que as reações de hidratação do cimento se procedessem de forma satisfatória, pois devido à alta compactidade (acima do  $\gamma_d$  máx), houve perda de água no processo de compactação estática da moldagem. A redução da resistência à compressão não é desejada como resultado da pesquisa, além de que para atingir maiores valores de pesos específicos são necessários maior energia de compactação e volume de materiais na composição da mistura.

Figura 11 - Influência do peso específico aparente seco nas misturas solo-cimento - Pereira e Vargas (2019)



Fonte: Pereira e Vargas (2019).

Figura 12 - Influência do peso específico aparente seco nas misturas solo-cimento + RCD - Pereira e Vargas (2019)



Fonte: Pereira e Vargas (2019).

Comparando os teores de 15%, 30% e 45% de substituição em massa de solo por RCD, foi notado o aumento do peso específico aparente seco das misturas com o acréscimo do teor de RCD, porém sem que o comportamento das misturas se diferissem consideravelmente do comportamento do solo puro; sendo definida a porcentagem de 45% como parâmetro de moldagem. Os autores concluíram, também, que a substituição de 45% de solo por RCD melhorou a trabalhabilidade das misturas durante a moldagem dos corpos de prova e conferiu um aumento de

resistência à compressão simples em relação à mistura de solo + cimento (PEREIRA e VARGAS, 2019). Para a presente pesquisa foi mantido o teor de 45% de RCD para balizar os ensaios, visto que apresentou resultados satisfatórios quando aplicado em pesquisa semelhante.

Portanto, para balizar a moldagem dos corpos de prova cilíndricos ensaiados à Compressão Simples, foram adotados os valores de peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de 15,5kN/m<sup>3</sup>, 16kN/m<sup>3</sup> e 16,5kN/m<sup>3</sup>, teor de umidade constante de 22% e teor de resíduo de 45% para compor as misturas solo + RCD e solo + RCD + cal (Tabela 1).

Tabela 1 - Ensaio de Compactação: definição de valores para ensaio à Compressão Simples

Umidade ótima ( $h_{ot}$ )	22%
Peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ )	15,5kN/m <sup>3</sup>
	16kN/m <sup>3</sup>
	16,5kN/m <sup>3</sup>
Teor de RCD	45%

Fonte: A autora (2022).

### 3.2.2 Ensaio de Compressão Simples

O Ensaio de Compressão Simples foi realizado conforme a norma ABNT NBR 12770/2022. Este consiste na determinação da resistência à compressão (RCS), não confinada/ simples, de corpos de prova de solos coesivos, por meio da aplicação de carga axial com controle de deformação. Os corpos de prova devem ser cilíndricos, com diâmetro 5cm e altura 10cm.

O equipamento utilizado para a realização do ensaio foi a máquina universal de ensaio mecânicos, marca Shimadzu Autograph AG-I, com célula de carga fracionada (fração mínima de 100N) e capacidade máxima de 10kN (Figura 13). O ensaio foi realizado adotando taxa de deformação de 2mm/min.

Figura 13 - Shimadzu Autograph AG-I



Fonte: A autora (2022).

Definidos os três valores de peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) e teor de RCD adotados após a análise do Ensaio de Compactação de Pereira e Vargas (2019), foram moldados corpos de prova balizados por esses valores para ensaiar à compressão simples (Tabela 2). O rompimento dos CPs solo e solo + RCD foram feitos imediatamente após a moldagem.

Também, foram moldados corpos de prova com adição de cal nos teores de 3%, 5% e 7%. Os teores de cal foram definidos baseados em literaturas sobre o assunto. Johann (2013) concluiu em estudo de solo siltoso tratado com cal, que a adição de teores baixos de cal ao solo é suficiente para aumentar a resistência e rigidez inicial do solo. Nesse estudo os teores de cal variaram de 3% a 9% e apresentaram aumento simultâneo ao teor de cal adicionado quanto às resistências à compressão simples, tração e rigidez inicial. O rompimento dos CPs solo + cal e solo + RCD + cal foram feitos 28 dias após a moldagem.

Tabela 2 - Planejamento do Ensaio de Compressão Simples

<b>Solo (%)</b>	<b>RCD (%)</b>	<b>Cal (%)</b>	<b><math>\gamma_d</math></b>	<b>n° CP's</b>
100	0	0	15,5; 16; 16,5	9
55	45	0		9
55	45	3		9
55	45	5		9
55	45	7		9
			<b>Total</b>	<b>45</b>

Fonte: A autora (2022).

Após a moldagem dos corpos de prova, estes foram isolados hermeticamente e em temperatura estável (caixa térmica) para que não houvesse perda de umidade no período de cura da cal. A análise do comportamento mecânico desse modelo de cura será apresentada no capítulo seguinte, contudo, não apresentou resultados satisfatórios no primeiro momento e foi decidido testar o modelo de cura ambiente, repetindo a moldagem e ensaio de Compressão Simples para as misturas solo + RCD + cal para os pesos específicos aparentes secos e teores de cal apresentados na tabela a seguir (Tabela 3).

Tabela 3 - Planejamento do Ensaio à Compressão Simples (cura ambiente)

<b>Solo (%)</b>	<b>RCD (%)</b>	<b>Cal (%)</b>	<b><math>\gamma_d</math></b>	<b>n° CP's</b>
55	45	5	16,5	3
55	45	7	15,5	3
55	45	7	16	3
55	45	7	16,5	3
			<b>Total</b>	<b>12</b>

Fonte: A autora (2022).

Seguido da avaliação do comportamento mecânico da mistura de solo laterítico, presente na região de Ponta Grossa – PR, e resíduos de construção e demolição (RCD), com e sem adição de cal, por meio de Compressão Simples, foi analisada a viabilidade da utilização dessa mistura em aplicações geotécnicas.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor reconhecimento das características das misturas realizadas na presente pesquisa, apresenta-se a seguir (Tabela 4) as siglas que nomeiam as misturas e suas descrições. Para cada uma das misturas foram moldados três corpos de prova iguais, seguindo a norma ABNT NBR 12770/2022.

Tabela 4 - Misturas realizadas

Siglas	$\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )	Teores da mistura (%)		
		Solo	RCD	Cal
Sa	15,5	100	0	0
Sb	16	100	0	0
Sc	16,5	100	0	0
SRa	15,5	55	45	0
SRb	16	55	45	0
SRc	16,5	55	45	0
SRC <sub>3%</sub> a	15,5	55	45	3
SRC <sub>3%</sub> b	16	55	45	3
SRC <sub>3%</sub> c	16,5	55	45	3
SRC <sub>5%</sub> a	15,5	55	45	5
SRC <sub>5%</sub> b	16	55	45	5
SRC <sub>5%</sub> c	16,5	55	45	5
SRC <sub>7%</sub> a	15,5	55	45	7
SRC <sub>7%</sub> b	16	55	45	7
SRC <sub>7%</sub> c	16,5	55	45	7

Fonte: A autora (2022).

Também, para melhor entendimento dos resultados, apresenta-se a seguir os problemas enfrentados durante a execução do programa experimental e as decisões tomadas.

1. Não foi possível moldar os três corpos de prova da mistura Sc. A mistura é composta por 100% de solo, 22% de umidade de projeto e peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de 16,5kN/m<sup>3</sup>. Nas tentativas de moldagem o corpo de prova rompeu antes de ser tirado do molde (Figura 14); provavelmente ocorreu devido ao elevado peso específico aparente seco ao qual foi submetido. O mesmo não ocorre para misturas de mesmo  $\gamma_d$  que contém RCD, pois o RCD misturado ao solo promove aumento do valor de  $\gamma_d$  para um mesmo volume (TEIXEIRA, 2019; FERREIRA e

THOMÉ, 2011; SILVA e SILVA, 2020). A mistura Sc foi excluída do programa experimental.

Figura 14 - Moldagem do Corpo de Prova de Sc



Fonte: A autora (2022).

2. Todos os corpos de prova após a moldagem foram mantidos fechados hermeticamente e em temperatura estável (caixa térmica) para que não houvesse perda de umidade no período de cura da cal ou perda de umidade antes do rompimento dos corpos de prova de solo e solo + RCD. 24 horas antes do rompimento, os corpos de prova deveriam ser submersos em água a fim de simular a condição de saturação do solo. As primeiras triplicatas submetidas à saturação foram SRa, SRb, SRc, SRC5%c, SRC7%a, SRC7%b e SRC7%c. As triplicatas de SRa, SRb, SRc desmancharam, não podendo seguir com o ensaio de Compressão Simples para as mesmas (Figura 15). Foram realizadas novamente as moldagens para as misturas de solo + RCD e rompidas sem serem submetidas à saturação; os demais corpos de prova que compõem o programa experimental também foram rompidos sem serem submetidos à saturação.

Figura 15 - Corpos de prova submetidos à saturação



Fonte: A autora (2022).

3. Os resultados de resistência à compressão simples dos primeiros corpos de prova ensaiados (SRC5%c, SRC7%a, SRC7%b e SRC7%c) foram baixos quando comparados com outros trabalhos semelhantes. No momento foi sugerido que a cura hermética a qual os corpos de prova com cal foram submetidos poderia ter impedido a cura completa da cal, pois o endurecimento desse agente cimentante se dá com a reação com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (MATTOS e GONÇALVES, 2019), o qual foi limitado com a vedação. Sendo assim, para essas triplicatas (SRC5%c, SRC7%a, SRC7%b e SRC7%c) foi repetido o processo de moldagem e deixado curar por 28 dias ao ar (não hermético) e em temperatura ambiente e não estável para análise do comportamento.

#### 4.1 ENSAIO À COMPRESSÃO SIMPLES

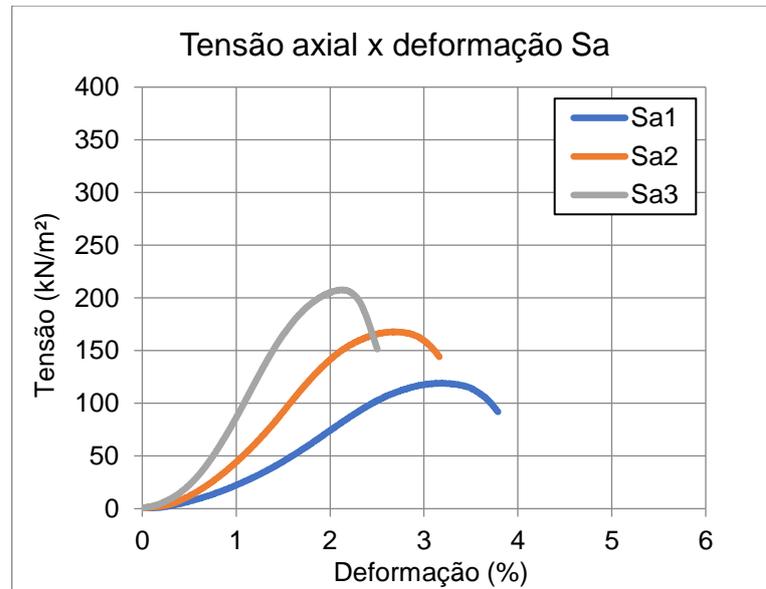
Os dados obtidos após o rompimento dos corpos de prova submetidos à compressão simples possibilitaram, com a plotagem gráfica, a análise da relação tensão axial x deformação. A seguir são apresentados os gráficos de cada mistura, com as três curvas correspondentes à triplicata de corpos de prova ensaiados e para cada tipo de cura, hermética e ambiente; alguns gráficos não possuem as três curvas por processo incorreto de compactação e/ ou extravio do corpo de prova.

Para os resultados, foi observado que, em alguns casos, há dispersão das curvas em funções das variáveis que compreendem os ensaios (umidade relativa do ar, interferência humana, possíveis perdas de massa, variação no processo de cura ou moldagem) no entanto foi considerado que as curvas, ainda assim, representam de maneira aceitável o comportamento do solo, na sua totalidade.

