

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Resistência, rigidez e durabilidade de solos arenosos estabilizados  
com materiais mais sustentáveis**

**Daniel Winter**

Porto Alegre  
2018

DANIEL WINTER

**RESISTÊNCIA, RIGIDEZ E DURABILIDADE DE SOLOS  
ARENOSOS ESTABILIZADOS COM MATERIAIS MAIS  
SUSTENTÁVEIS.**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Porto Alegre  
2018

**DANIEL WINTER**

**RESISTÊNCIA, RIGIDEZ E DURABILIDADE DE SOLOS  
ARENOSOS ESTABILIZADOS COM MATERIAIS MAIS  
SUSTENTÁVEIS.**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Área de Concentração Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 16 de fevereiro de 2018.

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Ph.D. pela Concordia University  
Orientador

Profa. Karla Salvagni Heineck  
Dra. pela UFRGS  
Co-orientadora

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Beatrice Anne Baudet**  
Ph.D. pela City University London (Reino Unido)

**Prof. Matthew Richard Coop**  
D.Phil. pela University of Oxford (Reino Unido)

**Prof. Lucas Festugato**  
Dr. Pelo PPGEC - UFRGS

Dedico este trabalho aos meus pais.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço enormemente ao meu orientador Nilo Cesar Consoli, um grande amigo que levo da UFRGS para a vida. Sempre disponível para ajudar, não importa a situação. Um exemplo de profissional, dedicado e extremamente apaixonado pelo que faz, contagiando a todos no grupo de trabalho com esta paixão. Dono de ideias ímpares que o tem evidenciado cada vez mais como o maior pesquisador do Brasil em Geotecnia e quem sabe em Engenharia Civil. Espero que a vida nos permita ainda trabalhar em parceria e saiba que sempre terá o meu respeito, carinho e admiração. Conte sempre comigo.

Agradeço muito a outro grande mestre, o Professor Fernando Schnaid, grande culpado da minha entrada no ramo da Geotecnia. Suas aulas motivantes e seus conselhos altamente valiosos me ajudaram bastante em algumas etapas decisivas. Agradeço por abrir tantas portas para mim.

Agradeço a minha co-orientadora Karla pela atenção dada e pelas suas correções minuciosas.

Agradeço ao Professor Lucas Festugato pelas suas contribuições e pela parceria ao longo de todos estes anos.

Agradeço aos avaliadores, Professora Beatrice Anne Baudet e Professor Matthew Richard Coop pelas suas contribuições durante a arguição e por terem vindo de tão longe para avaliar o meu trabalho.

Agradeço enormemente a duas pessoas que me auxiliaram muito no final da tese, Hugo Scheuermann Filho e Helena Leon. A parceria e o empenho de vocês foi extremamente importante para a conclusão desta etapa. Contem comigo para o que precisarem.

Agradeço ao Sr. João Diniz, laboratorista do LEGG por todo o apoio dado durante a tese.

Agradeço ao colega Eduardo Malmann por abrir as portas da CIENTEC para que as moldagens dos corpos de prova pudessem ser realizadas de maneira eficiente e também pelas belas horas de conversa sobre as nossas teses.

Agradeço a colega Engenheira Marianne Brum por durante o seu estágio obrigatório de conclusão de curso me auxiliar na moagem de vidro. Você foi fundamental no andamento da pesquisa.

Aos bolsistas e voluntários que trabalharam comigo no doutorado deixo um muito obrigado, principalmente pela realização dos ensaios de durabilidade. Em ordem cronológica agradeço a vocês Mateus Christh, Lorenzo Sauer, André Rivoire, Pablo Coelho, Lucas Festa, Vinícius Parisotto e Matheus Hoffman.

Agradeço a meus colegas de pós-graduação que sempre quando preciso estiveram ali para ajudar.

Agradeço ao laboratório LTM por permitir que o vidro fosse moído nos seus equipamentos e ao LACER pelos ensaios de granulometria a laser.

Agradeço a CIENTEC por ceder a sua estrutura durante o andamento do trabalho.

Agradeço enormemente a CAPES e ao CNPQ por conceder a bolsa de estudos que viabilizou o andamento do trabalho.

Agradeço a todos os professores e funcionários da UFRGS que de alguma maneira contribuíram para a execução deste trabalho.

A minha família que esteve sempre do meu lado, foram a minha estrutura, principalmente a Minha esposa Karen e a minha pequena Júlia.

Acima de tudo agradeço a Deus por todas as oportunidades que me foram concedidas.

Muito obrigado!

Na vida, não vale tanto o que temos, nem tanto importa o  
que somos. Vale o que realizamos com aquilo que  
possuímos e, acima de tudo, importa o que fazemos de  
nós!

*Francisco Cândido Xavier*

## RESUMO

WINTER, D. **Resistência, rigidez e durabilidade para solos arenosos estabilizados com materiais mais sustentáveis**. 2018. 166 p. Tese (Doutorado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Com uma necessidade cada vez maior da utilização de materiais mais sustentáveis na construção civil, existe uma grande busca por novas substâncias que possam suprir as nossas necessidades de maneira mais “limpa”. O presente trabalho tem como foco propor uma metodologia de dosagem para a obtenção de solos artificialmente cimentados, com determinadas resistências e rigidezes, de maneira que eles sejam duráveis, com a adição de diferentes resíduos. O solo inicialmente estudado é a areia de Osório e os resíduos são a cal de carbureto e o pó de vidro. A cal de carbureto consiste basicamente de hidróxido de cálcio e o pó de vidro de sílica em estado amorfo, gerando assim uma combinação adequada para a ocorrência das reações pozolânicas. A metodologia de dosagem proposta relaciona as propriedades dos materiais com o fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , aos sete dias de cura, sendo  $\eta$  a porosidade do solo artificialmente cimentado e,  $B_{iv}$  o teor volumétrico de agente cimentante no interior do mesmo (neste caso pó de vidro e cal de carbureto). O expoente externo 0,28 se assemelha ao encontrado em outras metodologias de dosagem para solos artificialmente cimentados com cimento Portland. Com a finalidade de validar a metodologia proposta, para condições distintas das analisadas, foram executados ensaios com diferentes períodos de cura (180 dias), diferentes resíduos (cinza de casca de arroz) e um solo distinto (arenito Botucatu), chegando também a correlações do comportamento mecânico destes materiais com o fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ . Os dados obtidos nesta pesquisa foram comparados com os resultados de outros pesquisadores que utilizaram cal com cinza volante de usinas de carvão juntamente com cal hidratada e de outros trabalhos que utilizaram cimento Portland, todos para criar solos artificialmente cimentados, e, mais uma vez, a metodologia proposta se mostrou eficaz. Foi possível ainda normalizar em função de um valor médio todos os resultados de rigidez, resistência e durabilidade obtendo assim equações únicas em função de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para todos os materiais analisados, chegando a uma correlação com mais de 1000 pontos no caso da resistência.

**Palavras-chave:** *solos artificialmente cimentados, melhoramento de solos, pó de vidro, metodologias de dosagem.*



## ABSTRACT

WINTER, D. **Resistência, rigidez e durabilidade para solos arenosos estabilizados com materiais mais sustentáveis.** 2018. 166 p. Tese (Doutorado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

With a growing need for the use of more sustainable materials in construction, there is a great search for new substances that can meet our needs in a "cleaner" way. The present work aims to propose a dosing methodology for obtaining artificially cemented soils, with certain strengths and stiffness, so that they are durable, with the addition of different residues. The initially studied soil is the Osório sand and the residues are carbide lime and glass powder. The carbide lime basically consists of calcium hydroxide and the glass powder consists of silica in the amorphous state, thus generating a great combination for the occurrence of the pozzolanic reactions. The proposed dosage methodology relates the properties of the materials with the factor  $\eta/B_{iv}^{0.28}$ , at the seven days of curing, in which  $\eta$  is the porosity of the artificially cemented soil and  $B_{iv}$  is the volumetric content of the cementitious agent inside it (in this case powder glass and carbide lime). The external exponent 0.28 resembles that found in other dosing methodologies for artificially cemented soils with Portland cement. The methodology led to a unique correlation for all the dosages used. To validate the hypothesis which was raised, tests were carried out with different curing periods (180 days), different residues (rice husk ash) and a different soil (Botucatu sandstone), reaching optimum correlations. The data obtained in this research were compared with the results of other researchers who used lime with fly ash from coal plants together with hydrated lime and from other works that used Portland cement, all to create artificially cemented soils, and, once again, the proposed methodology proved to be excellent. It was also possible to normalize all the results of stiffness, strength and durability thus obtaining unique equations as a function of  $\eta/B_{iv}^{0.28}$  for all materials analyzed, reaching a correlation with more than 1000 points.

**Key-words:** *cemented soils, soil improvement, powder glass, dosage methodology.*

## SUMÁRIO

|                                                                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                          | <b>23</b> |
| 1.1 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO.....                                                                                   | 23        |
| 1.2 OBJETIVOS.....                                                                                                 | 25        |
| 1.3 ORIGINALIDADE.....                                                                                             | 25        |
| 1.4 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....                                                                                  | 26        |
| 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....                                                                                     | 27        |
| <b>2 SOLOS ARTIFICIALMENTE CIMENTADOS.....</b>                                                                     | <b>29</b> |
| 2.1 METODOLOGIAS DE DOSAGEM DE SOLOS<br>ARTIFICIALMENTE CIMENTADOS QUANTO A RESISTÊNCIA....                        | 36        |
| 2.2 RELAÇÃO ENTRE A RIGIDEZ E A RAZÃO ENTRE A<br>POROSIDADE E O TEOR VOLUMÉTRICO DE AGENTE<br>CIMENTANTE.....      | 45        |
| 2.3 RELAÇÃO ENTRE A DURABILIDADE E A RAZÃO ENTRE A<br>POROSIDADE E O TEOR VOLUMÉTRICO DE AGENTE<br>CIMENTANTE..... | 46        |
| <b>3 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS.....</b>                                                                               | <b>50</b> |
| 3.1 VIDRO.....                                                                                                     | <b>50</b> |
| 3.2 CINZAS PROVENIENTES DE PROCESSOS INDUSTRIAIS.....                                                              | 60        |
| 3.2.1 Cinza de casca de arroz.....                                                                                 | 60        |
| 3.2.2 Cinza volante.....                                                                                           | 62        |
| 3.3 CAL DE CARBURETO.....                                                                                          | 64        |
| <b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                                                                  | <b>66</b> |
| 4.1 MATERIAIS.....                                                                                                 | 66        |

|                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1.1 Areia de Osório.....                                                         | 66        |
| 4.1.2 Arenito Botucatu.....                                                        | 68        |
| 4.1.3 Pó de vidro.....                                                             | 71        |
| 4.1.4 Cinza de casca de arroz.....                                                 | 73        |
| 4.1.5 Cal de carbureto.....                                                        | 75        |
| 4.2 ENSAIOS UTILIZADOS.....                                                        | 77        |
| 4.2.1 Resistência.....                                                             | 77        |
| 4.2.2 Rigidez.....                                                                 | 78        |
| 4.2.3 Durabilidade.....                                                            | 79        |
| 4.2.4 Moldagem dos corpos de prova.....                                            | 80        |
| 4.2.5 Cura dos corpos de prova.....                                                | 80        |
| 4.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....                                                     | 81        |
| 4.3.1 Misturas de areia de Osório, vidro e cal de carbureto.....                   | 81        |
| 4.3.2 Misturas de arenito Botucatu, vidro e cal de carbureto.....                  | 83        |
| 4.3.3 Misturas de areia de Osório, cinza de casca de arroz e cal de carbureto..... | 84        |
| <b>5 RESULTADOS.....</b>                                                           | <b>85</b> |
| 5.1 MISTURAS DE AREIA DE OSÓRIO, VIDRO E CAL DE CARBURETO AOS 7 DIAS DE CURA.....  | 85        |
| 5.1.1 Resistência.....                                                             | 85        |
| 5.1.1.1 Resistência em função do $\gamma_d$ da mistura.....                        | 85        |
| 5.1.1.2 Resistência em função do teor de vidro da mistura.....                     | 87        |
| 5.1.1.3 Resistência em função do teor de cal de carbureto da mistura.....          | 88        |
| 5.1.1.4 Resistência em função do fator $\eta/Liv$ .....                            | 89        |
| 5.1.1.5 Resistência em função do fator $\eta/Biv$ .....                            | 90        |
| 5.1.2 Rigidez.....                                                                 | 91        |
| 5.1.2.1 Rigidez em função do $\gamma_d$ da mistura.....                            | 92        |

