

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Filipe Favretto**

**MELHORAMENTO DE SOLO ARGILOSO COM CAL ALTERNATIVA**

Porto Alegre  
Julho, 2020



**FILIPPE FAVRETTO**

**MELHORAMENTO DE SOLO ARGILOSO COM CAL ALTERNATIVA**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à  
Comissão de Graduação do Curso de  
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheiro Civil.

**Orientador: Prof. Dr. Lucas Festugato**  
**Coorientador: Andrés Maurício Lotero Caicedo**

Porto Alegre  
Julho, 2020



**FILIPE FAVRETTO**

**MELHORAMENTO DE SOLO ARGILOSO COM CAL ALTERNATIVA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador.

Porto Alegre, julho de 2020

Prof. Lucas Festugato  
Dr. pela UFRGS  
Orientador

Andrés Mauricio Lotero Caicedo  
M.Eng pela UNIANDES  
Coorientador

**BANCA EXAMINADORA**

**Hugo Carlos Scheuermann Filho**  
M.Eng. pela UFRGS

**Nilo Cesar Consoli**  
PhD pela Concordia University, Canadá

**Rodrigo Beck Saldanha**  
Dr. pela UFRGS



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais que sempre me incentivaram a estudar e a dar o melhor em tudo que fazemos. Além disso, todo o suporte, desde financeiro a emocional, foi fundamental pois sem isso não poderia alcançar todos os objetivos que almejo.

Marcela, minha namorada, obrigado por tudo durante todos os anos. Agradeço ao estímulo dado para seguir com os objetivos que desejamos e, também, pelo esforço despendido para me ajudar neste trabalho.

Agradeço ao Prof. Lucas Festugato, pelos ensinamentos ao longo da graduação e também para a conclusão do trabalho.

Ao meu coorientador Andrés Lotero que me possibilitou a criação da pesquisa e aos esforços para que pudesse realizar a mesma. Ao Prof. Nilo Cesar Consoli que foi essencial para a realização do trabalho, o qual sempre incentiva ao desenvolvimento de novas ideias e materias.

A todos os colegas do Legg, em especial ao Sérgio, Hugo, Ricardo e Paulo, pelos conhecimentos transmitidos e auxílio na realização do trabalho.

Por fim, agradeço à UFRGS e a todos os professores que passaram pela minha vida, transmitindo conhecimento e sabedoria.

“Tudo vale a pena quando a alma não é pequena”

*Fernando Pessoa*



## RESUMO

Em virtude da urbanização e do crescimento das cidades, novas áreas vêm sendo utilizadas, porém o solo local nem sempre tem capacidade de suporte adequada ao projeto. O melhoramento do solo, em particular, pode ser uma técnica viável para se adequar o material. Sendo assim, o material deve ser estabilizado com algum tipo de agente cimentante. Em virtude disso, estudos no LEGG utilizam a técnica de estabilização junto com resíduo capaz de gerar materiais cimentantes. Nesse contexto, este trabalho objetiva analisar o comportamento de um solo argiloso composto por Caulim Rosa e Bentonita, em diferentes proporções, tratado com cal de cascas de ovos. O resíduo é amplamente produzido no Brasil, porém seu descarte não é dado de forma adequada, muito menos sua utilização, tendo em vista que este pode substituir em parte a rocha calcárea. Assim, com a utilização deste resíduo a produção de cal pode utilizar de uma fonte que não é esgotável, ao contrário da rocha calcárea que é um mineral não renovável. Dessa forma, para se analisar se a cal alternativa é capaz de estabilizar um solo argiloso, foi realizado ensaios de compressão simples ( $q_u$ ), compressão diametral ( $q_t$ ) e módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ). Foram estudados três misturas de caulim e bentonita, nas proporções de 85% caulim e 15% bentonita, 80% caulim e 20% bentonita e 75% caulim e 25% bentonita, umidades de 100%, 110% e 120% para todas as misturas, teor de cal de 5%, 7% e 10% para todas as misturas e tempo de cura de 28 dias para as amostras. Para se fazer a correta análise dos ensaios, se objetivou quantificar a influência da quantidade de cal e da porosidade. Além de ser verificada se a razão de porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_{iv}$ ) seria adequado para a previsão de comportamento mecânico das misturas. Os resultados possibilitaram observar que o aumento da resistência ( $q_u$ ) e ( $q_t$ ) se dá de forma linear com o aumento do teor de cal. Já para a porosidade, as resistências têm uma relação inversa, isto é, com o aumento da porosidade as resistências diminuem, sendo que para o ajuste desses dados foi utilizado curvas potenciais. Em relação à razão de porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_{iv}$ ), a mesma pode ser aplicada, assim, a possibilidade de aplicação dessa razão foi ampliada. Para o módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ), o comportamento descrito anteriormente é verificado. Ademais, se obteve uma relação única entre  $q_t/q_u$  para todas as misturas de solo-cal estudadas, a relação mostrou-se independente da razão porosidade/teor volumétrico de cal, o que é já era esperado, conforme a literatura.

Palavras-chaves: Cascas de ovos. Melhoramento de Solos. Razão Porosidade/Teor Volumétrico de Cal. Compressão Simples. Compressão Diametral. Módulo Cisalhante Inicial.

### ABSTRACT

Due to the urbanization and the growth of cities, new areas are being used, but the local soil is not always capable of supporting the Project loads. Soil improvement, in particular, can be a viable technique to adapt the material. Therefore, the material can be stabilized with some type of cementing agent. Because of that, studies at LEGG apply the stabilization technique together with the use of some type of waste capable of generating cementitious materials. In this context, this work aims to analyze the behavior of a clayey soil composed of Pink Kaolin clay and Bentonite, in different proportions treated with eggshell lime. The residue is widely produced in Brazil, but it is not properly disposed and used, given its potential to partially replace limestone. Thus, with the use of this residue, the production of lime can use a source that is not exhaustible, unlike limestone that is a non-renewable mineral. Hence, to analyze whether the alternative lime is able to stabilize a clayey soil, unconfined compression tests ( $q_u$ ), split tensile tests ( $q_t$ ) and initial shear modulus measurements ( $G_0$ ) were carried out. Three mixtures of kaolin and bentonite were studied, in the proportions of 85% kaolin and 15% bentonite, 80% kaolin and 20% bentonite and 75% kaolin and 25% bentonite, water content of 100%, 110% and 120% for all mixtures, lime content of 5%, 7% and 10% for all mixtures and curing time of 28 days for all samples. To perform the correct analysis of the tests, the objective was to quantify the influence of the amount of lime and porosity, and also to verify if the ratio of porosity / volumetric content of lime ( $\eta/Liv$ ) would be adequate to predict the mechanical behavior of the mixtures. The results made it possible to observe that the increase in strength ( $q_u$ ) and ( $q_t$ ) occurs linearly with the increase in the lime content. As for porosity, the resistances have an inverse relationship, that is, with the increase in porosity, strength decreases, and for the fitting of these data, power type functions were used. Regarding the ratio of porosity / volumetric content of lime ( $\eta / Liv$ ), it can be applied, thus, the possibility of applying this ratio has been expanded. For the initial shear module ( $G_0$ ), the same as previously described is valid. In addition, a single relationship was obtained between  $q_t / q_u$  for all studied soil-lime mixtures. This ratio was shown to be independent of the porosity / volumetric lime content, which is according to the literature.

Keywords: Egg shells. Soil improvement. Porosity / Volumetric Lime Content Ratio. Simple compression. Diametral compression. Initial Shear Module.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Delineamento da pesquisa .....	31
Figura 2 – Resistência à compressão simples em relação ao teor de cal .....	41
Figura 3 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura .....	42
Figura 4– Influência do tempo de cura em amostras ensaiadas com 28, 60 e 90 dias.....	43
Figura 5– Variação da resistência simples com o teor de umidade .....	44
Figura 6– Variação resistência à compressão simples em relação porosidade/cal .....	45
Figura 7– Variação resistência à compressão simples em relação porosidade/cal ajustado ....	45
Figura 8 – Curva granulométrica do caulim. ....	51
Figura 9 – Curva granulométrica da Bentonita. ....	52
Figura 10 – Curva granulométrica das Cales de Casca de Ovo .....	53
Figura 11 – Moldes de PVC: sem colarinho e molde com colarinho e vedado por fitas adesivas. ....	55
Figura 12 – Recipientes para agitação da mistura e aferição de pH .....	56
Figura 13 – Dosagem de Cal pelo método ICL .....	56
Figura 14 – Cascas de ovos em seu estado natural .....	58
Figura 15 – Cascas de ovos trituradas e secas .....	58
Figura 16 – Forno tipo mufla da marca SP Labor, modelo SP-1200.....	59
Figura 17 – Material obtido após a calcinação inicial .....	59
Figura 18 – Cadinho para calcinação das cascas de ovos.....	60
Figura 19 – Forno tipo mufla marca Sanchis, modelo CL-1200 .....	61
Figura 20 – Cal de Casca de Ovo após a calcinação final .....	61
Figura 21 – Cal de Casca de Ovo passante na peneira 0,075 mm .....	62
Figura 22 – Procedimento de mistura de todos os materiais .....	63
Figura 23 – Amostra finalizada e acondicionada, respectivamente.....	64
Figura 24 – Amostra armazenada e hermeticamente vedada .....	64
Figura 25 – Amostra após período de cura extraída do molde de PVC.....	65
Figura 26 – Amostras no tanque de imersão.....	65
Figura 27 – Corpo de prova .....	66
Figura 28 – Resultado de um ensaio de pulso ultrassônico, em interface computacional.....	68
Figura 29 – Ensaio de resistência à compressão simples.....	69
Figura 30 – Ensaio de resistência à compressão diametral.....	70

Figura 31 – Curva Granulométrica do Caulim por Sampa (2015) e da pesquisa .....	72
Figura 32 – Curva Granulométrica do Caulim por Sampa (2015) e da pesquisa .....	73
Figura 33 – Curva Granulométrica da mistura 85% Caulim e 15% Bentonita.....	74
Figura 34 – Curva Granulométrica da mistura 80% Caulim e 20% Bentonita.....	75
Figura 35 – Curva Granulométrica da mistura 75% Caulim e 25% Bentonita.....	76
Figura 36 – Curvas Granulométricas dos materiais estudados .....	76
Figura 37 – Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em relação ao teor de cal (L) para a mistura 85% Caulim e 15% Bentonita .....	77
Figura 38 – Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em relação ao teor de cal (L) para a mistura 80% Caulim e 20% Bentonita .....	78
Figura 39 – Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em relação ao teor de cal (L) para a mistura 75% Caulim e 25% Bentonita .....	78
Figura 40 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) na resistência à compressão simples na mistura 85% Caulim e 15% Bentonita .....	79
Figura 41 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) na resistência à compressão simples na mistura 80% Caulim e 20% Bentonita .....	80
Figura 42 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) na resistência à compressão simples na mistura 75% Caulim e 25% Bentonita .....	80
Figura 43 Variação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade/cal na mistura 85% Caulim e 15% Bentonita .....	81
Figura 44 – Variação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade/cal na mistura 80% Caulim e 20% Bentonita.....	82
Figura 45 – Variação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade/cal na mistura 75% Caulim e 25% Bentonita.....	82
Figura 46 – Curvas da resistência à compressão simples em função da relação porosidade/cal para todas misturas.....	83
Figura 47 – Variação da resistência à tração ( $q_t$ ) em relação ao teor de cal (L) para a mistura 85% Caulim e 15% Bentonita.....	84
Figura 48 – Variação da resistência à tração ( $q_t$ ) em relação ao teor de cal (L) para a mistura 80% Caulim e 20% Bentonita.....	85
Figura 49 – Variação da resistência à tração ( $q_t$ ) em relação ao teor de cal (L) para a mistura 75% Caulim e 25% Bentonita.....	85

Figura 50 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) na resistência à tração na mistura 85% Caulim e 15% Bentonita .....	86
Figura 51 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) na resistência à tração na mistura 80% Caulim e 20% Bentonita .....	87
Figura 52 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) na resistência à tração na mistura 75% Caulim e 25% Bentonita .....	87
Figura 53 Variação da resistência à tração em função da relação porosidade/cal na mistura 85% Caulim e 15% Bentonita .....	88
Figura 54 – Variação da resistência à tração em função da relação porosidade/cal na mistura 80% Caulim e 20% Bentonita .....	89
Figura 55 – Variação da resistência à tração em função da relação porosidade/cal na mistura 75% Caulim e 25% Bentonita .....	89
Figura 56 – Curvas da resistência à compressão diametral em função da relação porosidade/cal para todas misturas .....	90
Figura 57 – Relação $q_u$ e $q_t$ função da relação porosidade/cal na mistura 85% Caulim e 15% Bentonita .....	93
Figura 58 – Relação $q_u$ e $q_t$ função da relação porosidade/cal na mistura 80% Caulim e 20% Bentonita .....	94
Figura 59 – Relação $q_u$ e $q_t$ função da relação porosidade/cal na mistura 75% Caulim e 25% Bentonita .....	94
Figura 60 – Variação do ( $G_0$ ) em relação ao teor de cal (L) para a mistura 85% Caulim e 15% Bentonita .....	95
Figura 61 – Variação do ( $G_0$ ) em relação ao teor de cal (L) para a mistura 80% Caulim e 20% Bentonita .....	96
Figura 62 – Variação do ( $G_0$ ) em relação ao teor de cal (L) para a mistura 75% Caulim e 25% Bentonita .....	96
Figura 63 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) no $G_0$ na mistura 85% Caulim e 15% Bentonita .....	97
Figura 64 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) no $G_0$ na mistura 80% Caulim e 20% Bentonita .....	98
Figura 65 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) no $G_0$ na mistura 75% Caulim e 25% Bentonita .....	98
Figura 66 – Variação do $G_0$ em função da relação porosidade/cal na mistura 85% Caulim e 15% Bentonita .....	99
Figura 67 – Variação do $G_0$ em função da relação porosidade/cal na mistura 80% Caulim e 20% Bentonita .....	100

Figura 68 – Variação do $G_0$ em função da relação porosidade/cal na mistura 75% Caulim e 25% Bentonita.....	100
Figura 69 – Variação da resistência à compressão simples em função do módulo cisalhante inicial na mistura 85% Caulim e 15% Bentonita .....	101
Figura 70 – Variação da resistência à compressão simples em função do módulo cisalhante inicial na mistura 80% Caulim e 20% Bentonita .....	102
Figura 71 – Variação da resistência à compressão simples em função do módulo cisalhante inicial na mistura 75% Caulim e 25% Bentonita .....	102
Figura 72 – Variação da resistência à compressão simples em função do módulo cisalhante inicial para todas as misturas .....	103
Figura 73 – Razão $G_0/q_u$ em função da relação porosidade/ teor volumétrico de cal para a mistura de 85% Caulim e 15% Bentonita .....	104
Figura 74 – Razão $G_0/q_u$ em função da relação porosidade/ teor volumétrico de cal para a mistura de 80% Caulim e 20% Bentonita .....	105
Figura 75 – Razão $G_0/q_u$ em função da relação porosidade/ teor volumétrico de cal para a mistura de 75% Caulim e 25% Bentonita .....	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição mineralógica das cales hidratadas .....	36
Tabela 2– Composição mineralógica da cal não hidratada de cascas de ovos .....	37
Tabela 3– Composição mineralógica da cal não hidratada de cascas de ovos .....	37
Tabela 4 – Propriedades físicas do Caulim .....	51
Tabela 5 – Propriedades físicas do Caulim .....	52
Tabela 6– Composição química da cal de casca de ovo não hidratada .....	54
Tabela 7 – Umidade e Massa específicas aparente seca por mistura.....	57
Tabela 8 – Propriedades do caulim utilizado na pesquisa .....	71
Tabela 9 – Propriedades da bentonita utilizada na pesquisa.....	72
Tabela 10 – Propriedades da mistura 85% Caulim e 15% Bentonita .....	73
Tabela 11 – Propriedades da mistura 80% Caulim e 20% Bentonita .....	74
Tabela 12 – Propriedades da mistura 75% Caulim e 25% Bentonita .....	75



## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

LEGG – Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

IP – Índice de Plasticidade

NBR – Norma Brasileira

PVC – Policloreto de Vinila

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul



## LISTA DE SÍMBOLOS

$c'$  – coesão

$D_m$  – diâmetro médio da amostra (cm)

$f'$  – ângulo de atrito

$G_0$  – módulo cisalhante inicial (Mpa)

$H_m$  – altura média da amostra (cm)

$L$  – teor de cal (%)

$L_{iv}$  – teor volumétrico de cal (%)

$\eta$  – porosidade (%)

pH – potencial hidrogeniônico

$q_u$  – resistência à compressão simples (kPa)

$q_t$  – resistência à tração (kPa)

$R^2$  – coeficiente de determinação

$t_p$  – tempo da onda de compressão ( $\mu s$ )

$t_s$  – tempo da onda cisalhante ( $\mu s$ )

$V_s$  – velocidade da onda cisalhante (m/s)

$V_p$  – velocidade da onda de compressão (m/s)

$w$  – teor de umidade do solo (%)

$\gamma_d$  – massa específica aparente seca ( $g/cm^3$ )

$\gamma_s$  : massa específica dos grãos ( $g/cm^3$ )

$\gamma_w$  : massa específica da água ( $g/cm^3$ )



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>27</b>
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....	<b>29</b>
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	29
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	29
2.2.1 Objetivo principal .....	29
2.2.2 Objetivo secundário .....	29
2.3 HIPÓTESE.....	29
2.4 PRESSUPOSTO .....	29
2.5 DELIMITAÇÕES .....	29
2.6 LIMITAÇÕES .....	30
2.7 DELINEAMENTO .....	30
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>33</b>
3.1 VISÃO GERAL SOBRE A TÉCNICA DO SOLO-CAL .....	33
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS EM MISTURAS SOLO-CAL .....	34
3.2.1 Solo .....	34
3.2.2 Cal .....	34
3.2.2.1 Propriedades da Casca de ovo.....	35
3.2.2.2 Propriedades da Cal de casca de ovo .....	36
3.2.2.3 Dosagem da Cal .....	38
3.2.3 Água .....	38
3.3 CARACTERÍSTICAS COMPORTAMENTAIS DE MISTURAS SOLO-CAL.....	39
3.3.1 Reações Solo-Cal .....	39
3.3.2 Variáveis Determinantes do Comportamento de Misturas Solo-Cal .....	40
3.3.2.1 Efeito da cal .....	40
3.3.2.2 Efeito da Porosidade .....	41
3.3.2.3 Efeito do tempo de cura .....	42
3.3.2.4 Efeito do teor de umidade .....	43
3.3.2.5 Efeito da relação porosidade/cal .....	44
3.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS ESTABILIZADOS COM CAL.....	47
3.4.1 Ensaio de Resistência à Compressão Simples .....	47
3.4.2 Ensaio de Resistência à Tração .....	47
3.5 UTILIZAÇÃO DE MISTURAS DE CAULIM E BENTONITA EM PESQUISAS .....	48

<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>49</b>
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	49
4.2 MATERIAIS .....	49
4.2.1 Solo .....	50
4.2.1.1 Caulim rosa .....	50
4.2.1.2 Bentonita .....	51
4.2.2 Cal de Casca de Ovo .....	53
4.2.3 Água .....	54
4.2.4 Moldes cilíndricos de PVC .....	54
4.3 MÉTODOS .....	55
4.3.1 Ensaio de caracterização.....	55
4.3.2 Definição dos teores de cal .....	55
4.3.3 Definição da massa específica aparente seca .....	57
4.3.4 Obtenção da cal de casca de ovo.....	57
4.3.5 Preparação das amostras .....	62
4.3.5.1 Moldagem das amostras.....	62
4.3.5.2 Cura das amostras .....	64
4.3.5.3 Controle de qualidade das amostras.....	66
4.3.6 Ensaio de pulso ultrassônico .....	67
4.3.7 Ensaio de compressão simples.....	69
4.3.8 Ensaio de tração por compressão diametral.....	70
<b>5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>71</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS.....	71
5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS .....	73
5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES .....	77
5.3.1 Efeito da cal .....	77
5.3.2 Efeito da porosidade.....	79
5.3.3 Relação porosidade/teor volumétrico de cal .....	81
5.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	83
5.4.1 Efeito da cal .....	84
5.4.2 Efeito da porosidade.....	86
5.4.3 Relação porosidade/teor volumétrico de cal .....	88
5.5 RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO .....	91
5.6 ENSAIO DO MÓDULO CISALHANTE INICIAL.....	95

5.6.1 Efeito da cal .....	95
5.6.2 Efeito da porosidade.....	97
5.6.3 Relação porosidade/teor volumétrico de cal .....	99
5.7 RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS RESPOSTAS .....	101
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>106</b>
6.1 Conclusões .....	106
6.1.1 Resistências à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral ..	106
6.1.2 Módulo cisalhante inicial .....	107
6.1.3 Comparativo entre variáveis respostas.....	107
6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	108
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>109</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Em virtude da urbanização e do crescimento das cidades, áreas em que antes não eram ocupadas devido a sua localização, condição geográfica e geológica, atualmente vêm sendo utilizadas em obras de Engenharia. Tendo como exemplo, aeroportos, portos, rodovias e até mesmo grandes edificações estão sendo alocados em regiões em que o solo não possui parâmetros ideais para os projetos locados nessas áreas.

O engenheiro geotécnico deve estudar quais alternativas existem para dar continuidade ao projeto. Assim, pode-se proceder das seguintes maneiras: remoção ou substituição do solo, mudança do local da obra, adequação do projeto ao local da obra ou melhoramento do solo. O melhoramento do solo, em particular, pode ser realizado de diferentes formas. Sendo possível por meio da compactação do solo a ser melhorado, aumentando o peso específico e contato entre as partículas do material. Além disso, pode ser realizada a estabilização do solo com agentes cimentantes artificiais, empregados, mais comumente, a cal e o cimento (Dalla Rosa, 2009).

Para Dalla Rosa (2009) e Lopes Junior (2007), o tratamento de solos com cal vem sendo empregado com sucesso na engenharia geotécnica, melhorando as características do solo, que por ser um material complexo e muito variável nem sempre satisfaz as necessidades da obra a ser realizada. Ademais, a mesma autora afirma que o emprego da cal como agente estabilizador se dá a séculos e hoje sua aplicação está presente em obras de aterros, pavimentações e fundações superficiais. A cal é um aglomerante vastamente utilizado na estabilização de solos, devido ao seu baixo custo e garantir o ganho de resistência quando bem dosado.

A cal produzida, em grande parte, provém de rocha calcárea, sendo que este material deve ser calcinado para se obter a cal, o que produz dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Como alternativa Ferraz et al (2018), sugere a utilização de cascas de ovos como fonte alternativa de cal, impactando em uma exploração racional da rocha calcárea, sendo este um recurso não renovável. Além disso, o uso do resíduo promoveria um descarte mais adequado, isto é, o material deixaria de ir para aterros sanitários e passaria a ter maior valor agregado.

Dessa forma, este trabalho propõe a utilização da cal de casca de ovo para promover a estabilização de um solo argiloso, sendo a estabilização analisada por meio dos ensaios de resistência e rigidez. O capítulo 1 apresenta uma introdução do assunto estudado. No capítulo 2 são expostas as diretrizes para o desenvolvimento deste trabalho. Neste são apresentados: questão de pesquisa, objetivo principal e secundário, hipótese, pressuposto, delimitação, limitações e delineamento da pesquisa.

Já no capítulo 3 é realizada a revisão bibliográfica dos assuntos abordados neste trabalho. É apresentado o comportamento dos solos melhorados com cal, enfatizando o efeito que cada material provoca e a influência das variáveis estudadas.

Em relação ao capítulo 4, são descritos os materiais utilizados na pesquisa e os métodos para a realização dos ensaios, definição de parâmetros e obtenção de materiais.

O capítulo 5 descreve os resultados obtidos por meio dos ensaios realizados e comparações com outros trabalhos.

Por fim o capítulo 6 apresenta as conclusões desta pesquisa. Neste capítulo também são propostas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 DIRETRIZES DA PESQUISA

### 2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: a cal de casca de ovo pode ser utilizada como alternativa para a estabilização de um solo argiloso?

### 2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são apresentados a seguir:

#### 2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é avaliar a estabilização de um solo argiloso com cal de casca de ovo, por meio do comportamento mecânico, utilizando ensaios de resistência e de rigidez inicial.

#### 2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário consiste em avaliar a influência na resistência e na rigidez das misturas, de maneira isolada, de cada uma das variáveis de interesse, sendo estas a quantidade de cal e a porosidade. Além disso, verificar a possibilidade de correlação entre a resistência, a rigidez com a relação porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_{iv}$ ).

### 2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que a cal de casca de ovo possibilita a estabilização de solos argilosos e que a razão porosidade/teor volumétrico de cal é capaz de estimar a resistência à compressão simples, à compressão diametral e do módulo de rigidez inicial ( $G_0$ ) das misturas de caulim rosa e bentonita, em diferentes proporções, cimentadas com cal de casca de ovo.

### 2.4 PRESSUPOSTO

É conhecido que o valor da sucção nas amostras é baixo e pode ser desconsiderado. Conforme Lopes Junior (2007) e Dalla Rosa (2009) e Dalla Rosa Johann (2013).

### 2.5 DELIMITAÇÕES

A pesquisa se delimita à utilização de diferentes proporções, em massa seca, de caulim rosa e de bentonita estabilizadas com cal de casca de ovo, sendo ensaiadas à compressão simples e à diametral e ao módulo cisalhante inicial.

## 2.6 LIMITAÇÕES

O trabalho limita-se a estudar misturas com:

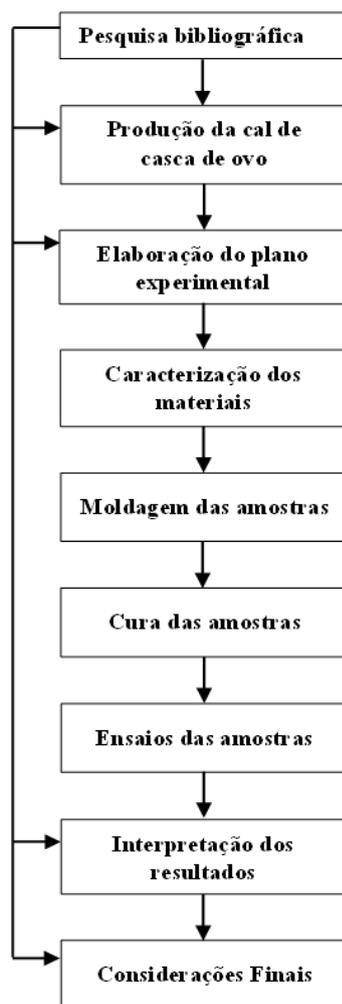
- a) solo:
  - \* 85% Caulim Rosa e 15% Bentonita; 80% Caulim Rosa e 20% Bentonita; 75% Caulim Rosa e 25% Bentonita;
  - \* teores de umidade: 100, 110 e 120%.
- b) teores de cal de casca de ovo: 5, 7 e 10%;
- c) tempo de cura dos corpos de prova de 28 dias.

## 2.7 DELINEAMENTO

A pesquisa será elaborada por meio das seguintes etapas apresentadas abaixo que são ilustradas na Figura 1 e descritas ao longo dos próximos parágrafos.

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) produção da cal de casca de ovo;
- c) elaboração do plano experimental;
- d) caracterização dos materiais;
- e) moldagem das amostras;
- f) cura das amostras;
- g) ensaios das amostras;
- h) interpretação dos resultados;
- i) considerações finais.

Figura 1 – Delineamento da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

Com relação à pesquisa bibliográfica, o objetivo desta é obter informações relativa à mistura solo-cal. Além disso, será realizada a busca de publicações e estudos a respeito dos materiais utilizados nesta técnica, das propriedades do resíduo usado na produção da cal, dos métodos de dosagem do aglomerante, do comportamento de solos estabilizados com cal e das variáveis em estudo

Na produção de cal de casca de ovo, o procedimento consiste na produção do aglomerante residual, sendo que ao longo do processo será feita a coleta do resíduo e por fim a calcinação do mesmo.