#### 4.1.1 Corpos de prova com cura hermética

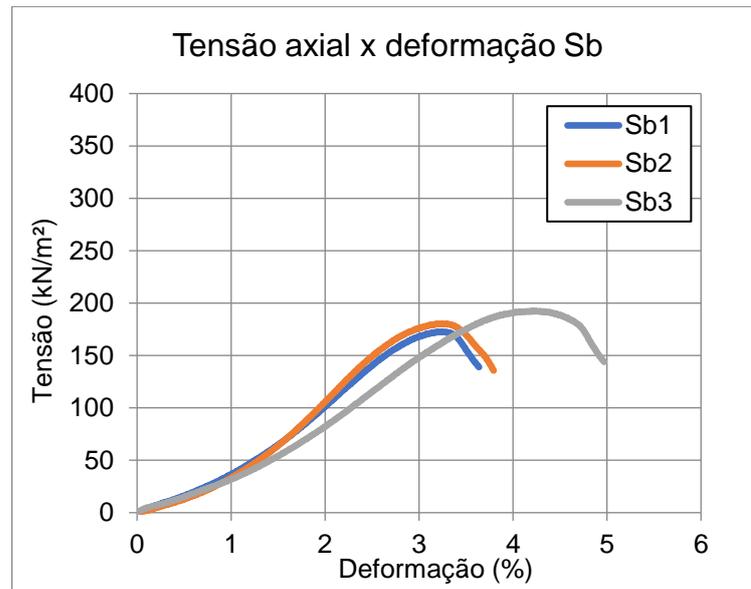
Pode-se observar, comparando as Figuras 16 e 17, as quais correspondem ao gráfico tensão axial x deformação de solo puro para valores de  $\gamma_d$  igual a  $15,5\text{kN/m}^3$  e  $16\text{kN/m}^3$  respectivamente, que o aumento do  $\gamma_d$  apresentou ligeiro aumento da tensão resistente e maior deformação dos corpos de prova.

Figura 16 - Tensão axial x deformação Sa



Fonte: A autora (2022).

Figura 17 - Tensão axial x deformação Sb

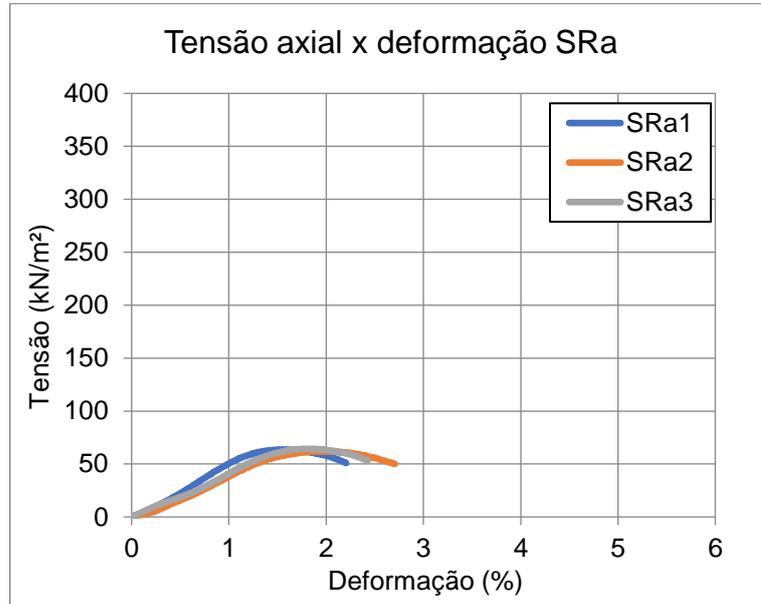


Fonte: A autora (2022).

Analisando as Figuras 18, 19 e 20, as quais correspondem ao gráfico tensão axial x deformação de solo + RCD para valores de  $\gamma_d$  igual a  $15,5\text{kN/m}^3$ ,  $16\text{kN/m}^3$  e  $16,5\text{kN/m}^3$  respectivamente, pode-se observar, da mesma forma que para a compressão de corpos de prova com 100% da composição de solo, que com o aumento do  $\gamma_d$  há aumento da deformação; contudo, não foram identificados ganhos ou perdas significativas de resistência.

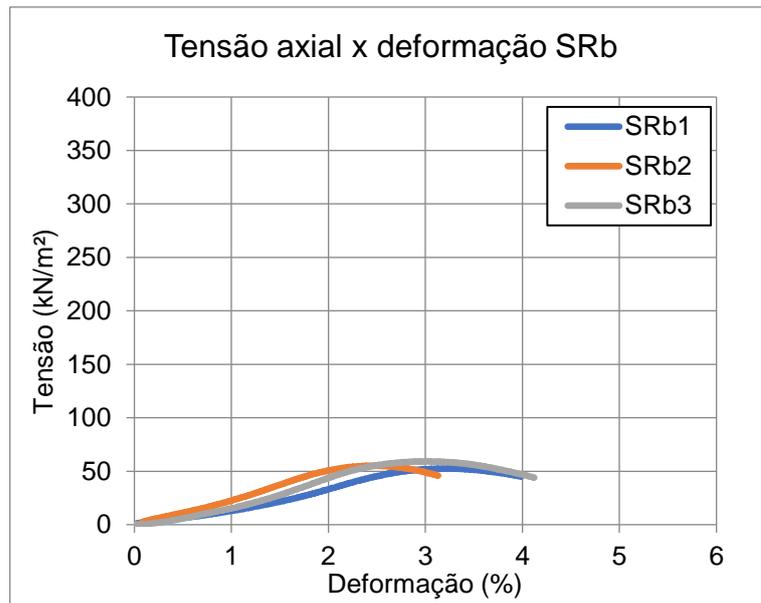
Comparando ainda a relação tensão axial x deformação, para diferentes valores de  $\gamma_d$ , de solo e solo + RCD, pode-se considerar que a adição de RCD ao solo puro resultou na diminuição da resistência à compressão simples.

Figura 18 - Tensão axial x deformação SRa



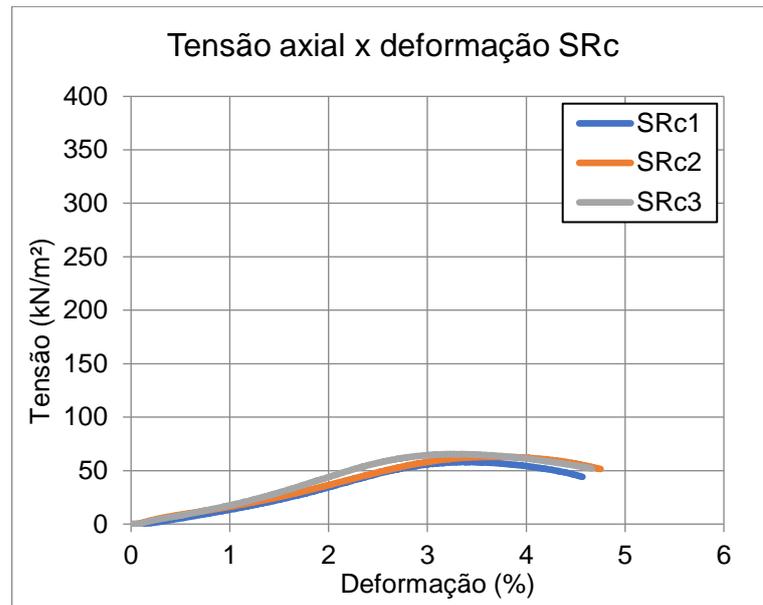
Fonte: A autora (2022).

Figura 19 - Tensão axial x deformação SRb



Fonte: A autora (2022).

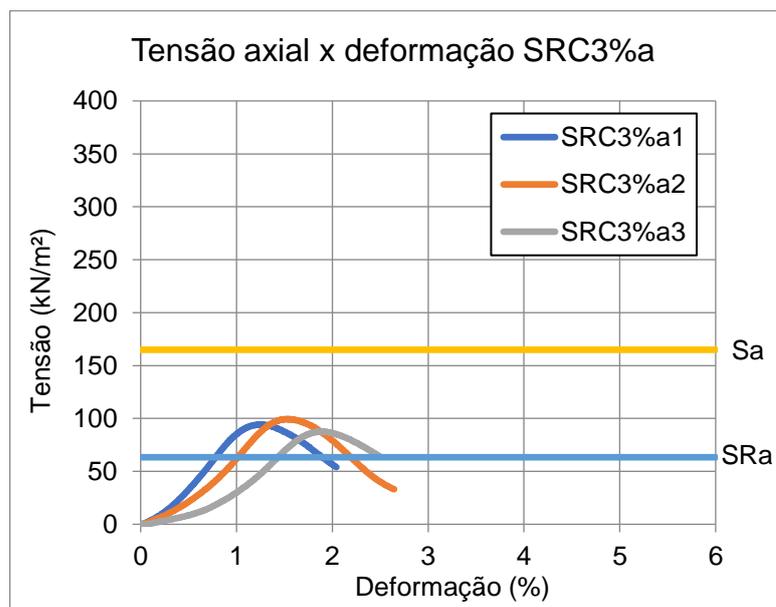
Figura 20 - Tensão axial x deformação SRC



Fonte: A autora (2022).

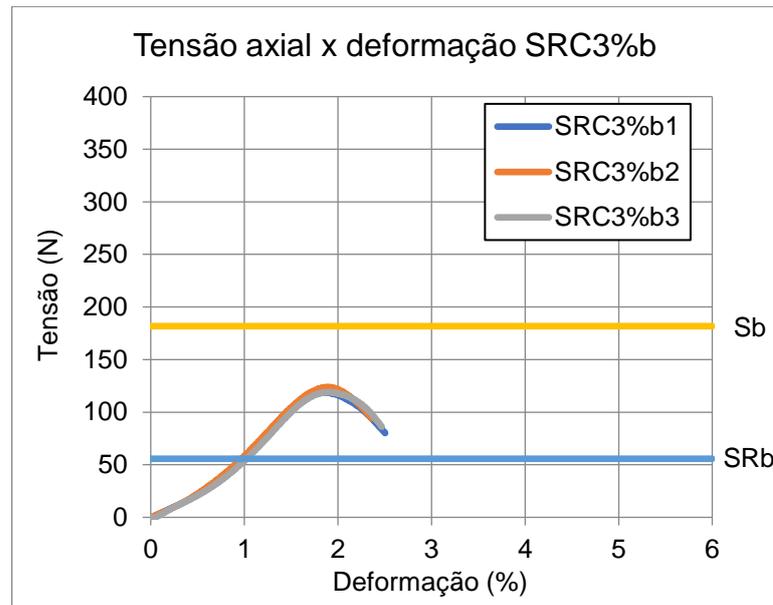
Analisando os gráficos tensão axial x deformação de solo + RCD com a adição de cal, pode-se constatar que, para o acréscimo de 3% de cal à mistura de solo + RCD (Figuras 21, 22 e 23), quanto maior o  $\gamma_d$  maior a resistência à compressão da mistura; que com 3% de cal já há aumento de cerca de 100% de resistência se comparado com a mistura de solo + RCD e que a resistência dessa composição não supera a do solo puro.

Figura 21 - Tensão axial x deformação SRC3%a



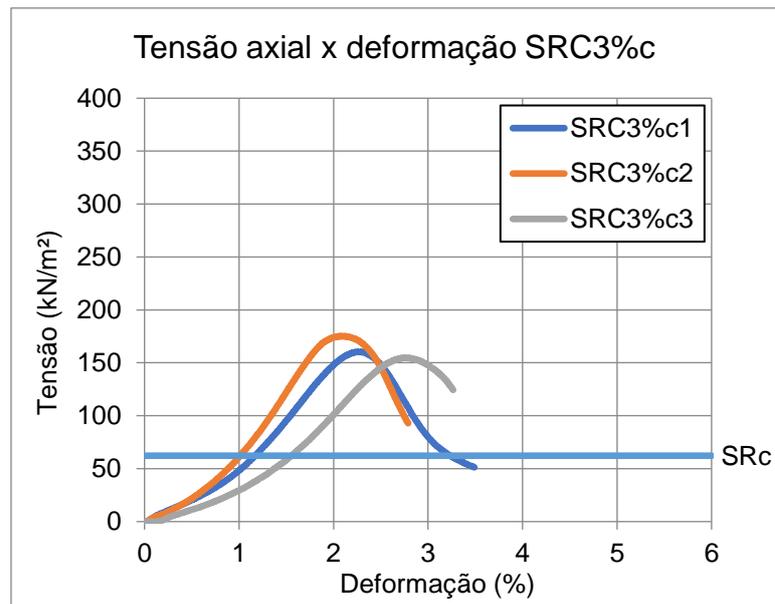
Fonte: A autora (2022).