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.2.2 Rigidez em função do teor de vidro da mistura.....                             | 93  |
| 5.1.2.3 Rigidez em função do teor de cal de carbureto da mistura.....                  | 94  |
| 5.1.2.4 Rigidez em função do fator $\eta/Liv$ .....                                    | 95  |
| 5.1.2.5 Rigidez em função do fator $\eta/Biv$ .....                                    | 96  |
| 5.1.3 Durabilidade.....                                                                | 97  |
| 5.1.3.1 Durabilidade em função do $\gamma_d$ da mistura.....                           | 97  |
| 5.1.3.2 Durabilidade em função do teor de vidro da mistura.....                        | 102 |
| 5.1.3.3 Durabilidade em função do teor de cal de carbureto da mistura.....             | 105 |
| 5.1.3.4 Durabilidade em função da resistência e da rigidez.....                        | 107 |
| 5.1.3.5 Durabilidade em função do fator $\eta/Biv$ .....                               | 110 |
| 5.1.4 Rigidez em função da resistência do material.....                                | 111 |
| 5.2 MISTURAS DE AREIA DE OSÓRIO, VIDRO E CAL DE<br>CARBURETO AOS 180 DIAS DE CURA..... | 111 |
| 5.2.1 Resistência.....                                                                 | 112 |
| 5.2.2 Rigidez.....                                                                     | 114 |
| 5.2.3 Rigidez em função da resistência do material.....                                | 116 |
| 5.3 MISTURAS DE AREIA DE OSÓRIO, CCA E CAL DE<br>CARBURETO AOS 7 DIAS DE CURA.....     | 117 |
| 5.3.1 Resistência.....                                                                 | 117 |
| 5.3.2 Rigidez.....                                                                     | 119 |
| 5.3.3 Durabilidade.....                                                                | 120 |
| 5.3.4 Rigidez em função da resistência do material.....                                | 122 |
| 5.4 MISTURAS DE AREIA DE OSÓRIO, CCA E CAL DE<br>CARBURETO AOS 180 DIAS DE CURA.....   | 122 |
| 5.4.1 Resistência.....                                                                 | 122 |
| 5.4.2 Rigidez.....                                                                     | 124 |
| 5.4.3 Durabilidade.....                                                                | 126 |
| 5.4.4 Rigidez em função da resistência do material.....                                | 128 |

|                                                                                                               |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.5 MISTURAS DE ARENITO BOTUCATU, VIDRO E CAL DE CARBURETO AOS 180 DIAS DE CURA.....                          | 128        |
| 5.5.1 Resistência.....                                                                                        | 129        |
| 5.5.2 Rigidez.....                                                                                            | 130        |
| 5.5.3 Durabilidade.....                                                                                       | 132        |
| 5.5.4 Rigidez em função da resistência do material.....                                                       | 134        |
| <b>6 DISCUSSÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>                                                           | <b>135</b> |
| 6.1 UTILIZAÇÃO DE PÓ VIDRO E CAL DE CARBURETO PARA CIMENTAR ARTIFICIALMENTE SOLOS ARENOSOS.....               | 135        |
| 6.2 VALIDAÇÃO DO FATOR $H/B_{IV}$ PARA A ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA DE AREIAS ARTIFICIALMENTE CIMENTADAS....   | 136        |
| 6.3 VALIDAÇÃO DO FATOR $H/B_{IV}$ PARA A ESTIMATIVA DE RIGIDEZ DE AREIAS ARTIFICIALMENTE CIMENTADAS.....      | 145        |
| 6.4 VALIDAÇÃO DO FATOR $H/B_{IV}$ PARA A ESTIMATIVA DE DURABILIDADE DE AREIAS ARTIFICIALMENTE CIMENTADAS..... | 147        |
| <b>7 CONCLUSÕES.....</b>                                                                                      | <b>154</b> |
| 7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....                                                                     | 156        |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                                                       | <b>157</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1: delineamento do trabalho.....                                                                                                                                                          | 27 |
| Figura 2.1: mecanismo de troca de cátions das argilas.....                                                                                                                                         | 34 |
| Figura 2.2: mecanismo de estabilização solo-cal.....                                                                                                                                               | 35 |
| Figura 2.3: resistência a compressão em função do fator $\eta/C_{iv}$ para o Arenito Botucatu artificialmente cimentado com cimento Portland.....                                                  | 37 |
| Figura 2.4: resistência a compressão em função do fator $V_v/V_{Li}$ para o Arenito Botucatu artificialmente cimentado com cal.....                                                                | 38 |
| Figura 2.5: resistência a compressão em função do fator $\eta/C_{iv}$ para a areia de Osório artificialmente cimentada com cimento Portland.....                                                   | 39 |
| Figura 2.6: resistência a compressão em função do fator $\eta/L_{iv}$ para o Arenito Botucatu artificialmente cimentado com cal.....                                                               | 40 |
| Figura 2.7: resistência a compressão em função do fator $\eta/L_{iv}$ para o Arenito Botucatu artificialmente cimentado com cal e cinza volante.....                                               | 41 |
| Figura 2.8: normalização da resistência em função da porcentagem de pozolana na mistura Arenito Botucatu, cal e cinza volante.....                                                                 | 41 |
| Figura 2.9: normalização da resistência em função de uma resistência a compressão para a obtenção de uma única equação para solos finos artificialmente cimentados com cimento Portland.....       | 42 |
| Figura 2.10: normalização da resistência em função de uma resistência a compressão para a obtenção de uma única equação para solos granulares artificialmente cimentados com cimento Portland..... | 43 |
| Figura 2.11: normalização da resistência em função de uma resistência a compressão para a obtenção de uma única equação para solos finos artificialmente cimentados com cal.....                   | 44 |
| Figura 2.12: modulo cisalhante a pequenas deformações em função do fator $\eta/L_{iv}$ para o Arenito Botucatu artificialmente cimentado com cal.....                                              | 45 |
| Figura 2.13: modulo cisalhante a pequenas deformações em função do fator $\eta/L_{iv}$ para a argila dispersiva artificialmente cimentada com cal.....                                             | 46 |
| Figura 2.14: perda de massa média por ciclo de molhagem e secagem em função do fator $\eta/C_{iv}$ para a areia de Osório artificialmente cimentada com cimento Portland..                         | 47 |
| Figura 2.15: perda de massa acumulada em função do fator $\eta/C_{iv}$ para a areia de Osório artificialmente cimentada com cimento Portland.....                                                  | 47 |

|                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.16: perda de massa acumulada em função do fator $\eta/C_{iv}$ para um solo calcário artificialmente cimentado com cimento Portland.....                                                                       | 48 |
| Figura 2.17: perda de massa acumulada em função do fator $\eta/L_{iv}$ para um solo silto argiloso artificialmente cimentado com cimento cinza volante e cal de carbureto com a metodologia de molhagem e secagem..... | 49 |
| Figura 2.18: perda de massa acumulada em função do fator $\eta/L_{iv}$ para um solo silto argiloso artificialmente cimentado com cimento cinza volante e cal de carbureto com a metodologia de gelo e degelo.....      | 49 |
| Figura 3.1: estrutura molecular do vidro.....                                                                                                                                                                          | 50 |
| Figura 3.2: painel de concreto para acabamento com a utilização de vidro como agregado.....                                                                                                                            | 53 |
| Figura 3.3: variação na resistência a compressão do concreto em relação a porcentagem de vidro substituindo o agregado fino.....                                                                                       | 54 |
| Figura 3.4: propriedades de uma areia artificialmente cimentada com a adição de vidro moído em forma granular.....                                                                                                     | 55 |
| Figura 3.5: etapa I da reação álcali agregado.....                                                                                                                                                                     | 56 |
| Figura 3.6: etapa II da reação álcali agregado.....                                                                                                                                                                    | 56 |
| Figura 3.7: etapa III da reação álcali agregado.....                                                                                                                                                                   | 56 |
| Figura 3.8: imagem de microscopia de uma reação álcali agregado em uma argamassa.....                                                                                                                                  | 57 |
| Figura 3.9: bloco de fundações afetado por reações álcali agregado.....                                                                                                                                                | 57 |
| Figura 3.10: variação na resistência a compressão do concreto em relação a porcentagem de vidro substituindo o cimento.....                                                                                            | 58 |
| Figura 3.11: variação na resistência a compressão do concreto em relação a porcentagem de vidro substituindo o cimento ao longo do tempo.....                                                                          | 59 |
| Figura 3.12: resistência a tração para um solo orgânico artificialmente cimentado com cal e cinza de casca de arroz para diferentes tempos de cura em função do $\eta/L_{iv}$ .....                                    | 61 |
| Figura 3.13: resistência a tração para um solo orgânico artificialmente cimentado com cimento e cinza de casca de arroz para diferentes tempos de cura em função do $\eta/C_{iv}$ .....                                | 62 |
| Figura 3.14: resistência a compressão para o arenito Botucatu com a adição de cal, cinza volante e pó de pedra em relação ao $\eta/L_{iv}$ .....                                                                       | 63 |
| Figura 4.1: localização da cidade de Osório.....                                                                                                                                                                       | 66 |
| Figura 4.2: curva granulométrica da areia de Osório.....                                                                                                                                                               | 67 |

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.3: foto de microscopia eletrônica da areia de Osório ampliada 40 e 500 vezes.....                                                | 67 |
| Figura 4.4: mapa geológico mostrando a formação Botucatu.....                                                                             | 69 |
| Figura 4.5: talude de onde foi retirado o arenito Botucatu.....                                                                           | 69 |
| Figura 4.6: curva granulométrica do arenito Botucatu.....                                                                                 | 70 |
| Figura 4.7: curva granulométrica do pó de vidro.....                                                                                      | 72 |
| Figura 4.8: foto de microscopia eletrônica do pó de vidro.....                                                                            | 72 |
| Figura 4.9: curva granulométrica da cinza de casca de arroz.....                                                                          | 74 |
| Figura 4.10: foto de microscopia eletrônica da cinza de casca de arroz.....                                                               | 74 |
| Figura 4.11: curva granulométrica da cal de carbureto.....                                                                                | 76 |
| Figura 4.12: foto de microscopia eletrônica da cal de carbureto.....                                                                      | 76 |
| Figura 4.13: prensa utilizada para os ensaios de compressão simples.....                                                                  | 78 |
| Figura 4.14: pundit lab plus.....                                                                                                         | 79 |
| Figura 4.15: resultado do ensaio de compactação para areia de Osório com pó de vidro.....                                                 | 81 |
| Figura 4.16: resultado do ensaio de compactação para o arenito Botucatu.....                                                              | 83 |
| Figura 5.1: $q_u$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para o $\gamma_d = 15,5$ kN/m <sup>3</sup> aos 7 dias de cura..... | 86 |
| Figura 5.2: $q_u$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para o $\gamma_d = 16,5$ kN/m <sup>3</sup> aos 7 dias de cura..... | 86 |
| Figura 5.3: $q_u$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para o $\gamma_d = 17,5$ kN/m <sup>3</sup> aos 7 dias de cura..... | 86 |
| Figura 5.4: $q_u$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para o $\gamma_d = 18,5$ kN/m <sup>3</sup> aos 7 dias de cura..... | 87 |
| Figura 5.5: $q_u$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 10% de vidro aos 7 dias de cura.....                          | 87 |
| Figura 5.6: $q_u$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 20% de vidro aos 7 dias de cura.....                          | 87 |
| Figura 5.7: $q_u$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 30% de vidro aos 7 dias de cura. ....                         | 88 |



|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 5.8: $q_u$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 3% de cal aos sete dias de cura.....                                                        | 88 |
| Figura 5.9: $q_u$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 5% de cal aos sete dias de cura.....                                                        | 88 |
| Figura 5.10: $q_u$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 7% de cal aos sete dias de cura.....                                                       | 89 |
| Figura 5.11: $q_u$ em função do fator $\eta/L_{iv}^{0,11}$ para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para sete dias de cura.....                         | 89 |
| Figura 5.12: $q_u / q_u (\eta/L_{iv}^{0,11}=30)$ em função do $\eta/L_{iv}^{0,11}$ para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para sete dias de cura..... | 90 |
| Figura 5.13: $q_u$ em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para sete dias de cura.....                         | 91 |
| Figura 5.14: $G_0$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para o $\gamma_d = 15,5$ kN/m <sup>3</sup> para os sete dias de cura.....                       | 92 |
| Figura 5.15: $G_0$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para o $\gamma_d = 16,5$ kN/m <sup>3</sup> para os sete dias de cura.....                       | 92 |
| Figura 5.16: $G_0$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para o $\gamma_d = 17,5$ kN/m <sup>3</sup> para os sete dias de cura.....                       | 93 |
| Figura 5.17: $G_0$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para o $\gamma_d = 18,5$ kN/m <sup>3</sup> para os sete dias de cura.....                       | 93 |
| Figura 5.18: $G_0$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 10% de vidro para os sete dias de cura.....                                                | 93 |
| Figura 5.19: $G_0$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 20% de vidro para os sete dias de cura.....                                                | 94 |
| Figura 5.20: $G_0$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 30% de vidro para os sete dias de cura.....                                                | 94 |
| Figura 5.21: $G_0$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 3% de cal, para os sete dias de cura.....                                                  | 94 |
| Figura 5.22: $G_0$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 5% de cal, para os sete dias de cura.....                                                  | 95 |
| Figura 5.23: $G_0$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 7% de cal, isolando o $\gamma_d$ .....                                                     | 95 |
| Figura 5.24: $G_0$ em função do fator $\eta/L_{iv}^{0,11}$ para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para sete dias de cura.....                         | 96 |

|                                                                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.25: $G_0$ em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto aos sete dias de cura.....                                     | 97  |
| Figura 5.26: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com $\gamma_d = 15,5 \text{ kN/m}^3$ para sete dias de cura.....                              | 98  |
| Figura 5.27: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com $\gamma_d = 16,5 \text{ kN/m}^3$ para sete dias de cura.....                              | 99  |
| Figura 5.28: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com $\gamma_d = 17,5 \text{ kN/m}^3$ para sete dias de cura.....                              | 100 |
| Figura 5.29: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com $\gamma_d = 18,5 \text{ kN/m}^3$ para sete dias de cura.....                              | 101 |
| Figura 5.30: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com 10% de vidro para sete dias de cura.....                                                  | 102 |
| Figura 5.31: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com 20% de vidro para sete dias de cura.....                                                  | 103 |
| Figura 5.32: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com 30% de vidro para sete dias de cura.....                                                  | 104 |
| Figura 5.33: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com 3% de cal de carbureto para sete dias de cura.....                                        | 105 |
| Figura 5.34: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com 5% de cal de carbureto para sete dias de cura.....                                        | 106 |
| Figura 5.35: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com 7% de cal de carbureto para sete dias de cura.....                                        | 107 |
| Figura 5.36: durabilidade da mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto em função de $q_u$ para os sete dias de cura.....                                                   | 108 |
| Figura 5.37: durabilidade da mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto em função de $G_0$ para os sete dias de cura.....                                                   | 109 |
| Figura 5.38: durabilidade da mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto em função de $\eta/B_{iv}$ para os sete dias de cura.....                                           | 110 |
| Figura 5.39: $G_0$ em função de $q_u$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para os sete dias de cura.....                                                          | 111 |
| Figura 5.40: $q_u$ em função do fator $\eta/L_{iv}^{0,11}$ para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.....                         | 112 |
| Figura 5.41: $q_u / q_u (\eta/L_{iv}^{0,11}=30)$ em função do $\eta/L_{iv}^{0,11}$ para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura..... | 113 |

|                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.42: $q_u$ em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.....      | 114 |
| Figura 5.43: $G_0 q_u$ em função do fator $\eta/L_{iv}^{0,11}$ para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.....  | 115 |
| Figura 5.44: $G_0$ em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.....      | 116 |
| Figura 5.45: $G_0$ em função de $q_u$ da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para os cento e oitenta dias de cura.....                            | 117 |
| Figura 5.46: $q_u$ em função do fator $\eta/L_{iv}^{0,11}$ para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para sete dias de cura.....                   | 118 |
| Figura 5.47: $q_u$ em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para sete dias de cura.....                   | 118 |
| Figura 5.48: $G_0$ em função do fator $\eta/L_{iv}^{0,11}$ para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para sete dias de cura.....                   | 119 |
| Figura 5.49: $G_0$ em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para sete dias de cura.....                   | 120 |
| Figura 5.50: durabilidade em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para sete dias de cura.....            | 121 |
| Figura 5.51: $G_0$ em função de $q_u$ da mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para os sete dias de cura.....                                         | 122 |
| Figura 5.52: $q_u$ em função do fator $\eta/L_{iv}^{0,11}$ para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.....        | 123 |
| Figura 5.53: $q_u$ em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.....        | 124 |
| Figura 5.54: $G_0$ em função do fator $\eta/L_{iv}^{0,11}$ para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.....        | 125 |
| Figura 5.55: $G_0$ em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.....        | 126 |
| Figura 5.56: durabilidade em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura..... | 127 |
| Figura 5.57: $G_0$ em função de $q_u$ da mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para os cento e oitenta dias de cura.....                              | 128 |
| Figura 5.58: $q_u$ em função do fator $\eta/L_{iv}^{0,11}$ para a mistura de arenito Botucatu, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.....  | 129 |