A elaboração do plano experimental constitui na definição dos parâmetros das amostras, listados abaixo:

- a) proporção das misturas

- b) teores de umidade;
- c) teores de cal;
- d) tempo de cura das amostras

Já a caracterização dos materiais, tem como fim a caracterização física das misturas de caulim rosa e bentonita.

Após definido todos os parâmetros das amostras, iniciará a moldagem das amostras. Posteriormente, os corpos de prova devêm ser armazenados, no período de cura pré-determinado, já no penúltimo dia de cura devem ser imersos em água por 24 horas, para, assim, efetuar completa saturação das amostras, reduzindo o efeito da sucção nas mesmas.

Dado este procedimento, os ensaios das amostras podem ser iniciados. Sendo estes: compressão simples, compressão diametral e pulso ultrassônico. Nos ensaios de compressão será utilizado uma prensa automatizada, variando apenas a posição da amostra. Na compressão simples a amostra é posicionada na vertical, já na compressão diametral é colocada na horizontal. Com relação ao ensaio de pulso ultrassônico este será executado nos corpos de prova de compressão simples, sendo utilizado o equipamento PunditLab (+), juntamente com dois transdutores de diferentes frequências. Posterior aos ensaios, os resultados devêm ser analisados, a fim de verificar a aceitação das amostras, caso estas não estiverem de acordo com os parâmetros de aceitação, as mesmas são refeitas.

Por fim a interpretação dos resultados obtidos com o rompimento das amostras, objetivando analisar, isoladamente cada uma das variáveis de interesse.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 VISÃO GERAL SOBRE A TÉCNICA DO SOLO-CAL

Para USBR (1998 apud Lopes Junior 2007) solo-cal é definido como o produto resultante da mistura íntima compactada de solo, geralmente argila, cal e água, em proporções estabelecidas através de dosagem.

Em relação as argilas expansivas estas tendem a reagir rapidamente com a adição de cal, diminuindo a plasticidade das mesmas Bell (1996 apud Bell e Coulthard, 1990). Além disso, conforme o mesmo autor, essa resposta mais ou menos instantânea, em vista dos íons de cálcio da cal causarem uma redução na plasticidade, tem a finalidade da alteração do solo, deixando o material mais friável e com maior trabalhabilidade.

Conforme Ingles e Metcalf (1972), a técnica de solo-cal ou solo-cimento é utilizada quando os materiais disponíveis carecem de propriedades como deformabilidade, resistência e permeabilidade, a fim de se adequarem a critérios adequados de projeto. O emprego da estabilização com cal é usualmente aplicado na construção de estradas, geralmente utilizado como base ou sub-base de pavimentos.

A técnica de melhoramento do solo também pode ser empregada em fundações de edificações de pequeno porte, em solos cuja a capacidade de suporte é baixa ou ainda apresentem baixa estabilidade volumétrica. Dadas condições são problemáticas na medida em que podem causar severas patologias na edificação (INGLES e METCALF, 1972).

Thomé (1994) estudou misturas de uma argila mole com 5, 7 e 9% de cal dolomítica. Demonstrando que a capacidade de carga e os recalques apresentaram melhora no desempenho, com o aumento da espessura da placa, fazendo com que as tensões mais significativas atuem na camada tratada, em virtude de suas melhores propriedades geotécnicas, por consequência, o valor do recalque diminui e aumenta a magnitude da capacidade de carga.

Outra relevância do método, conforme Thomé et.al (2005) é que em solos com baixa capacidade de suporte, a solução praticada é o uso de fundações profundas. Sendo que estas são assentes em camadas mais profundas e com maior capacidade de suporte. Todavia, esse tipo de solução técnica, pode inviabilizar obras de conjuntos habitacionais de baixo custo, em vista que nesses empreendimentos o investimento em fundações pode se tornar uma grande parcela do valor total da obra. Dessa forma, o autor afirma que a utilização de fundações apoiadas em sistema de dupla camada, sendo a superior a camada tratada, é uma técnica alternativa que pode ser utilizada nos casos em que existam solos de baixa resistência e o nível de carga das edificações seja baixo.

### 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS EM MISTURAS SOLO-CAL

#### 3.2.1 Solo

Conforme Ingles e Metcalf (1972) a cal proporciona pouco efeito em solos altamente orgânicos e também em solos com nenhuma ou pouca quantidade de argila. Sendo que, este agente cimentante é mais eficiente em solos argilosos, podendo ser mais efetivo que cimento em pedregulhos argilosos.

Bell (1996), verificou este comportamento tratando um solo contendo montmorilonita, para os teores de 2 a 3%, sendo os resultados mostrados por meio do ensaio de resistência à compressão simples. Ademais, neste solo, o teor de 4% de cal foi suficiente para atingir a resistência máxima. Já para um solo com predominância de caulinita, a resistência máxima se deu com teores entre 4 e 6 %. No entanto, para a mistura do solo caulinítico e cal a resistência foi ligeiramente superior em relação a outra.

#### 3.2.2 Cal

A cal utilizada na pesquisa será a não hidratada tendo em vista que o solo estabilizado será um solo argiloso. Este tipo de aglomerante será utilizado, em vista que o solo se apresenta na condição saturada, assim, este tipo de cal consumirá parte da água presente no material. Em relação a cal hidratada, esta é mais utilizada em pesquisas, tendo em vista que muitos trabalhos fazem a estabilização de solos não saturados, dessa forma a cal será um aglomerante responsável pela cimentação do solo e não necessitando de grande quantidade de água para sua hidratação.

Em virtude de a cal proveniente das cascas de ovos ser um material em desenvolvimento, será realizado o estudo sobre o que pode ser encontrado sobre a cal residual, até o presente momento, e sobre o resíduo.

#### 3.2.2.1 Propriedades da Casca de ovo

A indústria alimentícia gera grandes quantidades de resíduos de casca de ovo em todo o mundo. O resíduo é rico em carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), sendo considerado um resíduo sólido de difícil disposição final (Amaral et.al 2013).

Conforme FAO (2019) a produção mundial de ovos, em 2016, foi de aproximadamente 81 milhões de toneladas. Conforme Boron (2004), 11 % do peso de um ovo é composto pela casca, sendo assim, a produção anual de cascas foi aproximadamente de 8,91 milhões de toneladas em 2016.

Conforme Embrapa (2019) a produção de ovos no Brasil em 2018 foi de 44,5 bilhões de unidades, de acordo com Beck et.al (2010) a massa de um ovo médio é de aproximadamente 60g, a mesma considera que 11% desse peso seja composto pela casca, a produção anual desse resíduo no Brasil seria próxima de 294 mil toneladas. Para Boron (2004) o uso deste resíduo como fonte alternativa de  $\text{CaCO}_3$  pode reduzir o impacto sobre as reservas naturais de calcário, sendo estas fontes naturais não renováveis.

O óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) é uma matéria-prima usada pela indústria química na produção de cal. Cascas de ovos são uma excelente fonte dessa substância e poderiam fornecer uma matéria-prima alternativa para essa indústria (Oliveira *et al.* 2013). A composição do resíduo é de uma rede de fibras proteicas, associada com cristais de carbonato de cálcio (96% do peso da casca), carbonato de magnésio (1%) e fosfato de cálcio (1%), e também de substâncias orgânicas e água (2%), conforme Boron (2004).

Segundo Beck (2010) a casca de ovo, após apropriada calcinação, se torna cal viva, podendo desta forma ser hidratada, gerando a cal hidratada. Além disso, o mesmo autor afirmou que a cal proveniente de cascas de ovos alcançou 97% de pureza, sendo mais pura que a cal comercial.

Segundo Ferraz et al (2018) o resíduo deve ser valorizado, sendo que este tem potencial para produção de cal calcítica. Ademais, o reaproveitamento deste resíduo pode gerar vantagens ambientais e social, conforme os autores.

De acordo com Zaman et al (2018) a temperatura de calcinação do resíduo deve ser próxima de 1100 °C, para gerar a maior porcentagem de cal hidratada  $[Ca(OH)_2]$ . Sendo que temperaturas acima dessa diminuem a reatividade da cal, já as abaixo desta podem não decompor todo o carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) presente no resíduo.

### 3.2.2.2 Propriedades da Cal de casca de ovo

A cal utilizada para a pesquisa será a cal na forma não hidratada, porém em virtude de que na literatura se encontra estudos da cal residual nos dois estados, não hidratada e hidratada, será realizada a revisão de ambas as condições.

A cal estudada é proveniente de calcinação de cascas de ovos a temperaturas próximas de 1000°C, temperatura essa, que conforme Guimarães (2002, apud Dalla Rosa, 2009), ocorre a calcinação das rochas cálcicas e magnesianas para a produção da cal comercial. Assim, vários estudos utilizaram temperaturas próximas a está a fim de comparação entre as cales.

Ferraz et al (2018) realizaram estudos de caracterização físico-química da cal hidratada proveniente das cascas de ovos e da cal comercial, para isso foi utilizado o ensaio de difração por raios-X, conforme os autores. Ainda segundo observação destes, a cal alternativa tem capacidade reativa similar a cal comercial. Sendo apresentado os dados na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição mineralógica das cales hidratadas

<b>Elemento</b>	<b>Cal Comercial</b>	<b>Cal de casca de ovo Hidratada</b>
CaO (%)	81,73	76,77
MgO (%)	1,25	0,86
Na <sub>2</sub> O (%)	0,09	0,1
K <sub>2</sub> O (%)	0,04	0,03
SiO <sub>2</sub> (%)	0,22	0,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,11	0,02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,17	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,01	0,33
SO <sub>3</sub> (%)	0,16	0,18

(fonte: adaptado de Ferraz et al, 2018)

Bensaifi et al (2019) estudaram a estabilização de uma rocha sedimentar contendo argila e carbonato de cálcio, o uso deste solo é um desafio para engenharia, visto que sobre este material rodovias são construídas. Assim, os autores propuseram o melhoramento do material com a utilização de cimento Portland, de escoria granulada de alto-forno e de cal de casca de ovo, afim desta ser uma fonte de oxido de cálcio (CaO), quando não hidratada. Além disso, os

mesmos afirmam que com a utilização deste material seria possível diminuir a emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), durante a produção de cal. A fim de obter a caracterização físico-química do material, os autores utilizaram o ensaio de difração por raios-X, sendo na Tabela 2 apresentado os minerais presentes na cal não hidratada.

Tabela 2– Composição mineralógica da cal não hidratada de cascas de ovos

<b>Elemento</b>	<b>Cal de casca de ovo não Hidratada</b>
CaO (%)	92,02
MgO (%)	1,21
Na <sub>2</sub> O (%)	0,22
K <sub>2</sub> O (%)	-
SiO <sub>2</sub> (%)	0,41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	-
SO <sub>3</sub> (%)	0,12

(fonte: adaptado de Bensaifi et al, 2019)

Já Consoli et al (2020) analisaram a cal não hidratada e hidratada, juntamente, com uma fonte alternativa de material pozzolânico, o pó de vidro (SiO<sub>2</sub>), e um solo granular. Dessa forma, os mesmos caracterizaram as cales, com a finalidade de avaliar qual teria melhor resultado em sua pesquisa. Estes utilizaram a espectrometria de fluorescência por raios-X para a composição química dos materiais, sendo apresentada na Tabela 3.

Tabela 3– Composição mineralógica da cal não hidratada de cascas de ovos

<b>Elemento</b>	<b>Cal de casca de ovo não Hidratada</b>	<b>Cal de casca de ovo Hidratada</b>
CaO (%)	93,71	72,9
MgO (%)	2,39	1,17
Na <sub>2</sub> O (%)	-	-
K <sub>2</sub> O (%)	-	-
SiO <sub>2</sub> (%)	0,12	0,31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,13	0,36
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,15	0,13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	-	-
SO <sub>3</sub> (%)	-	-

(fonte: adaptado de Consoli et al, 2020)

### 3.2.2.3 Dosagem da Cal

Conforme Ingles e Metcalf (1972), a dosagem da cal objetiva selecionar a quantidade de cal a ser adicionada a um solo, com a finalidade de fornecer resistência e durabilidade compatível com o uso em que o material será empregado. Para isso, os autores citam que a dosagem deve ser realizada por meio de baterias de ensaios de laboratório.

Entre os métodos de dosagem que mais se destacam, são citados os seguintes pela literatura:

- I. Método do pH (Eades & Grim, 1966), consistindo na determinação do teor mínimo de cal que produza um aumento no valor do pH para 12,4;
- II. Método do ICL (Initial Consumption of Lime), proposto por Rogers et al. (1997, apud Lopes Junior, 2011), este procedimento é uma variação do método do pH, onde o teor mínimo de cal é aquele onde o pH atinge um valor constante (máximo);
- III. Método do Lime Fixation Point (HILT E DAVIDSON, 1960), baseado no limite de plasticidade, o qual determina o teor de cal máximo que propicia a melhora na trabalhabilidade, sem significativos aumentos de resistência.

De acordo com Thomé (1994), o método do pH não se apresentou apropriado para a determinação do teor ótimo de cal, sendo que este autor realizou a estabilização de um solo argiloso. Sendo que o valor aplicado pelo método (9%) apenas melhorou as características do material, já que a cimentação entre as partículas, como esperado, não ocorreu.

### 3.2.3 Água

A água potável é adequada, sendo que a água ácida (orgânica) deve ser evitada. Em relação a quantidade, a mesma é regrada pela quantidade para a compactação. A respeito de misturas com cal viva, o cuidado que dever ser tomado, em solos com teor de umidade inferior a 50%, poderá ser necessário acrescentar água extra, a fim de fornecer água suficiente para o processo de hidratação, em virtude desse ser muito rápido, conforme Ingles e Metcalf (1972).

### 3.3 CARACTERÍSTICAS COMPORTAMENTAIS DE MISTURAS SOLO-CAL

#### 3.3.1 Reações Solo-Cal

Castro (1995) observou que a adição de cal em um solo fino, com a presença de água, há, conjuntamente, algumas reações químicas. Na estabilização química de um solo, com a utilização de cal, o mesmo autor afirma que este processo se dá por meio de duas etapas distintas, sendo que primeiramente: ocorre o processo inicial que é rápido, durando horas a dias, já o secundário ocorre mais lentamente, podendo levar meses a anos.

Para Lopes Junior (2011), alguns eventos que podem provocar a etapa rápida no processo da interação da cal com um solo fino são: troca catiônica, floculação-aglomeração, compressão da dupla camada elétrica, adsorção de cal e reações químicas. Além disso, o autor afirmou que a fase lenta se dá por meio das reações pozolânicas, que proporcionam um aumento da resistência, devido à formação de produtos cimentantes. No entanto, a carbonatação, ocorre também, sendo uma reação prejudicial, uma vez que diminui a quantidade de cal disponível para produzir as reações pozolânicas.

Prusinski e Bhattacharja (1999) afirmam que com a troca catiônica, processo de estabilização inicial, que ocorre muito rapidamente, sendo seguida pela floculação e aglomeração. Conforme os autores, a superfície do argilo-mineral é escassa em carga e, para neutralizar essa deficiência, cátions e moléculas de água são atraídos para a superfície de clivagem carregada negativamente. Isso resultará em uma separação de duas camadas, chamada de dupla camada difusa.

Conforme estes mesmos autores a dupla camada atua como um lubrificante: quanto mais espessa a camada dupla, mais ativo e plástico é o solo. Cátions monovalentes como sódio e potássio ( $Na^+$  e  $K^+$ ) são os cátions predominantes que formam a dupla camada, junto com as moléculas de água.

Mitchell e Soga (2005, p.166) afirmam que, assumindo igual concentração, a ordem de adsorção preferencial de cátions comuns, associados com os solos é dada pela série:  $Na^+ < K^+ < Ca^{2+} < Mg^{2+} < Al^{3+}$ , da direita para a esquerda, ou seja, cátions de menor valência são substituídos por cátions de maior valência. Sendo a cal uma fonte de cálcio livre, sua adição, em quantidade suficiente, cria uma concentração de  $Ca^{++}$ , sendo estes adsorvidos na superfície dos argilo-minerais.

A flocculação e aglomeração alteram a textura da argila, em vista as partículas de argila têm sua estrutura alterada, sendo inicialmente plana e paralela, posterior a estes processos a orientação das partículas se dá de forma aleatória (Prusinski e Bhattacharja, 1999).

Lopes Junior (2011) atribuiu o aumento contínuo da resistência mecânica das misturas solo-cal por meio das reações pozolânicas. Sendo que o incremento na resistência ocorre porque as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo, que reagem com a cal e a água, foram diversos produtos cimentante.

Segundo Rogers e Glendinning (2000 apud Lopes Junior, 2011), os íons hidroxila liberados da cal aumentam o pH da mistura a um valor suficientemente alto, a fim de que a sílica e a alumina sejam dissolvidas da argila. Sendo que essas reações formarão géis de silicatos ou aluminatos hidratados de cálcio.

Conforme o relato do TRB (1987) esta reação não cessará enquanto houver hidróxido de cálcio  $[Ca(OH)_2]$  e sílica disponíveis no solo. Segundo Ingles e Metcalf (1972), os géis de silicato, produtos da reação, imediatamente cobrem e ligam as partículas de argila, bloqueando os vazios. Os géis são cristalizados lentamente e transformados em silicatos hidratados de cálcio bem definidos. Sendo que, conforme estes autores, a reação pozolânica só ocorre em presença de água, tendo a funcionalidade de carregar os íons cálcio e hidroxila para a superfície da argila.

### 3.3.2 Variáveis Determinantes do Comportamento de Misturas Solo-Cal

Ao momento que adicionada cal a um solo argiloso as propriedades físicas do mesmo são alteradas. Por isso que é necessário estudar os diversos fatores que estão atrelados a essas mudanças, dentre eles: teor de cal, período de cura e condições de cura.

A seguir serão detalhados os efeitos de alguns dos fatores considerados de suma importância na determinação da resistência de solos melhorados com cal, tendo esses elementos uma relação com as variáveis a serem estudadas na pesquisa.

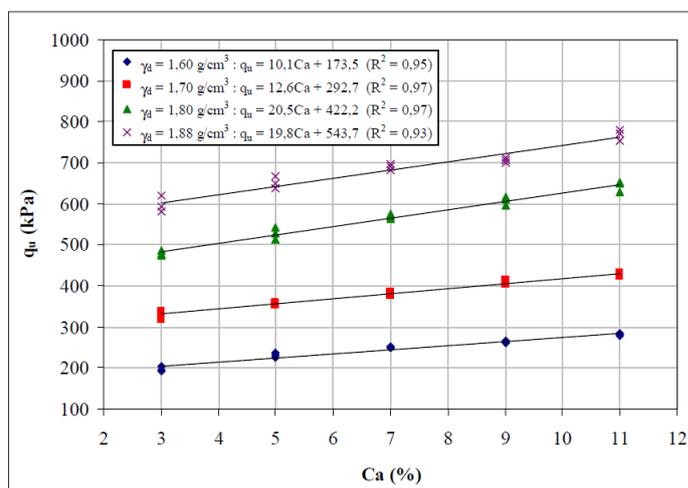
#### 3.3.2.1 Efeito da cal

Inicialmente a resposta da mistura solo, após a adição da cal, será a redução do índice de plasticidade e aumento da trabalhabilidade, posteriormente, há o aumento da resistência por meio da cimentação das partículas (Ingles e Metcalf, 1972).

Guimarães (1971, apud Lopes Junior ,2011) afirmou, que de maneira abrangente, a cal modifica, de forma favorável, algumas características dos solos, sendo estas modificações nas propriedades físicas do material, tal como: plasticidade, granulometria, trabalhabilidade, resistência e permeabilidade.

Em relação a resistência à compressão simples Lopes Junior (2007) verificou que nestes ensaios, realizados em um solo tratado com cal, com teores variando de 3 a 11%, com tempo de cura de 28 dias e umidade do solo de 14%, o autor observou um crescimento linear da resistência conforme o teor de cal. Sendo possível verificar-se este comportamento por meio da Figura 2, que com o aumento do teor de cal a resistência à compressão simples cresce linearmente.

Figura 2 – Resistência à compressão simples em relação ao teor de cal



(fonte: adaptado de Lopes Junior, 2007)

### 3.3.2.2 Efeito da Porosidade

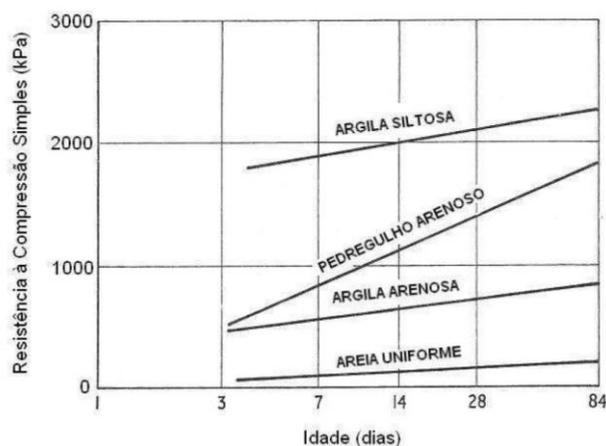
Conforme Dalla Rosa (2009) a porosidade é um fator que influencia na resistência à compressão simples, de forma similar ao aumento da resistência da mistura compactada devido à quantidade de cal. Dado que, independentemente, da quantidade de cal utilizada, a redução da porosidade do material promoverá aumentos na resistência. Além disso, a autora observou que a resistência à compressão simples aumenta exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

Já para Lopes Junior (2007) o ganho de resistência com a redução na porosidade da mistura, em relação à resistência à compressão simples, pode ser atribuído por um aumento dos contatos entre as partículas existentes, deixando a cimentação mais efetiva. Ademais, esse aspecto contribui com a maior capacidade de distribuição de tensões, além da maior capacidade de mobilização de atrito nas porosidades mais baixas.

### 3.3.2.3 Efeito do tempo de cura

Ingles e Metcalf (1972) apresentaram um estudo comparando diferentes tempos de cura em alguns solos, sendo observado taxas de ganhos de resistência maiores em pedregulhos arenosos, conforme Figura 3. Além disso, é possível verificar que a resistência à compressão simples aumenta com o tempo de cura, de forma linear, em todos os solos estudados pelos autores.

Figura 3 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura



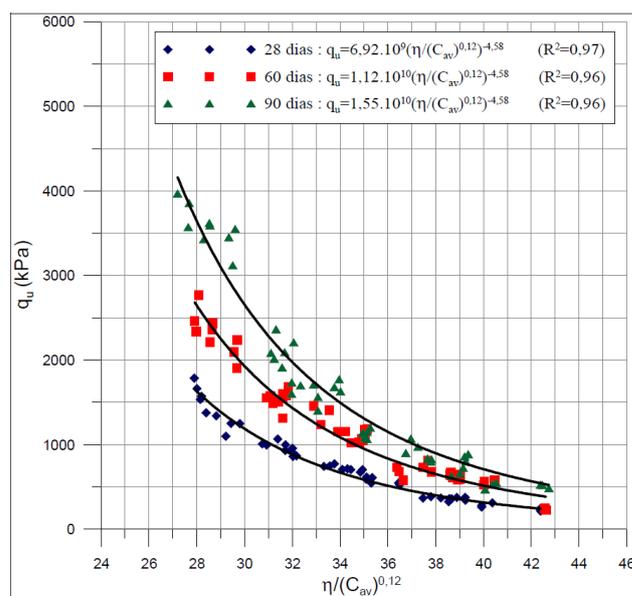
(fonte: adaptado de Ingles e Metcalf 1972, apud Lopes Junior, 2011)

Já Thomé (1994) estudou misturas de uma argila mole com 5, 7 e 9% de cal dolomítica. Sendo que este autor observou que a resistência não apresentou variação significativa para tempos de cura superiores a 7 dias. De acordo com o autor, as reações pozolânicas foram impedidas ou sua quantidade fora insuficiente para cimentar as partículas. Sendo que, conforme o autor, as reações podem ser impedidas pelos fatores simultâneos ou independentes: falta de água, temperatura de cura muito baixa, teor de cal insuficiente ou presença de matéria orgânica.

Para Lopes Junior (2007) as misturas de solo residual de arenito Botucatu com 25% de rocha basáltica pulverizada, tratadas com 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cal, curadas com 90 dias, apresentaram em média, resistências 50% superiores em relação às amostras com 28 dias de cura.

Para as misturas de solo residual de Arenito Botucatu com 25% de cinza volante, tratadas com 3%, 5%, 7% e 9% de cal, Dalla Rosa (2009) verificou que as amostras curadas por um período de 90 dias, apresentaram em média, resistências 35% superiores às amostras curadas por 60 dias, e estas, por sua vez, apresentaram resistências 65% superiores em relação às amostras com 28 dias de cura. Já as amostras ensaiadas com 90 dias de cura apresentam, em média, resistências em torno de 115% mais altas que as ensaiadas com 28 dias de cura, sendo isso observado pela Figura 4.

Figura 4– Influência do tempo de cura em amostras ensaiadas com 28, 60 e 90 dias



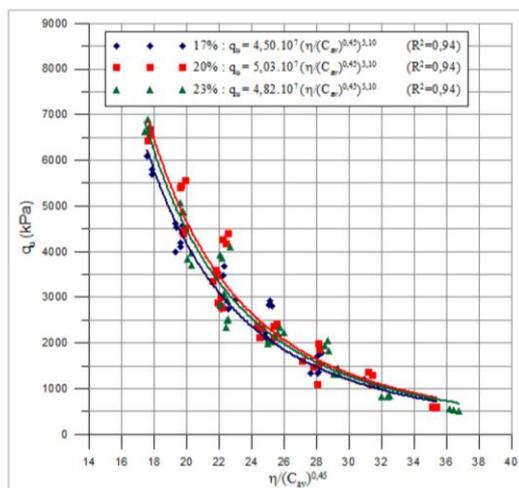
(fonte: adaptado de Dalla Rosa, 2009)

#### 3.3.3.4 Efeito do teor de umidade

Conforme Lopes Junior (2007), a variação do teor de umidade de moldagem, mantendo-se constante a massa específica aparente seca, não afetou consideravelmente a resistência à compressão simples de amostras com cal curadas a 28 dias e amostras com cimento. Em relação as amostras com cal curadas a 90 dias, em geral, houve uma diminuição da resistência com o teor de umidade acima de 14%.

Já para Dalla Rosa Johann (2013), conforme a Figura 5, o aumento da resistência à compressão simples com o aumento do teor de umidade é dado até um valor ótimo (20%), a partir do qual a resistência passa a diminuir. Além disso, as alterações no teor de umidade não provocaram muitas variações na resistência das misturas.

Figura 5– Variação da resistência simples com o teor de umidade



(fonte: adaptado de Dalla Rosa Johann, 2013)

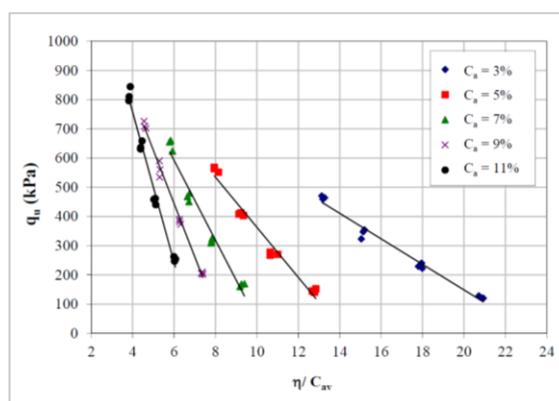
### 3.3.2.5 Efeito da relação porosidade/cal

A relação porosidade/cal é definida pela razão do volume de vazios pelo volume de cal. Trabalhos de Lopes Junior (2007,2011) e Dalla Rosa (2009) e Dalla Rosa Johann (2013) apresentam correlações entre a razão do vazios/agente cimentante e a resistência à compressão simples, a resistência à compressão diametral e da rigidez inicial, sendo que estes consideram uma relação razoável.