Figura 22 - Tensão axial x deformação SRC3%b



Fonte: A autora (2022).

Figura 23 - Tensão axial x deformação SRC3%c

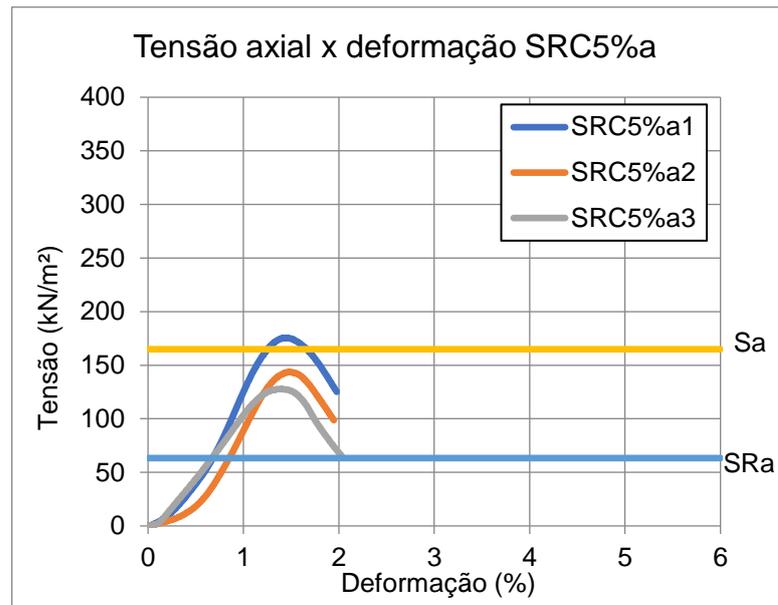


Fonte: A autora (2022).

Para o acréscimo de 5% de cal à mistura de solo + RCD (Figuras 24, 25 e 26), também, pode-se constatar o aumento da resistência à compressão simples com o aumento do  $\gamma_d$ , além de promover um aumento de resistência de até 300% se comparado com a mistura de solo + RCD. Essa composição só supera a resistência do solo puro quando moldada com peso específico aparente seco de  $16\text{kN/m}^3$  (SRC5%b). Os corpos de prova de SRC5%c foram comprometidos quando

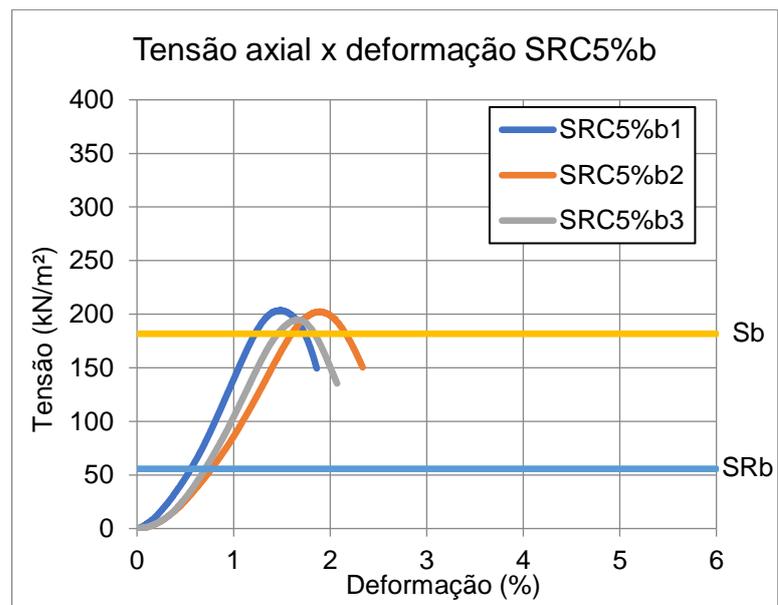
submetidos à saturação, pois estavam em contato direto com os corpos de prova de solo + RCD que dissolveram, o corpo de prova ensaiado não apresentou perda de massa considerável, mas precisou ser retirado solo que estava aderido à sua superfície, dessa forma o gráfico tensão axial x deformação não apresenta resultado confiável para essa configuração de moldagem.

Figura 24 - Tensão axial x deformação SRC5%a



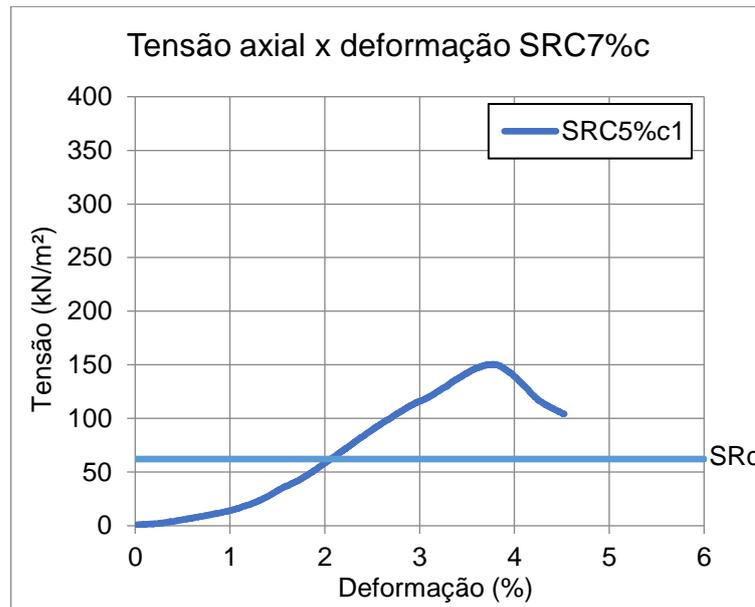
Fonte: A autora (2022).

Figura 25 - Tensão axial x deformação SRC5%b



Fonte: A autora (2022).

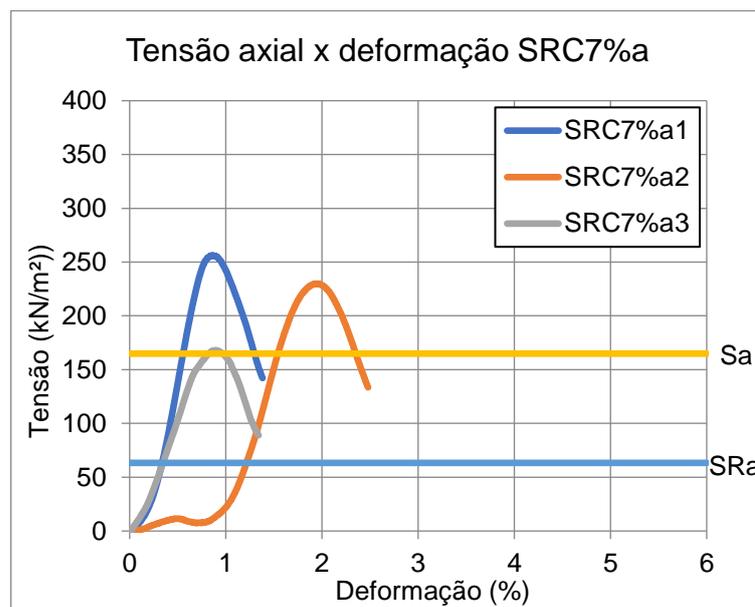
Figura 26 - Tensão axial x deformação SRC5%c



Fonte: A autora (2022).

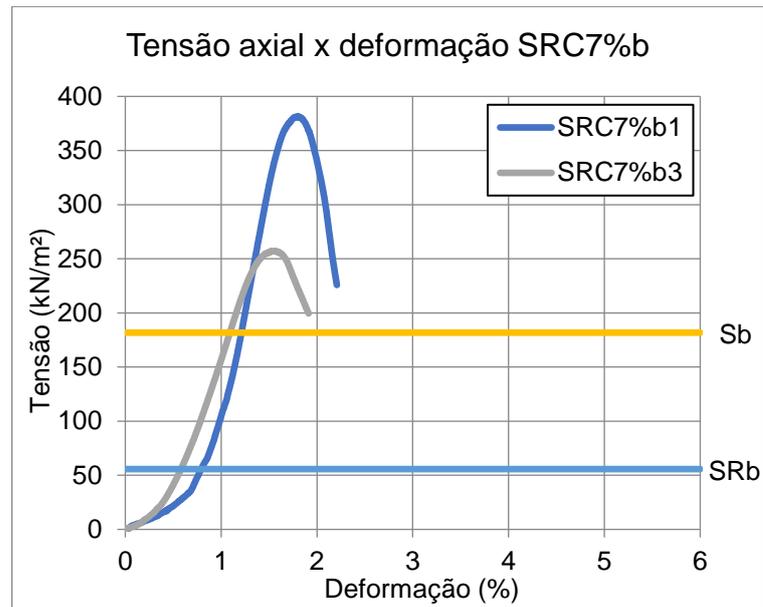
Para o acréscimo de 7% de cal à mistura de solo + RCD (Figuras 27, 28 e 29), pode-se constatar o aumento da resistência à compressão simples com o aumento do  $\gamma_d$  de  $15,5\text{kN/m}^3$  para  $16\text{kN/m}^3$ , como nas demais misturas com cal, contudo há redução da resistência com o aumento de  $16\text{kN/m}^3$  para  $16,5\text{kN/m}^3$ . A adição de 7% de cal promove um aumento de resistência de 300% a 600% se comparado com a mistura de solo + RCD e ultrapassa a resistência do solo puro.

Figura 27 - Tensão axial x deformação SRC7%a



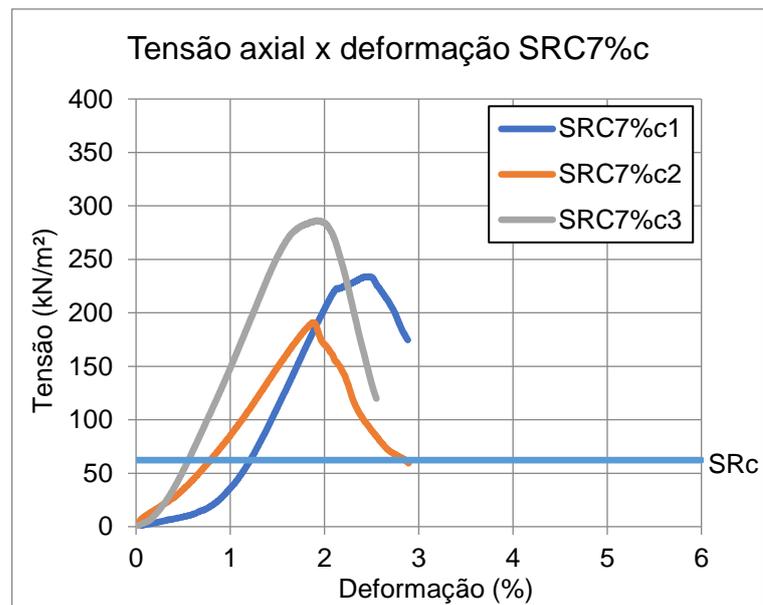
Fonte: A autora (2022).

Figura 28 - Tensão axial x deformação SRC7%b



Fonte: A autora (2022).

Figura 29 - Tensão axial x deformação SRC7%c



Fonte: A autora (2022).