|                                                                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.59: $q_u$ em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para a mistura de arenito Botucatu, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.....                                                   | 130 |
| Figura 5.60: $G_0$ em função do fator $\eta/L_{iv}^{0,11}$ para a mistura de arenito Botucatu, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.....                                                   | 131 |
| Figura 5.61: $G_0$ em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para a mistura de arenito Botucatu, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.....                                                   | 132 |
| Figura 5.62: durabilidade em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para a mistura de arenito Botucatu, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.....                                            | 133 |
| Figura 5.63: $G_0$ em função de $q_u$ da mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para os cento e oitenta dias de cura.....                                                                               | 134 |
| Figura 6.1: $q_u$ das misturas testadas em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .....                                                                                                                            | 137 |
| Figura 6.2: $q_u$ das misturas testadas normalizados e em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .....                                                                                                             | 138 |
| Figura 6.3: $q_u$ das misturas testadas por DALLA ROSA (2009) em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .....                                                                                                      | 139 |
| Figura 6.4: $q_u$ das misturas de DALLA ROSA (2009) normalizados e em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .....                                                                                                 | 140 |
| Figura 6.5: $q_u$ das misturas testadas e obtidas de DALLA ROSA (2009) normalizados e em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .....                                                                              | 141 |
| Figura 6.6: $q_u$ das misturas testadas por Caberlon (2008), Foppa (2005) e Consoli et al. (2016c) em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .....                                                                 | 142 |
| Figura 6.7: $q_u$ das misturas de Caberlon (2008), Foppa (2005) e Consoli et al. (2016c) normalizados e em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .....                                                            | 143 |
| Figura 6.8: $q_u$ das misturas testadas e obtidas de Caberlon (2008), Foppa (2005), Dalla Rosa (2009) e Consoli et al. (2016c) normalizados e em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .....                      | 144 |
| Figura 6.9: $q_u$ das misturas testadas e obtidas de Caberlon (2008), Foppa (2005), Dalla Rosa (2009) e Consoli et al. (2016c) normalizados e em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ em escala logarítmica..... | 145 |
| Figura 6.10: $G_0$ das misturas testadas em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .....                                                                                                                           | 146 |
| Figura 6.11: $G_0$ das misturas testadas normalizados e em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .....                                                                                                            | 147 |
| Figura 6.12: $G_0$ das misturas testadas normalizados e em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ juntamente com os dados de Consoli et al. (2016c).....                                                           | 148 |
| Figura 6.13: $G_0$ das misturas testadas normalizados e em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ juntamente com os dados de Consoli et al. (2016c) na escala logarítmica.....                                     | 148 |

|                                                                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 6.14: perda de massa média por ciclo das misturas testadas em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .....                                                                                 | 149 |
| Figura 6.15: perda de massa acumulada das misturas testadas em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .....                                                                                       | 149 |
| Figura 6.16: perda de massa média por ciclo das misturas testadas normalizados e em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .....                                                                  | 150 |
| Figura 6.17: perda de massa acumulada das misturas testadas normalizados e em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .....                                                                        | 151 |
| Figura 6.18: perda de massa acumulada das misturas testadas juntamente com os dados de Consoli et al. (2016c) normalizados e em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .....                      | 152 |
| Figura 6.19: perda de massa acumulada das misturas testadas juntamente com os dados de Consoli et al. (2016c) normalizados e em função do fator $\eta/B_{iv}^{0,28}$ na escala logarítmica..... | 153 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 3.1: porcentagem de vidro reciclado em 2010 em alguns países.....                                           | 52 |
| Tabela 4.1: propriedades físicas da areia de Osório.....                                                           | 68 |
| Tabela 4.2: propriedades físicas do arenito Botucatu.....                                                          | 71 |
| Tabela 4.3: propriedades físicas do pó de vidro.....                                                               | 73 |
| Tabela 4.4: propriedades físicas da cinza de casca de arroz.....                                                   | 75 |
| Tabela 4.5: propriedades físicas da cal de carbureto.....                                                          | 77 |
| Tabela 4.6: misturas de areia de Osório com pó de vidro e cal de carbureto para 7 dias de cura.....                | 82 |
| Tabela 4.7: misturas de areia de Osório com pó de vidro e cal de carbureto para 180 dias de cura.....              | 82 |
| Tabela 4.8: misturas de arenito Botucatu com pó de vidro e cal de carbureto para 180 dias de cura.....             | 84 |
| Tabela 4.9: misturas de arenito Botucatu com cinza de casca de arroz e cal de carbureto para 180 dias de cura..... | 84 |

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

$B_{iv}$  – teor volumétrico de agente cimentante.

CCA – cinza de casca de arroz.

$C_{iv}$  – teor volumétrico de cimento.

$G_0$  – módulo cisalhante a pequenas deformações.

GPa – gigaPascal.

kPa – kiloPascal.

$L_{iv}$  – teor volumétrico de cal.

$q_u$  – resistência a compressão simples.

$\eta$  – porosidade.





# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

A visão do homem sobre o meio ambiente tem sido alterada enormemente nos últimos anos. Cada vez mais o impacto ambiental gerado por nossas ações, necessidades e consumismo tem sido foco de análises críticas e ações para tentar minimizar ou até mitigar o seu efeito. O ser humano tem se conscientizado que o passivo deixado por ele irá afetar diretamente a longo prazo as gerações futuras ou ainda a curto prazo influenciará a sua própria qualidade de vida. Com este viés, governos e entidades criam normas e regras cada vez mais rígidas para a indústrias quanto ao descarte dos resíduos gerados nos seus processos.

Um setor da cadeia produtiva que necessita ainda de um grande avanço tecnológico para se tornar mais sustentável é a construção civil. Este setor apresenta técnicas muito bem consolidadas ao longo dos anos, porém muitas delas ineficientes e geradoras de uma grande quantidade de resíduos e ainda o seu no impacto consta a exploração de recursos naturais finitos. Grandes passos têm sido dados neste meio, porém ainda existe um caminho muito extenso a ser trilhado.

A Engenharia de fundações e de pavimentos possui um atraso ainda maior na sustentabilidade dos seus processos e as mesmas soluções são utilizadas repetitivamente a décadas e muito disso se dá pelo fato do pensamento de que aquilo que não está visível, ou seja, o que está enterrado não causa nenhum impacto. Existe uma grande necessidade de melhorar estes processos com tecnologias mais limpas e até que possam eliminar passivos ambientais de outras atividades.

Com uma demanda cada vez maior por materiais de construção mais sustentáveis, se cria a necessidade de buscar alternativas para soluções já consolidadas de produtos para substituírem de maneira mais eficiente e ambientalmente correta soluções já utilizadas tradicionalmente. No Brasil, somente na última década têm se olhado com mais atenção para estes fatores e tem vindo a tona, inclusive quando se trata de grandes obras, o tema melhoramento de solos.

O melhoramento de solos, tanto para a pavimentação quanto para fundações pode ser executado com materiais tradicionais como cimento, cales comerciais e materiais granulares, porém, quando entre em foco a sustentabilidade aí existe uma grande lacuna a ser preenchida. Algo que anteriormente era um passivo ambiental pode vir a ter utilizações nobres e até valor comercial dentro desta área.

No presente trabalho serão avaliados primeiramente os efeitos de dois resíduos (descartes de vidros planos de janelas e cal de carbureto) em um solo granular. O solo granular no qual será avaliado o melhoramento com estes resíduos é a areia de Osório, que consiste em um material com comportamento já conhecido por grupo de trabalho do LEGG. Posteriormente são adicionados à pesquisa um outro tipo de solo granular, o arenito Botucatu e um outro resíduo, a cinza de casca de arroz, ambos com a finalidade de consolidação das metodologias de utilização propostas.

É de senso comum o fato de que o vidro pode chegar a levar milhares de anos para se decompor na natureza e se não utilizado para outros fins acaba ocupando durante todo este período um espaço que é cada vez mais “nobre” nos aterros sanitários. No Brasil, e em diversos outros países, boa parte deste nobre material é simplesmente descartado. O vidro é composto principalmente por óxido de sílica em estado amorfo e se mostra um excelente material pozolânico quando moído em pequenas granulometrias. Quando o pó de vidro é adicionado a um meio onde possa ser dissolvido juntamente com  $\text{Ca(OH)}_2$ , esta mistura se torna um material cimentante com bastante eficiência gerando ganhos de resistência, rigidez e durabilidade ao material.

A cal de carbureto é um resíduo gerado na produção do gás acetileno, amplamente utilizado para soldas e cortes a fogo. Em grande parte, a cal de carbureto é descartada apesar de ser extremamente rica em óxido de cálcio, podendo ser comparada a cales comerciais de ótima qualidade.

Além de analisar as propriedades adquiridas pelo solo artificialmente cimentado com os resíduos em questão, será proposta uma nova metodologia de dosagem similar a definida por Consoli et al. (2007) e diversas pesquisas posteriores. A diferença está no fato em que a adição da pozolana e da fonte de cálcio é considerada como a adição de um cimento, independente do teor de cada um destes no interior da mistura. Esta metodologia de dosagem

permite que seja estimada a resistência, a rigidez e a durabilidade de solos granulares artificialmente cimentados com diferentes resíduos de uma maneira prática e simplificada.

Para validar a metodologia foram feitos ensaios com outros solos como o arenito Botucatu, outros períodos de cura, utilizadas outras fontes de sílica como a cinza de casca de arroz e, inclusive foram realizadas comparações com resultados obtidos em trabalhos anteriores de melhoramento de solos granulares com a utilização de cales e resíduos (cinza volante de carvão e cal hidratada), buscando possíveis normalizações e comparações. Com esta finalidade também foram usados resultados de pesquisadores que utilizaram cimento Portland para melhorar os solos empregados no presente trabalho e resíduo de mineração de ouro.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho é definir uma nova metodologia de dosagem eficiente para a obtenção de determinadas resistências e rigidezes, de maneira que estas propriedades sejam duráveis, em uma areia artificialmente cimentada, com a utilização de pó de vidro e cal de carbureto, em distintas quantidades e para diferentes graus de compactação do material gerado.

Os objetivos secundários do trabalho são os seguintes:

- avaliar o efeito da adição de vidro e cal de carbureto e do grau de compactação da mistura na areia de Osório artificialmente cimentada, inclusive para diferentes períodos de cura, avaliando o pó de vidro como pozolana para esta finalidade;
- validar a metodologia proposta para diferentes tipos de solos, pozolanas e aglomerantes com ensaios adicionais realizados e comparações com pesquisas anteriores;
- obter uma normalização para ser utilizada com o intuito de explicar o comportamento de diversos solos granulares com distintos agentes aglomerantes e pozolanas, em diferentes quantidades para qualquer grau de compactação da mistura, tanto em resistência quanto na compressibilidade e na durabilidade.

### 1.3 ORIGINALIDADE

Existem dois assuntos de caráter original na presente pesquisa. O primeiro é a utilização do pó de vidro como pozolana para o melhoramento de um solo granular juntamente com cal de carbureto. Outros pesquisadores já utilizaram o pó de vidro como pozolana para concretos e argamassas e, alguns outros, vidro moído em forma granular para melhorar solos, ou seja, de maneiras totalmente distintas a utilizada nesta pesquisa.

O segundo trata-se de uma metodologia de dosagem de solos artificialmente cimentados que nunca antes foi verificada, levando em conta o total de agente cimentante, ou seja, o total de uma pozolana mais o hidróxido de cálcio como sendo uma variável única e com o seu comportamento se aproximando bastante do comportamento de solos artificialmente cimentados com cimento Portland. Além disso, são obtidas normalizações em função desta metodologia para a resistência, a rigidez e a durabilidade do material, o que nunca antes foi proposto por outros pesquisadores.

### 1.4 DELINEAMENTO DA PESQUISA

O delineamento do trabalho é apresentado na Figura 1.1 mostrando as etapas que foram executadas para a elaboração do presente trabalho, na ordem em que foram executadas e mostrado a relação de dependência entre elas.

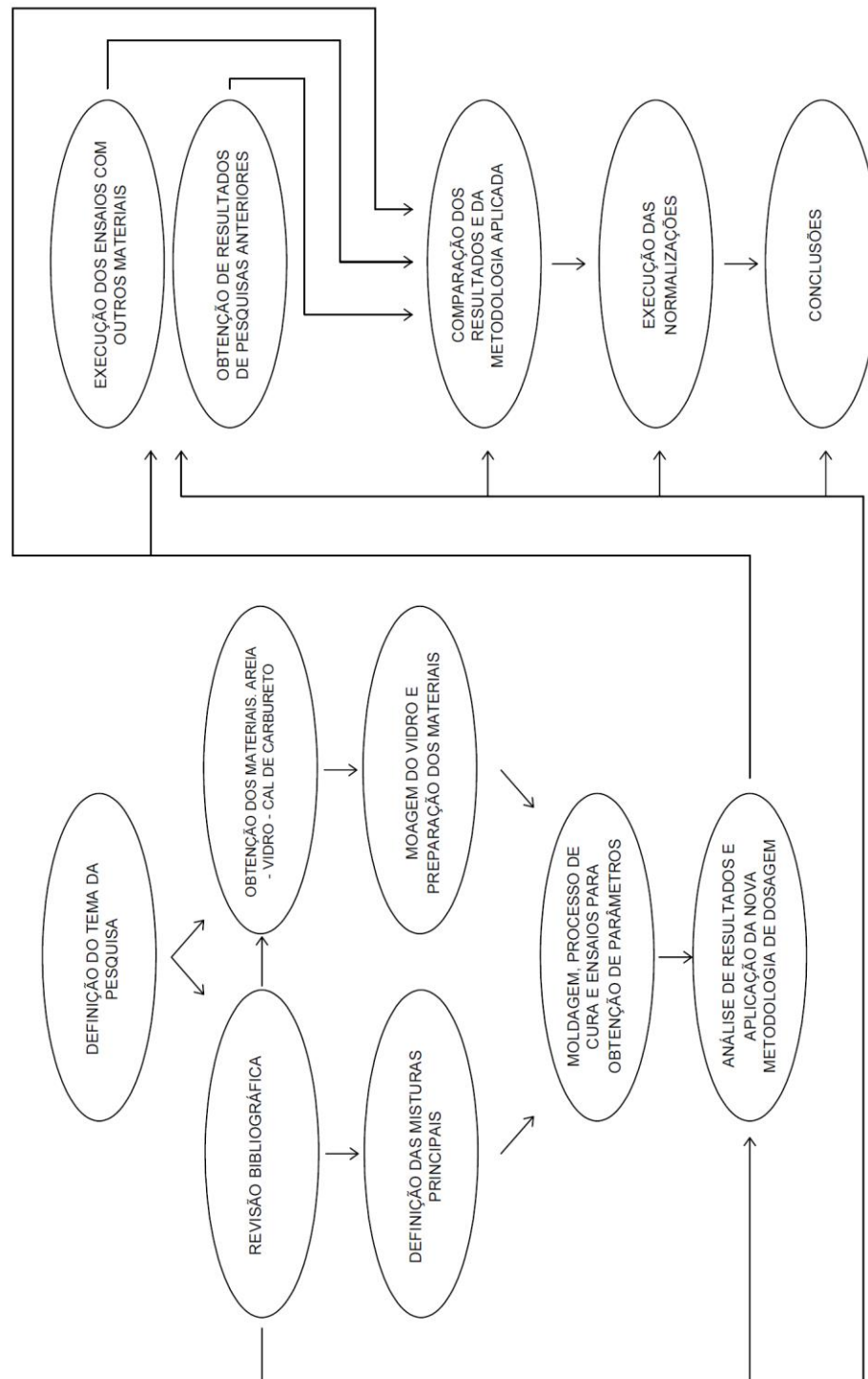


Figura 1.1: delineamento do trabalho.