Para Lopes Junior (2011) não há uma correlação única entre resistência à compressão simples e a relação porosidade/teor volumétrico de cal, Figura 6, sendo que conforme o autor, valores iguais de porosidade/teor volumétrico de cal, obtidos de diferentes combinações de cal e porosidades, apresentam distintas resistências.

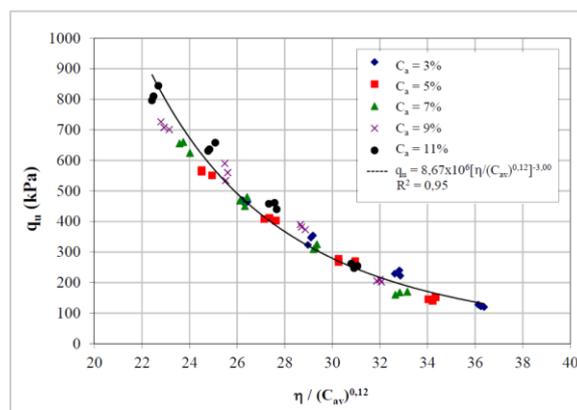
Para o mesmo autor, este afirma que uma maneira de compatibilizar as taxas de variação das grandezas, volume de vazios e o volume de agente cimentante, é através da aplicação de uma potência sobre uma delas. Já para se obter o melhor expoente verifica-se o melhor coeficiente de determinação ( $R^2$ ), sendo isto feito por meio de tentativas. Na Figura 6 é possível verificar a curva sem a aplicação do expoente, já a Figura 7 apresenta os mesmos dados, mas com a aplicação do expoente adequado.

Figura 6– Variação resistência à compressão simples em relação porosidade/cal



(fonte: adaptado de Lopes Junior, 2011)

Figura 7– Variação resistência à compressão simples em relação porosidade/cal ajustado



(fonte: adaptado de Lopes Junior, 2011)

Para Dalla Rosa (2009) a aplicação de um expoente ao volume de agente cimentante é considerada válida. No entanto, a fim de apresentar os resultados de forma adimensional a autora não apresentou pela forma de volume vazios/volume de agente cimentante, mas sim pela razão da porosidade do material ( $\eta$ )/teor volumétrico de cal ( $C_{av}$ ), sendo ambos expressos em porcentagem. Além disso, a mesma autora afirmou que não ocorre alteração na qualidade dos ajustes dos dados, visto que as novas variáveis são proporcionais as já utilizadas.

Sendo que para a resistência à tração Vitali (2008, apud Dalla Rosa ,2009) apresenta um bom ajuste para esta variável, em função da relação porosidade/agente cimentante.

Além disso, com o objetivo de avaliar os efeitos dos teores de cal, porosidade das misturas, relação porosidade/cal e tempo de cura, pode ser realizado a verificação do módulo cisalhante do solo-cal, conforme Lopes Junior (2011), já os resultados plotados em função da razão porosidade/teor cimentante.

Conforme Dalla Rosa (2009) a relação porosidade/agente cimentante, apresentada por diversos autores, possui grande potencial de utilização para as misturas solo-cal. Sendo justificada pela eficiência desta relação na previsão do comportamento mecânico e na previsão da rigidez inicial de materiais cimentados, inclusive de misturas solo-cal.

Foppa (2005) e Consoli et al. (2007) introduziram um método racional de dosagem baseado na relação entre o volume absoluto de vazios ( $V_v$ ) e o volume absoluto de cimento ( $V_c$ ). Esta relação pode ser expressa como o quociente entre a porosidade ( $\eta$ ) e o teor volumétrico de cimento ( $C_{iv}$ ) conforme apresentado na equação (1), em que  $V_{total}$  corresponde ao volume total da amostra de solo cimentado.

$$\frac{V_v}{V_c} = \frac{V_v/V_{total}}{V_{cimento}/V_{total}} = \frac{\eta}{C_{iv}} \quad (1)$$

Consoli et al. (2009a, 2009b) propuseram uma relação semelhante a apresentada, no entanto o teor volumétrico de cimento é substituído pelo teor volumétrico de cal ( $L_{iv}$ ), para emprego em solos finos estabilizados com esse material. O mesmo autor estudou estas misturas submetidas ao ensaio de compressão simples. Em virtude da utilização de ensaios de tração por compressão diametral será utilizada, também, a metodologia de Consoli et al (2010).

Além da metodologia de dosagem que estuda o comportamento mecânico das misturas, este ligado a resistência, foi demonstrado a eficácia da relação  $\eta/L_{iv}$  em descrever parâmetros para os materiais geotécnicos artificialmente cimentados. Dentre estes, estão a rigidez inicial, proposto por Consoli et al (2017b), no qual os autores estudam este método aplicado a um rejeito de mineração de ouro estabilizado com cimento Portland.

### 3.4. COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS ESTABILIZADOS COM CAL

Conforme Dalla Rosa (2009), solos estabilizados com a adição de cal são materiais geotécnicos já utilizados. Já quanto ao seu comportamento mecânico, o material pode diferir, significativamente, se comparado com o solo natural. Assim, para a avaliação da estabilização do material se utiliza ensaios de compressão simples e diametral, descritos a seguir, sendo os mesmos utilizados por diversos autores na literatura.

#### 3.4.1 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Ensaio de resistência à compressão simples são utilizados segundo a literatura, quando se deseja verificar a efetividade da estabilização com adição de cal ou analisar fatores que são influentes sobre a resistência de solos tratados. Uma das razões para tal é a experiência acumulada com este tipo de ensaio na área de concretos, além de ser um ensaio de simples e rápida execução, baixo custo, confiável e amplamente difundido no meio técnico (Quiñónez Samaniego, 2015).

Segundo Bell (1988), a resistência de misturas solo-cal é influenciada por alguns fatores, tais como: tipo de solo, tipo e quantidade de cal, tempo e temperatura de cura, peso específico aparente seco, umidade de moldagem e tempo de espera entre mistura e compactação.

Ormsby e Kinter (1973, apud Quiñónez Samaniego 2015), por sua vez, constataram que em solos ricos em caulinita a adição de cal cálcica ocasiona maiores resistências do que a dolomítica, sendo a resistência à compressão simples função linear do teor de cal adicionado. Já para solos contendo montmorilonita a relação é uma equação do segundo grau, e os melhores efeitos são obtidos com a adição de cal dolomítica.

#### 3.4.2 Ensaio de Resistência à Tração

A resistência à tração do solo-cal é de grande interesse em projetos de pavimentos e tem sido estudada por vários pesquisadores. Conforme Thompson (1975, apud Nunez 1991), o ensaio de resistência à tração por compressão diametral induz a valores de menor magnitude quando comparado aos obtidos via a resistência à tração na flexão.

Além disso, o mesmo constatou que o quociente entre a resistência à tração pela resistência à compressão simples das misturas solo-cal estudadas varia de 0,10 a 0,15, independentemente do tipo e/ou teor de cal.

Consoli et al (2014) analisaram que por meio da razão  $q_t/q_u$  pode ser determinado parâmetros de resistência do solo, como ângulo de atrito ( $f'$ ) e coesão ( $c'$ ). Além disso, para esses autores o intervalo válido da razão varia de 0,09 a 0,18.

### 3.5 UTILIZAÇÃO DE MISTURAS DE CAULIM E BENTONITA EM PESQUISAS

A fim de se reproduzir, em laboratório, muitas pesquisas utilizam misturas de caulim rosa e bentonita em diversas proporções, tendo como objetivo simular o comportamento de solos argilosos de campo. Conforme Faria (2019), a construção de um solo artificial permite melhor homogeneidade, trabalhabilidade e controle dos parâmetros geotécnicos de interesse às análises. Além disso, Lopes Junior (2011), afirma que para a estabilização com cal a presença de frações de argila e silte na composição do solo torna-se fundamental para esse processo. Sendo este mais um motivo da escolha deste tipo de mistura.

Diversos trabalhos realizados no Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental (LEGG), vêm utilizando estas misturas de caulim rosa e bentonita com o propósito de reproduzir o comportamento de solos argilosos, com ênfase em aplicações offshore. Porém, esta pesquisa tem a finalidade de utilizar o material como solo argiloso, mas sem aplicações offshore. Dessa forma, alguns trabalhos são citados, visto que os autores utilizaram as mesmas misturas que serão usadas na pesquisa.

Jung (2012) na sua pesquisa a respeito de estudos de jateamento em solos argilosos, utilizou a mistura de 80% de caulim rosa e 20% de bentonita, em massa de materiais secos. O autor utilizou os teores de umidade de 100 e 120 %. Oliveira (2005) também adotou a mesma mistura em seu trabalho.

Já Sampa (2015), Lourenço (2016) e Faria (2019) adotaram em seus estudos as proporções de 85% de caulim rosa e 15% de bentonita em massas secas, com teor de umidade de 120%, onde os mesmos observaram que esta proporção guarda similaridade com as propriedades das argilas marinhas estudadas.

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de analisar a influência da adição de diferentes teores de cal de casca de ovo na resistência à compressão simples e diametral, além de distintos valores de porosidade para três solos argilosos e por fim avaliar a rigidez inicial do solo tratado com cal.

Buscou-se criar um solo argiloso composto por diferentes teores de Caulim Rosa e Bentonita, sendo ambos solos utilizados para pesquisas no LEGG, por exemplo Gauer (2010), Sampa (2015), Lourenço (2016) e Faria (2019) utilizaram a mistura destes dois materiais a fim de simular um solo presente no ambiente marinho, os mesmos utilizaram algumas proporções usadas na pesquisa.

Sendo assim, para a obtenção dos objetivos deste trabalho e posterior análise dos resultados, alguns parâmetros devem ser definidos, sendo estes:

- a) Proporções de solo: 85% caulim rosa e 15% bentonita; 80% caulim rosa e 20% bentonita; 75% caulim rosa e 25% bentonita;
- b) Tipo de agente cimentante: cal de casca de ovo não hidratada;
- c) Teores de cal: 5, 7 e 10 % em relação à massa de solo seco;
- d) Teores de Umidade: 100, 110 e 120% em relação a massa da mistura seca;
- e) Tempo de Cura: 28 dias.

Assim, com as características das amostras definidas, foi adotado para o plano experimental a triplicata para cada ponto de moldagem. Foram moldados 81 corpos de prova para compressão simples e 81 para compressão diametral.

### 4.2 MATERIAIS

Neste tópico será detalhado os materiais que serão utilizados no programa experimental, sendo estes:

- a) Solo;
- b) Cal de casca de ovo não hidratada;
- c) Água;

d) Moldes cilíndricos de PVC.

#### 4.2.1 Solo

Como os solos utilizados nesta pesquisa tratam-se de misturas de caulim rosa e bentonita, apenas estes dois materiais serão descritos neste tópico, sendo as misturas, 85% caulim rosa e 15% bentonita, 80% caulim rosa e 20% bentonita e 75% caulim rosa e 25% bentonita, caracterizadas e analisadas no tópico 5.2.

##### 4.2.1.1 Caulim rosa

O caulim é composto por silicato de alumínio hidratado, formado basicamente por caulinita, conforme Faria (2019). Nesta pesquisa, utilizou-se o caulim de cor rosa proveniente de uma jazida de Pântano Grande, no estado do Rio Grande do Sul. Sendo o mesmo embalado em sacos de 25 kg, após aberto o solo era armazenado em bombonas e foi atentado para o lote do material, sendo utilizado o mesmo ao longo de toda pesquisa.

A Figura 8 ilustra a curva granulométrica do material obtida por Sampa (2015), classificado pelo autor como uma argila medianamente plástica. O solo é composto por 30% de argila (<0,002 mm), 68% silte (0,002 a 0,074 mm) e 2% de areia fina (0,074 a 0,42 mm), classificação feita pelo mesmo autor. Já na Tabela 4 tem-se as propriedades do solo.

Figura 8 – Curva granulométrica do caulim.



(fonte:Sampa,2015)

Tabela 4 – Propriedades físicas do Caulim

Propriedades do Caulim	
Limite de Liquidez – LL (%)	40
Limite de Plasticidade – LP (%)	27
Índice de Plasticidade – IP (%)	13
Massa Específica Real dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,7
Diâmetro médio, D <sub>50</sub> (mm)	0,0052

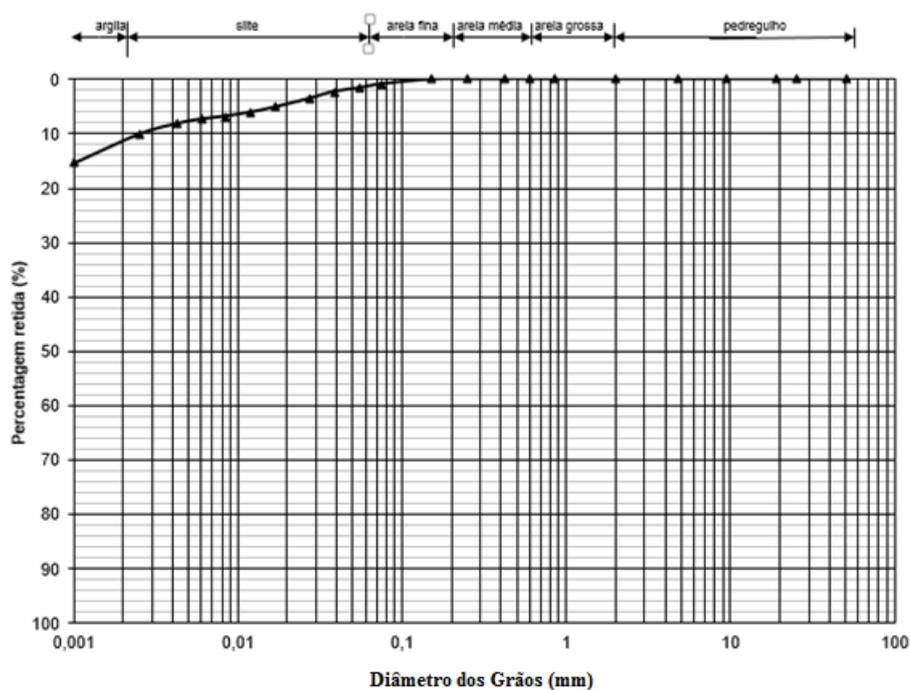
(fonte: adaptado de Sampa, 2015)

#### 4.2.1.2 Bentonita

A bentonita utilizada é uma bentonita sódica, de baixa condutividade hidráulica, retenção de água e alta plasticidade aos materiais que ela se mistura, em função dos argilominerais presentes na sua constituição (Sampa, 2015). Proveniente de uma jazida localizada no município de Santa Maria de Boa Vista /PE. A armazenagem se deu da mesma forma que o Caulim Rosa.

A Figura 9 ilustra a curva granulométrica do material, obtida por Sampa (2015). Sendo composto por 89% de argila (<0,002 mm), 10% silte (0,002 a 0,074 mm) e 1% de areia fina (0,074 a 0,42 mm), classificação feita pelo mesmo autor. A Tabela 5 apresenta as propriedades da Bentonita.

Figura 9 – Curva granulométrica da Bentonita.



(fonte: Sampa,2015)

Tabela 5 – Propriedades físicas do Caulim

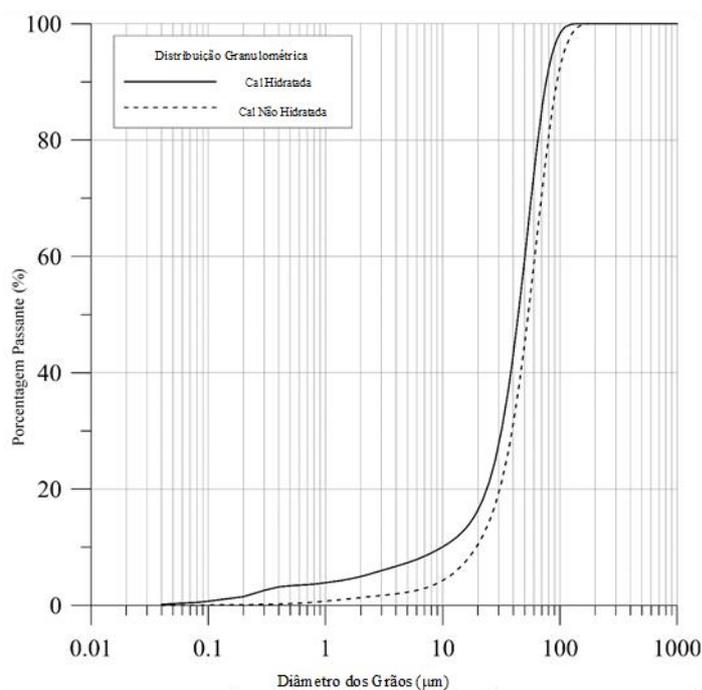
Propriedades do Bentonita	
Limite de Liquidez – LL (%)	439
Limite de Plasticidade – LP (%)	65
Índice de Plasticidade – IP (%)	374
Massa Específica Real dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,87

(fonte: adaptado de Sampa, 2015)

#### 4.2.2 Cal de Casca de Ovo

A cal utilizada nos ensaios é um produto originado da casca de ovo, o resíduo era obtido junto ao comércio local. Consoli et.al (2020) realizaram a caracterização do aglomerante alternativo. Os autores utilizaram a ASTM D854 (ASTM,2014) para o ensaio de massa específica da cal não hidratada, obtendo o valor de  $2,48 \text{ g/cm}^3$ . Além disso, os mesmos utilizaram a difração por raio laser para obter a curva granulométrica da cal, ilustrada na Figura 10, a mesma contém a granulometria da cal não hidratada e hidratada. Ademais, na Tabela 6 é apresentado a caracterização química da cal de casca de ovo.

Figura 10 – Curva granulométrica das Cales de Casca de Ovo



(fonte: adaptado de Consoli et al, 2020)

Tabela 6– Composição química da cal de casca de ovo não hidratada

Elemento	Cal de casca de ovo não Hidratada
CaO (%)	93,71
MgO (%)	2,39
Na <sub>2</sub> O (%)	-
K <sub>2</sub> O (%)	-
SiO <sub>2</sub> (%)	0,12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	-
SO <sub>3</sub> (%)	-

(fonte: adaptado de Consoli et al, 2020)

#### 4.2.3 Água

Para melhor controle de qualidade sobre os ensaios foi utilizada a água destilada, em vista que esta não contém minerais, além disso, a mesma fora obtida por meio de destilação no próprio laboratório. No entanto, para a imersão das amostras empregou-se a água do abastecimento público.

#### 4.2.4 Moldes cilíndricos de PVC

Em consequência do alto teor de umidade inicial das misturas, posterior a adição de cal e água o material torna-se muito líquido. Dessa forma, moldes cilíndricos em PVC foram produzidos. Sendo estes moldes com as dimensões: 47,5 mm de diâmetro interno e 95 mm de altura. Para todos os ensaios fora utilizado estes moldes, com a finalidade de atender as especificações do programa experimental.

Em virtude destes moldes não estarem disponíveis no laboratório foi necessário fabricá-los. Assim, os condutos em PVC foram cortados, lixados e, posteriormente, suas medidas foram aferidas com um paquímetro. Após isto, os moldes eram envoltos por fitas adesivas em sua base, objetivando a estanqueidade do molde e preservação das propriedades físicas da amostra, tal qual umidade e peso específico aparente seco.

Devido à retração da mistura, o molde foi aumentado, garantindo, assim, a altura correta dos corpos de prova. Isto era realizado por meio da disposição de um colarinho de PVC, este era fixado no topo do molde com a utilização de uma fita adesiva, a qual garantiria a estanqueidade entre as duas partes. Na Figura 11 o molde é apresentado em sua condição inicial e final.

Figura 11 – Moldes de PVC: sem colarinho e molde com colarinho e vedado por fitas adesivas.



(fonte: elaborado pelo autor)

## 4.3 MÉTODOS

### 4.3.1 Ensaios de caracterização

Os ensaios de caracterização do caulim rosa, da bentonita, e das misturas foram realizados seguindo as normas da ABNT. A preparação das amostras e a determinação do teor de umidade foram regidas pelo procedimento descrito na NBR 6457 (ABNT,2016). Já para os ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), os mesmos seguiram a NBR 6459 (ABNT,2016) e NBR 7180 (ABNT,2016), respectivamente. Em relação a análise granulométrica, a mesma seguiu as deliberações da NBR 7181 (ABNT,2016), quanto a massa específica dos grãos foi utilizada a NBR 6458 (ABNT,2016).

Para a determinação da massa específica dos grãos de solos argilosos e siltosos a NBR 6458 (ABNT,2016) indica a utilização de 50 g para o ensaio. No entanto, em virtude da bentonita estar presente nas misturas, solo em que os Limites de Atterberg são elevados e possui grande absorção de água, não pode ser utilizado a quantidade indicada pela norma. Dessa forma, decidiu-se utilizar 30 g para os ensaios das misturas.

### 4.3.2 Definição dos teores de cal

A determinação do teor mínimo de cal seguiu-se as recomendações da norma ASTM D6276-19 (ASTM,2019). Sendo que a mesma determina que sejam feitos cinco teores de cal e uma amostra saturada. No entanto, decidiu-se ampliar a faixa de teores, possibilitando aferir teores intermediários ou inferiores ao que a norma recomenda.

Já para a aferição do pH, fora utilizado o pHmetro de bancada da marca Marte, modelo MB-10. Inicialmente, o eletrodo deveria ser calibrado em duas soluções tampão, respectivamente de pH 7 e 10.

Na Figura 12 apresenta-se os recipientes em que a mistura era colocada, sendo que nos copos brancos o material era vertido, a fim de se aferir o pH do solo com diferentes teores de cal.

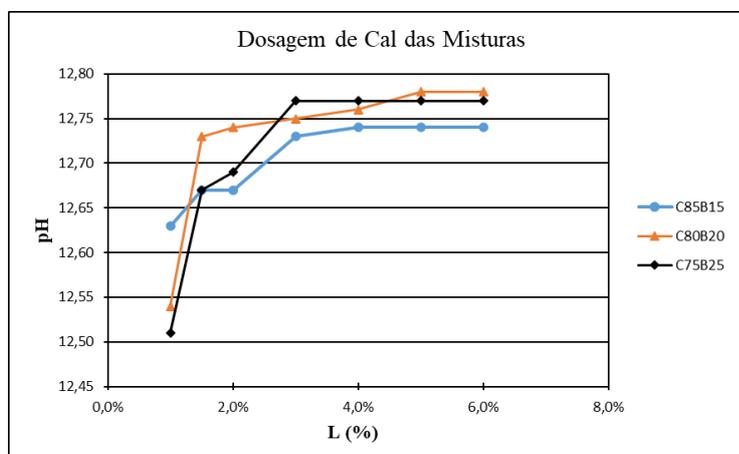
Figura 12 – Recipientes para agitação da mistura e aferição de pH



(fonte: elaborado pelo autor)

Conforme o método do ICL (Initial Consumption of Lime), proposto por Rogers et al (1997) o teor mínimo seria aquele em que o pH se estabiliza. Assim, neste trabalho utilizou-se deste método para a definição dos teores a serem utilizados. Na Figura 13, é apresentado os resultados da dosagem de cal para as diferentes misturas, demonstrando que com o teor de 5% todas as misturas adquirem pH contaste. Os demais teores utilizados na pesquisa são observados em outros trabalhos.

Figura 13 – Dosagem de Cal pelo método ICL



(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.3.3 Definição da massa específica aparente seca

Para se obter este parâmetro levou-se em consideração que o solo deveria estar saturado, na condição de lama. Dessa forma pode-se obter a massa específica aparente seca ( $\gamma_d$ ) pela equação (2). Obtida do livro de Pinto (2006, p.80).

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s * \gamma_w}{\gamma_w + \gamma_s * w} \quad (2)$$

$\gamma_d$ : Massa específica aparente seca, [g/cm<sup>3</sup>];

$\gamma_s$ : Massa específica dos grãos [g/cm<sup>3</sup>];

$\gamma_w$ : Massa específica da água [g/cm<sup>3</sup>];

w: Umidade do solo, em decimal [].

As umidades das misturas foram escolhidas conforme os trabalhos já citados, sendo que os autores utilizaram umidades iguais ou próximas aos valores usados no trabalho. Dessa forma, na Tabela 7 é apresentado os teores de umidade e a massa específica aparente seca, para cada mistura utilizada na presente pesquisa.

Tabela 7 – Umidade e Massa específicas aparente seca por mistura

Solo	w (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
85% Caulim 15% Bentonita	100	0,72
	110	0,67
	120	0,63
80% Caulim 20% Bentonita	100	0,73
	110	0,68
	120	0,63
75% Caulim 25% Bentonita	100	0,73
	110	0,68
	120	0,64

(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.3.4 Obtenção da cal de casca de ovo

Inicialmente as cascas de ovos foram coletadas em locais onde há a utilização de ovos. Posteriormente, o resíduo era lavado, a fim de se retirar a película que envolve as cascas, visto que está possui grande quantidade de matéria orgânica. A lavagem era feita para amenizar a emissão de odores durante a calcinação.

Na Figura 14, o resíduo está em sua condição natural, sendo assim, o mesmo era lavado em água da rede de abastecimento público, posteriormente era triturado em um liquidificador, com 50% de resíduo e 50% de água, em volume. A seguir este era peneirado, com o objetivo de reter, em grande parte, apenas a casca de ovo. Em virtude de o material conter bastante água este era seco em estufa a temperatura de 100°C, por um período de 24 horas, na Figura 15 é possível notar o resultado deste processo. O mesmo era colocado em sacos plásticos, após atingir a quantidade necessária do material, a calcinação inicial era realizada, visto que fora criado um grande lote para calcinação, objetivando a maior homogeneidade do resíduo.

Figura 14 – Cascas de ovos em seu estado natural



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 15 – Cascas de ovos trituradas e secas



(fonte: elaborado pelo autor)

Em virtude da limitação do equipamento que realiza a calcinação final, deveria ser realizado um processo de remoção da matéria orgânica remanescente do processo descrito

anteriormente. A limitação se dá em virtude que o forno do tipo mufla da marca Sanchis Modelo CL- 1200, possuir resistências expostas, assim, parte do carbono liberado na calcinação ficaria aderido as resistências, prejudicando o funcionamento do equipamento, informação esta dada pelo fabricante. Dessa forma, foi necessário utilizar um forno tipo mufla da marca SP Labor, modelo SP-1200, Figura 16, sendo que este possui resistências isoladas. Assim, o material foi calcinado a 600 °C, temperatura que conforme Carús et al (2013) é suficiente para a eliminação da matéria orgânica. O processo ocorria ao longo de um período de três horas, sendo uma hora para o forno atingir a temperatura desejada, já o intervalo remanescente destinado para a calcinação do material. Após o fim deste processo a mufla era desligada e após 24 horas o material poderia ser retirado, em vista que o equipamento demorava este período para atingir a temperatura ambiente. Sendo o produto deste processo ilustrado na Figura 17. Ao longo do processo havia uma perda de 50% do material inicial, isto é, para 100 gramas de resíduo era obtido 50 gramas, ao final da calcinação.

Figura 16 – Forno tipo mufla da marca SP Labor, modelo SP-1200



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 17 – Material obtido após a calcinação inicial



(fonte: elaborado pelo autor)

Em seguida o material proveniente da calcinação inicial era posto no forno tipo mufla da marca Sanchis. Conforme Zaman et al (2018) temperaturas próximas de 1100 °C fazem com que a cal seja mais reativa. Dessa forma, optou-se pela temperatura de 1050 °C, em virtude que estudos no laboratório utilizam esta temperatura de calcinação. Em relação ao período de calcinação, este foi de 240 minutos, visto que após esta duração não se observava a presença de grumos pretos, o que indica que a calcinação se deu de forma adequada. Para esse processo havia um rendimento de 50% do material calcinado.