Os corpos de prova que passaram por cura hermética, mas não foram submetidos à saturação nas 24 horas que antecediam o ensaio de Compressão Simples (Sa, Sb, SRa, SRb, SRCc, SRC3%a, SRC3%b, SRC3%a, SRC5%a e SRC5%b) (Figura 30), apresentavam aspecto úmido em função da cura hermética e estabilidade da temperatura durante os 28 dias.

Figura 30 - Corpos de prova após ensaio de Compressão Simples



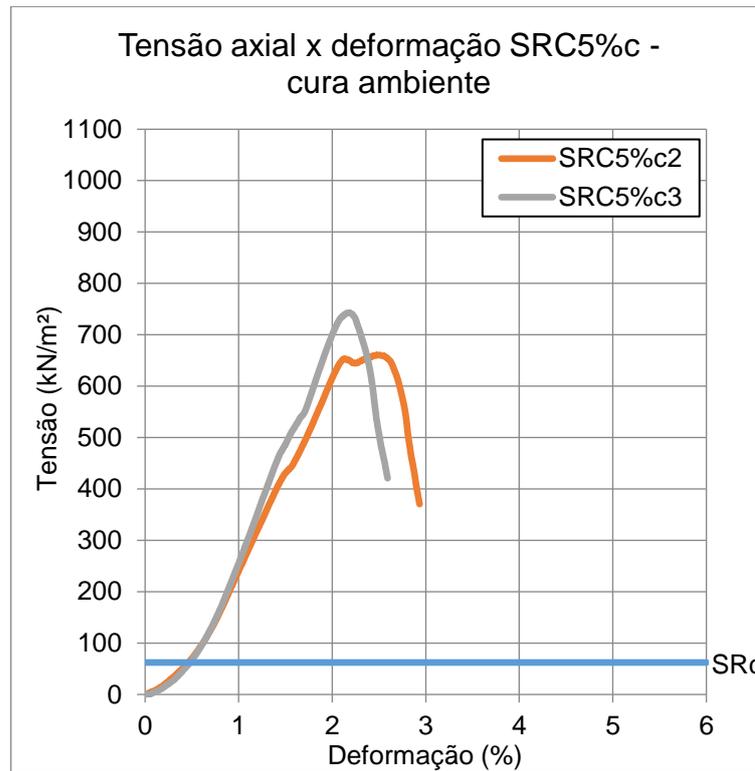
Fonte: A autora (2022).

#### 4.1.2 Corpos de prova com cura ambiente

Supondo que a cura hermética dos corpos de prova moldados com adição de cal poderia ter causado uma ineficiência na aquisição de resistência promovida pela cal (aglomerante aéreo), foram moldadas novamente as misturas correspondentes às triplicatas de SRC5%c, SRC7%a, SRC7%b e SRC7%c. Os gráficos apresentados a seguir possuem valor limite de eixo vertical superior aos gráficos da cura hermética por apresentarem resistências significativamente superiores.

Para a mistura de SRC5%c (Figura 31) foi observado um aumento considerável da resistência à compressão simples com a cura ambiente do corpo de prova; a cura hermética (Figura 26) tinha promovido uma tensão resistente de 150,52kN/m<sup>2</sup>, a cura ambiente promoveu uma tensão resistente média de 701,75kN/m<sup>2</sup>; indicando, dessa forma, o maior potencial de aquisição de resistência nesta modalidade de cura.

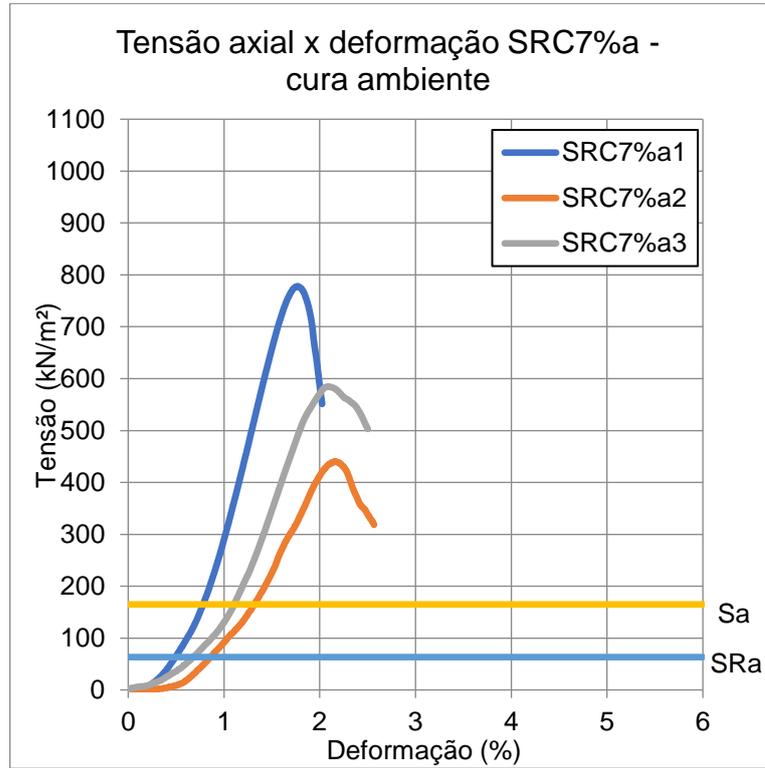
Figura 31 - Tensão axial x deformação SRC5%c - cura ambiente



Fonte: A autora (2022).

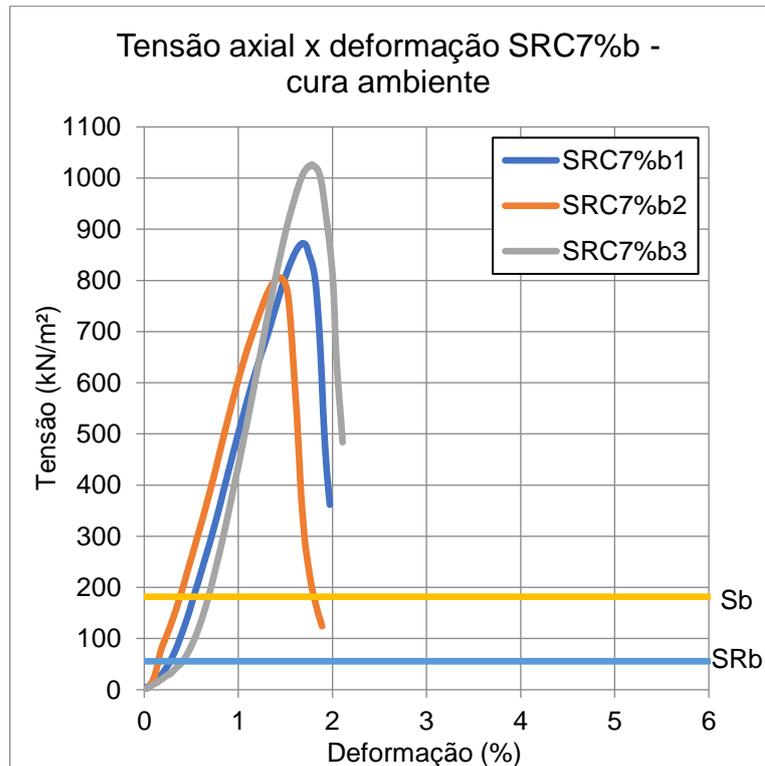
Para as misturas com adição de 7% de cal à mistura de solo + RCD e com cura ambiente, SRC7%a, SRC7%b e SRC7%c (Figuras 32, 33 e 34), também foi observado acréscimo considerável de resistência à compressão, promovendo resistências de até 1025kN/m<sup>2</sup>. Dessa forma, pode-se afirmar que o procedimento de cura hermética, utilizado para misturas com cimento, foi aplicado de maneira equivocada às misturas com cal, a qual tem seu endurecimento promovido pela presença de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Figura 32 - Tensão axial x deformação SRC7%a - cura ambiente



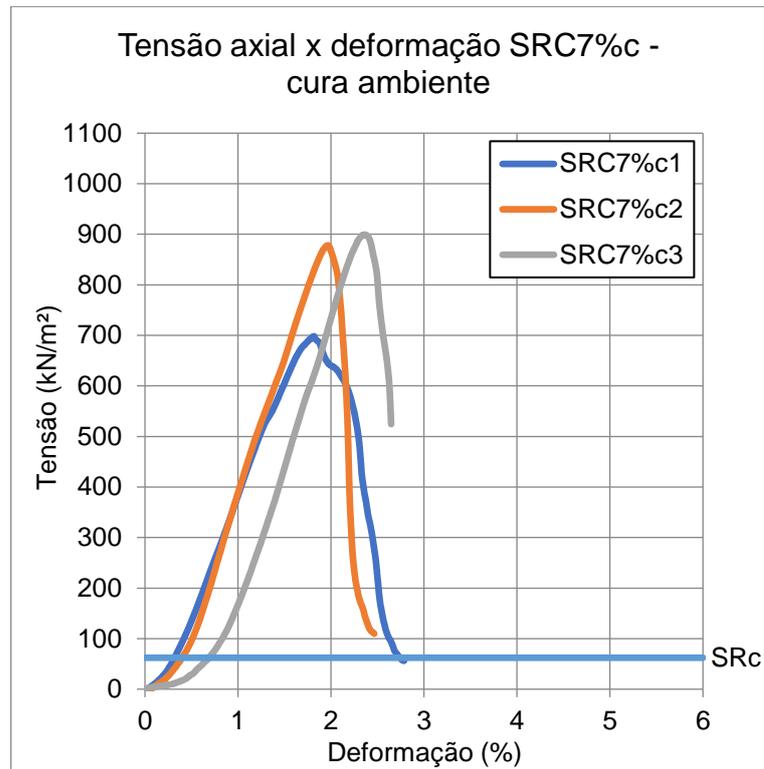
Fonte: A autora (2022).

Figura 33 - Tensão axial x deformação SRC7%b - cura ambiente



Fonte: A autora (2022).

Figura 34 - Tensão axial x deformação SRC7%c - cura ambiente



Fonte: A autora (2022).

Os corpos de prova SRC5%c, SRC7%a, SRC7%b e SRC7%c (Figura 35), os quais passaram por processo de cura ambiente e sem controle de temperatura apresentavam aspecto seco e esbranquiçado após os 28 dias de cura.

Figura 35 - Corpos de prova após ensaio de Compressão Simples – cura ambiente



Fonte: A autora (2022).

### 4.1.3 Comparação do modelo de cura

Foi comprovado com a análise dos gráficos de tensão x deformação apresentados anteriormente que a cura hermética reduziu a possibilidade de acréscimo de tensão resistente que a cal poderia promover aos corpos de prova que passaram por ela. A Tabela 5 mostra uma comparação direta dos valores médios de tensão resistente que foram obtidos nos ensaios com cura hermética e cura ambiente. A cura ambiente atingiu valores, em média, 3,5 vezes maiores de resistência que a cura hermética.