Após a definição da pesquisa, foram executadas duas etapas simultâneas, a revisão bibliográfica e a obtenção dos materiais principais, areia de Osório, vidro e cal de carbureto. Com os materiais em mãos foi executada a preparação e caracterização destes, inclusive a moagem de vidro, que acabou gerando 50kg de pó de vidro com granulometria inferior a

0,075mm. Após a definição das misturas ocorreu a moldagem dos corpos de prova, a cura e os ensaios realizados, para assim serem elaboradas a primeira análise e verificação da validade da metodologia proposta.

Para preencher algumas das lacunas deixadas pelo programa experimental principal, foi elaborado um programa experimental auxiliar, com outros tipos de solo, resíduos, períodos de cura e resultados de pesquisas anteriores e, posteriormente, foram executadas normalizações quanto a resistência, rigidez e durabilidade, para finalmente chegar nas conclusões da pesquisa.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é composto por 7 capítulos, sendo o presente capítulo (Capítulo 1) o introdutório, contextualizando e justificando a pesquisa além de explicitar os seus objetivos, seu caráter de originalidade, seu delineamento e a estrutura do mesmo.

Os capítulos 2 e 3 compõe a revisão bibliográfica da tese, e tem o intuito de embasar teoricamente o estudo realizado, sendo o capítulo 2 dedicado a explicar como ocorrem as reações cimentantes em solos com a utilização de cales e exibindo cronologicamente as metodologias de dosagem de solos artificialmente cimentadas criadas e aperfeiçoadas pelo grupo de trabalho do laboratório sob a liderança do Professor Nilo Cesar Consoli. No capítulo 3 são exibidas características gerais e algumas utilizações dos resíduos presentes nas misturas estudadas.

O capítulo 4, denominado materiais e métodos exhibe a breve caracterização dos materiais presentes, os ensaios e métodos utilizados além do programa experimental realizado. Posteriormente, o capítulo 5 exhibe de maneira organizada os resultados obtidos nos ensaios de resistência, rigidez e durabilidade. Neste capítulo já é aplicada a metodologia de dosagem proposta para todos os materiais. Uma ênfase maior é dada para a mistura areia de Osório, pó de vidro e cal de carbureto pois esta é a base do presente trabalho.

No capítulo 6 são discutidos e comparados os resultados obtidos e, inclusive, dados de outras pesquisas, para assim exhibir as normalizações obtidas quanto a resistência, rigidez e durabilidade. No capítulo 7 são constam as conclusões e as sugestões para futuros trabalhos.

## 2 SOLOS ARTIFICIALMENTE CIMENTADOS

A resistência, rigidez e a durabilidade de solos cimentados dependem de diversos fatores, entre eles a porcentagem e qualidade de agente cimentante, a quantidade de material amorfo para que as reações ocorram e o índice de vazios. Neste capítulo são brevemente descritas e explicadas as reações químicas que ocorrem quando há a adição de cal ou cimento em um solo e algumas das metodologias de dosagem de misturas de solo/cimento e solo/cal existentes, além de exemplificar quais são os fatores que influenciam nas propriedades destes materiais. As normas Brasileiras vigentes sobre solo cimento são as seguintes:

NBR 11798:2012, Materiais para base de solo-cimento - Requisitos. Estabelece os requisitos para materiais utilizados na execução de camadas de base de pavimentos de solo-cimento. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012a)

NBR 12253:2012, Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento. Estabelece requisitos para determinação da quantidade de cimento Portland utilizados como camada de pavimento solo-cimento. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012b)

NBR 12025:2012, Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio. Estabelece o método de ensaio de resistência à compressão simples de corpos de prova cilíndricos de solo-cimento. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012c)

NBR 16096:2012, Solo-cimento - Determinação do grau de pulverização - Método de ensaio. Estabelece o método para determinação do grau de pulverização do solo para execução de base de solo-cimento. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012d)

NBR 12023:2012, Solo-cimento - Ensaio de compactação. Estabelece os métodos para determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca de misturas de solo e cimento, sem reuso do material, quando as mesmas são compactadas com energia normal. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012e)

NBR 12024:2012, Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento. Estabelece dois métodos aplicáveis para moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos de solo-cimento. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012f)

NBR 13554:2012, Solo-cimento - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem - Método de ensaio. Estabelece os métodos para a verificação da durabilidade de misturas solo-cimento. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012g)

NBR 12254:2013, Solo-cimento - Execução de base de solo-cimento - Procedimento. Estabelece os métodos para a execução de bases de solo-cimento para pavimentos. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013)

O melhoramento de solos com o uso de cimento Portland é um assunto bastante estudado e bem difundido na literatura. Autores como Nuñez (1991), Vendruscolo (2003) e Foppa (2005), na revisão bibliográfica de suas teses ou dissertações, citam diversas referências sobre o assunto. Segundo Nunez (1991), o mecanismo que ocorre na combinação de solos granulares com cimento é similar ao mecanismo que ocorre na utilização do cimento no concreto. Quanto às reações da mistura em solos argilosos, Herzog e Mitchel (1963), citam que, nestes materiais, o processo de endurecimento se deve a cimentação de partículas de argila pelos produtos da hidratação do cimento e pelos produtos das reações secundárias, que consistem em reações entre a cal liberada pela hidratação do cimento e os argilo-minerais do solo.

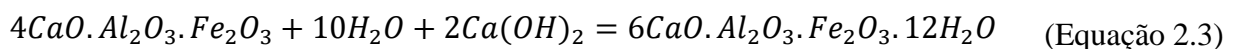
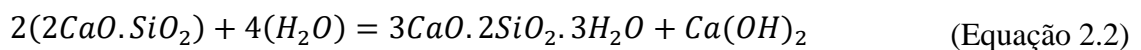
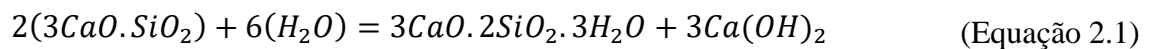
Conforme citado em Foppa (2005), mesmo em pequenas quantidades a adição de cimento gera ganhos de resistência no material estudado, que no caso era o Arenito Botucatu. A adição dos finos acabou gerando também um ganho de resistência ao material estudado devido a permitir elevar a massa aparente seca das misturas, possivelmente gerando um melhor empacotamento da mistura. O mesmo autor cita que não existe relação entre a resistência a compressão simples e a relação água/cimento para o material estudado, fato este que se deve ao fato de o solo não ser saturado.

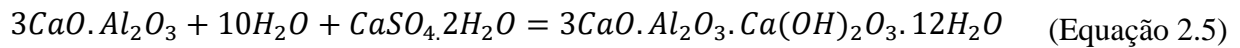
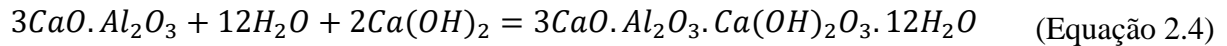


MOORE et al. (1970) em seu estudo em busca dos fatores que mais influenciam a resistência de solos cimentados com cimento Portland chegaram a conclusão de que a resistência destes materiais se deve principalmente:

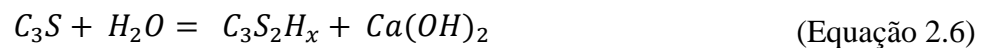
- ao teor de umidade inicial da mistura;
- ao tempo de cura dos corpos de prova;
- as condições de cura dos corpos de prova;
- a granulometria da mistura;
- a mineralogia do solo;
- as condições de compactação;
- a quantidade de cimento adicionada a mistura.

Como citado por Lea (1956), o cimento Portland consiste de diferentes substâncias, sendo as responsáveis pelo ganho de resistência: silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato dicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e aluminato tetracálcico ferrite ( $C_4AF$ ). Segundo Bergado et al. (1996), quanto estas substâncias entram em contato com a água presente nos solos, rapidamente ocorre a sua hidratação, formando-se os silicatos hidratados de cálcio (CSH), os aluminatos hidratados de cálcio (CAH) e cal hidratada ( $Ca(OH)_2$ ). As principais reações químicas que ocorrem com a água do solo são descritas nas equações 2.1 a 2.5.





Segundo o mesmo autor, os compostos formados pela hidratação do cimento nas Equações 2.1 e 2.2, géis de tobermorita e cal hidratada, são os principais responsáveis pelo ganho de resistência das misturas solo/cimento. As reações que ocorrem ao longo do tempo com o silicato tricálcico são exibidas nas Equações 2.6 a 2.9, sendo que, a Equação 2.6 representa as reações primárias, a Equação 2.7 mostra a dissolução dos íons de cálcio e as Equações 2.8 e 2.9 mostram as reações secundárias. Estas reações secundárias necessitam de componentes do solo (sílica e alumina em estado amorfo) para ocorrerem.



Segundo Mindess et al. (2003), as reações de hidratação do cimento nos primeiros dias ocorrem em intensidade nos seguintes elementos, em ordem decrescente:  $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$ . Com a liberação de cal, posteriormente, se houver sílica ou alumina em estado amorfo, ocorrem as reações secundárias.

Assim como para as misturas solo/cimento, as misturas solo/cal estão muito bem descritas na literatura. Autores como Nuñez (1991), Thomé (1994), Lopes Junior (2011) e Johann (2013) em suas teses ou dissertações citam diversas referências sobre o assunto. Ao contrário do cimento, para a cal viva reagir existe a necessidade de haver sílica e alumina em estado amorfo, para que ocorram as reações pozolânicas.

Como citado em Thomé (1994), ocorrem diversas reações químicas ao ser executada a mistura solo/cal, algumas imediatas e outras ao longo do tempo. As principais reações que ocorrem são:

- Floculação – consiste no aumento e estabilização das partículas argilosas e ocorre devido a três fatores: troca catiônica, aumento da capacidade de troca catiônica dependente do pH e aumento da concentração de eletrólitos na água dos poros;
- Carbonatação – é a reação da cal com o dióxido de carbono do ar atmosférico, geram cristais de  $CaCO_3$  e ocorrem imediatamente após a exposição da cal ao ar;
- Adsorção química das moléculas da cal – íons de cálcio são liberados na mistura;
- Reações pozolânicas – reação do cálcio da cal com a sílica e alumina do solo gerando os silicatos e aluminatos hidratados de cálcio, responsáveis pela maior parte do ganho de resistência das misturas solo/cal.

Segundo Castro (1995), quando a cal é adicionada a um solo fino com a presença de água ocorrem simultaneamente algumas reações químicas, que podem ser caracterizadas por duas etapas distintas, uma etapa inicial rápida que dura de horas a dias e outra mais lenta, que pode levar meses a anos. A etapa inicial rápida consiste em: troca catiônica, floculação, compressão da dupla camada elétrica, adsorção da cal e reações químicas. A etapa lenta consiste nas reações pozolânicas e na carbonatação.

Prusinski e Bhattacharja (1999) afirmam que para neutralizar a deficiência de cargas do argilo-mineral, cátions e moléculas que se encontram dissolvidos na água são atraídos para as superfícies carregadas negativamente, iniciando assim rapidamente as trocas catiônicas. Segundo Harrin e Mitchel (1961), a ordem de adsorção preferencial dos cátions é a seguinte:

$Na^+ < Ca^{++} < Mg^{++} < Al^{+++}$ , ou seja, cátions de menor valência são substituídos por cátions de maior valência. A figura 2.1 adaptada de Prusinski e Bhattacharja (1999), mostra o mecanismo de troca dos cátions.

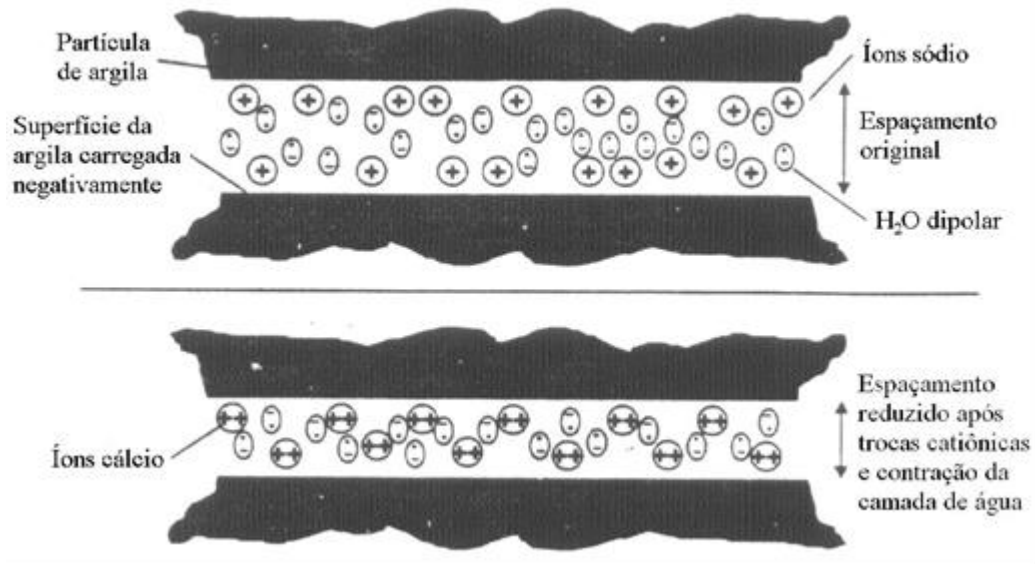


Figura 2.1: mecanismo de troca de cátions. (adaptado de PRUSINSKI, BHATTACHARJA, 1999)

Segundo Johann (2013), as reações pozolânicas são responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica de misturas solo-cal. Esse aumento ocorre porque as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo reagem com a cal e a água, formando diversos produtos cimentantes. Como citado por Rogers e Glendinning (2000), os íons hidroxila liberados da cal elevam o pH da mistura a um valor suficientemente alto, de modo que a sílica e a alumina sejam dissolvidas do solo. Essas reações formarão géis de silicatos ou aluminatos hidratados de cálcio. Conforme Ingles & Metcalf (1972), os géis de silicato resultantes 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. Os autores salientam que esta reação só ocorre em presença de água, que tem a função de carregar os íons cálcio e hidroxila para a superfície da argila. Este mecanismo é ilustrado na Figura 2.2.