Na Figura 18 é possível verificar o recipiente em que era colocado os materiais para a calcinação, sendo este cadinho de porcelana, com limite de temperatura de 1200 °C e gradiente térmico de 7,5 °C/min, informações obtidas no manual do fabricante. Para a calcinação inicial utilizava-se dois recipientes, temperatura de 600 °C, quanto na calcinação final era usado também dois recipientes, temperatura de 1050 °C.

Figura 18 – Cadinho para calcinação das cascas de ovos



(fonte: elaborado pelo autor)

Na Figura 19 é possível verificar o equipamento forno mufla, utilizado para a calcinação final.

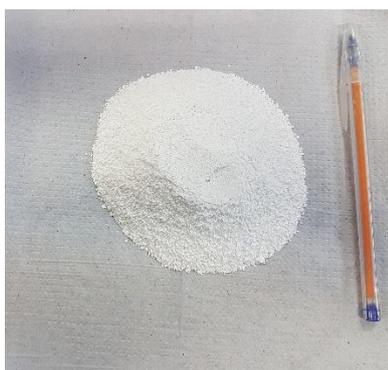
Figura 19 – Forno tipo mufla marca Sanchis, modelo CL-1200



(fonte: elaborado pelo autor)

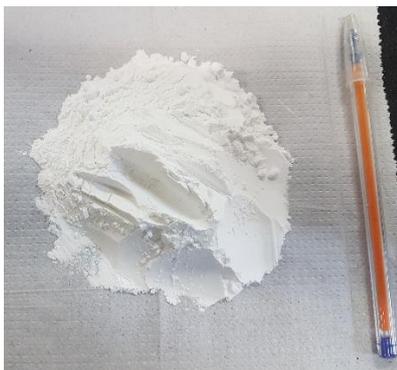
Já a Figura 20, ilustra o produto final, após a calcinação, o mesmo era peneirado na peneira #200, com malha de abertura de 0,075 mm, este processo é realizado para a homogeneização do material, sendo o aspecto final apresentado na Figura 21. Toda a cal foi peneirada em um único lote, assim, este material possuiria mais homogeneidade. Logo após, o material foi acondicionado em sacos plásticos, a fim de evitar sua hidratação, e armazenado até a moldagem das amostras.

Figura 20 – Cal de Casca de Ovo após a calcinação final



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 21 – Cal de Casca de Ovo passante na peneira 0,075 mm



(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.3.5 Preparação das amostras

##### 4.3.5.1 Moldagem das amostras

Todos corpos de prova seguiram o mesmo padrão, independentemente de qual seria o ensaio que este seria submetido. De início era necessário pesar o caulim rosa e a bentonita, nas proporções especificadas para cada mistura, proporção feita em relação ao material seco. O procedimento de pesagem foi realizado em um único lote, onde este possuiria toda a massa de mistura necessária para a pesquisa, para isso foi utilizado uma balança com precisão de 0,01 g. Dado este processo os materiais eram homogeneizados com o auxílio de uma espátula metálica, logo após, a mistura foi armazenada em sacos plásticos.

Na data da moldagem, o solo era pesado conforme cálculos preestabelecidos em planilha. Em referência a cal, a mesma tinha seu teor calculado em relação a massa de solo seco. Quanto a água destilada, esta era acrescida após a homogeneização do aglomerante e do solo, sua dosagem era calculada em termos da soma das massas de solo e cal. Em virtude da retirada de cápsulas de umidade, a quantidade da mistura era calculada com um acréscimo de 10%, em relação ao peso úmido da amostra, assim, haveria material suficiente para a preparação dos corpos de prova e para a aferição do teor de umidade.

Com a mistura homogênea, metade da quantidade do material era vertida, cuidadosamente, dentro do molde cilíndrico de PVC, após isso eram aplicados 30 golpes contra a base do molde, tampando-se a boca do molde para evitar perda de material, em seguida a quantidade restante era colocada no molde, desferindo-se 40 golpes na base do molde, sendo que com o total de golpes e número de camadas, foi observado que a amostra fica homogênea, não apresentando separação visível entre as camadas. Antes de todo o processo, tirava-se a tara do molde, logo após a moldagem do corpo de prova a massa da amostra era aferida, com o objetivo de garantir o peso específico aparente seco da amostra ( $\gamma_d$ ). Na Figura 22, é possível verificar o processo de mistura dos materiais.

Figura 22 – Procedimento de mistura de todos os materiais



(fonte: elaborado pelo autor)

Sendo ressaltado que o molde era preenchido de forma que o volume da mistura atingisse uma altura superior à altura desejada da amostra. Isto é necessário, tendo em vista que há a retração da mistura, o que poderia não garantir a altura especificada do corpo de prova para os ensaios. O procedimento é possibilitado pela utilização do colarinho de PVC acima do molde.

Posterior a moldagem, era retirada uma pequena quantidade do material e colocada em duas cápsulas, sendo pesadas e levadas à estufa a temperatura de 100 graus Celsius, num período de 48 horas. Logo após, as cápsulas, que continham o material seco, eram pesadas e, assim, o teor de umidade poderia ser calculado. Dessa forma, adotava-se como teor de umidade de uma amostra o valor médio entre os dois valores obtidos após o cálculo.

Dado o procedimento descrito, o molde era identificado e colocado dentro de 2 sacos plásticos e armazenado. Na Figura 23, é ilustrado um corpo de prova após a moldagem, com identificação e embalado.

Figura 23 – Amostra finalizada e acondicionada, respectivamente.



(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.3.5.2 Cura das amostras

Finalizada a moldagem e a amostra já embalada e identificada, a mesma era armazenada, por um período de 72 horas, em ambiente com temperatura e umidade controladas (temperatura de  $23^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ). Assim, após este período, as amostras, já com alguma resistência adquirida, eram armazenadas em sacos herméticos, Figura 24, para evitar a entrada de água e, então, colocadas em cura submersa, até completarem 27 dias após serem moldadas.

Figura 24 – Amostra armazenada e hermeticamente vedada



(fonte: elaborado pelo autor)

Desta forma, no vigésimo sétimo dia os corpos de provas eram extraídos do molde de PVC e, posteriormente, submersos em água do abastecimento público, ao longo de 24 horas, visando à saturação e a redução da sucção destes. Na Figura 25 apresenta-se o corpo de prova extraído do molde e pronto para imersão. Já a Figura 26 ilustra as amostras no tanque de imersão.

Figura 25 – Amostra após período de cura extraída do molde de PVC



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 26 – Amostras no tanque de imersão



(fonte: elaborado pelo autor)

Após as 24 horas, o corpo de prova era, então, pesado e medido com resolução de 0,01 g e 0,01 mm, respectivamente, assim, a amostra poderia ser ensaiada. Na Figura 27 é apresentado o corpo de prova pronto para ser ensaiado.

Figura 27 – Corpo de prova



(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.3.5.3 Controle de qualidade das amostras

Em virtude de o processo de moldagem ser totalmente manual, deve-se seguir critérios rigorosos, com a finalidade de que a amostra ensaiada esteja de acordo com os seguintes parâmetros.

- \* massa específica aparente seca ( $\gamma_d$ ): grau de compactação de 99 a 101% do especificado;
- \* teor de umidade (w):  $\pm 0,5$  pontos percentuais;
- \* diâmetro:  $47,5 \pm 0,47$  mm;
- \* altura:  $95 \pm 0,95$  mm.

Além disso, foram moldados corpos de prova em triplicata para cada ponto de moldagem, garantindo maior confiabilidade nos resultados. Conforme Dalla Rosa (2009) é indicado que a moldagem dos corpos de prova seja aleatória, e para um mesmo ponto fosse em dias diferentes. Assim, seguiu-se esses princípios para que neste procedimento ruídos pudessem ser espalhados e, conseqüentemente, diminuídos.

Já em relação aos critérios de aceitação das resistências à compressão simples e à compressão diametral, seguiu-se a NBR 12253 (ABNT,2012). De acordo com esta norma, com a resistência obtida das três amostras, de um mesmo ponto, deve ser calculada a média destas. Sendo considerados os valores que estiverem dentro da faixa de variação de 10%, em relação à média, tanto para mais quanto para menos.

#### 4.3.6 Ensaio de pulso ultrassônico

De acordo com SANTAMARINA et al (2001, apud SCHEUERMANN FILHO 2019) o módulo cisalhante ( $G_0$ ), em meios elásticos, infinitos e contínuos, possui uma relação intrínseca com a massa específica do meio ( $\rho$ ) e a velocidade de propagação de uma onda cisalhante ( $V_s$ ). Sendo que para se obter o valor do módulo deve-se seguir a equação (3). Com relação as ondas cisalhantes estas necessitam de meios com certa rigidez para se propagarem e são filtradas por fluidos como água, já ondas de compressão podem ser propagadas em meios sólidos e fluidos e filtradas no vácuo (SANTAMARINA et al, 2001, apud SCHEUERMANN FILHO 2019).

$$G_0 = \rho * V_s^2 \quad (3)$$

Sendo:

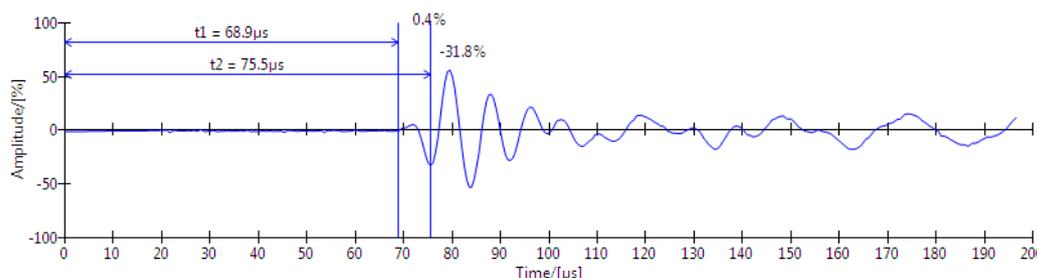
$\rho$  = massa específica do material;

$V_s$  = velocidade da onda cisalhante.

Em relação aos ensaios, estes eram iniciados após a medição e pesagem das amostras de compressão simples, sendo previamente retiradas do tanque de imersão e secas superficialmente. Para a realização dos ensaios foi utilizado o equipamento PunditLab(+), onde ocorria a medição dos tempos de propagação de ondas de compressão e de cisalhamento ao longo dos corpos de prova.

Inicialmente a onda de compressão era induzida pela propagação de uma vibração, produzida nos transdutores e com frequência de 54 kHz, tendo-se como resultado o tempo de deslocamento da onda de compressão ( $t_p$ ), este tempo era obtido diretamente no equipamento citado. Posteriormente, a onda de cisalhamento era propagada por transdutores à uma frequência de 250kHz resultando o tempo de deslocamento da onda de cisalhamento ( $t_s$ ). Em virtude que a leitura deste tempo deveria ser devidamente interpretada, a mesma ocorria na interface computacional do programa do PunditLab(+). A Figura 28 apresenta o resultado característico do ensaio de pulso ultrassônico: sendo observado a chegada da onda de compressão de início ( $t_1$ ), onde  $t_1$  é equivalente ao  $t_p$ , a seguir a onda cisalhante ( $t_2$ ), sendo  $t_2$  o  $t_s$ . Na mesma figura no eixo das abcissas o valor lido é o tempo em microssegundos ( $\mu s$ ), já nas ordenadas lê-se a amplitude da onda em percentual. Com o decorrer da pesquisa, foi observado que, geralmente, o  $t_s$  é superior ao  $t_p$ .

Figura 28 – Resultado de um ensaio de pulso ultrassônico, em interface computacional



(fonte: elaborado pelo autor)

Para as leituras ocorrerem da maneira correta, a interface entre o transdutor e o corpo de prova deveria ser preenchida com um gel específico para cada tipo de onda, o mesmo auxiliaria na transmissão e leitura do sinal.

Quanto ao cálculo das velocidades ( $V_p$  e  $V_s$ ) tomava-se a altura média do corpo de prova e o tempo medido. Para o  $t_p$  eram realizadas três leituras deste, considerando-se a média dos valores, o mesmo era realizado para o  $t_s$ . Faz-se necessário ressaltar que o tempo de deslocamento da onda de compressão serviria apenas para comparação entre o que era lido no equipamento e na interface computacional.

#### 4.3.7 Ensaio de compressão simples

Com relação aos ensaios de compressão simples, as amostras eram colocadas no tanque de imersão após o ensaio de pulso ultrassônico, assim a saturação era garantida. Neste trabalho, os procedimentos do ensaio de compressão simples seguiram as diretrizes da norma NBR 5739 (ABNT,2018).

No ensaio utilizou-se uma prensa automatizada com capacidade de carga de 100 kN e deslocamento controlado de 1,14 mm por minuto. Para a aferição do carregamento na amostra usou-se uma célula de carga calibrada com capacidade de carga de 10kN.

Para o cálculo da resistência, inicialmente, o valor lido pela célula de carga deveria ser convertido, com a utilização da equação de calibração da mesma, assim, obtinha-se o carregamento aplicado à amostra. Já a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) para cada amostra era determinada segundo a equação (4):

$$q_u = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot D_m^2}{4}} \quad (4)$$

Onde:

Q = carregamento aplicado à amostra e obtido pela calibração da célula de carga;

$D_m$  = diâmetro médio da amostra.

Na Figura 29 é ilustrado a amostra sendo ensaiada à compressão simples.

Figura 29 – Ensaio de resistência à compressão simples



(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.3.8 Ensaio de tração por compressão diametral

Nos ensaios de tração por compressão diametral, após os corpos de provas serem pesados e medidos, os mesmos eram ensaiados. Quanto aos procedimentos do ensaio de tração por compressão diametral, estes eram realizados de acordo com a norma NBR 7222 (ABNT,2011).

Para a realização do ensaio foi utilizado o mesmo equipamento citado no item anterior e também a mesma célula de carga. Neste ensaio a diferença está no posicionamento da amostra, que era ensaiada na horizontal

Ao final do ensaio o valor lido na célula de carga era convertido, pela equação de calibração da mesma, e, assim, tinha-se o valor do carregamento. A determinação da resistência à compressão diametral ( $q_t$ ), para cada corpo de prova, foi dada por meio da equação (5):

$$q_t = \frac{2*Q}{\pi*H_m*D_m} \quad (5)$$

Onde:

Q = carregamento aplicado à amostra e obtido pela calibração da célula de carga;

$H_m$  = altura média da amostra;

$D_m$  = diâmetro médio da amostra.

Na Figura 30 é ilustrado a amostra sendo ensaiada à compressão simples.

Figura 30 – Ensaio de resistência à compressão diametral



(fonte: elaborado pelo autor)

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos neste trabalho, sua análise e comparação com outros trabalhos e com dados da bibliografia.

Primeiramente, são apresentados os ensaios de caracterização das misturas de caulim rosa e bentonita. Em seguida, são expostos os resultados referentes aos solos argilosos estabilizados com cal de casca de ovo.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

Será realizada a comparação dos resultados do trabalho exposto com o trabalho de Sampa (2015), sendo plotada as curvas do caulim e da bentonita

Na Tabela 8 são expostos os resultados da caracterização do caulim rosa utilizado neste trabalho e em outros da literatura.

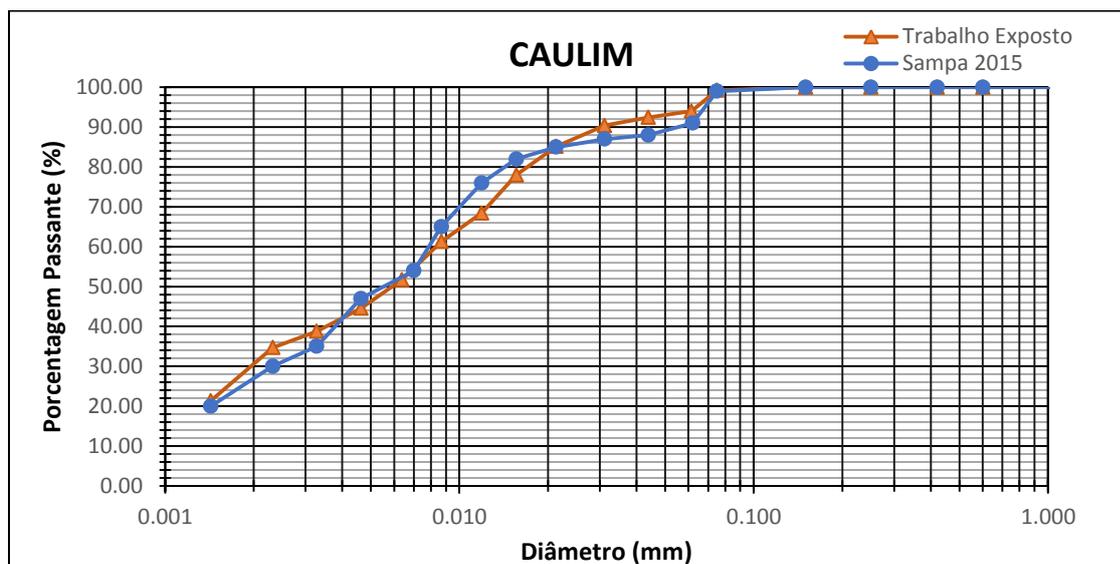
Tabela 8 – Propriedades do caulim utilizado na pesquisa

Propriedades do Caulim	Fonte		Norma Utilizada
	Sampa (2015)	Trabalho Proposto	
Limite de Liquidez – LL (%)	40	41	NBR 6459/16
Limite de Plasticidade – LP (%)	27	25	NBR 7180/16
Índice de Plasticidade – IP (%)	13	16	NBR 7180/16
Massa Específica Real dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,7	2,531	NBR 6458/16
% Argila	30	30	6502/95
% Silte	68	65	6502/95
% Areia	2	5	6502/95

(fonte: elaborado pelo autor)

A Figura 31 ilustra a curva granulométrica do caulim, obtido por Sampa (2015) e o presente trabalho. Classificado como uma argila medianamente plástica, conforme a classificação unificada (SUCS), de acordo com a norma da ASTM D5102-09.

Figura 31 – Curva Granulométrica do Caulim por Sampa (2015) e da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

Na Tabela 9 são expostos os resultados da caracterização da bentonita utilizada neste trabalho e em outros da literatura.

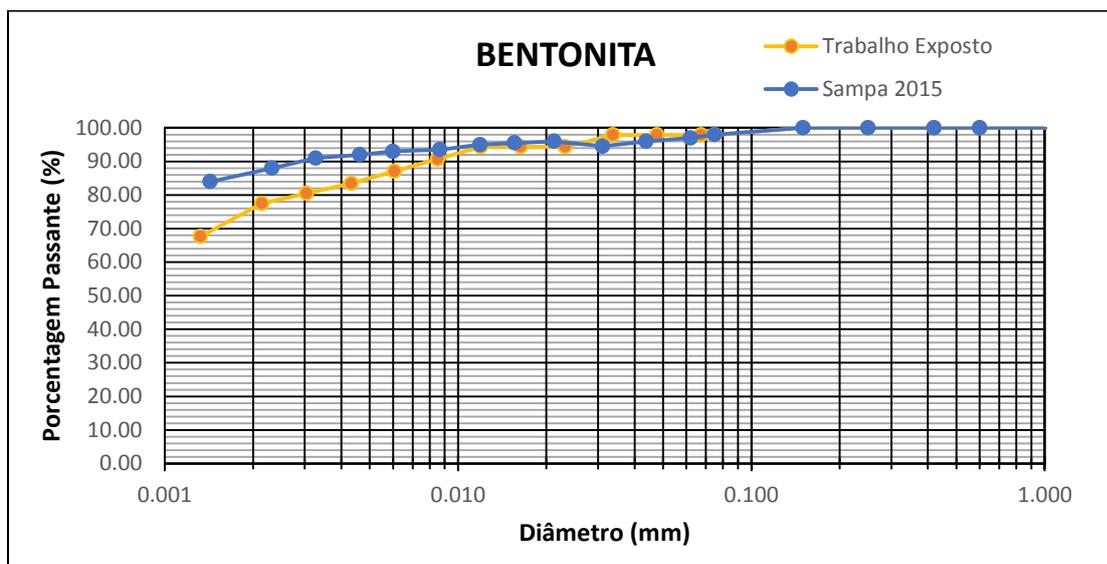
Tabela 9 – Propriedades da bentonita utilizada na pesquisa

Propriedades da Bentonita	Fonte		Norma Utilizada
	Sampa (2015)	Trabalho Proposto	
Limite de Liquidez – LL (%)	439	431	NBR 6459/16
Limite de Plasticidade – LP (%)	65	83	NBR 7180/16
Índice de Plasticidade – IP (%)	374	348	NBR 7180/16
Massa Específica Real dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,87	2,717	NBR 6458/16
% Argila	89	80	6502/95
% Silte	10	18	6502/95
% Areia	1	2	6502/95

(fonte: elaborado pelo autor)

A Figura 32 ilustra a curva granulométrica da bentonita, obtido por Sampa (2015) e o presente trabalho. Classificada como uma argila altamente plástica, conforme a classificação unificada (SUCS), de acordo com a norma da ASTM D5102-09.

Figura 32 – Curva Granulométrica do Caulim por Sampa (2015) e da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS

Será realizada a comparação dos resultados encontrados em trabalhos disponíveis na literatura, sendo ressaltado que se utilizou as normas atuais, o que pode diferir das normas empregadas nos trabalhos citados.

Na Tabela 10 são expostos os resultados da caracterização da mistura 85% caulim rosa e 15% bentonita utilizada neste trabalho e em outros da literatura.

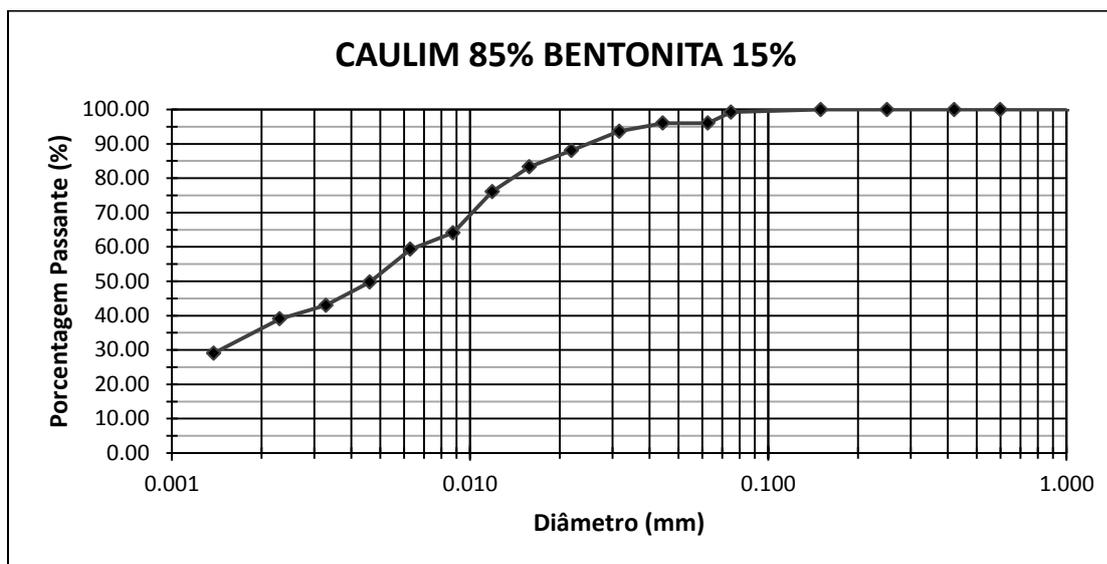
Tabela 10 – Propriedades da mistura 85% Caulim e 15% Bentonita

Propriedades 85% Caulim e 15% Bentonita	Trabalho			Norma Utilizada
	Sampa (2015)	Faria (2019)	Presente Pesquisa	
Limite de Liquidez – LL (%)	108	103	103	NBR 6459/16
Limite de Plasticidade – LP (%)	33	37	35	NBR 7180/16
Índice de Plasticidade – IP (%)	75	66	68	NBR 7180/16
Massa Específica Real dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,65	2,626	2,608	NBR 6458/16
% Argila	39	41	37	6502/95
% Silte	59	58	59	6502/95
% Areia	2	1	4	6502/95

(fonte: elaborado pelo autor)

A Figura 33 ilustra a curva granulométrica da mistura 85% caulim rosa e 15% bentonita, obtida no presente trabalho. Classificada como uma argila muito plástica, conforme a classificação unificada (SUCS), de acordo com a norma da ASTM D5102-09. Já para Faria (2019), o solo pode ser considerado como altamente plástico.

Figura 33 – Curva Granulométrica da mistura 85% Caulim e 15% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

Já na Tabela 11, são expostos os resultados da caracterização da mistura 80% caulim rosa e 20% bentonita, sendo também comparado com os dados disponíveis na literatura.

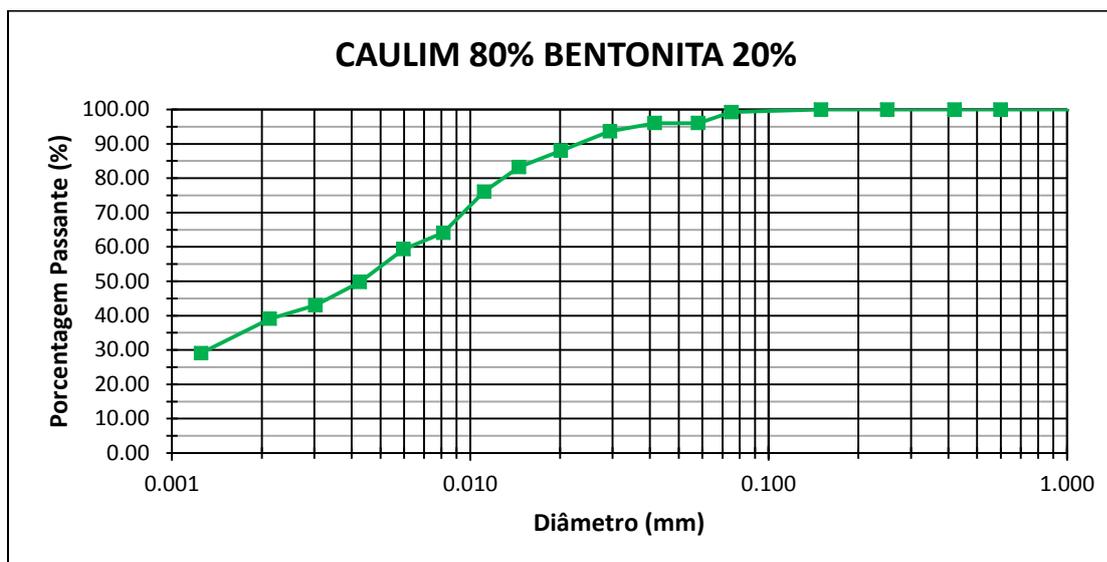
Tabela 11 – Propriedades da mistura 80% Caulim e 20% Bentonita

Propriedades 80% Caulim e 20% Bentonita	Trabalho			Norma Utilizada
	Jung (2012)	Oliveira (2005)	Presente Pesquisa	
Limite de Liquidez – LL (%)	102	93	105	NBR 6459/16
Limite de Plasticidade – LP (%)	32	22	40	NBR 7180/16
Índice de Plasticidade – IP (%)	70	71	65	NBR 7180/16
Massa Específica Real dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,569	2,617	2,666	NBR 6458/16
% Argila	83	-	38	6502/95
% Silte	17	-	59	6502/95
% Areia	0	-	3	6502/95

(fonte: elaborado pelo autor)

Na Figura 34 é apresentada a curva granulométrica da mistura 80% caulim rosa e 20% bentonita, obtida nesta pesquisa. Classificada como uma argila muito plástica, conforme a classificação unificada (SUCS), de acordo com a norma da ASTM D5102-09. Jung (2012) classificou o material como uma argila de alta plasticidade.