Tabela 5 - Comparação do modelo de cura

Tensão resistente (kN/m <sup>2</sup> )			
	Cura hermética	Cura ambiente	Aumento da resistência (%)
SRC <sub>5%</sub> C	150,52	701,75	466,2
SRC <sub>7%</sub> a	218,05	600,84	275,0
SRC <sub>7%</sub> b	319,74	901,33	281,9
SRC <sub>7%</sub> C	236,97	825,15	348,2

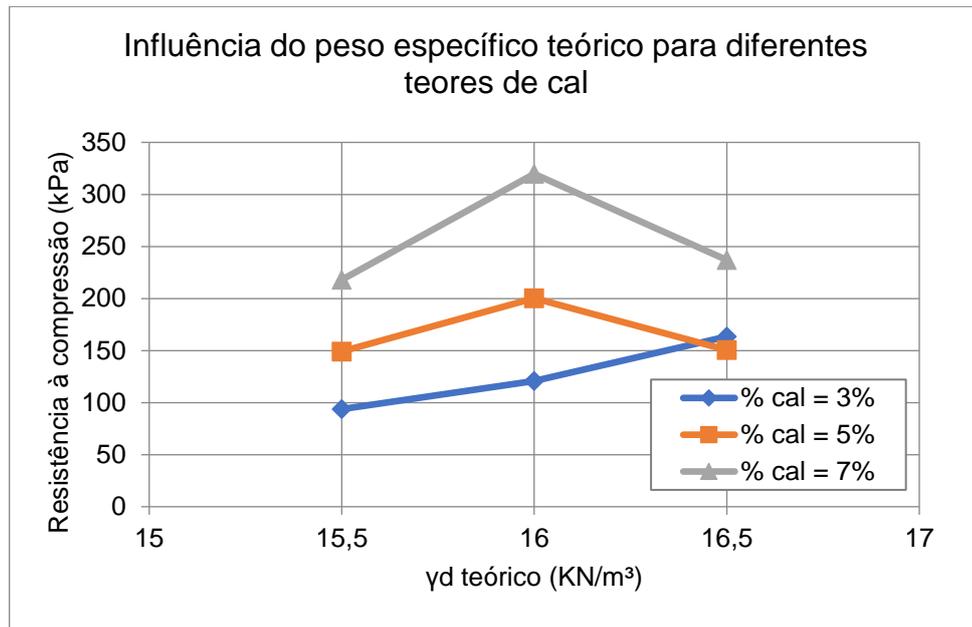
Fonte: A autora (2022).

## 4.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

### 4.2.1 Influência do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ )

A Figura 36 evidencia a influência do peso específico teórico para os diferentes teores de cal determinados em projeto. Pode-se perceber que o comportamento se distorce para o valor de  $\gamma_d$  de 16,5kN/m<sup>3</sup>, promovendo redução da resistência à compressão e indicando que a cal não está sendo efetiva para grandes densidades, possivelmente pela pouca disponibilidade de ar devido ao menor volume de vazios.

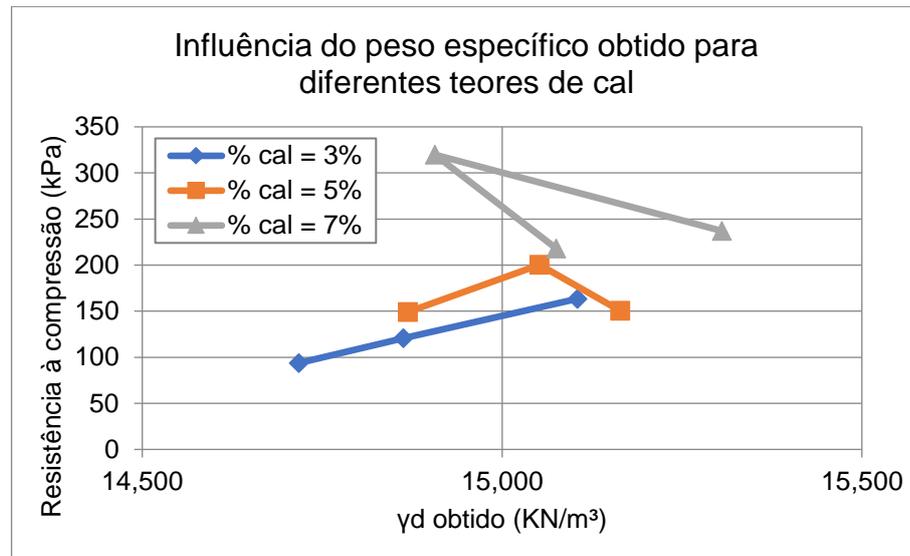
Figura 36 - Influência do peso específico teórico para diferentes teores de cal



Fonte: A autora (2022).

Após a realização da moldagem dos corpos de prova e cálculos de umidade, peso seco e volume real, foi definido o  $\gamma_d$  real ou “obtido” dos corpos de prova; foi verificado valores menores que os teóricos (Anexo B), ou seja,  $\gamma_d$  real ou “obtido” de projeto; isso se deu provavelmente em função da umidade natural do solo (quantidade de água natural que o solo possui) a qual não foi subtraída do volume de água de projeto para atingir a umidade ótima de 22%; dessa forma, a água pode ter ocupado o espaço de outros materiais e reduzido o peso específico do corpo de prova. O valor médio de umidade natural do solo é de 4,3%. Observando a influência do peso específico obtido para diferentes teores de cal (Figura 37), pode-se perceber que para o teor de 3% de cal há aumento linear da resistência à compressão à medida que aumenta o  $\gamma_d$ ; para o teor de cal de 5% o comportamento se distorce para o valor de  $\gamma_d$  de 16,5kN/m³; e para o teor de 7% o comportamento se distorce para o valor de  $\gamma_d$  de 15,5kN/m³ e 16,5kN/m³, apresentando maior resistência à compressão para  $\gamma_d$  igual a 16kN/m³.

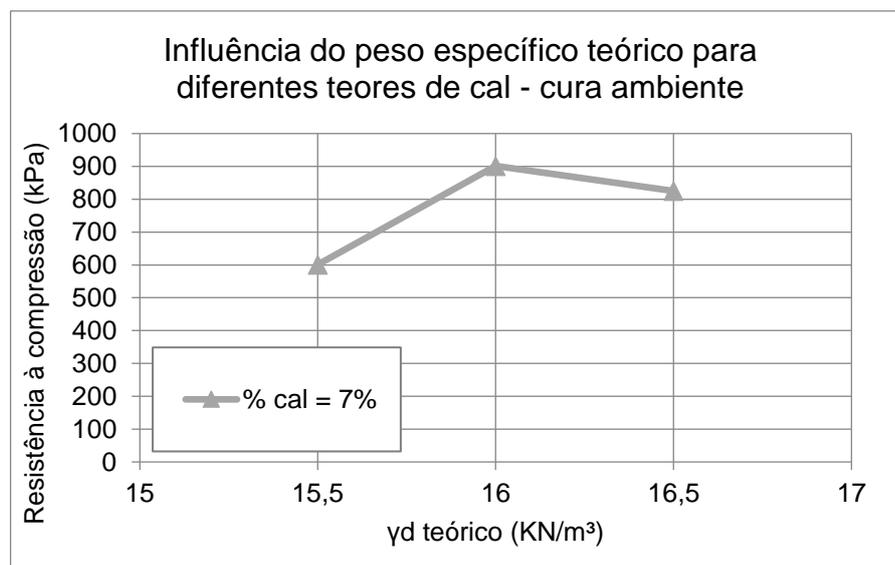
Figura 37 - Influência do peso específico obtido para diferentes teores de cal



Fonte: A autora (2022).

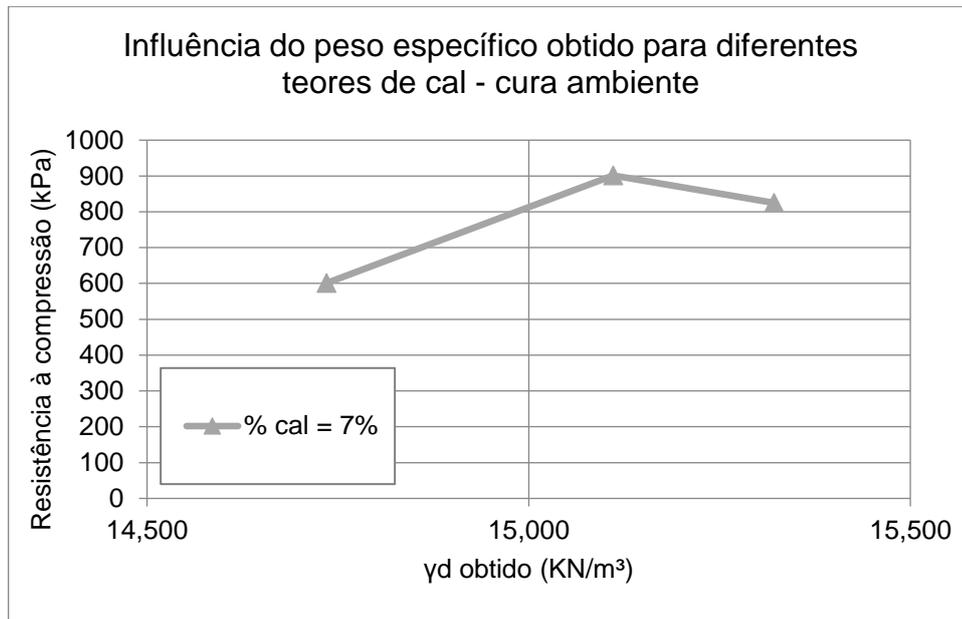
Esperava-se que o comportamento de menores resistências para maiores valores de  $\gamma_d$  não se repetisse para as amostras com cura ambiente (Figuras 38 e 39), considerando que estas teriam disponibilidade de ar para cura completa e aumento da resistência. Contudo, para o peso específico teórico e para o peso específico obtido houve redução da resistência para o valor de  $\gamma_d$  de 16,5kN/m<sup>3</sup> em cerca de 100kPa, indicando que a pouca disponibilidade de ar, devido ao alto grau de compactação, prejudicou também no caso da cura ao ar a aquisição de resistência devido a cal.

Figura 38 - Influência de peso específico teórico para diferentes teores de cal – cura ambiente



Fonte: A autora (2022).

Figura 39 - Influência do peso específico obtido para diferentes teores de cal - cura ambiente

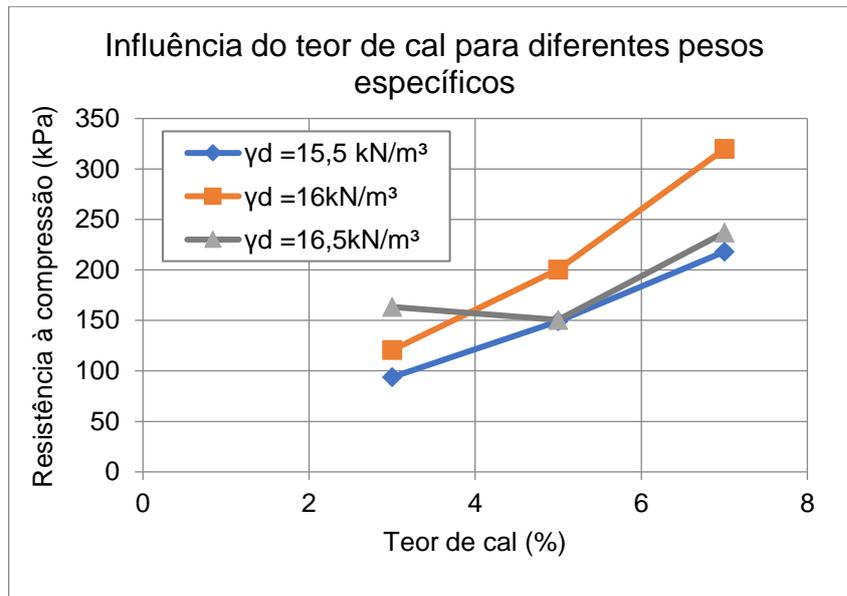


Fonte: A autora (2022).

#### 4.2.2 Influência do teor de cal

Analisando a influência do teor de cal para os diferentes valores de  $\gamma_d$  (Figura 40), pode-se constatar que a cal melhorou a resistência de forma linear nos casos de pesos específicos mais baixos ( $15,5\text{kN/m}^3$  e  $16\text{kN/m}^3$ ), conforme esperado. No peso específico mais alto ( $16,5\text{kN/m}^3$ ), a resistência só foi melhor para o menor teor de cal. Uma possível explicação é que, para o maior  $\gamma_d$ , há menor disponibilidade de ar na amostra (em cura hermética) para que a cal passe pelo processo de cimentação completo e promova resistência ao corpo de prova. A resistência não ter apresentado comportamento crescente linear para os teores de 5% e 7% ( $16,5\text{kN/m}^3$ ) indica que a presença da cal parece ter prejudicado a aquisição de resistência ou que a falta de ar não permitiu a cura adequada da cal.