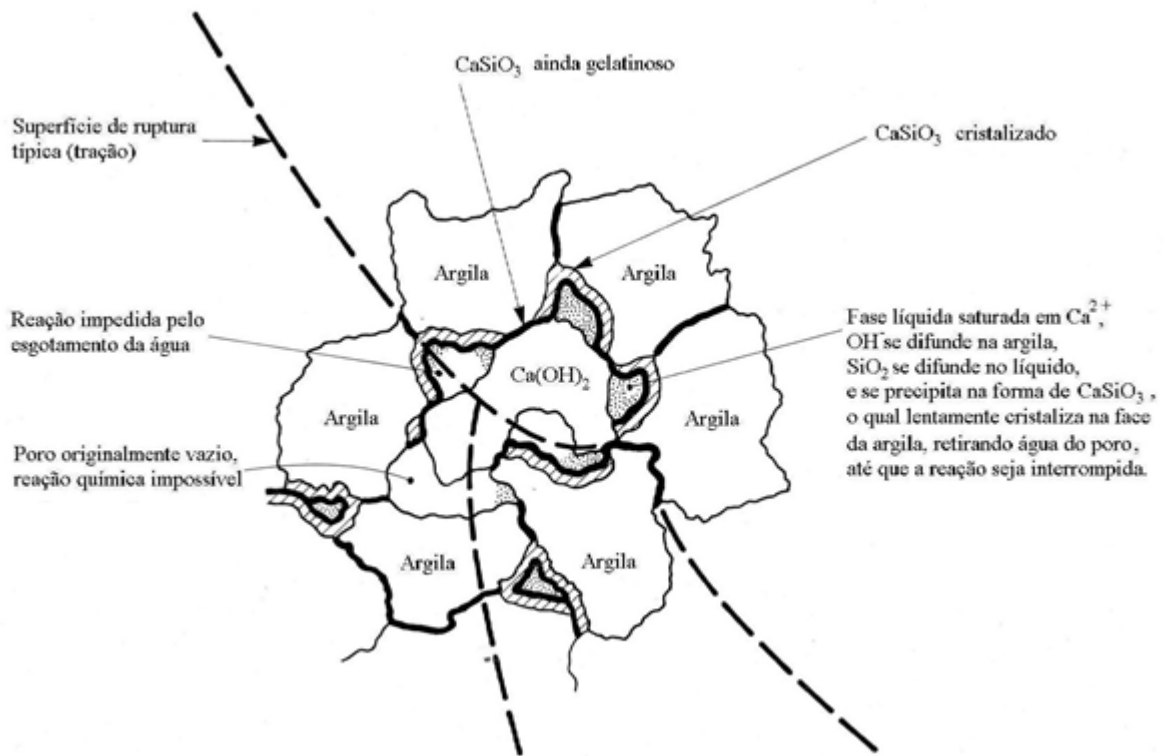
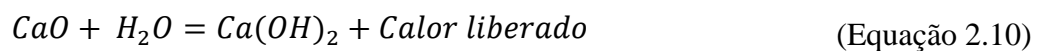


Figura 2.2: mecanismo de estabilização solo-cal .  
(adaptado de INGLES , METCALF, 1972)

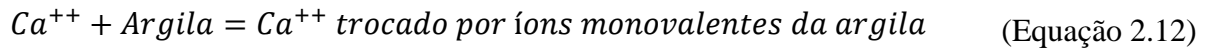
Segundo Bergado et al. (1996), as equações das reações químicas da cal, simplificadas, quando misturada com o solo são exibidas nas Equações 2.10 a 2.15. Onde a Equação 2.10 representa a hidratação da cal viva, onde a cal viva em contato com água se transforma em cal hidratada e libera calor.



A Equação 2.11 mostra a dissociação dos íons da cal.



A Equação 2.12 mostra esquematicamente as trocas catiônicas.



As Equações 2.13 e 2.14 mostram de maneira simplificada as reações pozolânicas.



A Equação 2.15 mostra também de maneira simplificada a carbonatação.



## 2.1 METODOLOGIAS DE DOSAGEM DE SOLOS ARTIFICIALMENTE CIMENTADOS QUANTO A RESISTÊNCIA

O objetivo deste item é descrever algumas das metodologias de dosagem de mistura de solo/cimento e solo/cal existentes e exemplificar quais são os fatores que influenciam na resistência destes materiais.

Consoli et al. (2007) propuseram uma metodologia de dosagem de misturas solo cimento obtida para o Arenito Botucatu e Cimento Portland. Neste estudo foram moldados diversos corpos de prova e realizados ensaios triaxiais e de compressão simples aos sete dias de cura. Os autores propuseram que, para um mesmo material, a resistência a compressão ( $q_u$ ) é função da porosidade da mistura e do teor volumétrico de cimento. O caráter inovador desta metodologia foi fornecer uma equação única para que seja obtida a resistência de diferentes densidades de um mesmo material com a adição de cimento. A Figura 2.3 mostra os resultados obtidos nos ensaios de compressão das misturas realizadas e a equação que fornece

a resistência dos materiais em função da razão entre a porosidade ( $\eta$ ) e o teor volumétrico de cimento ( $C_{iv}$ ).

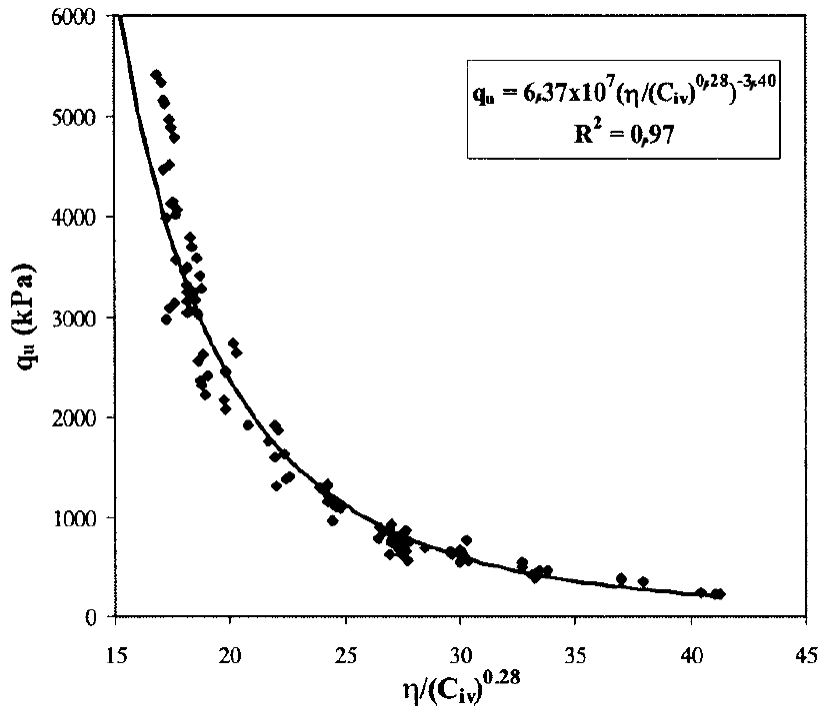


Figura 2.3: resistência a compressão em função do fator  $\eta/C_{iv}$  para o Arenito Botucatu artificialmente cimentado com cimento Portland. (CONSOLI ET AL, 2007)

Com o mesmo solo dos pesquisadores anteriormente citados, o Arenito Botucatu, Consoli et al. (2009) propuseram uma metodologia de dosagem para este material artificialmente cimentado com cal, onde a resistência a compressão da mistura seria função da relação entre o volume de vazios da mistura e do volume de cal adicionado para 28 e 90 dias de cura. A Figura 2.4 mostra o resultado obtido pelos autores onde claramente é possível obter uma curva característica da resistência do material em função dos parâmetros  $V_v$  (volume de vazios) e  $V_{Li}$  (volume de cal).

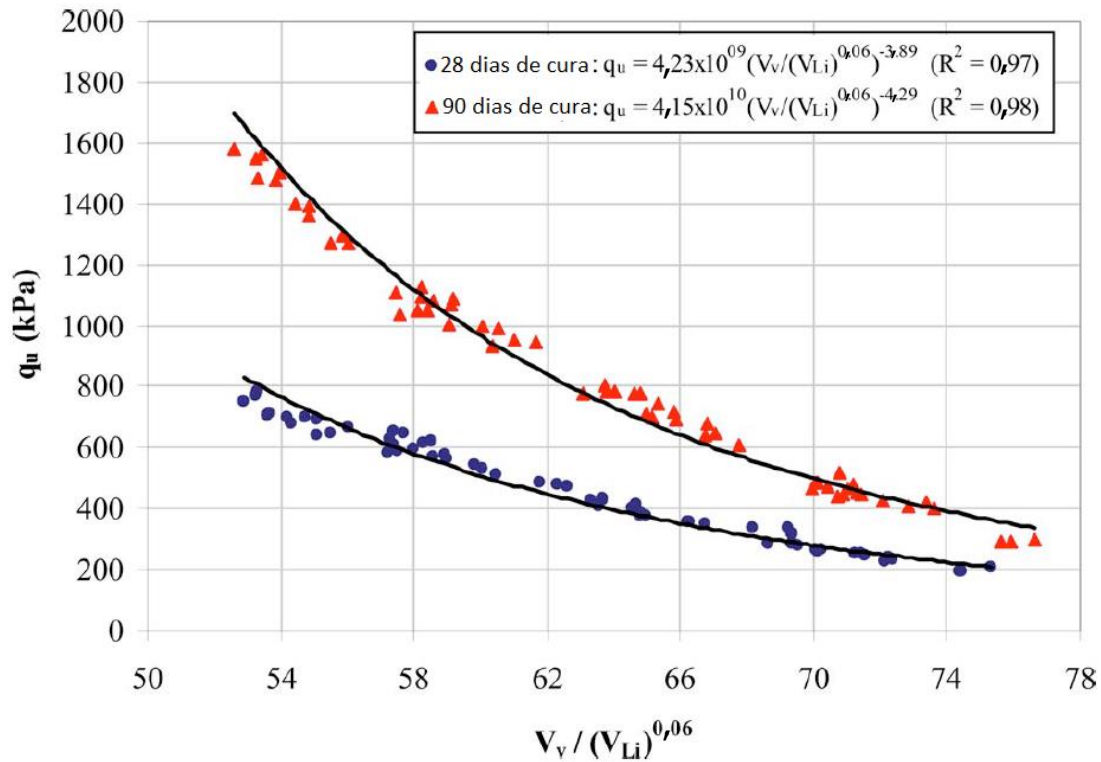


Figura 2.4: resistência a compressão em função do fator  $V_v/V_{Li}$  para o Arenito Botucatu artificialmente cimentado com cal.  
 (adaptado de CONSOLI ET AL, 2009)

Consoli et al. (2010) validaram a metodologia proposta por Consoli et al. (2007) com a realização de ensaios de compressão simples em uma areia uniforme (Areia do Osório) artificialmente cimentada com sete dias de cura utilizando sete diferentes dosagens de cimento Portland. Na Figura 2.5 é possível visualizar como se comporta a resistência a compressão da areia de Osório artificialmente cimentada com cimento Portland em função do fator  $\eta/C_{iv}$ .



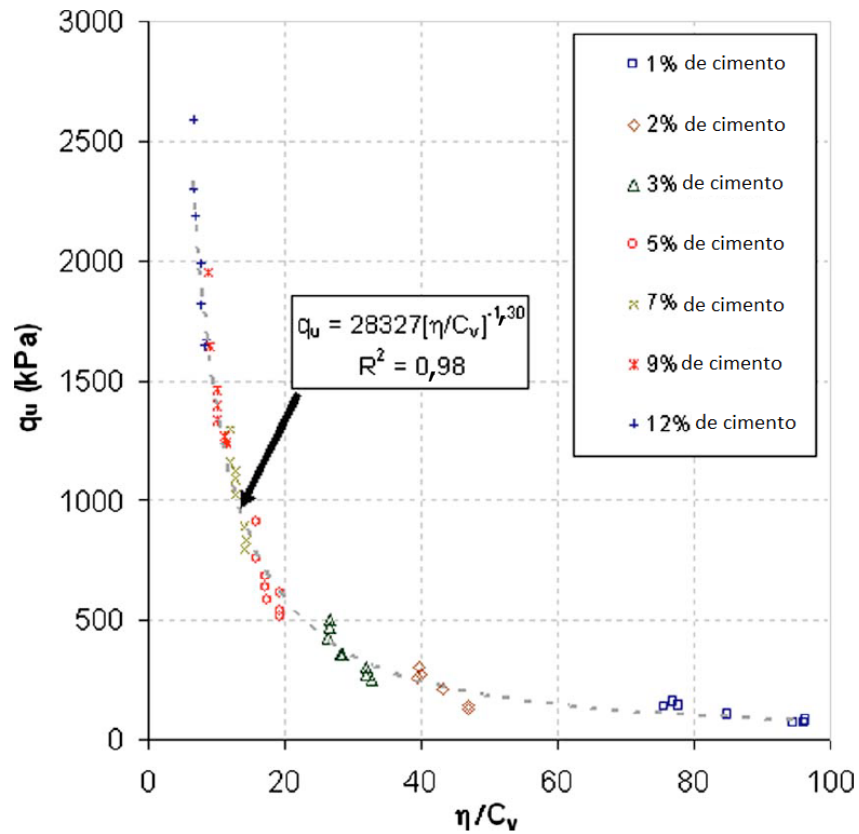


Figura 2.5: resistência a compressão em função do fator  $\eta/C_{iv}$  para a areia de Osório artificialmente cimentada com cimento Portland. (adaptado de CONSOLI ET AL, 2010)

Consoli et al. (2011a), além de verificarem a rigidez do Arenito Botucatu, chegaram em uma equação para a obtenção da resistência a compressão inclusive aos 365 dias de cura em função do fator  $\eta/L_{iv}$  sendo  $\eta$  a porosidade da mistura e  $L_{iv}$  o teor volumétrico de cimento. A correlação obtida pelos autores é exibida na Figura 2.6.