Figura 34 – Curva Granulométrica da mistura 80% Caulim e 20% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

A Tabela 12 expõem os resultados de caracterização da mistura 75% caulim rosa e 25% bentonita, para esta mistura não foi encontrado nenhum estudo para comparação.

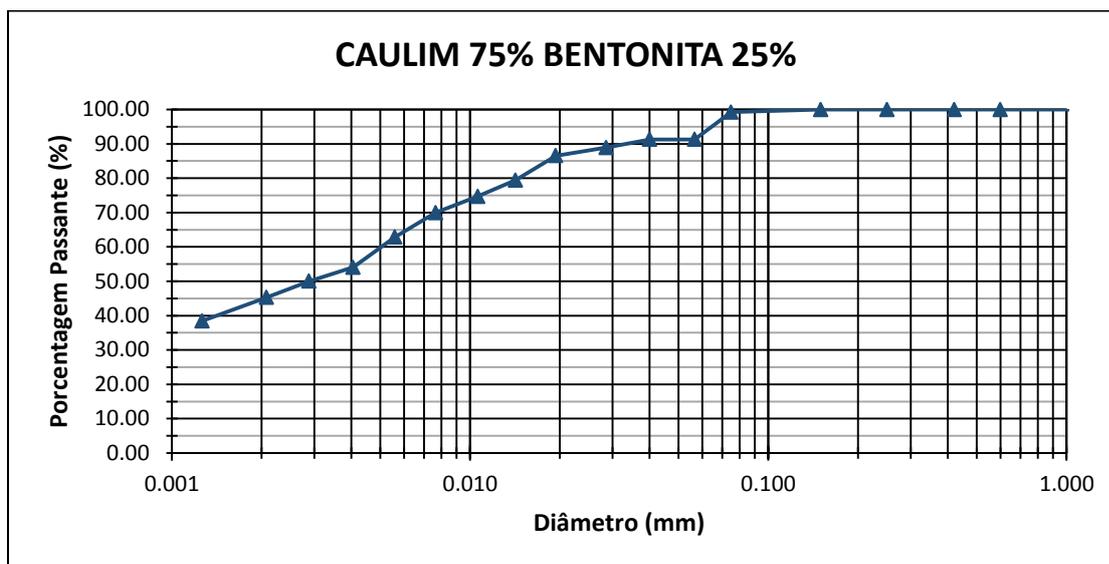
Tabela 12 – Propriedades da mistura 75% Caulim e 25% Bentonita

Propriedades 75% Caulim e 25% Bentonita	Trabalho	Norma Utilizada
	Presente Pesquisa	
Limite de Liquidez – LL (%)	131	NBR 6459/16
Limite de Plasticidade – LP (%)	48	NBR 7180/16
Índice de Plasticidade – IP (%)	89	NBR 7180/16
Massa Específica Real dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,708	NBR 6458/16
% Argila	44	6502/95
% Silte	50	6502/95
% Areia	6	6502/95

(fonte: elaborado pelo autor)

Na Figura 35 é apresentada a curva granulométrica da mistura 75% caulim rosa e 25% bentonita, obtida no presente trabalho. Classificada como uma argila muito plástica, conforme a classificação unificada (SUCS), de acordo com a norma da ASTM D5102-09.

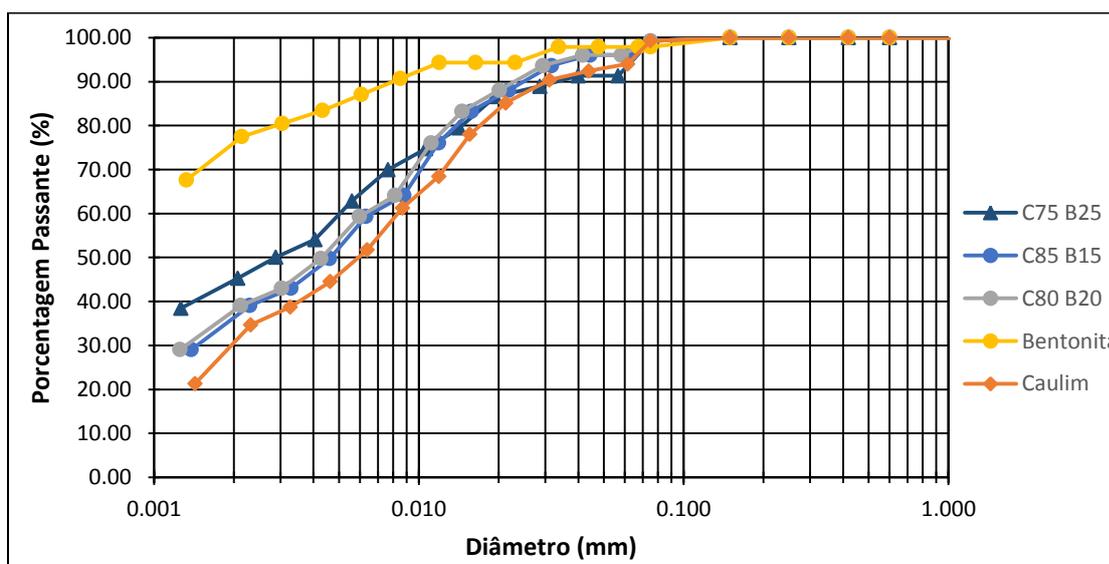
Figura 35 – Curva Granulométrica da mistura 75% Caulim e 25% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

Por meio da Figura 36, é possível observar que as misturas com menor teor de bentonita, 15 e 20%, são bastante similares ao caulim, já a mistura com 25% não possui tanta similaridade, a partir de diâmetros menores que 0,010 mm. Além disso, o limite de liquidez (LL) desta mistura é de 131% e o índice de plasticidade (IP) é de 83%, fazendo com que a mesma seja bem distinta das outras misturas: 15% (LL= 103% e IP = 68%), 20% (LL= 105% e IP = 65%).

Figura 36 – Curvas Granulométricas dos materiais estudados



(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

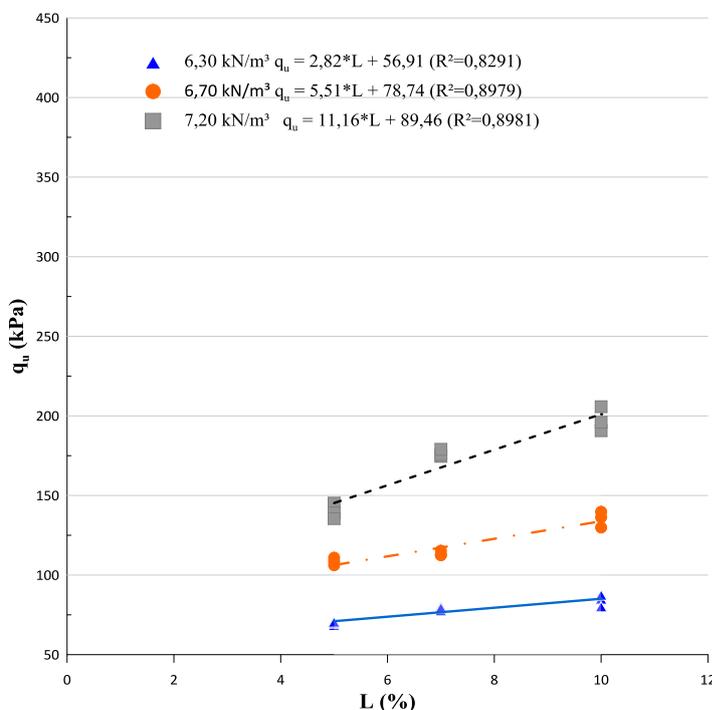
Os ensaios de compressão simples foram utilizados para a determinação da resistência à compressão das amostras. Assim, os resultados foram analisados com a finalidade de verificar o efeito do teor de cal e da porosidade na resistência das misturas. Ademais, a relação porosidade/cal também será apresentada neste item.

#### 5.3.1 Efeito da cal

Nas figuras 37, 38 e 39, são apresentadas as curvas ajustadas para as misturas estudadas, cada uma expressando um peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), sendo mostrado a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função da quantidade de cal (L) nas amostras.

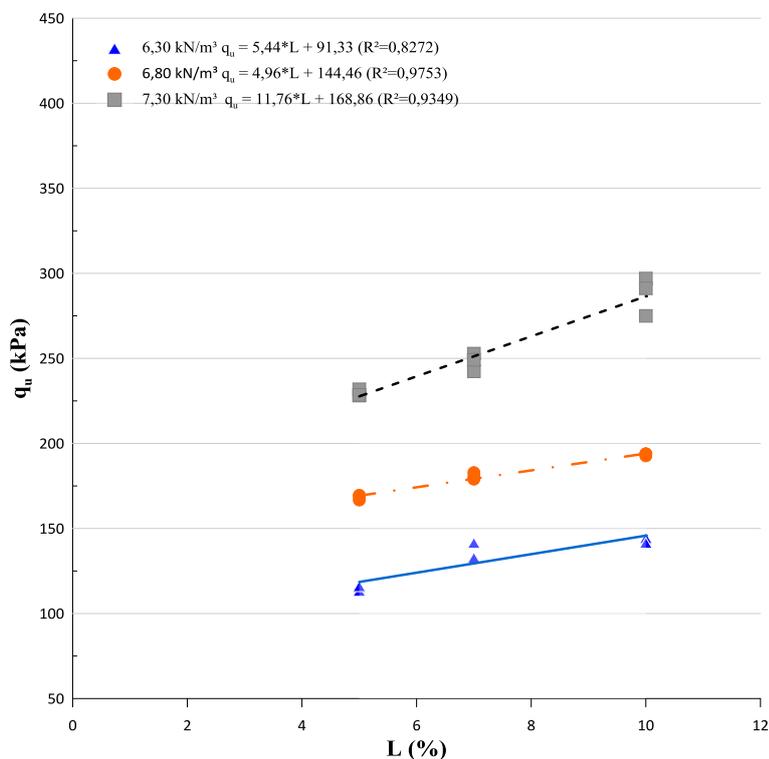
Independente da mistura observada, é possível notar que a quantidade de cal influi nas resistências dos corpos de prova. Verifica-se também que, a resistência à compressão simples varia de forma linear com o aumento do teor de cal, o mesmo já fora observado por Lopes Junior (2007), Dalla Rosa (2009). Ademais, é possível notar que a inclinação das curvas, para uma mesma mistura, aumenta, em virtude que o peso específico aparente seco aumenta, concluindo que, com a redução do índice de vazios a estabilização é mais efetiva.

Figura 37 – Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em relação ao teor de cal (L) para a mistura 85% Caulim e 15% Bentonita



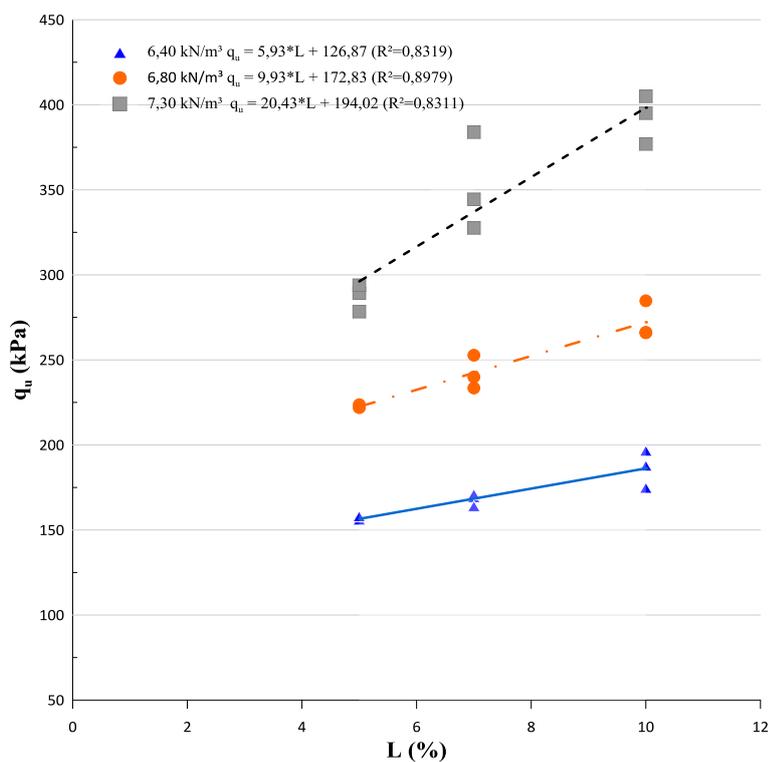
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 38 – Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em relação ao teor de cal (L) para a mistura 80% Caulim e 20% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 39 – Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em relação ao teor de cal (L) para a mistura 75% Caulim e 25% Bentonita

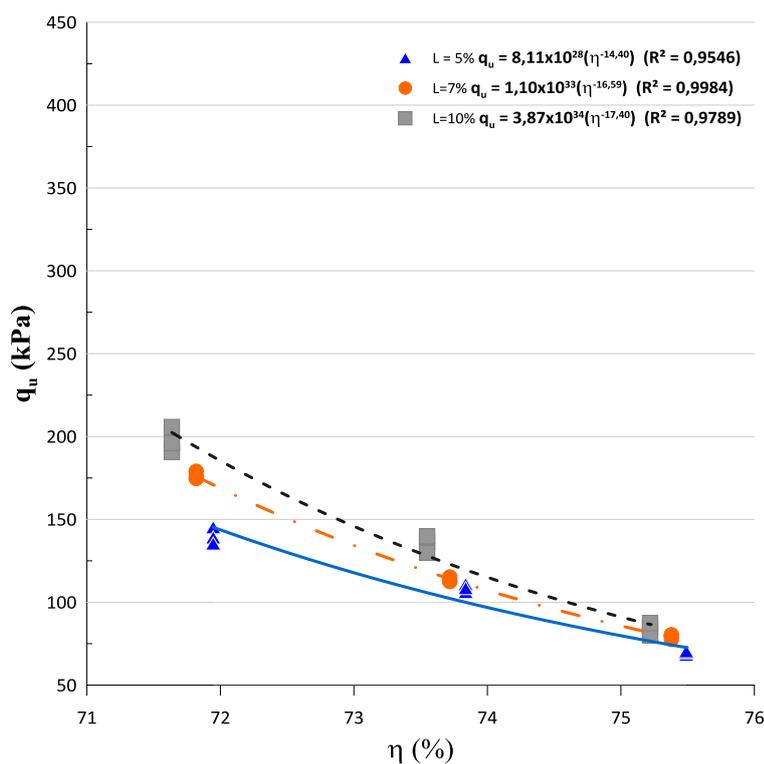


(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.3.2 Efeito da porosidade

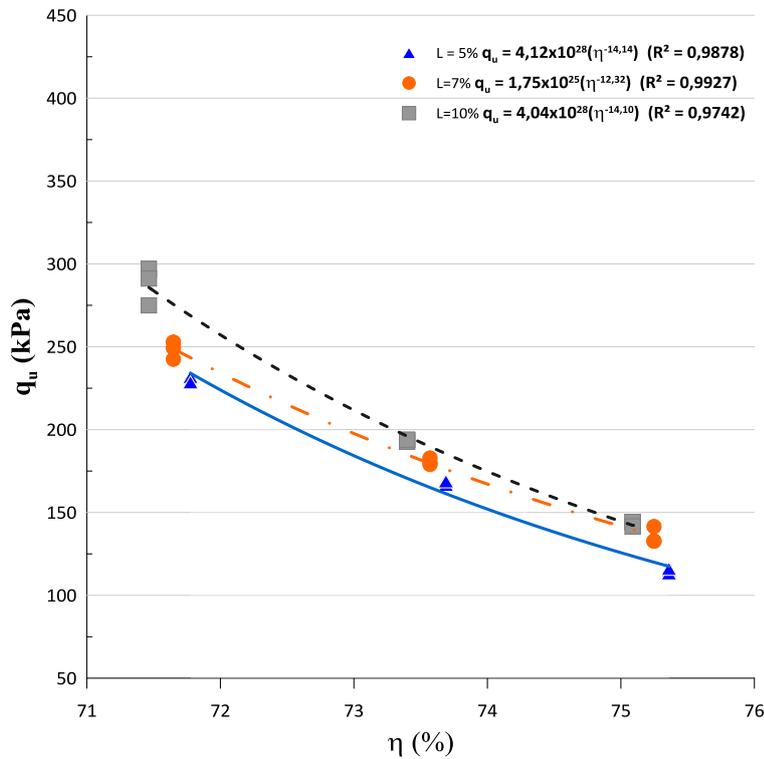
As figuras 40, 41 e 42 apresentam como a porosidade ( $\eta$ ) afeta a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) nas misturas de – 85% Caulim e 15% Bentonita, 80% Caulim e 20% Bentonita e 75% Caulim e 25% Bentonita, respectivamente. É observado que o aumento da resistência à compressão simples ocorre com a redução da porosidade, independente do teor de cal analisado. Além disso, o ganho de resistência ocorre de forma potencial para cada curva, sendo que cada uma representa um teor diferente de cal. Lopes Junior (2007), estudando misturas de solo-cal, atribui o efeito do ganho de resistência com a redução da porosidade em vista que, há maior contato entre as partículas existentes, ocasionando uma cimentação mais efetiva, melhorando o intertravamento das partículas, contribuindo para o aumento da resistência.

Figura 40 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) na resistência à compressão simples na mistura 85% Caulim e 15% Bentonita



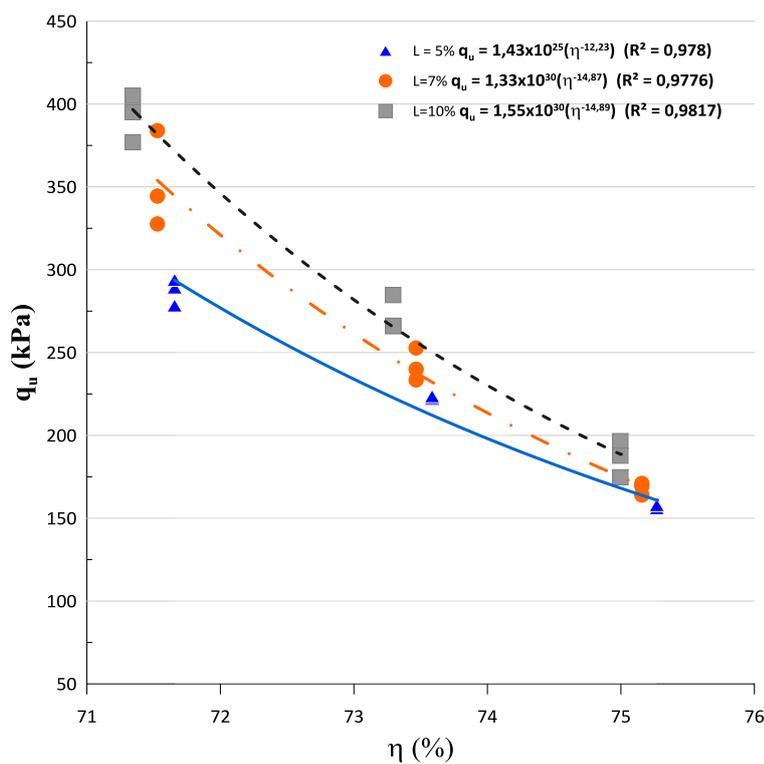
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 41 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) na resistência à compressão simples na mistura 80% Caulim e 20% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 42 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) na resistência à compressão simples na mistura 75% Caulim e 25% Bentonita



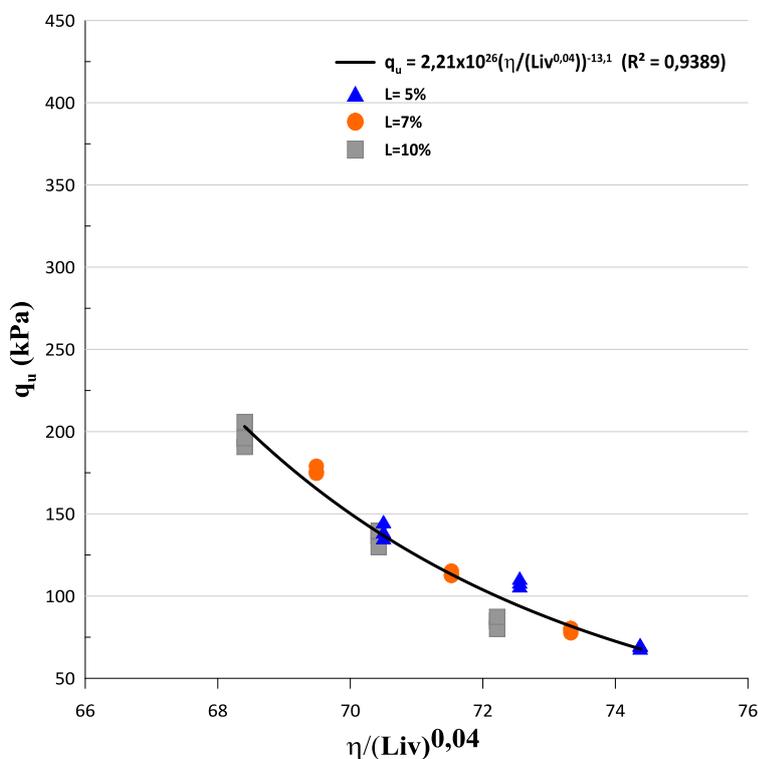
(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.3.3 Relação porosidade/teor volumétrico de cal

Como observado nos tópicos anteriores, é verificado que a resistência à compressão simples é dependente da quantidade de cal e da porosidade das misturas. Para a análise conjunta dos dois parâmetros, foi utilizada a metodologia proposta por Consoli et.al (2009b), a mesma também é utilizada para a técnica de solo-cimento. Dessa forma, com a diminuição da relação  $\eta/L_{iv}$  há o ganho de resistência à compressão simples das misturas.

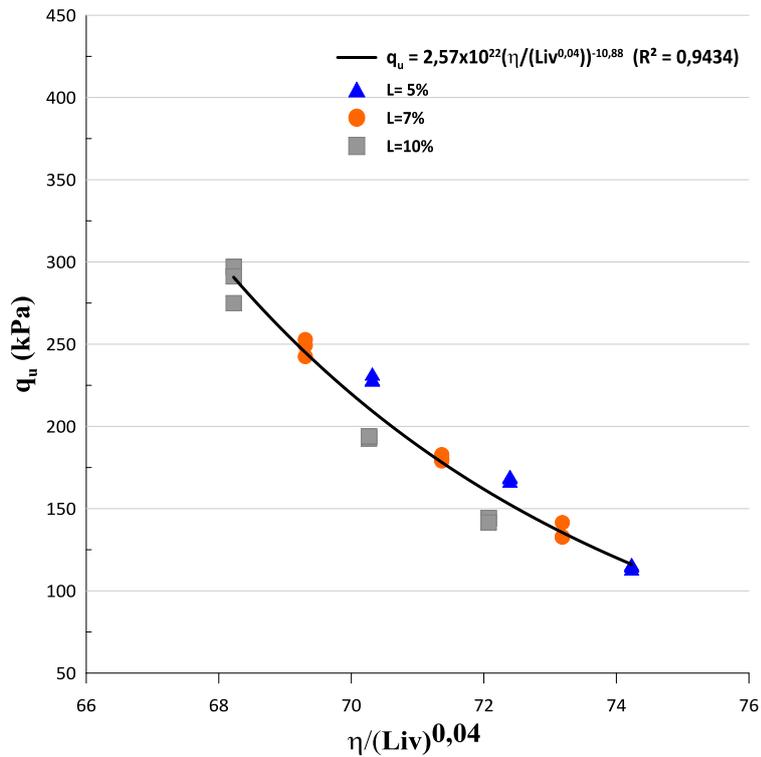
A escolha do expoente 0,04, se deu em consequência do melhor coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da curva potencial ajustada para os pontos. Em relação a magnitude do expoente, o seu baixo valor (0,04) indica maior influência da porosidade sobre as características investigadas. Para as situações estudadas, tendo em vista que a quantidade mínima de cal esteja presente, a porosidade ditará o comportamento das misturas. Nas figuras 43, 44 e 45 é possível observar o que foi concluído acima, sendo que na mesma curva se apresenta todos os teores de cal correlacionados com  $q_u$ .

Figura 43 Variação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade/cal na mistura 85% Caulim e 15% Bentonita



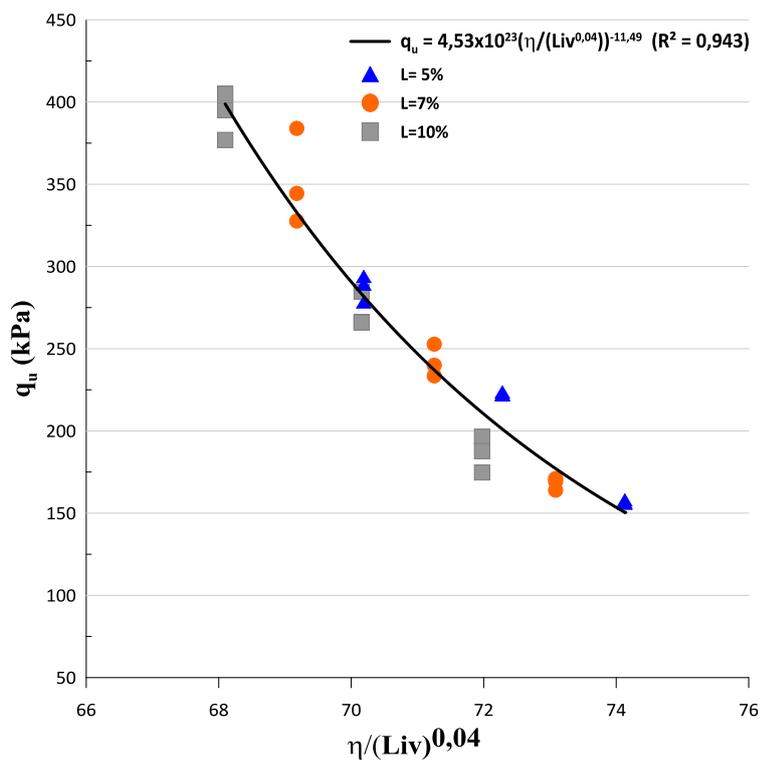
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 44 – Variação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade/cal na mistura 80% Caulim e 20% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

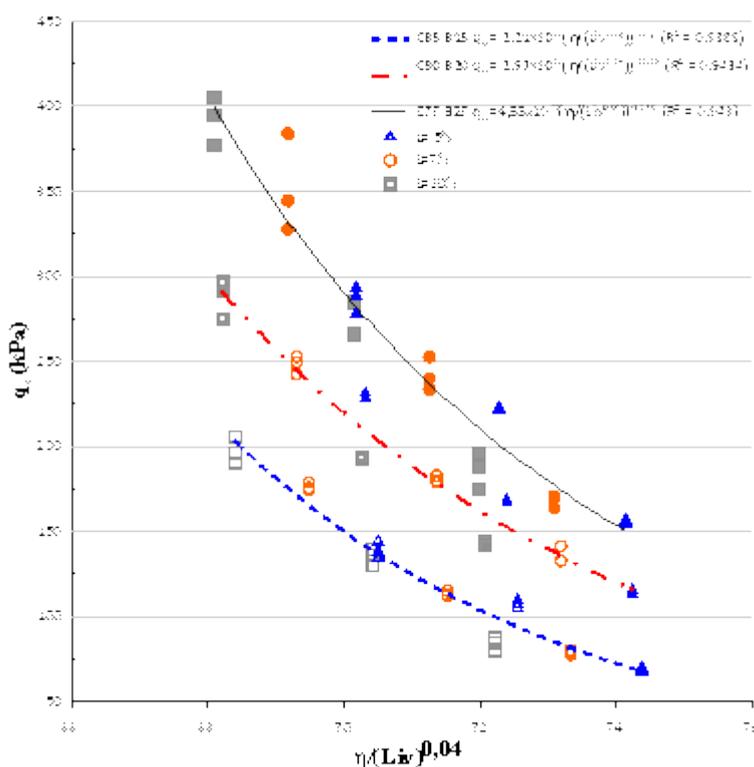
Figura 45 – Variação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade/cal na mistura 75% Caulim e 25% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

A Figura 46 apresenta as curvas de cada mistura para a resistência à compressão simples em função da relação porosidade/ teor volumétrico de cal. Por meio disso é possível analisar que, as misturas com maior teor de bentonita possuem as maiores resistências. Isso ocorre em vista que, a bentonita possui partículas de menor diâmetro que o caulim, possuindo, assim, uma maior área de superfície específica. Dessa forma, a cal possui maior reatividade com o aumento do teor de bentonita, assim, ocorre o aumento da resistência à compressão simples.