Figura 40 - Influência do teor de cal para diferentes pesos específicos



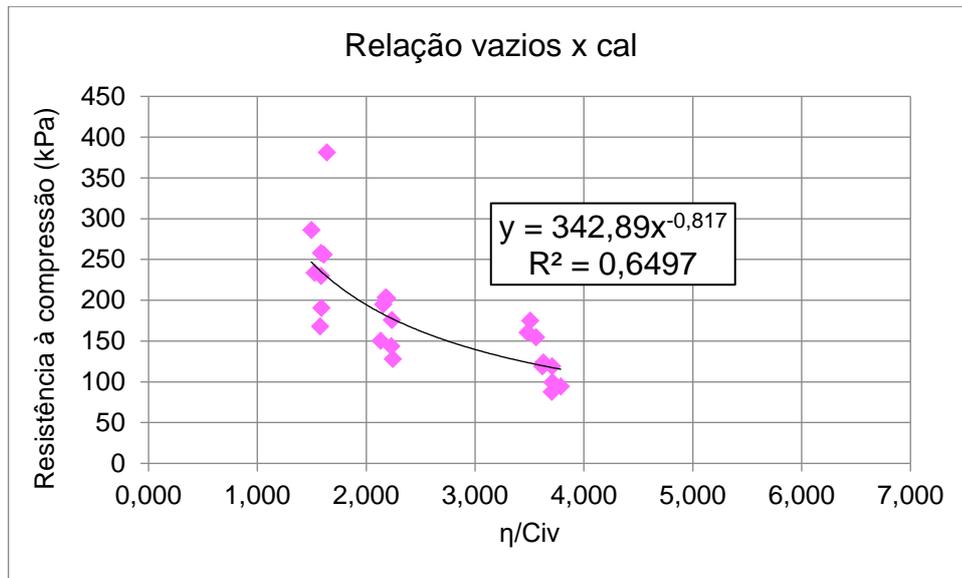
Fonte: A autora (2022).

#### 4.2.3 Influência do volume de vazios x agente cimentante

Os gráficos da relação resistência à compressão simples x vazios/ agente cimentante para cura hermética (Figura 41) e cura ambiente (Figura 43) mostram que com a redução da porosidade, ou seja, quanto menor a relação vazios/ volume de cal, há acréscimo exponencial da resistência à compressão simples. Esse resultado está de acordo com ensaios realizados com cal pelos autores Johann (2020) e Lopes Junior (2011), os quais atestaram que o acréscimo de cal promove o aumento da resistência à compressão simples do solo e que a redução da porosidade, independente do volume de cal adicionado também resulta em maior resistência à compressão simples.

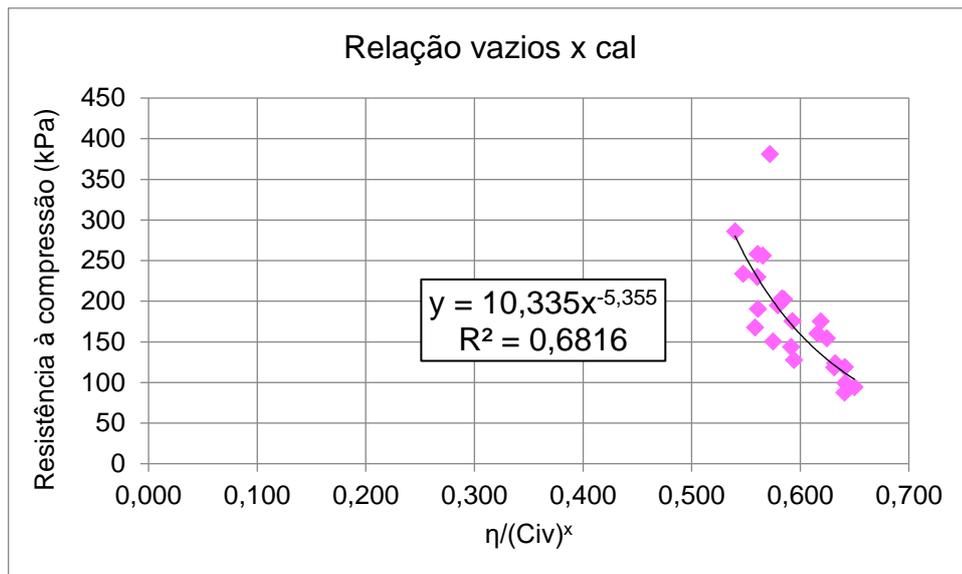
Pesquisas com foco na adição de agentes cimentantes buscam desenvolver equações que atendam às particularidades da mistura estudada e possibilitem um resultado mais fiável da relação resistência à compressão simples x vazios/ agente cimentante baseados na linha de tendência e aproximação do  $R^2$  ao valor inteiro 1. O ajuste da equação  $\eta/Civ$  visando maior valor de  $R^2$ , para cura hermética, resultou na potência 0,177 (Figura 42) e, para cura ambiente, na potência 0,151 (Figura 44); contudo, observa-se que não houve variação considerável do  $R^2$  para o melhor ajuste.

Figura 41 - Relação vazios x cal



Fonte: A autora (2022).

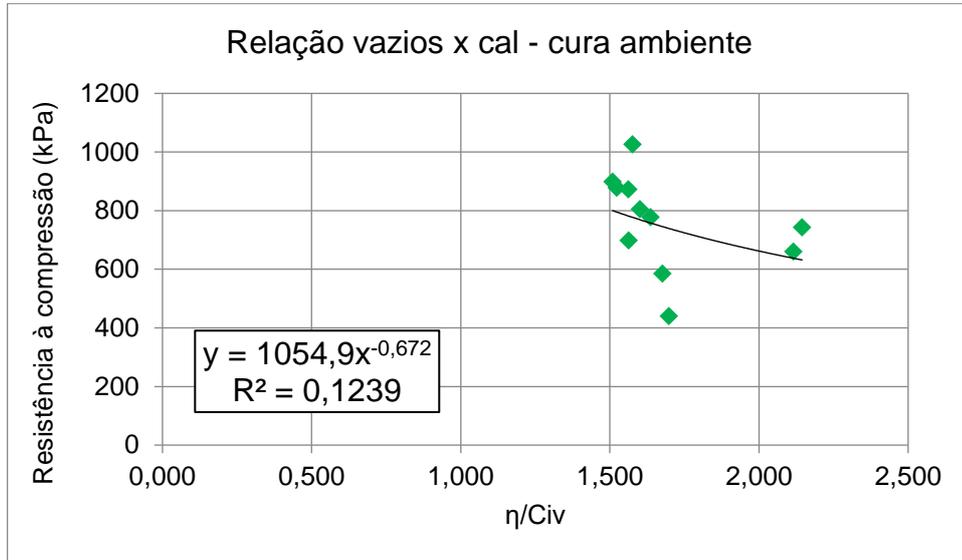
Figura 42 - Relação vazios x cal - expoente x = 0,177



Fonte: A autora (2022).

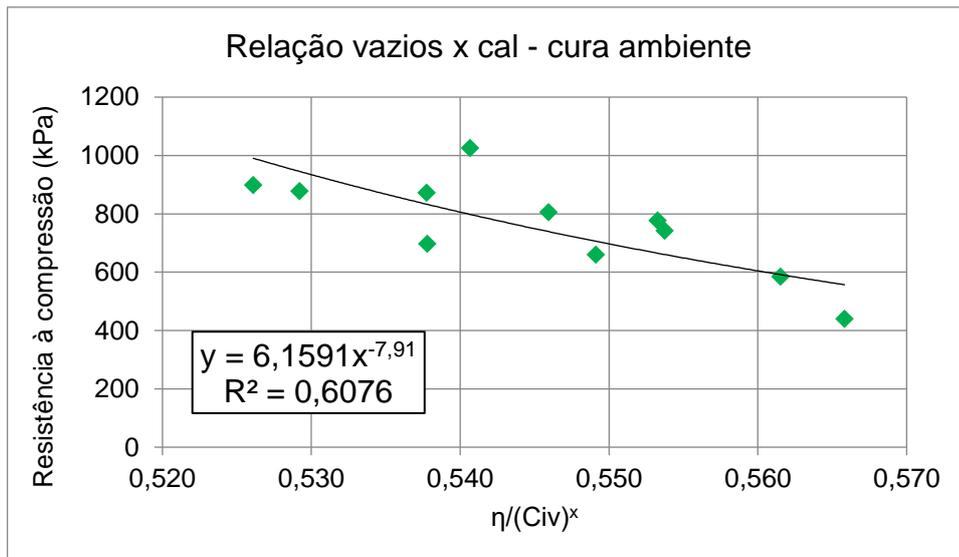
Apesar da obtenção de maiores resistências para a cura ambiente, a dispersão da relação vazios x cal com a resistência a compressão foi grande na cura ao ar, pois não houve qualquer controle de cura, influenciando diretamente no coeficiente de correlação. Ainda, haveria necessidade de moldagem de novos corpos de provas em combinações distintas, para que se tivesse uma curva de relação vazios/ agente cimentante mais aderida à tendência.

Figura 43 - Relação vazios x cal - cura ambiente



Fonte: A autora (2022).

Figura 44 - Relação vazios cal - expoente x = 0,151 - cura ambiente



Fonte: A autora (2022).

## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo dessa pesquisa foi avaliar o comportamento mecânico de uma mistura de solo laterítico, presente na região de Ponta Grossa – PR, e resíduos de construção e demolição (RCD), com e sem adição de cal, analisando a viabilidade da utilização dessa mistura em aplicações geotécnicas. Para alcançar o objetivo, foram realizados ensaios de Compressão Simples para diferentes configurações de misturas. Em face dos resultados obtidos, conclui-se que:

- 1) A resistência natural do solo só é superada para as misturas de solo + RCD + 7% de cal, independente do  $\gamma_d$  e do modelo de cura;
- 2) A cura hermética dos corpos de prova, procedimento padrão de análise de solos para evitar perda de umidade e variações de temperatura, não permitiu a correta cimentação da cal e influenciou na resistência atribuída ao corpo de prova, reduzindo consideravelmente a resistência à compressão simples;
- 3) As maiores resistências foram obtidas para corpos de prova com  $\gamma_d$  igual a  $16\text{kN/m}^3$ ;
- 4) Apesar da substituição de 45% de solo por RCD resultar na redução da resistência à compressão, com a adição da cal à mistura a resistência é elevada à medida que aumenta o teor de cal;
- 5) Com a redução da porosidade, ou seja, quanto menor a relação vazios/volume de cal, há acréscimo exponencial da resistência à compressão simples;

Assim, o aumento da resistência à compressão simples do solo, para as misturas de solo + RCD com cal, estudadas confere a viabilidade técnica da aplicação de RCD e cal na estabilização do solo do Campo Experimental Geotécnico da Universidade Estadual de Ponta Grossa. No entanto, como foi observado que o aumento da resistência com adição da cal é eficiente até o valor de peso específico de  $16\text{kN/m}^3$  e que a redução da disponibilidade de ar afeta diretamente o aumento da resistência à compressão simples do solo, faz-se necessário a aplicação da mistura considerando esse aspecto.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De forma a dar prosseguimento à pesquisa realizada nesse trabalho de conclusão de curso e ampliar o conhecimento sobre o comportamento mecânico de misturas solo-RCD estabilizadas com cal para aplicação em obras geotécnicas, são sugeridos os seguintes tópicos de pesquisa:

- 1) Avaliar a influência de outros teores de cal na estabilização de misturas de solo + RCD;
- 2) Avaliar a influência de outros níveis de compactação;
- 3) Avaliar a influência de outros tipos de agente cimentantes misturados com solo + RCD;
- 4) Realizar o mesmo estudo de análise de comportamento mecânico de misturas de solos com outros tipos de resíduos, estabilizadas com cal;

## 6 REFERÊNCIAS

ANIBELE, R. **Análise em modelo de laboratório da substituição de filtro de areia por geocomposto em barragens de terra**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2019.

ANIBELE, R., *et al.* **Análise em modelo de laboratório da substituição de filtro de areia por geocomposto em barragens de terra**. In: COBRAMSEG 2020, Campinas/ SP. **Anais Cobramseg 2020**. Campinas, 2020.