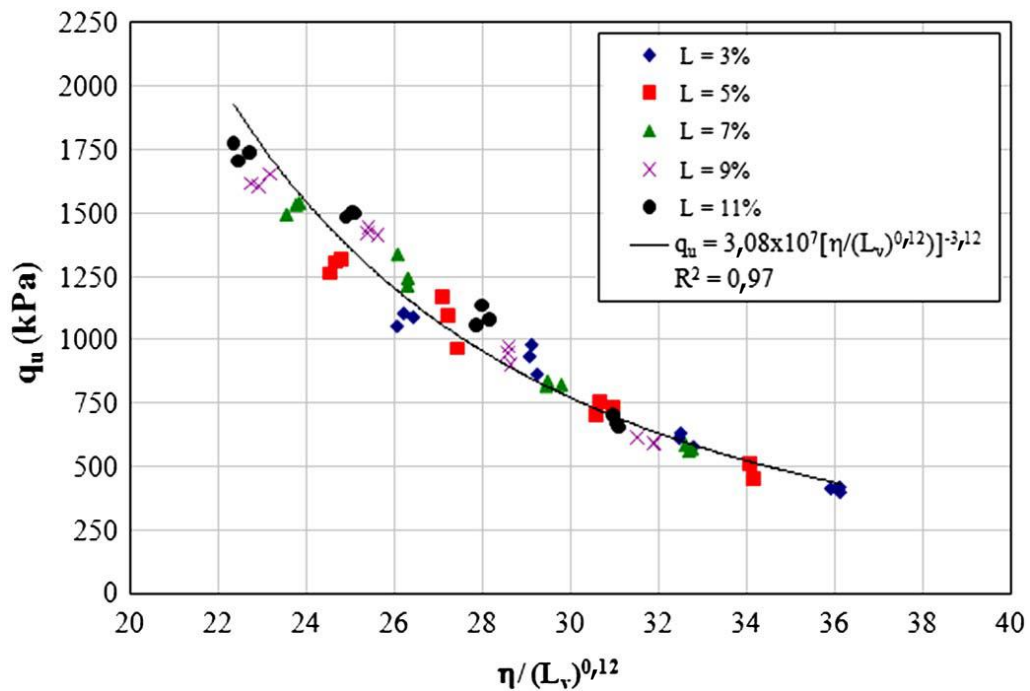


Figura 2.6: resistência a compressão em função do fator  $\eta/L_{iv}$  para o Arenito Botucatu artificialmente cimentado com cal. (CONSOLI ET AL, 2011a)

Consoli et al. (2011b) validaram a metodologia de dosagem para a obtenção de uma equação de comportamento quanto a resistência a compressão de misturas com arenito Botucatu Artificialmente Cimentado com Cal e Cinza Volante. Pela primeira vez esta metodologia foi testada com a adição de uma pozolana na mistura. Na Figura 2.7 é possível visualizar o efeito da adição de cinza volante na resistência a compressão e a equação característica de cada uma das misturas com diferentes porcentagens deste material para 28 dias de cura. No seu trabalho fica evidente o ganho de resistência que se tem com a adição de uma pozolana na mistura. Os expoentes das equações de resistência a compressão para os diferentes teores de cinza volante se mantem o mesmo, mudando simplesmente o escalar.

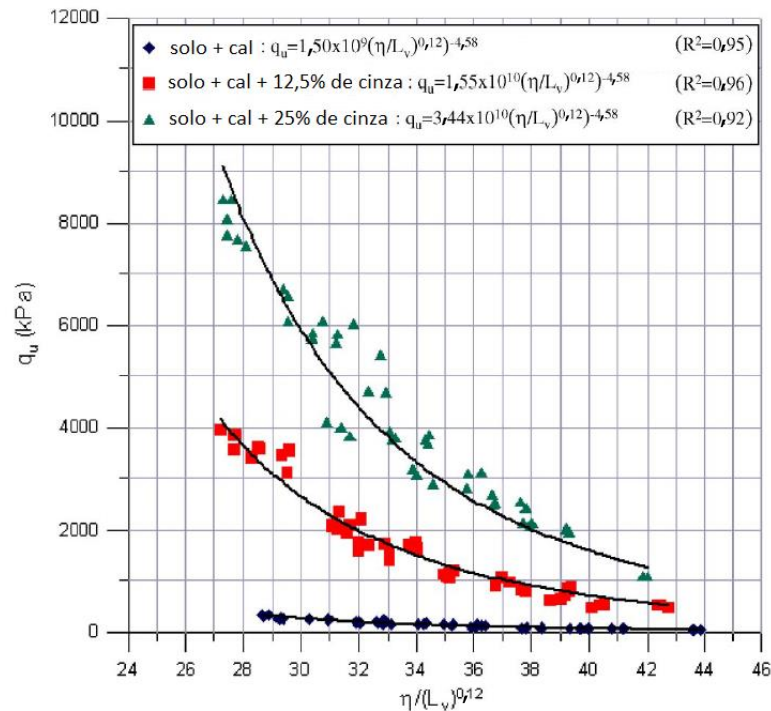


Figura 2.7: resistência a compressão em função do fator  $\eta/L_{iv}$  para o Arenito Botucatu artificialmente cimentado com cal e cinza volante.  
(adaptado de CONSOLI ET AL, 2011b)

Os mesmos autores ainda mostram que é possível normalizar a equação de resistência aos 28 dias de cura para este solo artificialmente cimentado em uma única equação para as três dosagens de cal e esta normalização pode ser visualizada na Figura 2.8, sendo FA a porcentagem de cinza volante adicionada. Da Rocha et al. (2014) exibem a normalização para diferentes períodos de cura.

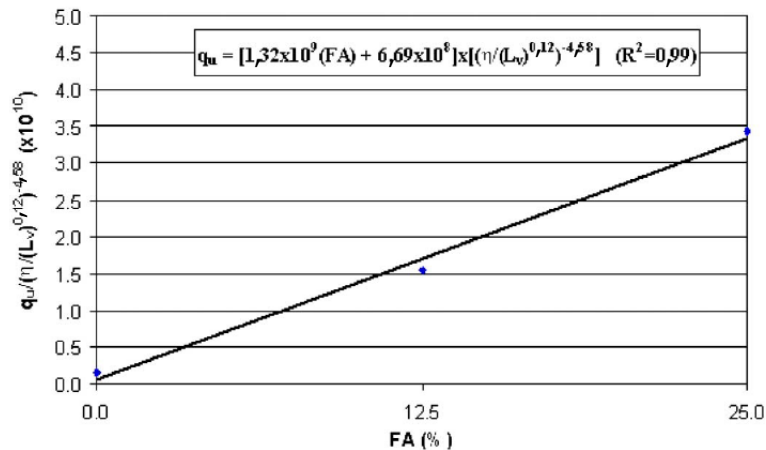


Figura 2.8: normalização da resistência em função da porcentagem de pozolana na mistura Arenito Botucatu, cal e cinza volante.  
(adaptado de CONSOLI ET AL, 2011b)

Winter (2013) obteve equações de dosagem com a mesma metodologia para a obtenção da resistência a tração de misturas solo/cimento para solos orgânicos da região de Grande Porto Alegre/RS e Rilho (2014) equações de resistência a compressão para o solo orgânico da região do Aeroporto Internacional Salgado Filho de Porto Alegre/RS. Consoli et al. (2016a) demonstra que a metodologia de dosagem proposta por Consoli et al.(2007) é válida para solos dispersivos paraguaios com a adição de cimento Portland e cal.

Consoli et al. (2016b) obtiveram uma única equação para a determinação de resistência a compressão de solos siltosos e argilosos artificialmente cimentados com cimento Portland. Os autores provaram que dividindo a resistência a compressão pela resistência a compressão do material em questão para um determinado fator  $\eta/C_{iv}$  é possível chegar em uma equação única para todos os solos finos estudados. Na Figura 2.9 é possível visualizar os resultados obtidos pelos autores.

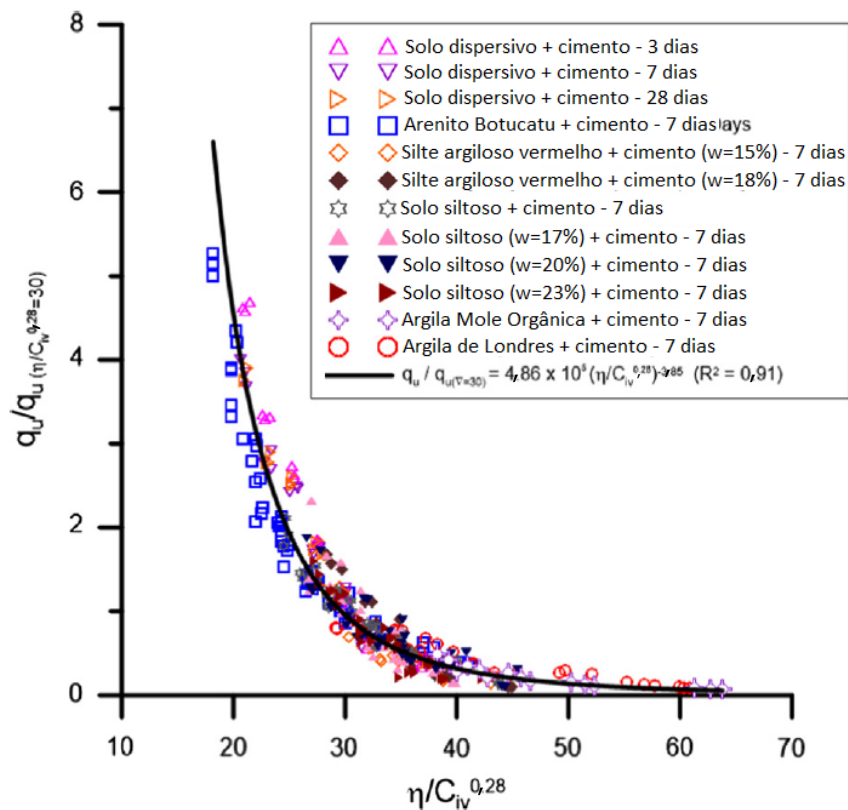


Figura 2.9: normalização da resistência em função de uma resistência a compressão para a obtenção de uma única equação para solos finos artificialmente cimentados com cimento Portland. (adaptado de CONSOLI ET AL, 2016b)

Consoli et al. (2017a) aplicando a mesma metodologia de Consoli et al. (2016b), só que desta vez em solos arenosos artificialmente cimentados com diferentes tipos de cimento Portland e distintos tempos de cura, chegou também em uma única equação característica de resistência a compressão para estes materiais. O resultado pode ser visualizado na Figura 2.10.

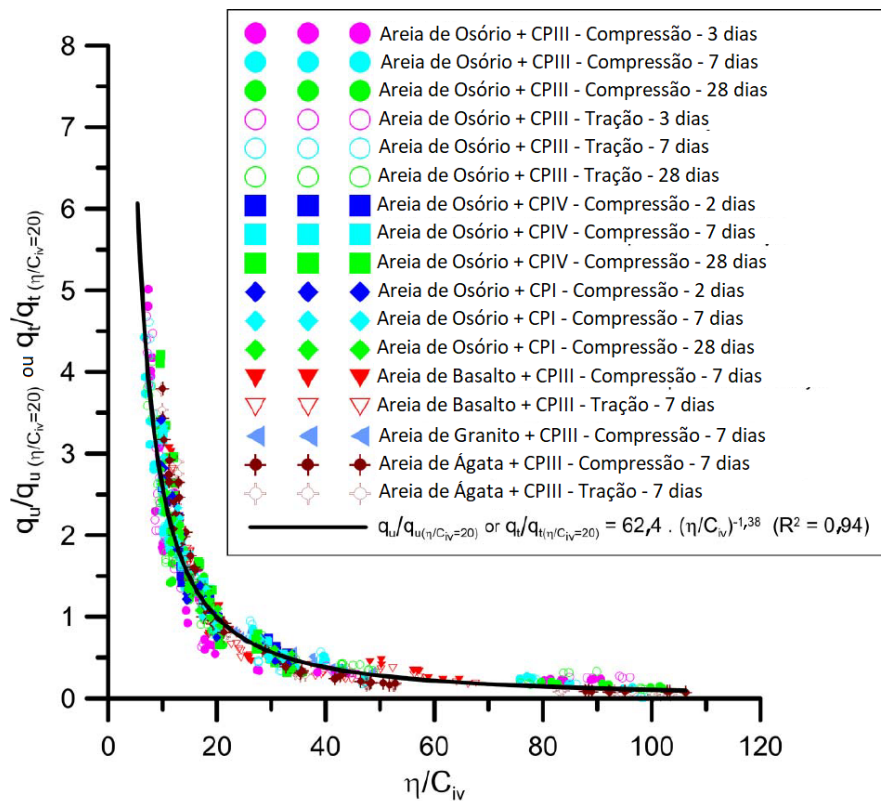


Figura 2.10: normalização da resistência em função de uma resistência a compressão para a obtenção de uma única equação para solos granulares artificialmente cimentados com cimento Portland. (adaptado de CONSOLI ET AL, 2017a)

Consoli et al. (2017b) executou um estudo similar, porém o foco foi a obtenção de uma equação única de resistência para solos finos artificialmente cimentados com cal, inclusive com tempos e temperaturas de cura distintos. O resultado pode ser visualizado na Figura 2.11.