Figura 46 – Curvas da resistência à compressão simples em função da relação porosidade/cal para todas misturas



(fonte: elaborado pelo autor)

#### 5.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL

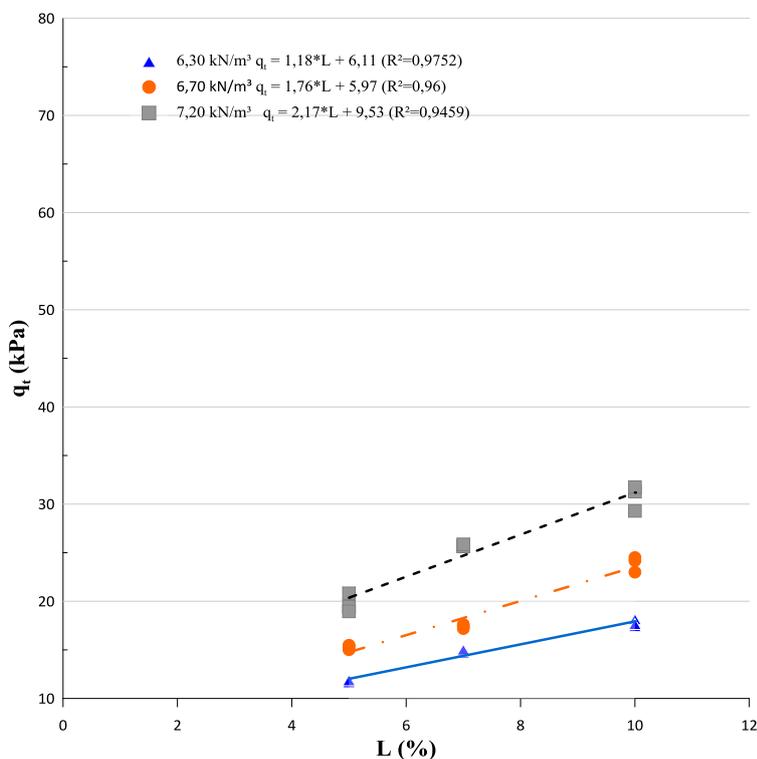
Ensaio de tração por compressão diametral são utilizados para se obter a resistência à tração das amostras. Em relação aos resultados, os mesmos foram analisados quanto ao efeito do teor de cal e da porosidade sobre a resistência dos corpos de prova. Por fim, a relação porosidade/cal também foi analisada.

### 5.4.1 Efeito da cal

Nas figuras 47, 48 e 49, as curvas ajustadas apresentam a resistência à compressão diametral ( $q_t$ ) em função da quantidade de cal (L) nas amostras, cada curva expressa um peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ).

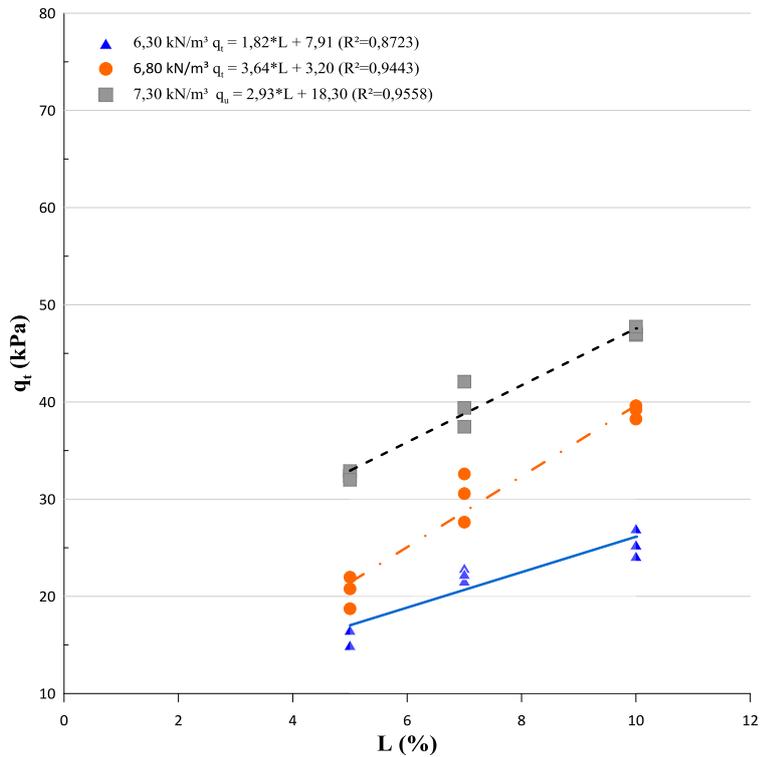
Pode-se observar que, o mesmo que fora visto para as amostras ensaiadas à compressão simples, também é notado para estas amostras. A exemplo do item 5.3.1 do trabalho, a resistência à compressão diametral também segue uma relação linear com o teor de cal. Além disso, quanto maior o peso específico da mistura, maior é a inclinação das retas, indicando uma estabilização mais eficiente, consequência da redução do índice de vazios.

Figura 47 – Variação da resistência à tração ( $q_t$ ) em relação ao teor de cal (L) para a mistura 85% Caulim e 15% Bentonita



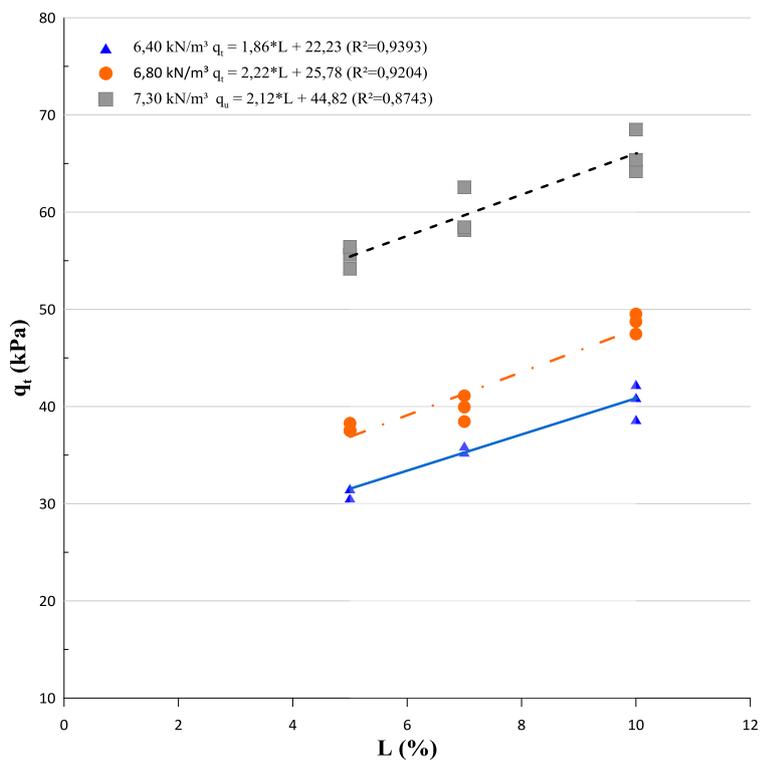
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 48 – Variação da resistência à tração ( $q_t$ ) em relação ao teor de cal (L) para a mistura 80% Caulim e 20% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 49 – Variação da resistência à tração ( $q_t$ ) em relação ao teor de cal (L) para a mistura 75% Caulim e 25% Bentonita

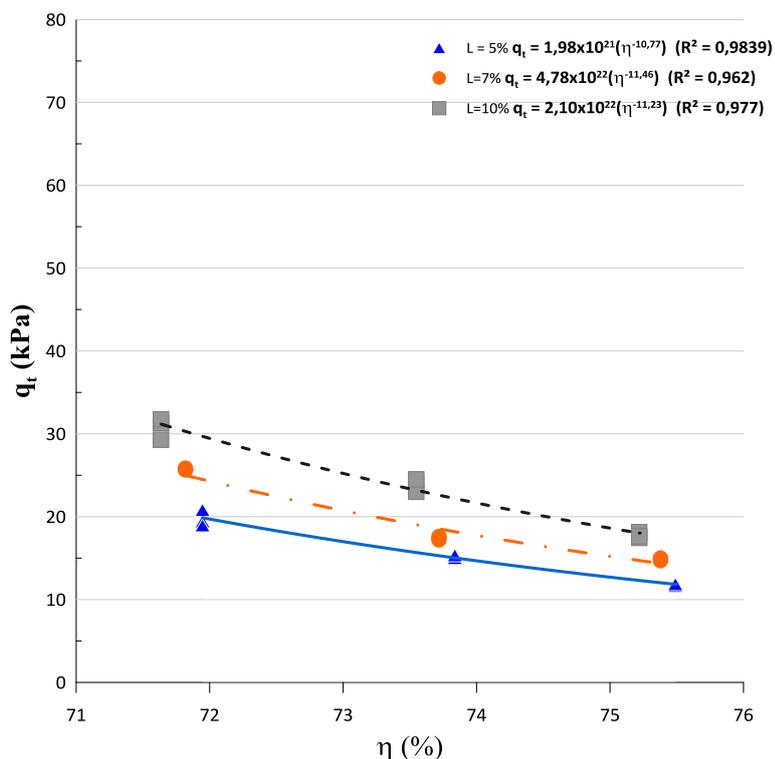


(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.4.2 Efeito da porosidade

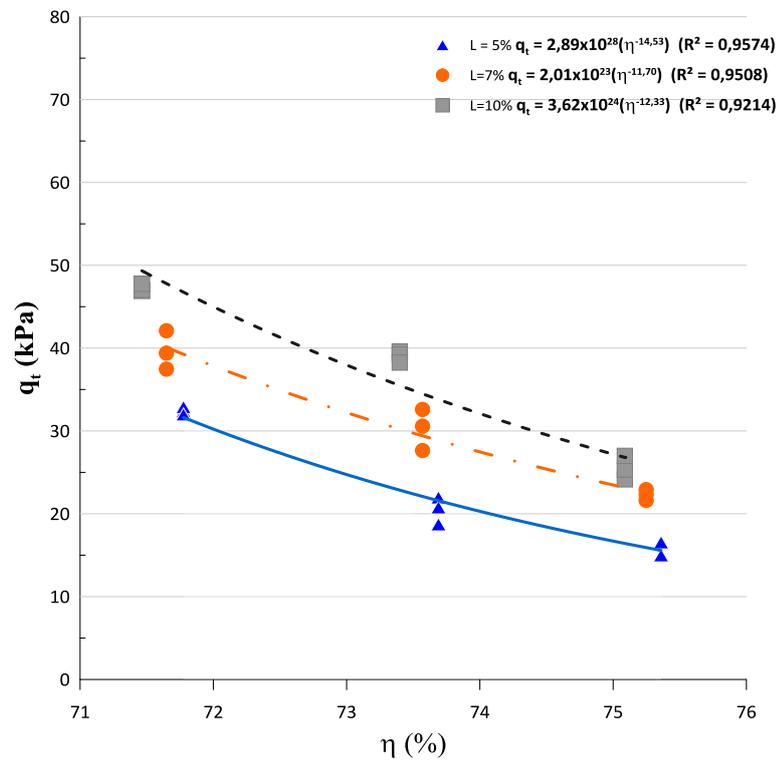
O efeito da redução da porosidade ocasiona o aumento da resistência à tração por compressão diametral, podendo ser verificado nas figuras 50, 51 e 52. O mesmo comportamento descrito no item 5.3.2 pode ser observado neste tópico, em que a resistência à tração ( $q_t$ ) aumenta conforme a porosidade ( $\eta$ ) diminui nas misturas, não dependendo do teor de cal. Nas curvas apresentadas a seguir o ajuste é realizado para o mesmo teor de cal.

Figura 50 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) na resistência à tração na mistura 85% Caulim e 15% Bentonita



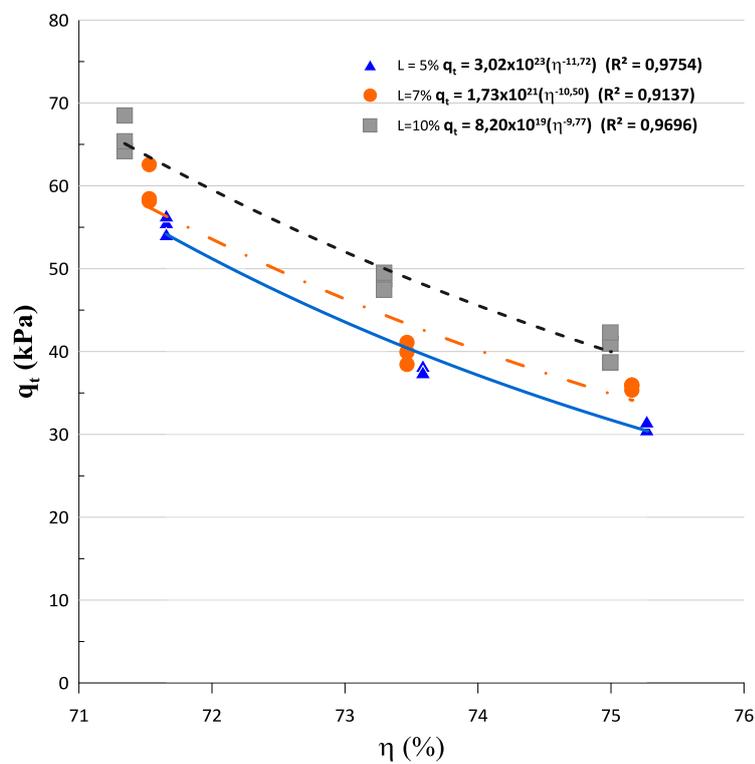
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 51 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) na resistência à tração na mistura 80% Caulim e 20% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 52 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) na resistência à tração na mistura 75% Caulim e 25% Bentonita



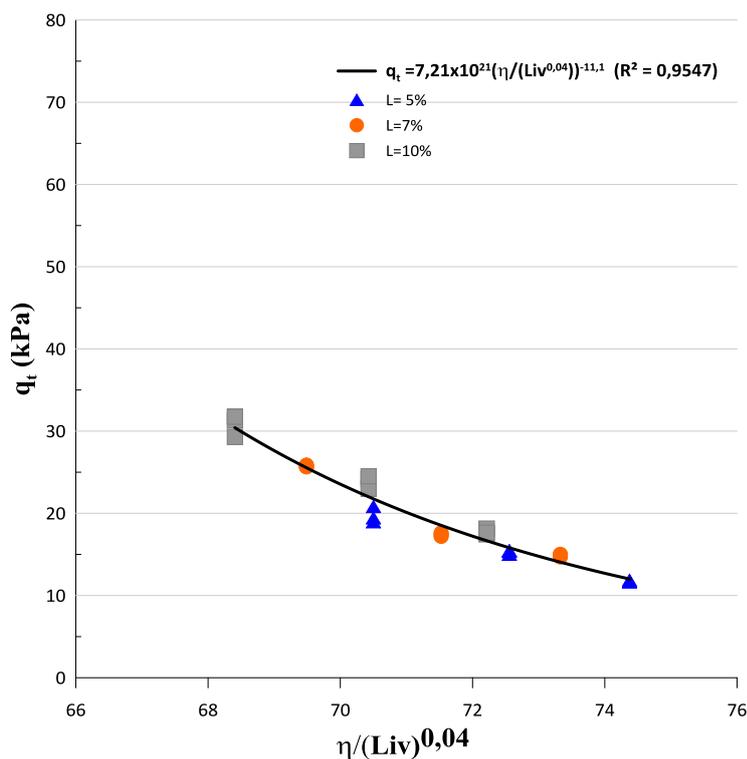
(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.4.3 Relação porosidade/teor volumétrico de cal

Como pode ser visto nos tópicos anteriores, é verificado que a resistência à tração é dependente da quantidade de cal e da porosidade das misturas. Para a análise destes dois parâmetros, foi utilizada a metodologia proposta por Consoli et.al (2010), sendo que os autores estudaram o comportamento de uma mistura de um solo granular submetido ao ensaio de compressão diametral.

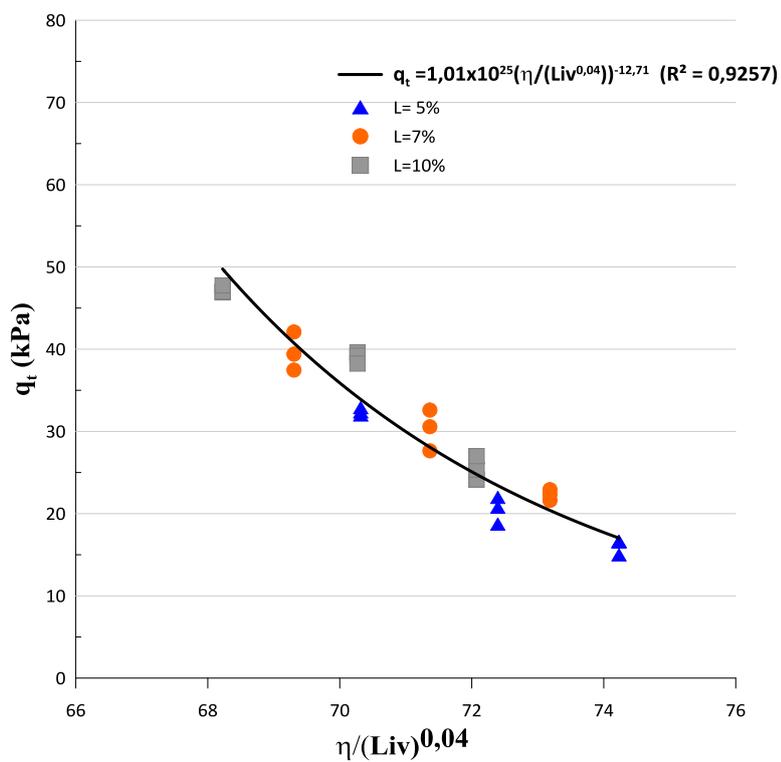
Em virtude da redução da relação  $\eta/L_{iv}$  há o ganho de resistência à tração das misturas, utilizou-se o mesmo expoente apresentado nos ensaios de resistência à compressão simples. Nas figuras 53, 54 e 55, demonstra-se o ganho da resistência à tração ( $q_t$ ) com a redução da relação  $\eta/L_{iv}$ , ao longo da curva, em cada figura, se apresenta todos os teores de cal utilizados na mistura.

Figura 53 Variação da resistência à tração em função da relação porosidade/cal na mistura 85% Caulim e 15% Bentonita



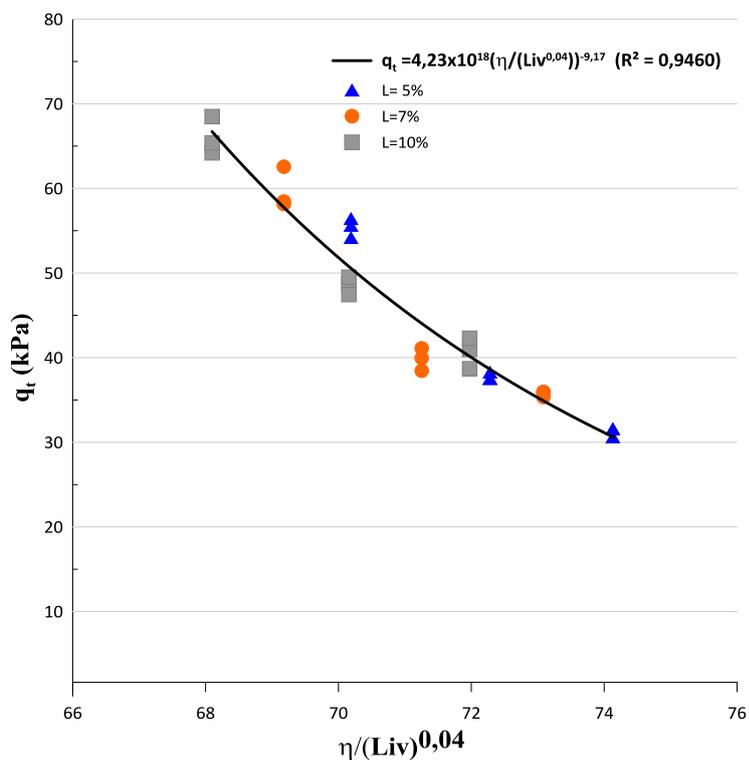
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 54 – Variação da resistência à tração em função da relação porosidade/cal na mistura 80% Caulim e 20% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

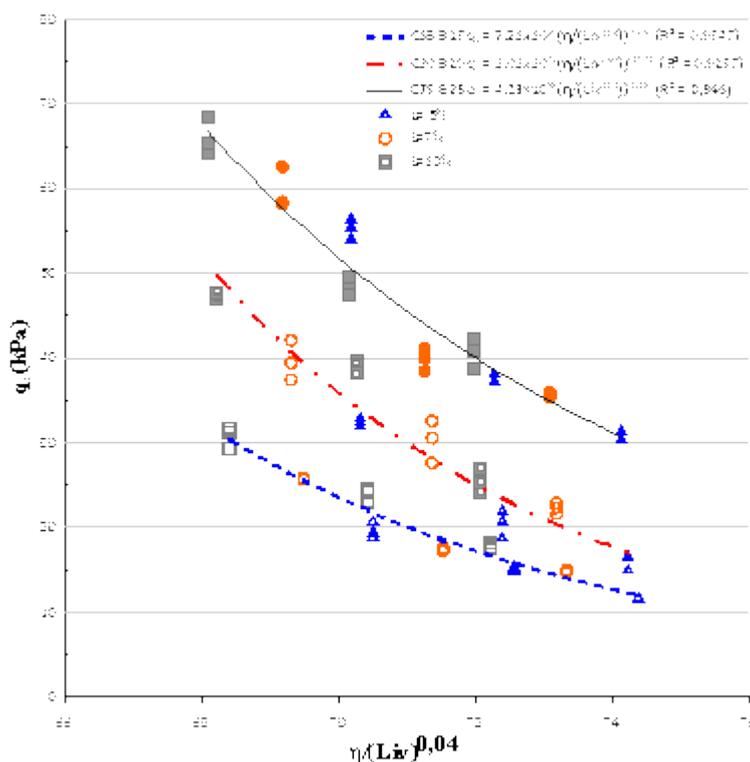
Figura 55 – Variação da resistência à tração em função da relação porosidade/cal na mistura 75% Caulim e 25% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

A Figura 56 apresenta as curvas de cada mistura para a resistência à compressão diametral em função da relação porosidade/ teor volumétrico de cal. Para este ensaio a mesma análise feita para o ensaio de resistência à compressão simples pode ser realizada. Sendo observado que com o acréscimo do teor de bentonita, a resistência à compressão diametral aumenta.

Figura 56 – Curvas da resistência à compressão diametral em função da relação porosidade/cal para todas misturas



(fonte: elaborado pelo autor)

## 5.5 RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO

Diversos estudos realizados na UFRGS, para diversos solos e agentes cimentantes, a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) e à compressão diametral ( $q_t$ ) são controladas pela porosidade, mais especificadamente, pela relação porosidade/teor volumétrico de agente cimentante ( $\eta/L_{iv}$ ). Consoli et al (2007), Consoli et al (2010), Consoli et al (2012b), Consoli (2014), Tomasi (2018) e dentre outros trabalhos trataram sobre este índice. Além disso, os autores verificaram que a relação entre as resistências à tração( $q_t$ ) e à compressão ( $q_u$ ) é única, apenas dependente do tipo de material estudado. Assim, a relação não depende da porosidade, quantidade de agente cimentante e da relação porosidade/teor volumétrico de agente cimentante.

Dessa forma, no presente trabalho, buscou-se verificar este comportamento para as misturas de caulim rosa e bentonita estabilizadas com cal de casca de ovo não hidratada. Nos itens anteriores foi analisado que a resistência à tração ( $q_t$ ) está diretamente relacionada com o parâmetro porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_{iv}$ ), independentemente da mistura, sendo observado nas figuras 53, 54 e 55. Sendo aplicado o ajuste entre os dados experimentais por meio de uma função potência. Além disso, para a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) a análise se deu de forma similar, onde o índice ( $\eta/L_{iv}$ ) também se mostrou adequado para as misturas. Nas figuras 43, 44 e 45, é possível observar a as curvas de ajuste para as diferentes misturas.

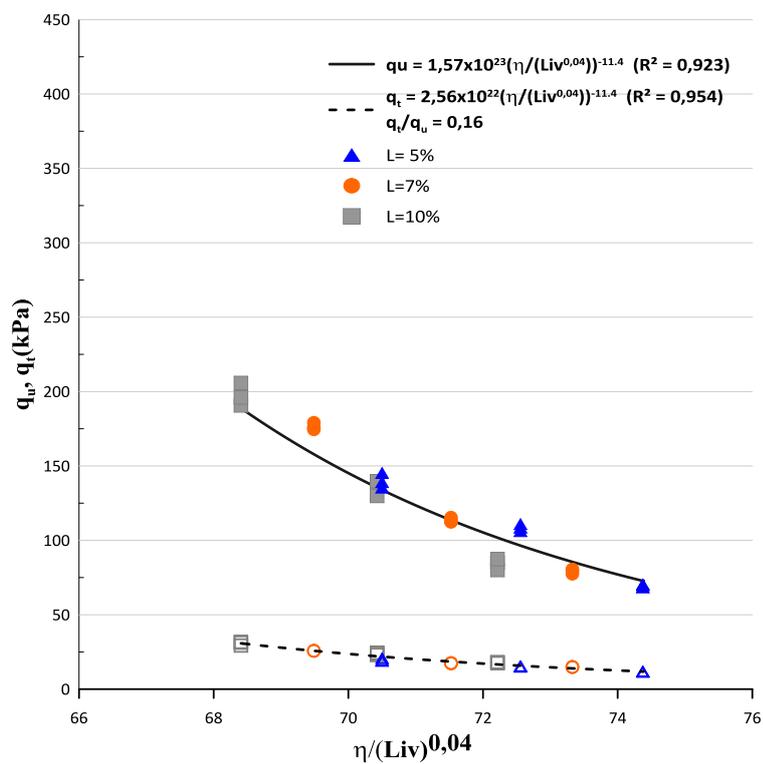
A partir disso, sendo feita a análise das curvas é possível perceber que em ambos os ensaios as curvas de ajuste têm comportamento muito similar, diferindo na magnitude das resistências e no expoente de ajuste da relação ( $\eta/L_{iv}$ ). Dessa forma, para se obter a razão entre a resistência à tração e à compressão é necessário igualar o expoente da relação ( $\eta/L_{iv}$ ). Assim, foi realizada a média de todos os expoentes das curvas dos ensaios, sendo obtido o valor de 11,40, sendo que neste expoente foi obtido o melhor coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Nas figuras 57, 58 e 59, são plotadas as curvas de  $q_u$  e  $q_t$  das misturas. Observa-se que, para as misturas 85%-15% e 80% - 20% (caulim-bentonita) a relação  $q_t/q_u$  tem o valor de 0,16, enquanto que esse quociente é igual a 0,18, para a mistura 75-25. Consoli et al (2014) constataram que a razão de  $q_t/q_u$  pode variar de 0,09 até 0,18, sendo assim, os valores encontrados nesta pesquisa estão dentro dos limites encontrados na literatura.