ARAÚJO, C. B. C.; DANTAS, S. **Caracterização de Solos Lateríticos para Utilização em Pavimentos de Baixo Custo na Cidade de Canindé/CE**. In: COBRAMSEG 2014, Goiânia/ GO. **Anais Cobramseg 2014**. Artigo 187. Goiânia, 2014.

ARRUDA, M. S. Z. J. **Caracterização do material proveniente de usinas de beneficiamento de materiais de construção para análise de sua influência na estabilização de solos lateríticos**, 2020. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Engenharia – Campus de Bauru. 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/202492>. Acesso em: 06 de agosto de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE), **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. São Paulo: ABRELPE, 2021.

ASSINE, M. L. **Aspectos da estratigrafia das sequências pré-carboníferas da Bacia do Paraná no Brasil**, 1996. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15112: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 15113: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 15114: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção**: Volume 2. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

- BEJA, I. A. **Agregado reciclado de construção e demolição com adição de aglomerantes hidráulicos como sub-base de pavimentos**, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, 2014.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- BRASIL. Lei Nº12.305 de 02 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Congresso Nacional de Brasília, Distrito Federal, 2010.
- \_\_\_\_\_. Lei Nº11.043 de 13 de abril de 2022. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Congresso Nacional de Brasília, Distrito Federal, 2022.
- BRITO, Laís Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. Estabilização de Solos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. p. 425-438, Setembro de 2017.
- CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de Solos Residuais Graníticos através da adição de Cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Minho, Braga, Portugal, 2001.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 307**, 5 de julho de 2002.
- DIAS, M. C. C. **Viabilidade do uso de solo tropical e resíduo de construção civil em sistemas de cobertura de aterro sanitário**, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, UFG, Goiânia, 2014.
- EVANGELISTA, P.P. de A.; COSTA, D. B.; ZANTA, V.M. **Alternativa sustentável para destinação de resíduos de construção classe A: sistemática para reciclagem em canteiro de obras**. Porto Alegre: Ambiente Construído, 2010.
- FERREIRA, M. de C.; THOMÉ, A. Utilização de resíduo da construção e demolição como reforço de um solo residual de basalto, servindo como base de fundações superficiais. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande do Sul/ RS, n. 18, p. 1-12, novembro de 2011.
- FRANÇA, A. B.; PORTTER, P. E. **Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de Reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (parte 1)**. Boletim de Geociências da Petrobrás, 2: 147-191, 1988.
- GERIN, M. T.; *et al.* Utilização de agregados de RCD em elementos estruturais: panorama atual. *In*: Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 2., 2019. Foz do Iguaçu/PR. **Anais 2º ConReSol**. Bauru/SP: IBEAS, 2019. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2019/VII-067.pdf>. Acesso em: 03 de agosto de 2022.
- GUIMARÃES, G. B.; *et al.* **Geologia dos Campo Gerais** – Capítulo 2. Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2007. 10p. INTERNATIONAL Union of Geological Sciences. Disponível em: <http://www.stratigraphy.org/>. Acesso em: 26 de junho de 2022.
- HERRIN, M.; MITCHELL, H. **Lime-soil Mixtures**. Highway Research Board Bulletin, Washington, D.C., v. 304, p. 99-121, 1961.

IAT/PR. **Instituto Água e Terra**. Geologia do Paraná – História Evolutiva. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Geologia-do-Parana-Historia-Evolutiva>. Acesso em: 26 de julho de 2022.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization: principles and practices**. Sydney: Butterworths, 1972.

JOHANN, A. D. R. **Metodologia para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação da Porosidade de um solo Siltoso Tratado com Cal em Diferentes Tempos de Cura**, 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2013.

KÄMPF, N.; CURI, N. Formação e evolução do solo (Pedogênese). *In*: KER, J.C.; SHAEFER, C.E.G.R; VIDAL-TORRADO, P. **Pedologia: fundamentos**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa-MG, 2012, p.207-302.

KRUGER, P.; PEREIRA, E.; CHINELATTO, A. S. A., **INFLUÊNCIA DO AGREGADO RECICLADO NA DURABILIDADE DO CONCRETO: UMA REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA**. 2º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções (2º SPPC), artigo2SPPC1021, pp. 253–265, 2017. DOI: 10.4322/2SPPC.2017.021

LOPES JUNIOR, L. S. **Metodologia de Previsão do Comportamento Mecânico de Solos Tratados com Cal**, 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2011.

LOVATO, R.S. **Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, Aplicado à Pavimentação**, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

MACENHAN, F. F.; OJCZENASZ, G. B. **Elaboração de mapa geológico da cidade de Ponta Grossa (Paraná – Brasil) baseado em resultados de sondagens à percussão**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2019.

MATTOS, F. C. de; GONÇALVES, M. R. F. **Argamassas de cal e metacaulim: influência das condições de cura**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 24, 2019.

MILANI, E.J.; FRANÇA, A. B.; MEDEIROS, R. Á., 2007. Roteiros Geológicos, Rochas geradoras e rochas-reservatório da Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**. Rio de Janeiro: Petrobras, v.15, n.1, p.135–162, 2007.

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

OLIVEIRA, R. F.; BRAGA, R. M. Q. L. Resíduos da Construção Civil como Alternativa Sustentável para a Aplicação em Aterro Sanitário. *In*: REGEO/ GEOSINTÉTICOS 2019, São Carlos/SP. **Anais IX Congresso Brasileira de Geotecnia Ambiental**. São Carlos: EESC, 2019. p. 159 – 164.

PEREIRA, E. V.; VARGAS, M. C. **Estudo de dosagem para misturas de solo-cimento e resíduos de construção e demolição mediante ensaios de compressão simples**, 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2019.

PEREIRA, L. A. de F.; AMORIM, Ênio F.; MOTTA, L. M. G. da. Analysis of a Soil Mixed With Construction And Demolition Waste (CD&W) for use in Road Works. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 8, p. e21911830315, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i8.30315. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/30315>. Acesso em: 3 de agosto de 2022.

QUAGLIO, R. S.; ARANA, A. R. A. Diagnóstico da gestão de resíduos da construção civil a partir da leitura da paisagem urbana. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 32, p. 457–471, 2020. DOI: 10.14393/SN-v32-2020-47547. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/sociedadedenatureza/article/view/47547>. Acesso em: 3 de agosto de 2022.

SANTOS E. F. **Estudo Comparativo de Diferentes Sistemas de Classificações Geotécnicas Aplicadas aos Solos Tropicais**, 2006. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SANTOS, E. C. G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**, 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SANTOS, J. F. R. dos. **Estudos de formulação de solo-cimento e solo-cal e respectivas aplicações**. 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto- Portugal, 2008.

SCARABELOT, C. D. P.; SILVA, C. R. da. Estudo do Comportamento Geotécnico de Predominância do Resíduo da Construção Civil em Solo Argiloso para Aplicação em Obras de Recuperação Ambiental. *In*: REGEO/ GEOSSINTÉTICOS 2019, São Carlos/SP. **Anais IX Congresso Brasileira de Geotecnia Ambiental**. São Carlos: EESC, 2019. p. 113 – 118.

SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1 ed. São Paulo: Pini, 2001.

SILVA, C. R.; SILVA, T. L. C.. Estudo do comportamento geotécnico de misturas de solo argiloso e resíduos da construção civil para aplicação como barreira hidráulica em áreas degradadas. **Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil Unesc-CIVILTEC**, v. 3, n. 1, p. 59-75, 2020.

SILVA, M. F. da. **Estudo comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal**. 2010. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geológica (Geotecnia), Departamento de Ciências da Terra, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa- Portugal, 2010.

SINIR. **Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos**, 2021. Relatório nacional de gestão de resíduos sólidos 2019. Disponível em: <https://www.sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em 24 de julho de 2022.

TEIXEIRA, W. **Comportamento mecânico de misturas solo, cal e RCD para uso em pavimentos**, 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

THOMÉ, A. **Estudo do comportamento de um solo mole tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais**, 1994. Dissertação (Mestrado em

Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

TONUS, B. P. de A., *et al.* Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa (CEEG-PG): classificação do solo local e parâmetros de resistência ao cisalhamento. *In: COBRAMSEG 2020, Campinas/ SP. Anais Cobramseg 2020.* Campinas, 2020.

TONUS, B. P. de A., *et al.* Site characterization for a study on shallow geothermal energy exploitation in Southern Brazil. **Soils and Rocks**, v. 45, 2022.

TULLIO, L. **Formação, Classificação e Cartografia dos Solos.** Ponta Grossa: Atena Editora, 2019.

VILLIBOR, D. F. **Estabilização Granulométrica ou Mecânica.** GRÁFICA EESC – USP, São Carlos, SP, 1982.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. **Pavimentos Econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos.** São Paulo: Arte & Ciência, 2009. 291 p.



## F.I.S.P.Q - FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS

Produto: CAL HIDRATADA DOLOMÍTICO

Emissão: 3-ago-13

Páginas 07

### 1- IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO E DA EMPRESA

- Produto: CAL HIDRATADA DOLOMÍTICA
- Nome da empresa: Calcário Calponta Ltda.
- Cnpj 02.592.857/0001-73 / I.E 9016794284
- Endereço: Av. General Carlos Cavalcanti, 448 – Uvaranas - CEP: 84.025-000 Ponta Grossa – PR
- Telefone da empresa: (55 42) 3224-0864
- Telefone para emergências: (55 42) 3224-0864
- Fax: (55 42) 3225-1718
- E-mail: tiago@calponta.com.br

### 2- COMPOSIÇÃO E INFORMAÇÕES SOBRE OS INGREDIENTES

- Substância Predominantemente
  - Hidróxido de Cálcio e Magnésio (associados)  $\text{Ca(OH)}_2 / \text{Mg(OH)}_2$
  - Número da ONU: Não se aplica
  - (CAS No: CAS · 1305-62-0 / 1309-42-8)
- Características e Aspecto
  - Sólido, pó finamente moído; cor branca; sem odor; mais denso que a água
  - Percentual de pureza:  $\geq 98,5\%$
- Composição química característica:
  - $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2 > 98,5\%$
  - $\text{SiO}_2 \leq 1,00\%$
  - $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 0,30\%$
  - $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,30\%$
  - Carbonatos totais ( $\text{CO}_3 \text{ t}$ )  $\leq 6,0\%$
  - Umidade  $\leq 1,0\%$
- Características Físicas:
  - Peneira ABNT 200 (0,074mm)  $< 12,0\%$
- Nome químico comum ou nome genérico: Cal Hidratada Dolomítica, Hidratada Dolomítica, Cal Apagada, Cal Extinta



Versão: 01

Revisão: CRQ9301464/PR



## F.I.S.P.Q - FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS

Produto: CAL HIDRATADA DOLOMÍTICO

Emissão: 3-ago-13

Páginas 07

- Sinônimo: Cal Hidratada
- Ingredientes que contribuem para o perigo: Não aplicável
- Peso Molecular médio: 49 g/mol
- Densidade aparente: 750 a 800 kg/m<sup>3</sup>

### 3- IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS

- Perigos mais importantes: Produto alcalino.
- Efeitos adversos à saúde humana: Pode ser irritante quando em contato direto com mucosas ou ingerido. Contato direto e prolongado com a pele pode provocar o desenvolvimento em pessoas mais sensíveis.
- Efeitos ambientais:
  - Água: pode alterar pH tornando-o básica
  - Solo: pode alterar pH tornando-o básico;
  - Fauna e Flora: podem sofrer danos se em contato direto, prolongado e grandes quantidades com o produto.
- Perigos físicos e químicos:
  - Não reagem com a água
  - Reage fortemente com ácidos.
- Classificação do produto químico: Base



Versão: 01

Revisão: CRQ9301464/PR



## F.I.S.P.Q - FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS

Produto: CAL HIDRATADA DOLOMÍTICO

Emissão: 3-ago-13

Páginas 07

### 4- **MEDIDAS DE PRIMEIROS-SOCORROS:**

- Medidas de primeiros-socorros:

- Inalação: remova a vítima para um local arejado e ventilado.