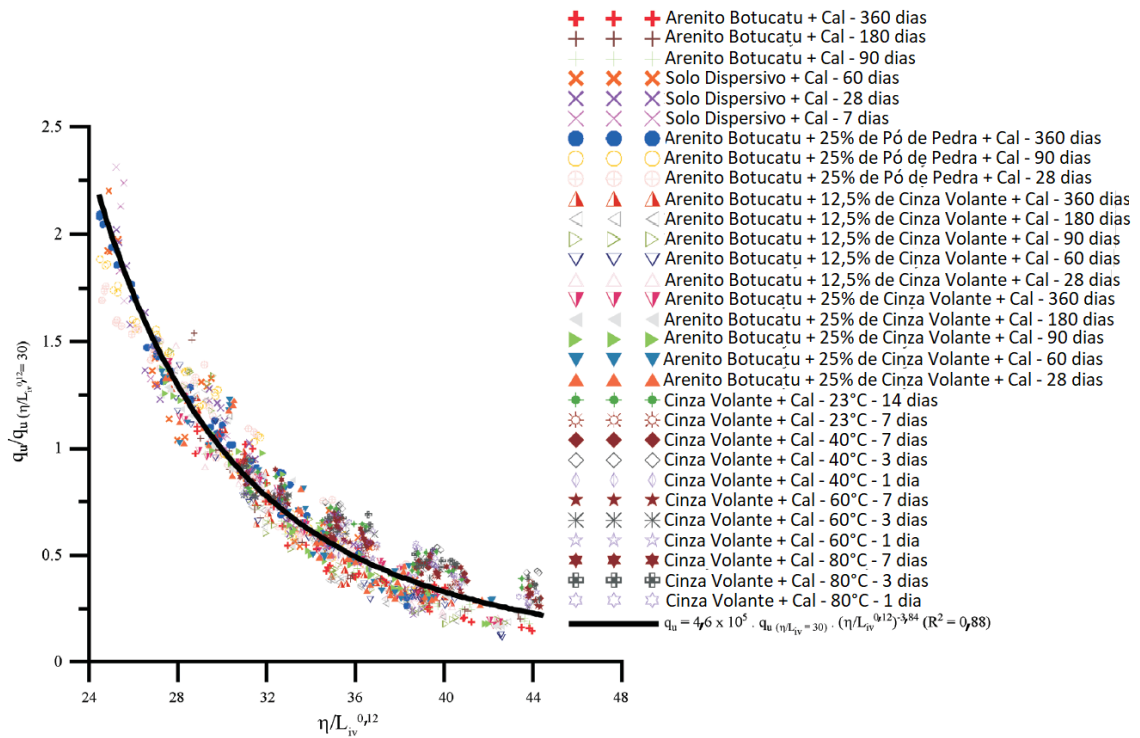


Figura 2.11: normalização da resistência em função de uma resistência a compressão para a obtenção de uma única equação para solos finos artificialmente cimentados com cal. (adaptado de CONSOLI ET AL, 2017b)

Diambra et al. (2017) aplicaram a teoria do estado crítico da mecânica dos solos e modelagem para prever o comportamento de solos artificialmente cimentados com o uso de Cimento Portland. Os autores validaram a correlação experimental obtida por Consoli et al. (2007) e chegaram na equação 2.16:

$$q_u = B \left( \frac{\eta}{C_{iv}^{\frac{1}{a}}} \right)^{-a} \quad (\text{Equação 2.16})$$

Onde:

$q_u$  = resistência a compressão do novo material;

$B$  = escalar que depende dos materiais;

$a$  = escalar que depende dos materiais;

$\eta$  = porosidade;

$C_{iv}$  = teor volumétrico de cimento.

## 2.2 RELAÇÃO ENTRE A RIGIDEZ E A RAZÃO ENTRE A POROSIDADE E O TEOR VOLUMÉTRICO DE AGENTE CIMENTANTE

A rigidez de solos artificialmente cimentados pode ser mensurada a partir de ensaios não destrutivos como os *bender elements* ou medidas ultrassônicas. Neste item serão exibidos alguns estudos que comparam a Rigidez de solos artificialmente cimentados com a razão entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento ou cal. A rigidez sempre será expressa em função do parâmetro  $G_0$  (módulo cisalhante a pequenas deformações).

Consoli et al. (2011a) realizaram medidas de rigidez em um solo argiloso artificialmente cimentado com cal com a utilização de *bender elements* e chegaram em uma correlação da rigidez do material com a razão entre a porosidade da mistura e o teor volumétrico de cal para 365 dias de cura. Esta correlação é exibida na Figura 2.12. Os autores provaram que a rigidez deste material é função do fator  $\eta/L_{iv}$ .

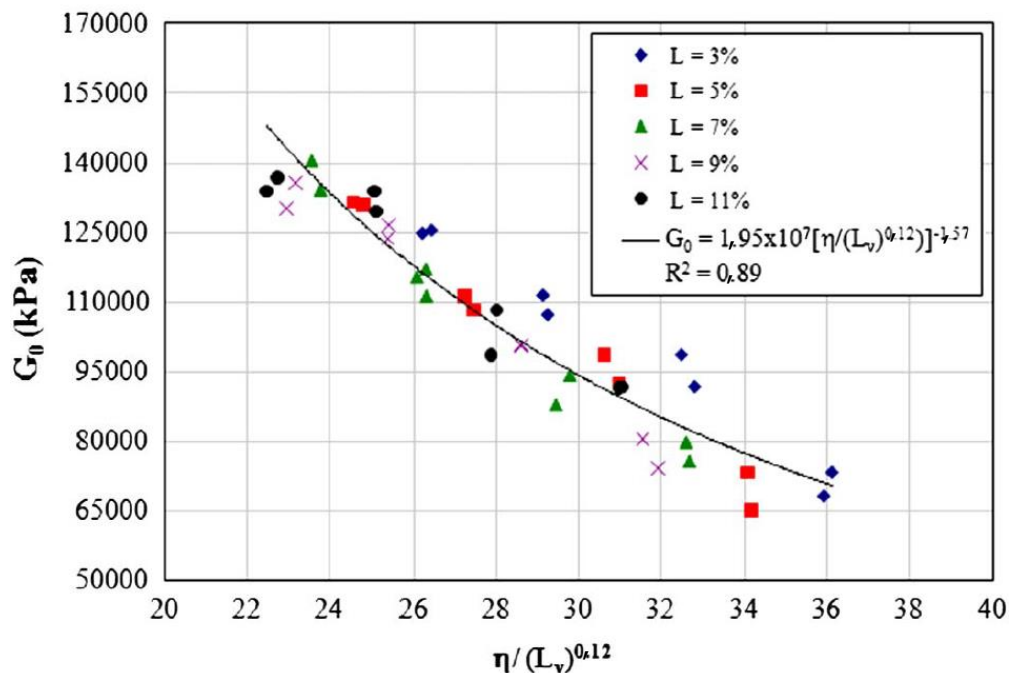


Figura 2.12: módulo cisalhante a pequenas deformações em função do fator  $\eta/L_{iv}$  para o Arenito Botucatu artificialmente cimentado com cal. (CONSOLI ET AL, 2011a)

Da Rocha et al. (2016) executam medidas de rigidez em solos argilosos dispersivos estabilizados com cal com a utilização de pulsos ultrassônicos, obtendo assim a correção entre

o  $G_0$  e a razão entre a porosidade o teor volumétrico de cal exibido na Figura 2.12 Ficando assim provado que a rigidez deste material é função do fator  $\eta/L_{iv}$ .

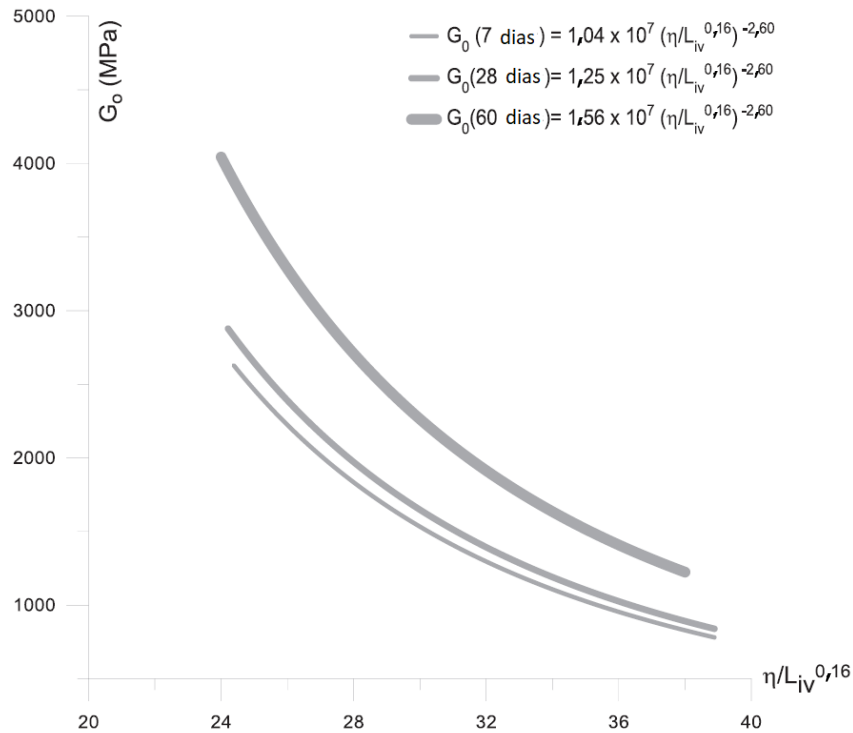


Figura 2.13: modulo cisalhante a pequenas deformações em função do fator  $\eta/L_{iv}$  para a argila dispersiva artificialmente cimentada com cal. (adaptado de DA ROCHA ET AL, 2016)

### 2.3 RELAÇÃO ENTRE A DURABILIDADE E A RAZÃO ENTRE A POROSIDADE E O TEOR VOLUMÉTRICO DE AGENTE CIMENTANTE

Para uma utilização prática dos solos artificialmente cimentados se faz necessário que estes materiais sejam duráveis e que não percam as suas propriedades ao longo de sua vida útil. A durabilidade de uma mistura pode ser medida através da observação da perda de massa destes após ciclos de molhagem e secagem (estes métodos são explicados no capítulo materiais e métodos). Neste item serão exibidas as correlações obtidas em alguns trabalhos entre a perda de massa e a razão entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento ou cal ( $\eta/C_{iv}$  ou  $\eta/L_{iv}$ ).

Consoli e Tomasi (2017) executaram ensaios de durabilidade em Areia de Osório artificialmente cimentada com cimento Portland. No seu trabalho foram encontradas correlações entre a razão  $\eta/C_{iv}$  com a perda de massa média no ciclo (Figura 2.14) e com a



perda de massa acumulada após diversos ciclos utilizando a metodologia de molhagem e secagem. (CLM = perda de massa média por ciclo; ALM = perda de massa acumulada)

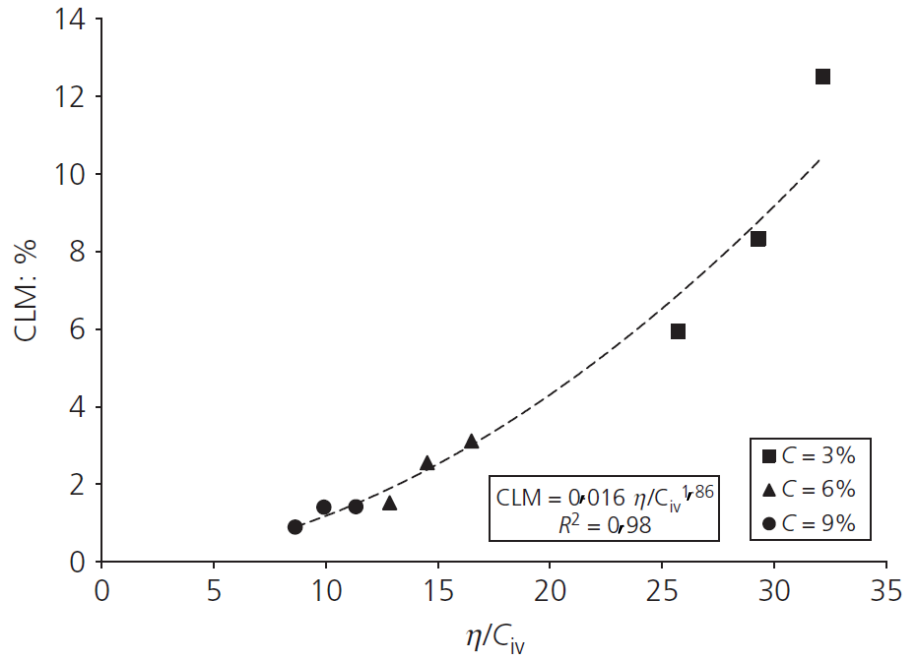


Figura 2.14: perda de massa média por ciclo de molhagem e secagem em função do fator  $\eta/C_{iv}$  para a areia de Osório artificialmente cimentada com cimento Portland. (CONSOLI E TOMASI, 2017)

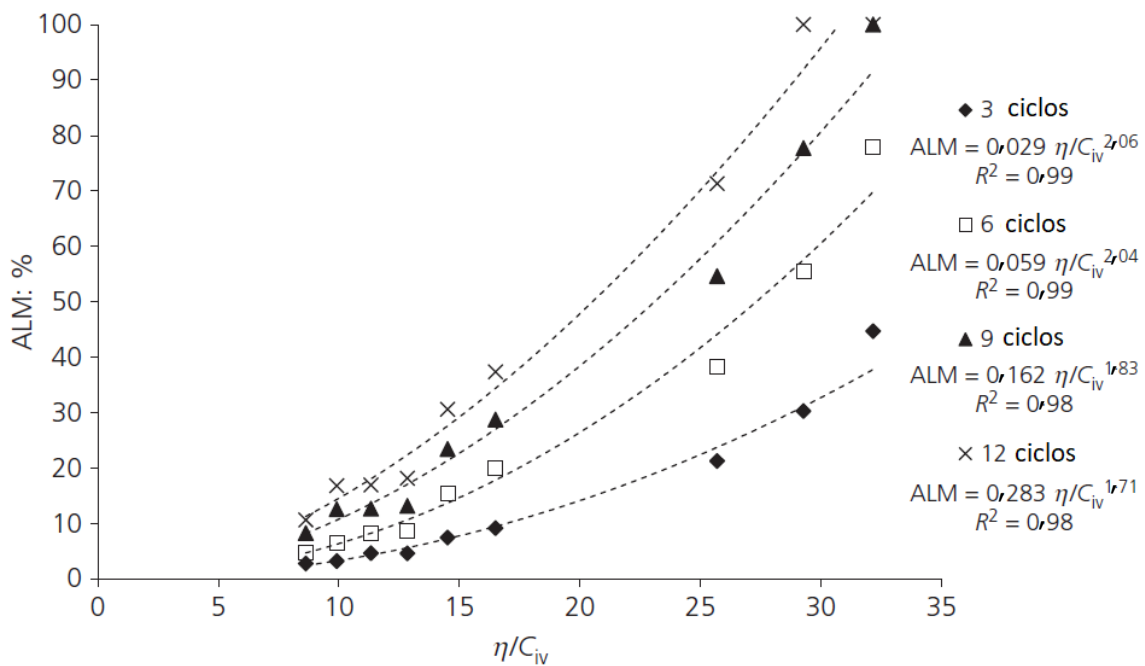


Figura 2.15: perda de massa acumulada em função do fator  $\eta/C_{iv}$  para a areia de Osório artificialmente cimentada com cimento Portland. (CONSOLI E TOMASI, 2017)

Consoli et al. (2017c) realizaram ensaios de durabilidade em um solo calcário artificialmente cimentado com cimento Portland e obtiveram a correlação ilustrada na Figura 2.16 para 3, 6, 9 e 12 ciclos de molhagem e secagem, mostrando que a durabilidade deste material está diretamente ligada ao fator  $\eta/C_{iv}$ .