Outro estudo em que a razão  $q_t/q_u$  pode ser usada é na estimativa de parâmetros de resistência do solo, como ângulo de atrito ( $f'$ ) e coesão ( $c'$ ). Consoli et al (2014) realizaram um estudo em que se pode estimar os valores destes parâmetros, com a confirmação da análise por meio de ensaios triaxiais, onde os autores puderam notar que com o aumento da razão de  $q_t/q_u$  ocorre um decréscimo no ângulo de atrito. Em relação à coesão, a mesma pode ser relacionada à resistência não confinada do material cimentado. Assim, o ângulo de atrito das misturas cimentadas permanece constante e o valor da coesão depende da resistência não confinada do material.

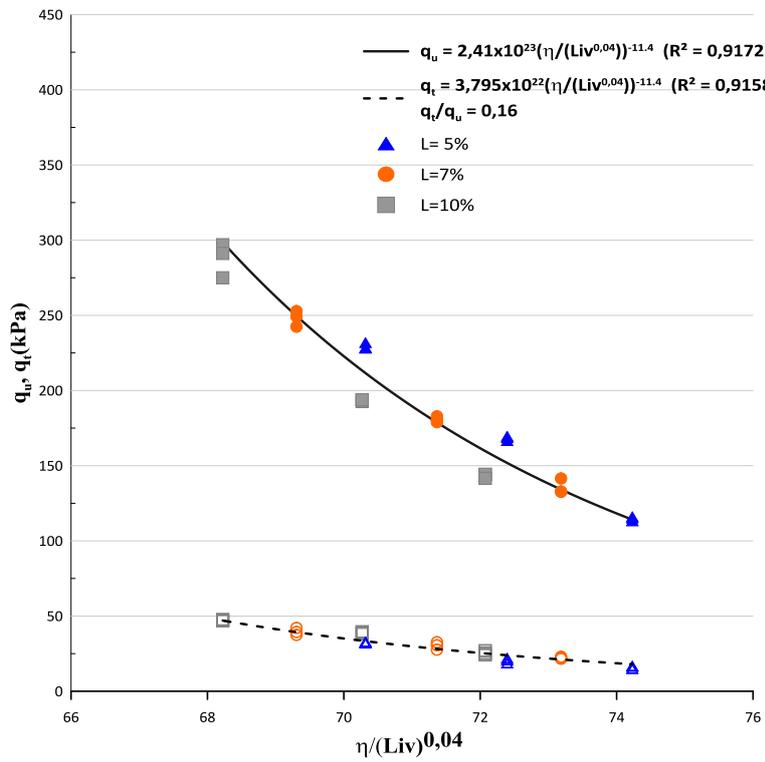
Assim, para o presente estudo pode-se analisar que nas misturas de 85 % caulim e 15 % bentonita, 80% caulim e 20 % bentonita, as razões de  $q_t/q_u$  possuem o mesmo valor, indicando que o ângulo de atrito das misturas seria igual, se comparando com a granulometria dos materiais essa afirmação pode ser real. No entanto, para total certeza deveria ser realizado o ensaio de triaxial, no mínimo 3 ensaios para cada combinação e ser ensaio consolidado não drenado. Já para a mistura de 75% caulim e 25% bentonita a razão possui o maior valor, o que é lógico, tendo em vista que essa mistura possui maior porcentagem passante nas peneiras de menor abertura. Ademais, se comparado os valores da razão  $q_t/q_u$  para as misturas estudadas com o valor tipicamente obtido para areias, sendo este de 0,15, conforme Consoli et al (2014), o aumento é lógico, tendo em vista que argilas possuem menor ângulo de atrito, quando comparado com areias.

Figura 57 – Relação  $q_u$  e  $q_t$  função da relação porosidade/cal na mistura 85% Caulim e 15% Bentonita



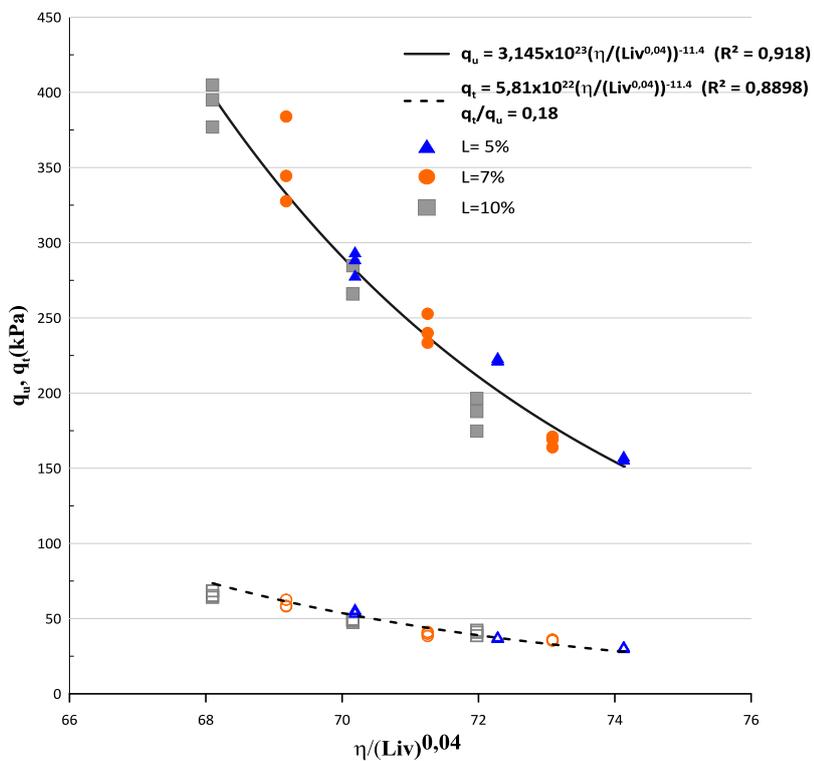
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 58 – Relação  $q_u$  e  $q_t$  função da relação porosidade/cal na mistura 80% Caulim e 20% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 59 – Relação  $q_u$  e  $q_t$  função da relação porosidade/cal na mistura 75% Caulim e 25% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

## 5.6 ENSAIO DO MÓDULO CISALHANTE INICIAL

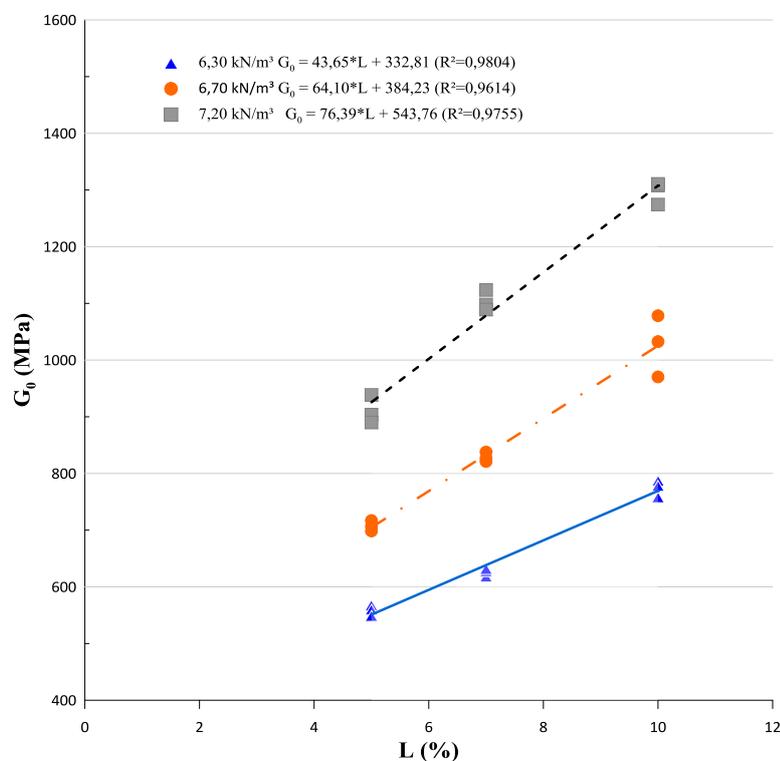
Ensaio de pulso ultrassônico são utilizados para obter o módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ), sendo um ensaio não destrutivo, tendo em vista que foi utilizado as amostras de compressão simples para o ensaio. Com relação aos resultados, os mesmos foram analisados quanto ao efeito do teor de cal e da porosidade sobre o módulo cisalhante. Já a relação porosidade/cal também foi analisada.

### 5.6.1 Efeito da cal

Nas figuras 60, 61 e 62, as curvas ajustadas apresentam o módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ) em função da quantidade de cal (L) nas amostras, cada curva expressa um peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ).

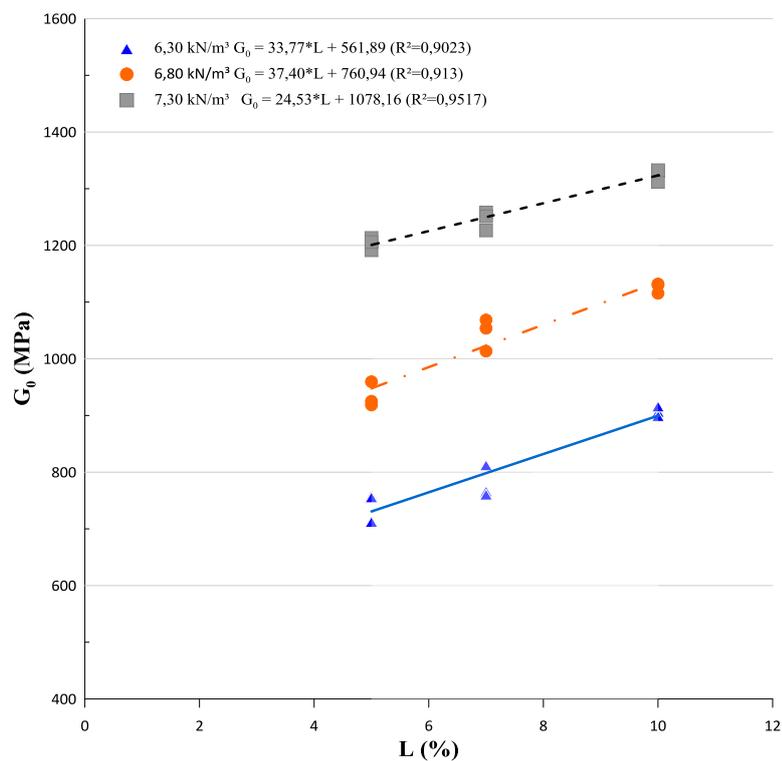
Para este ensaio as o que pode ser observado é que há uma relação linear entre o módulo e o teor de cal, o mesmo já observado para as amostras de compressão e tração. Ademais, quanto maior o peso específico da mistura, maior é a taxa de ganho do módulo, indicando uma estabilização mais eficiente.

Figura 60 – Variação do ( $G_0$ ) em relação ao teor de cal (L) para a mistura 85% Caulim e 15% Bentonita



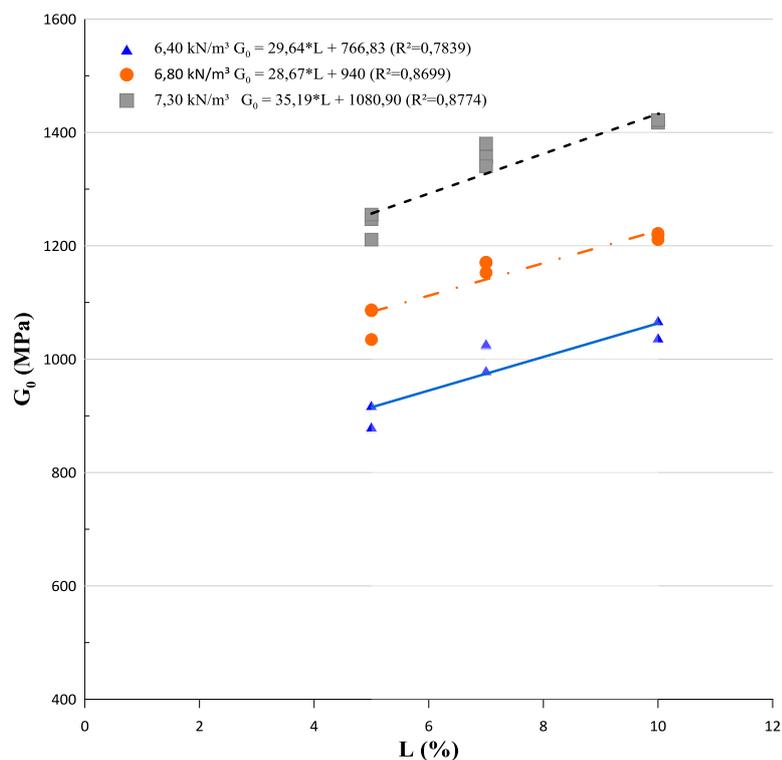
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 61 – Variação do ( $G_0$ ) em relação ao teor de cal (L) para a mistura 80% Caulim e 20% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 62 – Variação do ( $G_0$ ) em relação ao teor de cal (L) para a mistura 75% Caulim e 25% Bentonita

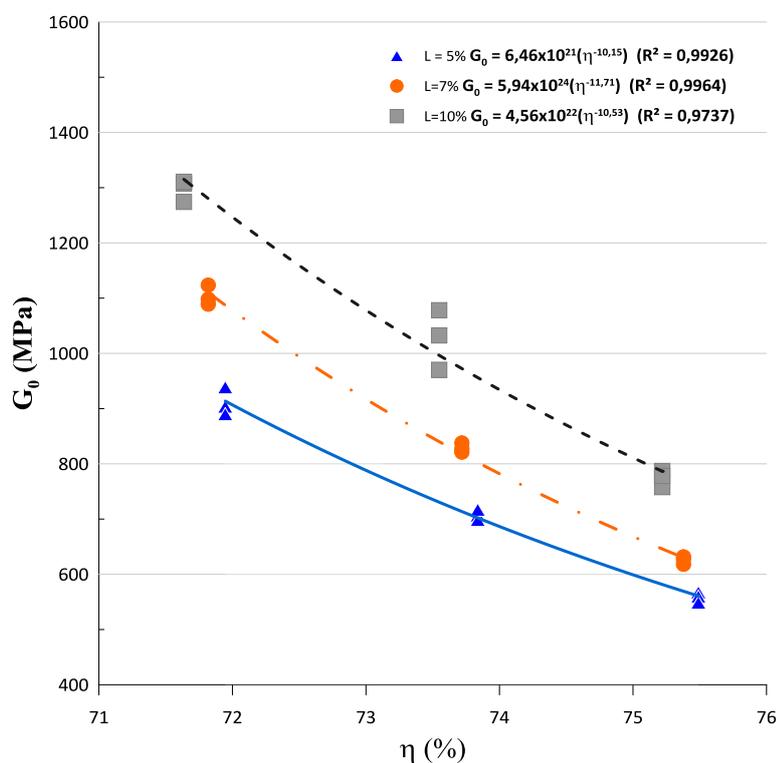


(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.6.2 Efeito da porosidade

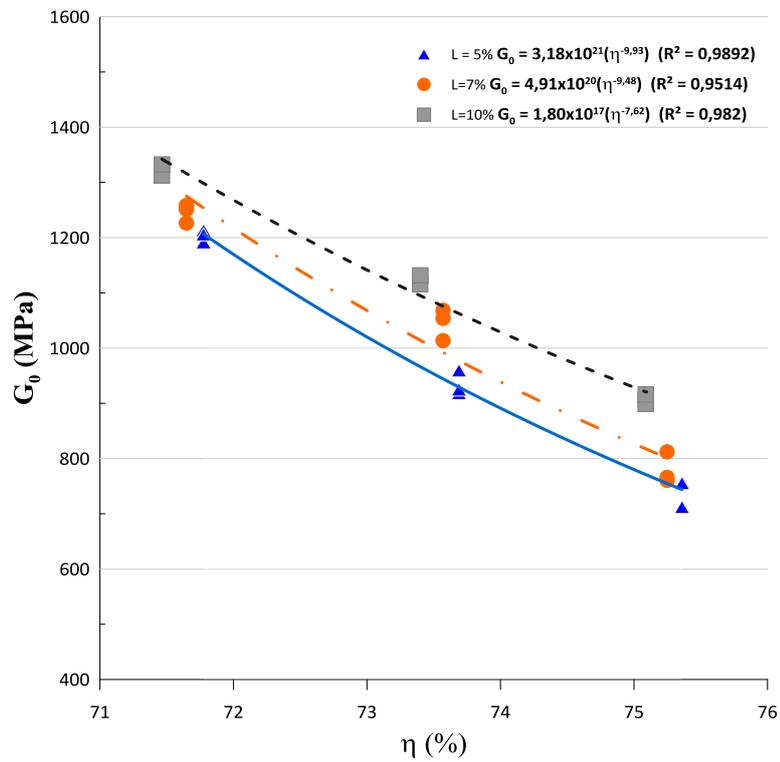
Com a redução da porosidade, o módulo cisalhante aumenta de forma potencial, isto é verificado nas figuras 63, 64 e 65. O mesmo comportamento do módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ) é descrito nos itens 5.3.2 e 5.4.2 para os ensaios de compressão e tração. Isto é, o módulo aumenta conforme a porosidade ( $\eta$ ) diminui nas misturas, independente do teor de cal.

Figura 63 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) no  $G_0$  na mistura 85% Caulim e 15% Bentonita



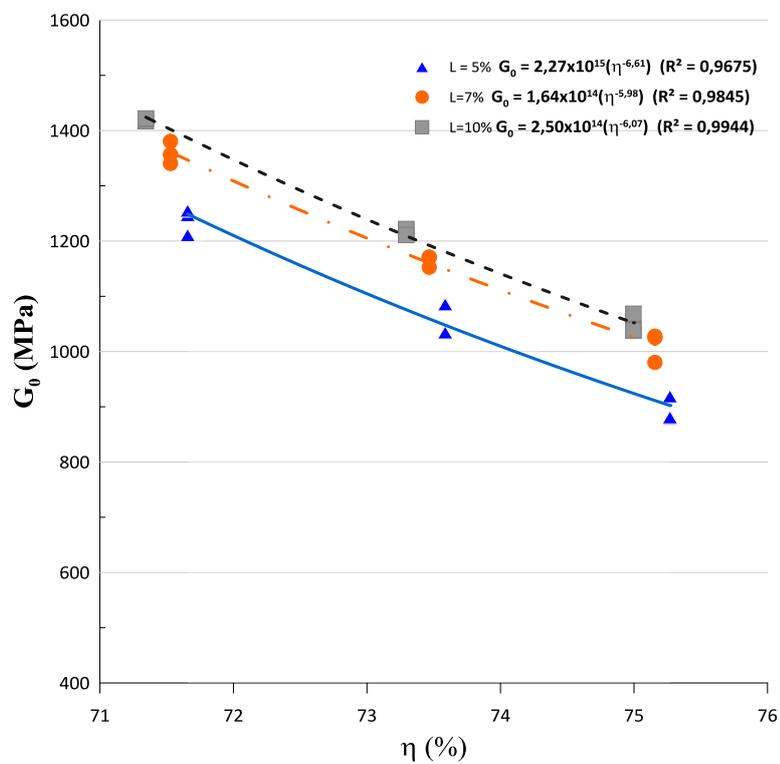
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 64 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) no  $G_0$  na mistura 80% Caulim e 20% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 65 – Efeito da porosidade ( $\eta$ ) no  $G_0$  na mistura 75% Caulim e 25% Bentonita



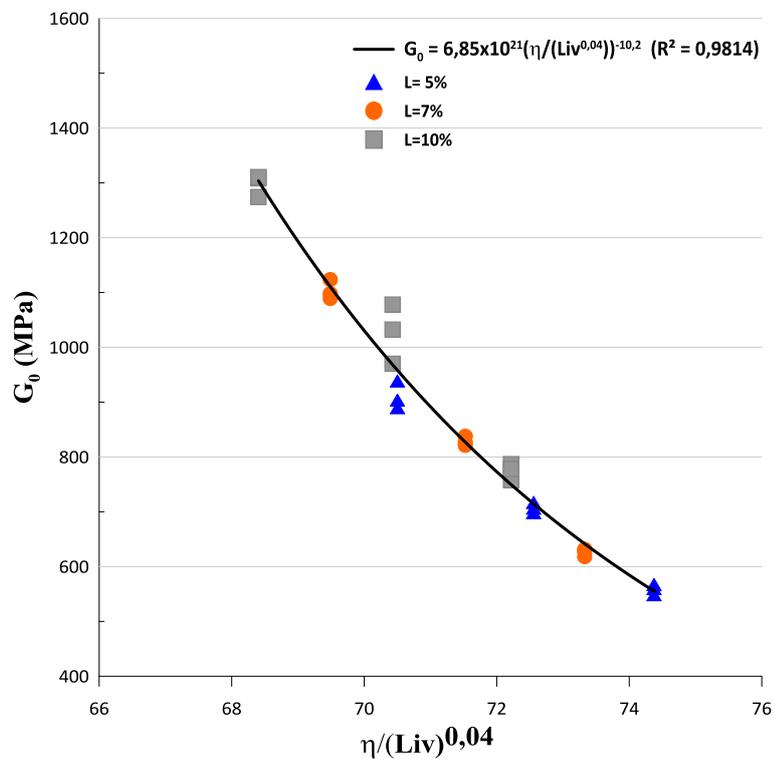
(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.6.3 Relação porosidade/teor volumétrico de cal

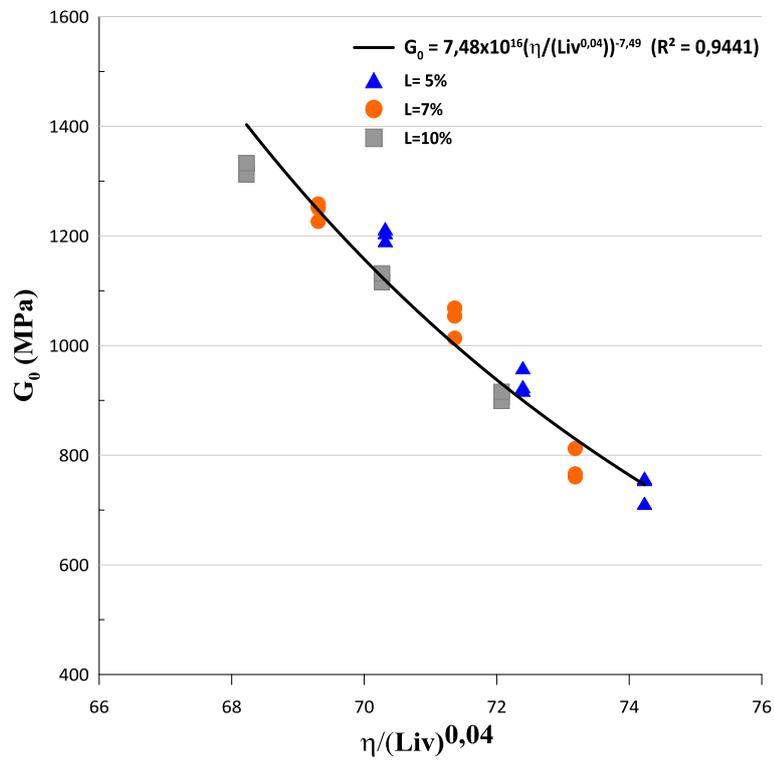
Esta correlação pode ser observada nos resultados da metodologia proposta por Consoli et al (2017b), onde o autor relaciona o módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ) com a relação  $\eta/L_{iv}$ , de forma análoga ao exposto para os resultados de resistência à compressão simples e à tração.

Nas figuras 66, 67 e 68, são apresentadas as curvas ajustadas para cada mistura, sendo que ao longo de cada curva apresenta-se os teores de cal utilizados na mistura. Observando as figuras, há a redução da relação  $\eta/L_{iv}$ , conseqüentemente, o módulo cisalhante inicial aumenta, este padrão é o mesmo notado nos resultados dos ensaios de compressão simples e diametral.

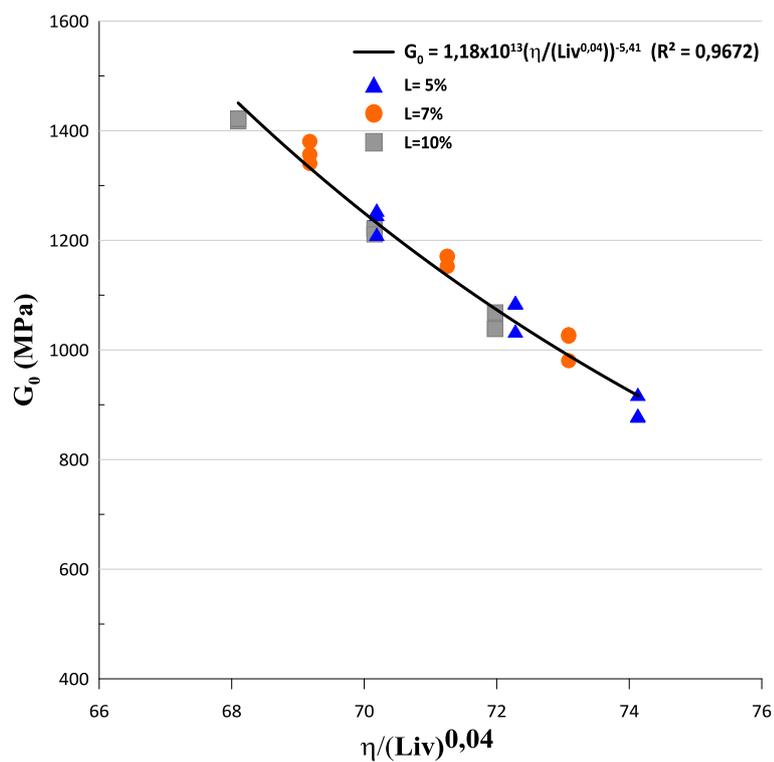
Figura 66 – Variação do  $G_0$  em função da relação porosidade/cal na mistura 85% Caulim e 15% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 67 – Variação do  $G_0$  em função da relação porosidade/cal na mistura 80% Caulim e 20% Bentonita

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 68 – Variação do  $G_0$  em função da relação porosidade/cal na mistura 75% Caulim e 25% Bentonita

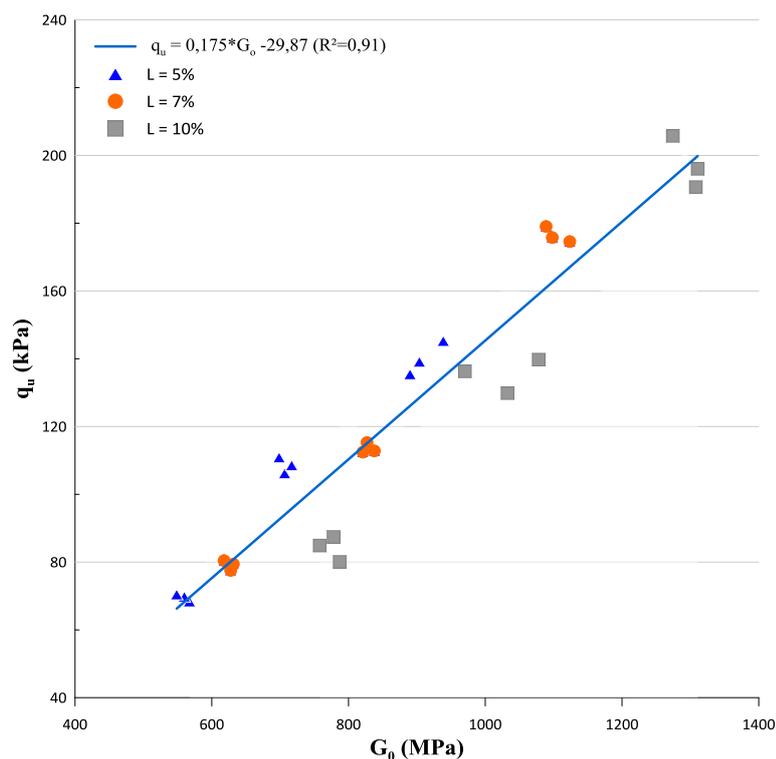
(fonte: elaborado pelo autor)

## 5.7 RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS RESPOSTAS

A existência de uma relação entre a resistência à compressão simples e a rigidez inicial pode ser observada na literatura, LOPES JUNIOR (2011), DALLA ROSA JOHANN (2013), TOMASI (2018) e dentre outros já realizaram o estudo comparativo entre estes parâmetros.