- Contato com a pele: lave as partes contaminadas com grande quantidade de água.

- Contato com os olhos: lave os olhos com água em abundância, mantendo as pálpebras abertas para assegurar a lavagem de toda a superfície. Procure socorro médico.

- Ingestão: não dê nada a pessoa inconsciente pela boca. Não provoque vômito. Lave a boca com água para beber. Dê grandes quantidades de água para beber. Se ocorrer vômito espontâneo, mantenha a via respiratória desobstruída. Procure socorro médico imediatamente.

### 5- **MEDIDAS DE COMBATE A INCÊNDIO:**

- Meios de extinção apropriados: não aplicável. Produto não inflamável.

- Métodos especiais: este produto não é combustível. Neblina de água, espuma, CO<sub>2</sub> e pó químico poderão ser utilizados em incêndios nos locais onde o produto esteja armazenado.

- Proteção dos bombeiros: Produto não inflamável.

### 6- **MEDIDAS DE CONTROLE PARA DERRAMAMENTO OU VAZAMENTO**

- Remoção de fontes de ignição: Não se aplica ao produto

- Controle poeira: Evitar expor o produto a correntes de ar, produto se finamente moído gera poeira quando exposto a ação do vento.

- Prevenção da inalação e do contato com a pele, mucosas e olhos: usar botas, roupas e luvas impermeáveis, óculos de segurança, proteção respiratória



Versão: 01

Revisão: CRQ9301464/PR



## F.I.S.P.Q - FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS

Produto: CAL HIDRATADA DOLOMÍTICO

Emissão: 3-ago-13

Páginas 07

- Precauções ao meio ambiente: Afaste se possível, o veículo para lugar sem trânsito. Sinalize e isole a área.
- Use equipamento de proteção individual. Procure conter o derramamento sempre que possível. Se finamente moído poderá ser coberto com lona plástica, terra ou areia evitando sua dispersão pela ação do vento.
- Sistemas de alarme: avise imediatamente a Calponta, Polícia Rodoviária, Corpo de Bombeiros, Órgãos de meio Ambiente, Defesa Civil
- Métodos para limpeza:
  - Recuperação: Sempre que possível recupere o produto derramado para tambores ou outros recipientes.
  - Limpeza: finalize a limpeza com água em abundância.
  - Disposição: O material recolhido deve ser devidamente embalado, identificado e transportado conforme normas legais e de boa prática. Se não for recuperável o resíduo deverá ser devidamente descartado em local apropriado

### 7- MANUSEIO E ARMAZENAMENTO

#### • Manuseio

- Prevenção da exposição do trabalhador: Recomendado o uso de óculos e máscara anti póamentos de proteção individual (EPI).
- Prevenção de incêndio e explosão: Não combustível. Produto não inflamável.
- Precauções para manuseio seguro: protetor facial e óculos ou óculos de proteção química devem ser utilizados;
- Orientações para manuseio seguro: Não se aplica, produto não tóxico

#### • Armazenamento

- Medidas técnicas apropriadas: a cal hidratada deve ser estocada em ambientes ou embalagens confinadas (silos metálicos, big-bag, sacos, caminhões tipo cebolão).
- Produtos e materiais incompatíveis: ácidos, alumínio



Versão: 01

Revisão: CRQ9301464/PR



## F.I.S.P.Q - FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS

Produto: CAL HIDRATADA DOLOMÍTICO

Emissão: 3-ago-13

Páginas 07

### 8- CONTROLE DE EXPOSIÇÃO E PROTEÇÃO INDIVIDUAL

- Equipamento de proteção individual apropriado
  - Proteção respiratória: necessária sob condições de uso específico;
  - Proteção das mãos: luvas
  - Proteção dos olhos: óculos de proteção.
  - Proteção da pele e do corpo: roupa comum e calçados de segurança.
  - Precauções especiais: não se aplica

### 9- PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

- Estado físico: Sólido.
- Cor: branca ou levemente cinza ou bege.
- Odor: sem odor.
  
- Temperaturas específicas ou faixas de temperaturas nas quais ocorrem mudanças de estado físico:
  - Ponto de desidratação: 850 °C a 1.000 °C (transforma-se em cal virgem óxido de cálcio / magnésio)
  - Ponto de ebulição: 2300 °C
  - Ponto de fulgor: produto não é combustível.
  - Temperatura de auto-ignição: produto não inflamável.
  - Limites de explosividade superior/inferior: não aplicável
  - Massa Específica (20/4°C): (2.000 a 2900 kg/m3)
  
- Outras informações:
  - Higroscopicidade: Não higroscópica



Versão: 01

Revisão: CRQ9301464/PR



## F.I.S.P.Q - FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS

Produto: CAL HIDRATADA DOLOMÍTICO

Emissão: 3-ago-13

Páginas 07

### 10- ESTABILIDADE E REATIVIDADE

- Condições específicas
  - Instabilidade: estável
  - Reações perigosas: reage violentamente com ácidos.
  - Materiais ou substâncias incompatíveis: ácidos
  - Produtos perigosos da decomposição: não aplicável.

### 11- INFORMAÇÕES TOXICOLÓGICAS

- Informações de acordo com as diferentes vias de exposição

#### Toxidade Aguda

- Ingestão: pode causar irritação e desarranjo intestinal.
- Inalação: a presença de poeira no ar pode causar irritação
- Contato com a pele: pode causar irritação em pessoas de maior sensibilidade quando contato prolongado e frequente
- Contato com os olhos: pode causar irritação e queimaduras leves

#### Toxicidade crônica

- o efeito crônico local pode consistir em áreas múltiplas da pele ou de dermatite primária irritante. Simultaneamente, a inalação de poeiras pode dar origem a diversos graus de irritação.

### 12- INFORMAÇÕES ECOLÓGICAS

- Efeitos ambientais, comportamento e impactos do produto.

#### Impacto ambiental:

- Água: Temporariamente tóxico quando em elevadíssima concentração. Avise o órgão responsável pelo abastecimento, caso o produto vazado atinja os cursos d'água.
- Solo: efeito danoso em altas concentrações



Versão: 01

Revisão: CRQ9301464/PR

**F.I.S.P.Q - FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS**

Produto: CAL HIDRATADA DOLOMÍTICO

Emissão: 3-ago-13

Páginas 07

**13- CONSIDERAÇÕES SOBRE TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO**

- Métodos de tratamento e disposição
  - Produto: o produto deve ser recuperado quando possível
  - Restos de produtos: restos de produto devem ser descartados de forma e local adequado.
  - Embalagem usada: sacos plásticos, de papel ou em big-bag;

**14- INFORMAÇÕES SOBRE TRANSPORTE:**

- Regulamentações nacionais e internacionais
  - Número ONU: não se aplica
  - Nome apropriado para o embarque: Cal hidratada Dolomítica
  - Grupo de embalagem: não se aplica
  - Transporte rodoviário no Mercosul: Não é considerado produto Perigoso conforme ONU
  - Transporte aéreo doméstico e Internacional ICA O & IATA Section 4.2 : Não é considerado produto Perigoso conforme ONU
  - Transporte Marítimo Internacional – IMDG Code Amendment 29-98: Não é considerado produto Perigoso conforme ONU

**15- REGULAMENTAÇÕES**

- Regulamentações: não aplicável. Produto vendido a granel ou em sacos de papel de 20 kg

**16- OUTRAS INFORMAÇÕES**

- não se aplica



Versão: 01

Revisão: CRQ9301464/PR



## F.I.S.P.Q - FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS

Produto:	CAL HIDRATADA DOLOMÍTICO		
Emissão:	3-ago-13	Páginas	07

- **Observações:**

As informações contidas nesta F.I.S.P.Q representam informações atuais e refletem com exatidão o melhor conhecimento do produto para uso em condições normais e de acordo com a aplicação específica na embalagem e/ou literatura.

Qualquer outro uso do produto que envolva o uso combinado com outro produto ou outros processos é responsabilidade do usuário.

- **Apresentação Comercial:** embalagem de 20 kg em saco de papel valvulado



Versão: 01

Revisão: CRQ9301464/PR



UNICALLAB REPRESENTAÇÕES, PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS E ASSISTÊNCIA LTDA

## BOLETIM DE ANÁLISES – Nº: 0097/2017

<b>CLIENTE</b>	Calcário Calponta Ltda.
<b>ENDEREÇO</b>	Av Gal Carlos Cavalcanti, N° 448 - Uvaranas
<b>CIDADE</b>	Ponta Grossa – PR
<b>CEP</b>	84.025-000

<b>PRODUTO</b>	Cal Hidratada
<b>IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA</b>	AM. 02 – Cal Hidratada – Cal Ponta – MP
<b>RESPONSÁVEL PELA COLETA</b>	Cliente
<b>DATA COLETA DA AMOSTRA</b>	25/11/2018
<b>DATA EMISSÃO LAUDO</b>	05/12/2018

### RESULTADOS DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

ANÁLISES		UNIDADE	RESULTADOS	LIMITES		
CaO Total		%	44,95	NE		
MgO		%	30,71	NE		
SiO <sub>2</sub>		%	0,49	NE		
S		%	0,0085	NE		
PF		%	23,31	NE		
Umidade		%	0,36	NE		
<b>LIMITES NBR 7175</b>				<b>CHI</b>	<b>CHII</b>	<b>CHIII</b>
Anidrido Carbônico (CO <sub>2</sub> )		%	8,97	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
Óxidos de Cálcio e Magnésio Não hidratado calculado (CaO + MgO)		%	23,53	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos Totais na base de não-voláteis (CaO <sub>t</sub> + MgO <sub>t</sub> )		%	98,66	≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%
Granulometria (retido)	Malha 28#	%	0,12	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Malha 200#	%	98,03	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%

OBS: Norma técnica utilizada NBR 6473.

Parâmetros utilizados da norma técnica para cal hidratada NBR 7175.

NE – Não especificado

\*Resultados válidos para a amostra analisada.

  
Geraldo Rodrigues de Sousa  
CRQ-MG 02404380

ANEXO B - Valores de  $\gamma_d$  teóricos e obtidos

	$\gamma_d$ teórico (KN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ obtido (KN/m <sup>3</sup> )
Cura hermética		
Sa	15,5	14,17
	15,5	14,65
	15,5	14,47
Sb	16	14,50
	16	14,38
	16	14,51
SRa	15,5	14,90
	15,5	14,83
	15,5	15,00
SRb	16	14,87
	16	14,89
	16	15,06
SRc	16,5	15,37
	16,5	15,33
	16,5	15,46
SRC <sub>3%a</sub>	15,5	14,62
	15,5	14,76
	15,5	14,77
SRC <sub>3%b</sub>	16	14,92
	16	14,91
	16	14,76
SRC <sub>3%c</sub>	16,5	15,17
	16,5	15,12
	16,5	15,03
SRC <sub>5%a</sub>	15,5	14,89
	15,5	14,91
	15,5	14,86
SRC <sub>5%b</sub>	16	15,06
	16	15,02
	16	15,12
SRC <sub>5%c</sub>	16,5	15,20
	16,5	15,17
	16,5	15,16
SRC <sub>7%a</sub>	15,5	15,00
	15,5	15,10
	15,5	15,13
SRC <sub>7%b</sub>	16	14,87
	16	14,76
	16	15,09
SRC <sub>7%c</sub>	16,5	15,35
	16,5	15,08
	16,5	15,49

	$\gamma_d$ teórico (KN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ obtido (KN/m <sup>3</sup> )
Cura ambiente		
SRC <sub>5%c</sub>	16,5	
	16,5	15,25
	16,5	15,16
SRC <sub>7%a</sub>	15,5	14,87
	15,5	14,62
	15,5	14,71
SRC <sub>7%b</sub>	16	15,19
	16	15,02
	16	15,13
SRC <sub>7%c</sub>	16,5	15,18
	16,5	15,36
	16,5	15,42