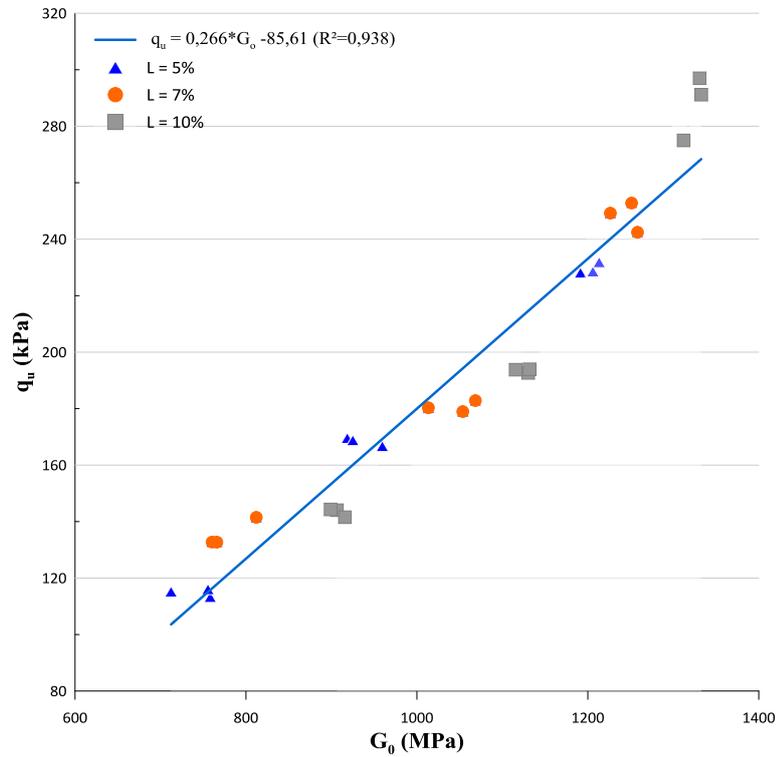
Sendo assim, é possível observar a relação linear entre a resistência à compressão simples e o módulo de rigidez inicial, além disso, com o aumento do teor de agente cimentante ambas as variáveis sofrem um acréscimo na sua magnitude. Assim, nas figuras 69, 70 e 71, é possível observar a correlação entre a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) e o módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ). Em todos os gráficos é possível observar que o coeficiente linear das retas possui sinal negativo, isto é, para qualquer material com resistência nula o mesmo possuirá um certo nível de rigidez, mesmo que de baixa magnitude.

Figura 69 – Variação da resistência à compressão simples em função do módulo cisalhante inicial na mistura 85% Caulim e 15% Bentonita



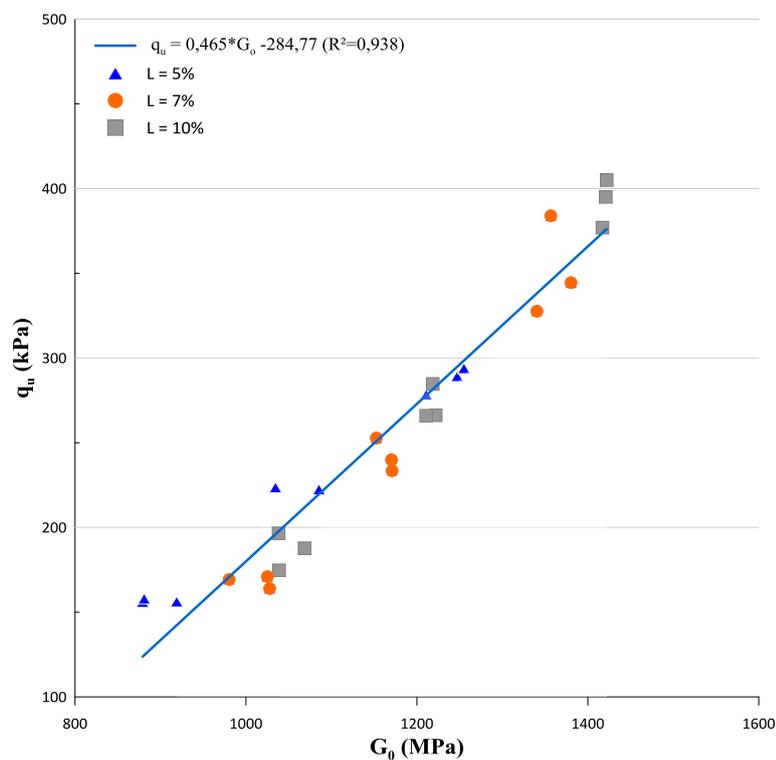
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 70 – Variação da resistência à compressão simples em função do módulo cisalhante inicial na mistura 80% Caulim e 20% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

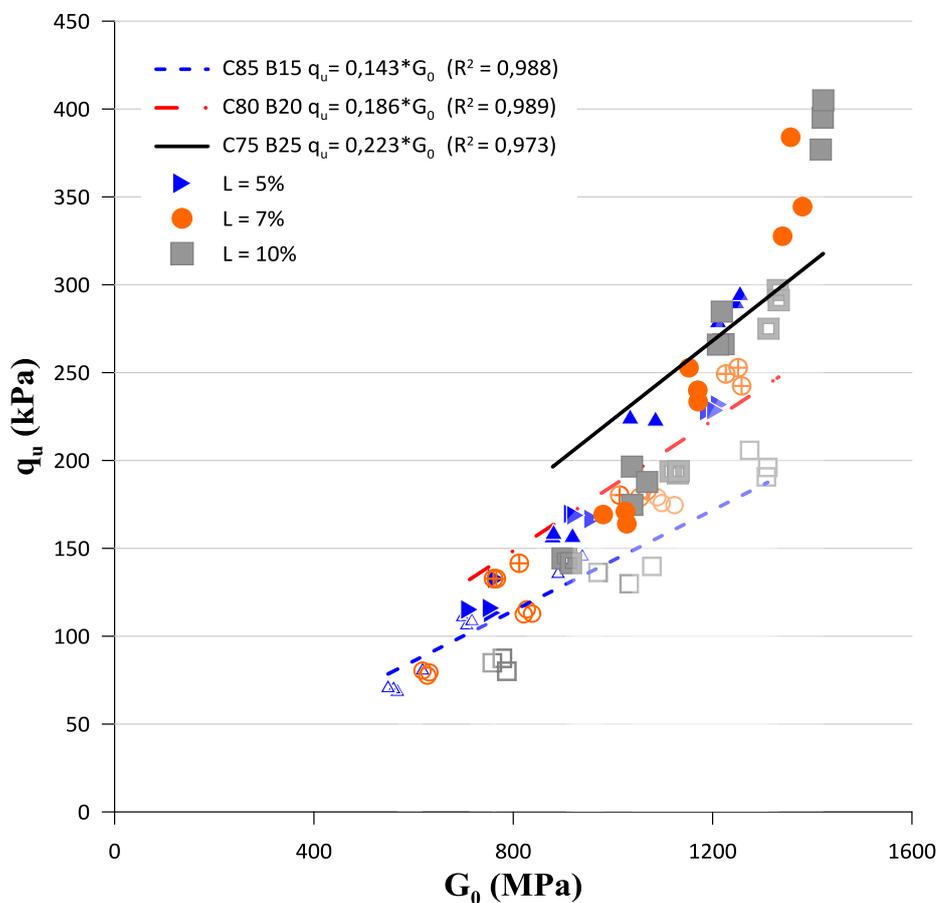
Figura 71 – Variação da resistência à compressão simples em função do módulo cisalhante inicial na mistura 75% Caulim e 25% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

Outro estudo sugerido é a análise entre a resistência à compressão simples e o módulo cisalhante inicial com as suas retas passando pela origem do gráfico. Dessa forma, é possível observar que há uma relação linear entre as variáveis, já observado nos estudos anteriores. Além disso, observa-se que com o aumento do teor de cal ambos os parâmetros sofrem acréscimo em sua magnitude. Ademais, o aumento do teor de bentonita provoca o aumento das variáveis, o que já foi observado separadamente para a resistência e para o módulo. Na figura 72 é apresentada as curvas de cada mistura.

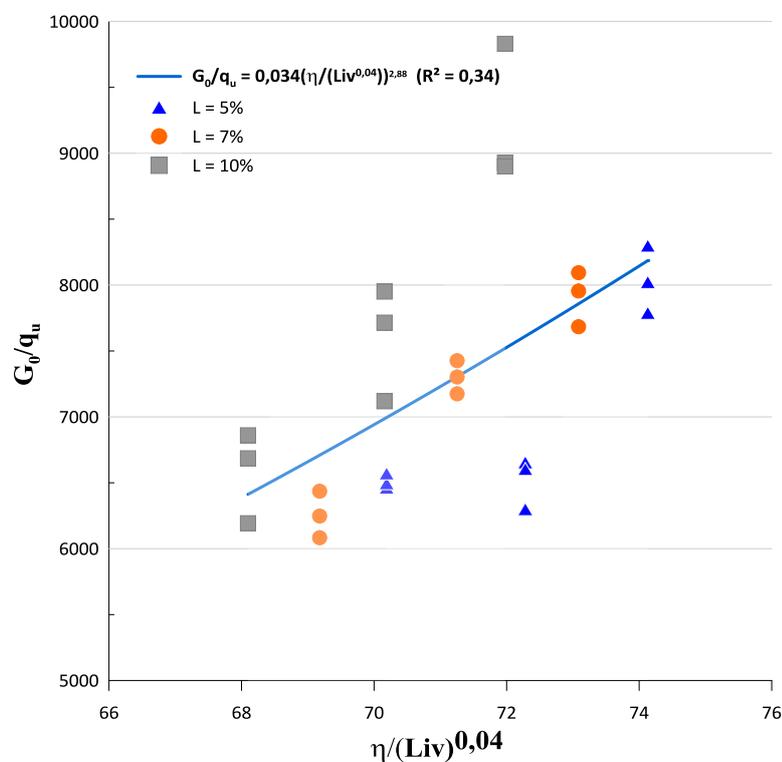
Figura 72 – Variação da resistência à compressão simples em função do módulo cisalhante inicial para todas as misturas



(fonte: elaborado pelo autor)

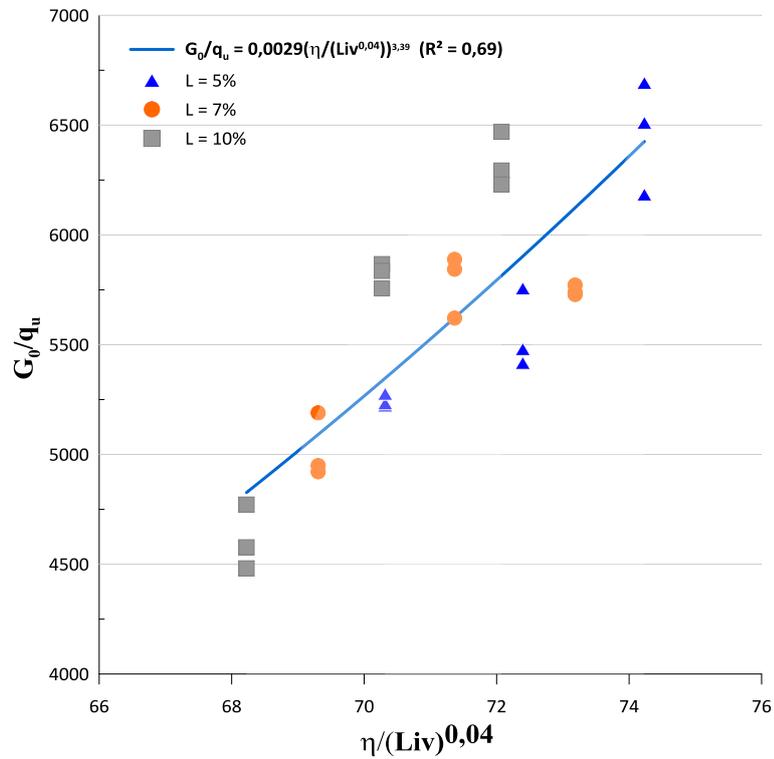
Ademais, os mesmos autores realizaram a comparação da razão do módulo cisalhante inicial/resistência à compressão simples ( $G_0/q_u$ ) em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_{iv}$ ). Para essa relação foi ajustada uma curva de potência, a mesma é observada na literatura. A análise que pode ser feita é que a relação porosidade/teor volumétrico de cal governa a razão entre o módulo e a resistência a compressão simples, o que é redundante, tendo em vista que isto já fora demonstrado separadamente para cada um dos parâmetros. Nas figuras 73, 74 e 75, é possível observar a correlação entre a razão módulo cisalhante inicial ( $G_0$ )/resistência à compressão simples ( $q_u$ ) e a relação de vazios/ teor volumétrico de cal

Figura 73 – Razão  $G_0/q_u$  em função da relação porosidade/ teor volumétrico de cal para a mistura de 85% Caulim e 15% Bentonita



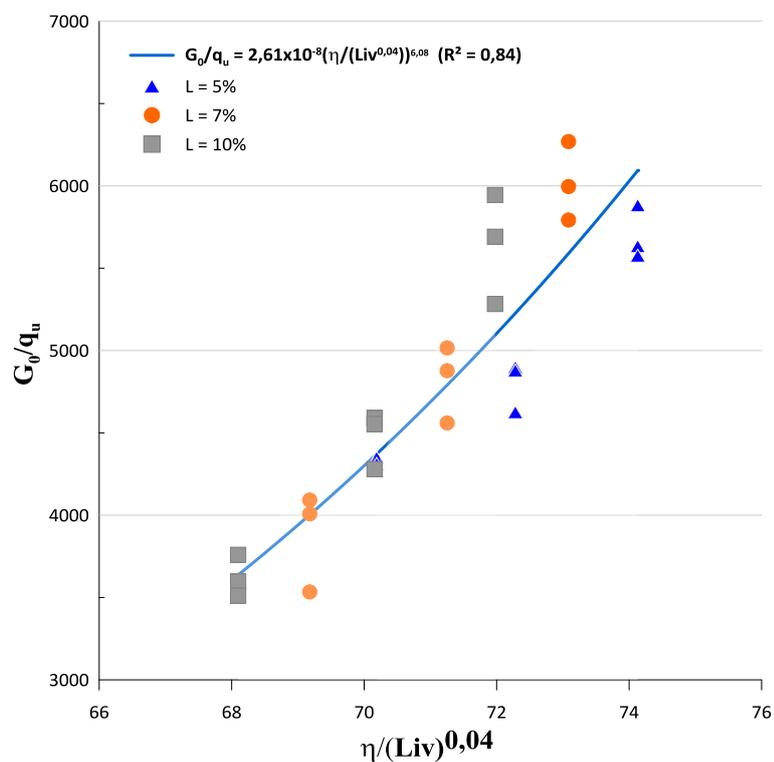
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 74 – Razão  $G_0/q_u$  em função da relação porosidade/ teor volumétrico de cal para a mistura de 80% Caulim e 20% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 75 – Razão  $G_0/q_u$  em função da relação porosidade/ teor volumétrico de cal para a mistura de 75% Caulim e 25% Bentonita



(fonte: elaborado pelo autor)

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados e dos fatores controláveis, pode ser realizada as conclusões sobre o que fora proposto para estudo.

Inicialmente, respondendo ao objetivo principal da pesquisa, a cal de casca de ovo se mostrou uma nova fonte de agente cimentante, assim, a mesma pode ser utilizada ao longo da pesquisa. Assim, será discutido, a seguir, o que se pode concluir para cada uma das variáveis estudadas.

#### 6.1.1 Resistências à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral

A cal de casca de ovo demonstrou um comportamento mecânico similar ao já estudado para outros agentes cimentantes. Isto é, pode-se observar que com o aumento do teor de cal houve o acréscimo das resistências à compressão simples e à compressão diametral. A relação do teor de cal com as variáveis estudadas se deu de forma linear, o que pode ser observado em estudos com outros agentes cimentantes. Ademais, a taxa de ganho de resistência, representada pela inclinação da curva dos parâmetros supracitados em função do teor de cal, cresceu com o aumento do peso específico aparente seco, mostrando que o reforço é mais efetivo para as misturas com menor volume de vazios, isto também pode ser observado para outros agentes cimentantes na literatura.

Outro aspecto que pode ser analisado é a o aumento das resistências conforme o aumento do teor de bentonita. Isto é, em virtude da bentonita ter montmorilonita, cuja estrutura possui elevada superfície específica (Zhirong et al, 2011). Dessa forma, a grande capacidade de adsorção de cátions provenientes da cal de casca de ovo ocorre devido a propriedade citada da bentonita. Além disso, a bentonita tem grãos de menor diâmetro que o caulim, fazendo com que a cal reaja melhor com o aumento do teor de bentonita, aumentando a resistência das misturas com maior teor de bentonita.

Em relação a porosidade nas misturas, o decréscimo dessa ocasiona ganhos substanciais nas resistências, para ambos os ensaios. Observou-se que a curva das resistências em função da porosidade foi ajustada pela curva de potência, em que as resistências diminuem com o aumento da porosidade. O comportamento descrito anteriormente é o mesmo observado em outros estudos com diferentes solos e agentes cimentantes.

A relação porosidade/teor volumétrica de cal ( $\eta/L_{iv}$ ) mostrou-se adequada para a avaliação das resistências das misturas. O ajuste da razão vazios/cal,  $\eta/L_{iv}^{0,04}$ , foi considerado apropriado para avaliar tanto a resistência à compressão e à compressão diametral. Para ambas as resistências o decréscimo desta razão ocasionou o acréscimo das resistências.

Em virtude dos ensaios de resistência serem bem parecidos, além do vasto estudo de comparação entre os mesmos, foi possível obter a relação de  $q_v/q_u$  para as diferentes misturas. Sendo que, os valores obtidos para as misturas estão dentro do intervalo citado por Consoli et al (2014). Além disso, a razão entre os ensaios se demonstrou independente da relação porosidade/teor volumétrico de cal, o mesmo pode ser observado na literatura.

### 6.1.2 Módulo cisalhante inicial

Para o  $G_0$ , o mesmo descrito para as resistências pode ser observado. Ou seja, aumento deste com o aumento do teor de cal, observando-se uma relação linear entre estes parâmetros. Em relação a inclinação das curvas o mesmo citado para as resistências pode ser observado no módulo cisalhante inicial. Estudos com outros solos e diferentes agentes cimentantes apresentaram as mesmas tendências.

Já para a porosidade a curva foi ajusta de forma potencial e o decréscimo dessa provoca o aumento do módulo. Em relação à razão vazios/teor volumétrico de cal, a mesma foi adequada para a avaliação do  $G_0$ , sendo a razão ajustada com o expoente de 0,04 ( $\eta/L_{iv}^{0,04}$ ), considerado adequado para o ajuste. O decréscimo da razão vazios/teor volumétrico de cal provoca o aumento do módulo. Isto também pode ser observado na literatura.

### 6.1.3 Comparativo entre variáveis respostas

Outro estudo realizado, também observado na literatura, é a análise da resistência à compressão simples em função do módulo de cisalhamento inicial. Pode ser observado que com o aumento do  $G_0$  a resistência aumenta, tendo em vista que ambos dependem do teor de agente cimentante, logo, com o aumento do teor ambas as variáveis sofrem acréscimo em sua magnitude. A relação entre as variáveis se deu de forma linear, o mesmo pode ser observado na literatura, onde fora utilizado outros solos e agentes cimentantes.

Já para a relação de vazios/teor volumétrico de cal, pode ser relacionada a razão de  $G_0/q_u$  em função de  $(\eta/L_{iv}^{0,04})$ . Para isso, foi necessário ajustar uma curva de ajuste de potência, também utilizada nos gráficos vistos na literatura. Por meio disso, foi possível observar que a razão vazios/teor volumétrico de cal governa a razão entre  $G_0/q_u$ , o que condiz, tendo em vista que a relação de vazios governa separadamente cada um dos parâmetros,  $G_0$  e  $q_u$ .

## 6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Algumas sugestões, a fim de ampliar o conhecimento sobre solos argilosos tratados com cal não hidratada de casca de ovo, são dadas a seguir:

- a) inclusão de fibras de polipropileno nas matrizes dos solos;
- b) realização de ensaios de compressão oedométrica, a fim de avaliar o comportamento do solo conforme o teor de cal, além da expansibilidade do mesmo;
- c) ensaios triaxiais para avaliar a mudança de parâmetros de resistência do solo, conforme o teor de cal e índice de vazios;
- d) análise do efeito de maiores tempos de cura na resistência e na rigidez.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12253: Solo-cimento – dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, ABNT, 1992. 3p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 5 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a. 8 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b. 10 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c. 5 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016d. 3 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo -Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016e. 12 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 9 p.

Beck, K.; Brunetaud, X.; Mertz, J.-D.; Al-Mukhtar, M. “On the use of eggshell lime and tuffeau powder to formulate an appropriate mortar for restoration purposes.” Geological Society Special Publications. 2010. 331(1), 137–145.

Bensaifi, E., F. Bouteljda, M. S. Nouaoria., P. Breul, P. “Influence of crushed granulated blast furnace slag and calcined eggshell waste on mechanical properties of a compacted marl.” Transportation Geotechnics, 20(1), 1-9, 2019.100244.

Boron, Luana. Citrato de cálcio obtido da casca de ovo: biodisponibilidade e uso como suplemento alimentar. 2004. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos.

CASTRO, F. J. C. de O. Contribuição ao Conhecimento e à Determinação da Reatividade de Solos Sesquixídicos Utilizando o Hidróxido de Cálcio: Aplicação ao Processo de Geopolimerização (Estabilização). 1995. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

CARUS, L. A.; BENTO, L.; BRAGANCA, S. R. Avaliação do comportamento reológico de suspensões de ossos bovinos calcinados. **Cerâmica**, São Paulo, v. 59, n. 352, p. 539-544, Dec. 2013. Available from [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-69132013000400008&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132013000400008&lng=en&nrm=iso).

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. Key parameters for strength control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. Reston, American Society of Civil Engineers, v. 133, n. 2, p. 197-205, 2007b.

CONSOLI, N. C.; LOPES Jr., L. da S.; HEINECK, K. S. Key parameters for the strength control of lime stabilized soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21(5), p. 210 – 216, 2009a.

CONSOLI, N. C.; LOPES Jr., L da S.; FOPPA, D.; HEINECK, K. S. Key parameters dictating strength of lime/cement-treated soils. **Geotechnical Engineering**, v. 162 (GE2), p. 111 – 118, 2009b.

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; FLOSS, M. F.; FESTUGATO, L. Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. Reston, American Society of Civil Engineers, v. 136, n. 5, p. 759-763, may 2010.

CONSOLI, N. C.; de MORAES, R. R.; FESTUGATO, L. Parameters controlling tensile and compressive strength of fiber-reinforced cemented soil. **Journal of Materials in Civil Engineering**, New York: ASCE . 2012b.

CONSOLI, N. C. A method proposed for the assessment of failure envelopes of cemented sandy soils. **Engineering Geology**, pp. 61-68, 2014.

CONSOLI, N.C.; LOPES JUNIOR, L. S.; Consoli B.S.; FESTUGATO, L.. Mohr-Coulomb failure envelopes of lime-treated soils. *Geotechnique*, v. 64, p. 165-170, 2014.

CONSOLI, N. C; LOTERO CAICEDO, A. M; BECK SALDANHA, R. ; SCHEUERMANN FILHO, H.C ; MONCALEANO ACOSTA, C. J. Eggshell Produced Limes: Innovative Materials for Soil Stabilization **Journal of Materials in Civil Engineering** , 2020. (ACEITO PARA PUBLICAÇÃO).

DALLA ROSA, A. **Estudo dos Parâmetros-Chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

DALLA ROSA JOHANN, A. **Metodologias 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 de Doutorado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

FARIA, D. A. **Estudo do arrancamento de fundações superficiais apoiadas em argilas marinhas através de experimentos em modelo reduzido**. 2019.192p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

FAO (2018). “Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Gateway to poultry production and products: Production**.” Retrieved December 16, 2018 from <http://www.fao.org/poultry-production-products/production/en/>.

Ferraz, E.; J. A. F. Gamelas, J. Coroado, C. Monteiro, F. Rocha. Eggshell waste to produce building lime: calcium oxide reactivity, industrial, environmental and economic implications”. **Materials and Structures**, 51(115), 1-14, 2018.

FOPPA, D. **Análise de Variáveis-chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados**. 2005. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GAUER, E. A. **Influência da velocidade de rotação da mini palheta na resistência de um solo siltoso**. 2010. 126p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization – Principles and Practice**. Sidney: Butterworths, 1972. 374p.

JUNG, J. G. **Estudo do jateamento em solos argilosos e sua aplicação à engenharia de fundações offshore**. 2012. 181p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LOPES JUNIOR, Luizmar da Silva. **Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada**. 2007. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

LOPES JUNIOR, Luizmar da Silva. **Metodologia de Previsão do Comportamento Mecânico de Solos Tratados com Cal**. 2011. 227p Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

LOURENÇO, D. E. **Hidrojateamento em Solos Argilosos**. 2016. 191p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

L. Zhirong, Md.A. Uddin, S. Zhanxue, FT-IR and XRD analysis of natural Na-bentonite and Cu(II)-loaded Na-bentonite, *Spectrochim. Acta A* 79 (2011) 1013–1016.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. 3 ed. Hoboken: John Wiley and Sons, 2005.

NUNEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de Arenito Botucatu, visando o seu emprego na pavimentação**. 1991. 171p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

OLIVEIRA, J. R. M. S. **Modelagem em centrífuga de um problema de interação solo estrutura**. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.

Oliveira, D.A.; Benelli, P.; Amante, E.R. “A literature review on adding value to solid residues: Egg shells.” **Journal of Cleaner Production**. 2013. 46, 42-47.

PINTO, CARLOS DE SOUSA. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas/3ª Edição**. Carlos de Sou Pinto. – São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PRUSINSKI, J.R.; BHATTACHARJA, S. Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., nº 1652, p.215-227, 1999.

QUIÑÓNEZ SAMANIEGO, R.A. **Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal.**2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

SAMPA, N. C. **Atenuação de Cargas Dinâmicas em Linhas de Ancoragem de Plataformas Offshore.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

SCHEUERMANN FILHO, HUGO CARLOS. **Estabilização de um Solo Dispersivo com Pó de Vidro Moído e Cal de Carbureto.** 2019. 197p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

THOMÉ, A.; DONATO, M.; CONSOLI, N. C.; GRAHAM, J. Circular Footings on a Cemented Layer Above Weak Foundation Soil. **Canadian Geotechnical Journal**, 2005.16p.

TOMASI, L. F. **Comportamento mecânico de resíduo de mineração estabilizado com cimento. Dissertação.** 2018.151p.Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime Stabilization, reactions, properties, design and construction.** Washington: TRB, 1987. 58p. (State of the art report, 5).

VITALI, O. P. M. **Efeito da composição de misturas de solo-cimento nos parâmetros de rigidez e de resistência.** 2008. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

ZAMAN, T. et al . Evolution and characterization of eggshell as a potential candidate of raw material. **Cerâmica**, São Paulo , v. 64, n. 370, p. 236-241, June 2018.