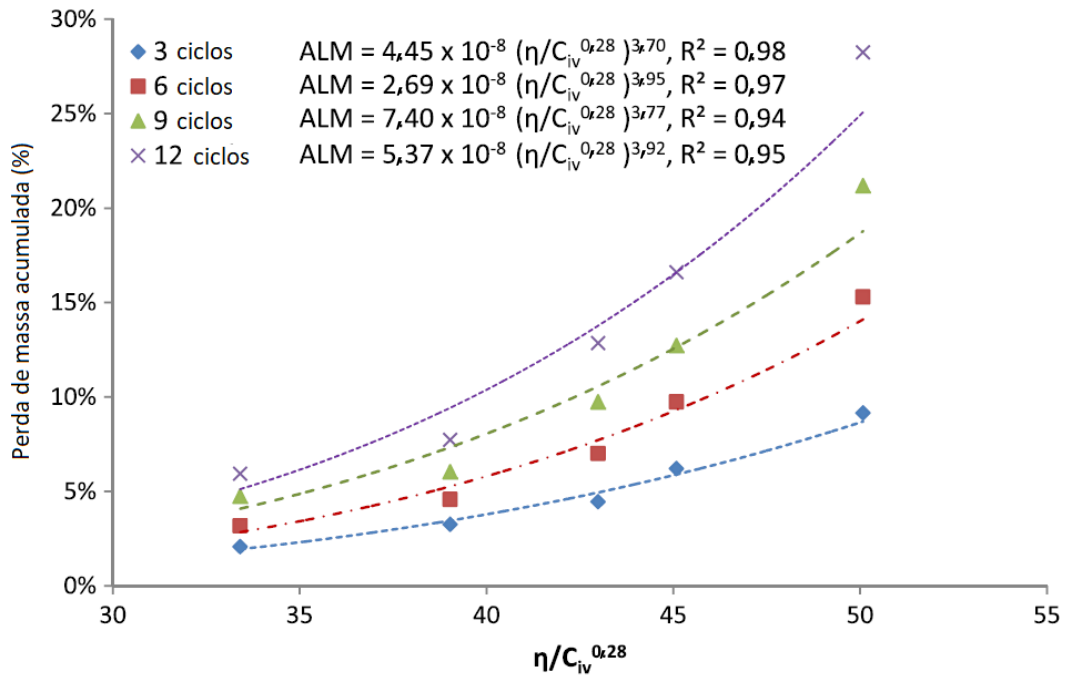


Figura 2.16: perda de massa acumulada em função do fator  $\eta/C_{iv}$  para um solo calcário artificialmente cimentado com cimento Portland. (CONSOLI ET AL., 2017c)

Consoli et al. (2017d) executaram ensaios de durabilidade com molhagem e secagem e com gelo e degelo para um solo silto-argiloso artificialmente cimentado com a adição de cinza volante e cal de carbureto. As correlações obtidas para a perda de massa acumulada em relação com o fator  $\eta/L_{iv}$  são exibidas na Figura 2.17 para a metodologia de molhagem e secagem e na Figura 2.18 para a metodologia de gelo e degelo. Os autores provam que existe uma correlação entre a durabilidade deste material a o fator  $\eta/L_{iv}$ .

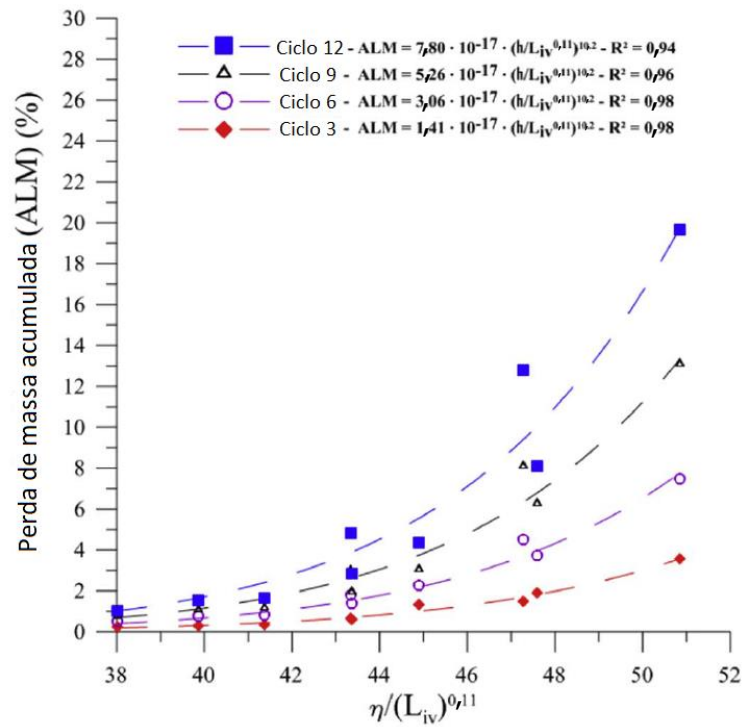


Figura 2.17: perda de massa acumulada em função do fator  $\eta/L_{iv}$  para um solo silto argiloso artificialmente cimentado com cimento cinza volante e cal de carbureto com a metodologia de molhagem e secagem. (CONSOLI ET AL., 2017d)

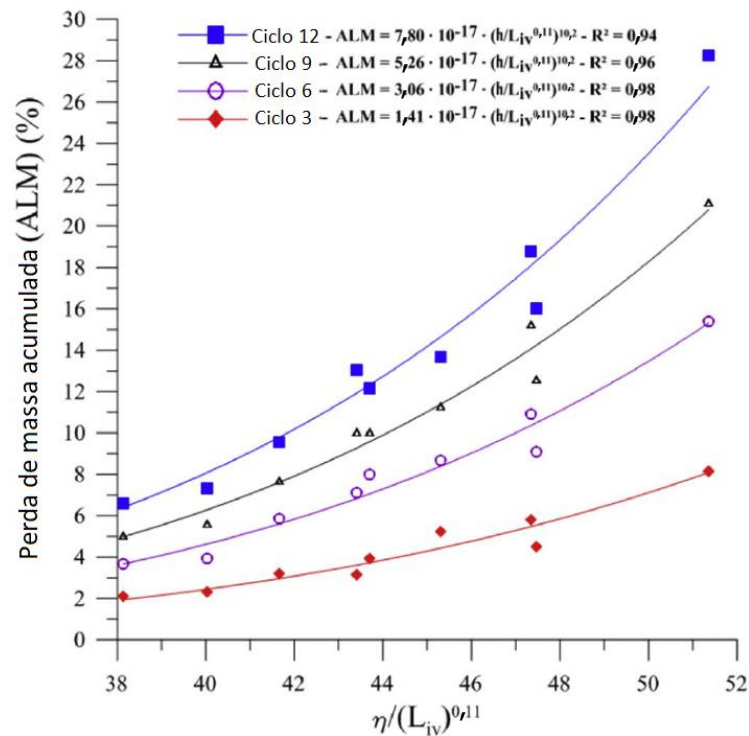


Figura 2.18: perda de massa acumulada em função do fator  $\eta/L_{iv}$  para um solo silto argiloso artificialmente cimentado com cimento cinza volante e cal de carbureto com a metodologia de gelo e degelo. (CONSOLI ET AL., 2017d)

### 3 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS

A finalidade deste capítulo é elucidar algumas das propriedades e aplicações em Engenharia dos resíduos utilizados no presente trabalho, sendo eles o vidro, cinzas provenientes de processos industriais e a cal de carbureto.

#### 3.1 VIDRO

O vidro é um material amplamente utilizado na construção civil e em diversas outras finalidades. A produção de resíduos deste material é enorme e neste item serão exibidas algumas das possíveis utilizações dos descartes deste material na construção civil.

Segundo Bauer (1994), não se tem certeza sobre a origem do vidro, porém se supõe que ele tenha surgido na Síria a aproximadamente 5.000 anos ou então no Egito a aproximadamente 4.500 anos. O que se sabe com certeza é que em 1.400 A.C. os Egípcios produziam produtos decorativos em uma fábrica descoberta na cidade de Tal Amona. Os Romanos empregavam este material em vasos, garrafas, jarros e até em casas, como pode ser visto nas ruínas de Pompéia. As primeiras janelas que se têm notícia foram produzidas no século 2 D.C. Segundo o autor, o que dá ao vidro uma qualidade singular é o fato dele não ser totalmente sólido e nem um líquido, tudo isto devido a sua estrutura atômica que não possui em ordenamento regular dos átomos, como pode ser visto na Figura 3.1.

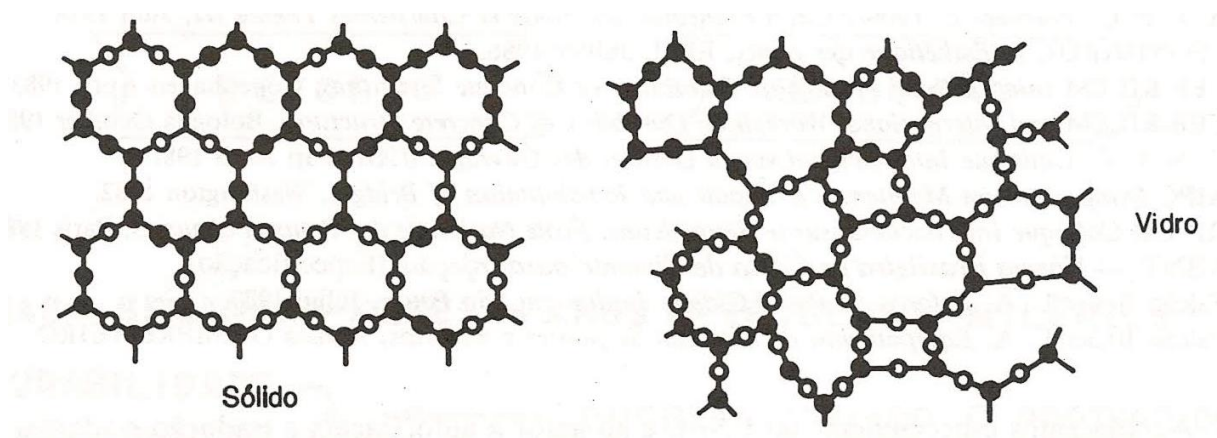


Figura 3.1: estrutura molecular do vidro.  
(BAUER , 1994)

O mesmo autor cita que o vidro poderia ser feito com somente sílica, carbonato de sódio e calor, porém esse material seria solúvel em água, sendo assim chamado de vidro-água. A adição de cálcio o torna mais duro e insolúvel a água.

Segundo Domone e Illston (2010) o vidro pode ter diversas composições sendo que geralmente é composto por dióxido de sílica (entre 69% e 74%), óxido de cálcio (entre 5% e 12%), óxido de sódio (entre 12% e 16%), óxido de magnésio (entre 0% e 6%) e óxido de alumínio (entre 0 e 3%). A coloração deste material pode ser dada por algum tipo de óxido adicionado a mistura, como por exemplo o óxido de ferro que gera uma coloração verde claro. Ao contrário dos cristais de quartzo, que possuem uma estrutura cristalina o vidro possui uma estrutura amorfa. A densidade deste material é aproximadamente  $2,5\text{t/m}^3$ , seu módulo de elasticidade em torno de 70GPa e seu coeficiente de Poisson aproximadamente 0,2.

Entre as inúmeras normas Brasileiras vigentes sobre o vidro, cabe citar as seguintes:

- NBR 14697:2001 Vidro laminado; (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001a)
- NBR 14698:2001 Vidro temperado; (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001b)
- NBR 7199:2016 Vidros na construção civil - Projeto, execução e aplicações. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016)

Segundo Mohajerani et al. (2017), o resíduo de vidro começou a chamar mais atenção nos últimos tempos, isso se deve a restrição cada vez maior de espaços para a deposição e a outras questões ambientais. O vidro pode chegar a levar 1.000.000 de anos para se decompor totalmente na natureza. Na Tabela 3.1 é possível visualizar a porcentagem de reciclagem de vidro que é executada em cada um dos países citados em 2010.

Tabelas 3.1: porcentagem de vidro reciclado em 2010 em alguns países.

| <b>País</b>    | <b>Porcentagem de vidro reciclado</b> |
|----------------|---------------------------------------|
| Bélgica        | 96%                                   |
| Suíça          | 94%                                   |
| Luxemburgo     | 93%                                   |
| Holanda        | 91%                                   |
| Suécia         | 91%                                   |
| Noruega        | 89%                                   |
| Alemanha       | 82%                                   |
| Itália         | 74%                                   |
| França         | 67%                                   |
| Reino Unido    | 61%                                   |
| Espanha        | 57%                                   |
| Austrália      | 34%                                   |
| Estados Unidos | 33%                                   |

Fonte: container recycling institute, 2017

Segundo o COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM (2018), o Brasil produz somente em embalagens 980 mil toneladas de vidro utilizando cerca de 45% de matéria prima reciclada. No Brasil os resíduos de vidro representam cerca de 3% do total de resíduos sólidos urbanos e em 2011 somente 47% deste material era reciclado. Destes, 53% acabava sendo depositado em aterros sanitários, ocupando um espaço cada vez mais escasso e deixando de ser utilizado para alguma finalidade mais nobre, como por exemplo materiais de construção civil. Conforme citado por Wartman et al. (2004), com um maior conhecimento de suas características, o vidro moído poderia ser utilizado para diversos fins em Engenharia, sendo alguns deles:

- base e sub-base de rodovias;
- aterros;
- preenchimentos estruturais, não estruturais e de estruturas de contenção;
- cama para tubulações;
- material antiderrapante;
- material de drenagem;
- execução de fossas sépticas.

Younus et al. (2011) estudou o efeito da adição de vidro moído granular em brita visando a sua utilização em pavimentação. Os autores chegaram à conclusão que a brita com até 30% de vidro adicionado teve desempenho satisfatório, tendo este material sido avaliado com a utilização de ensaios de Abrasão Los Angeles, ensaio que no Brasil é regido pela NBR NM 51:2001 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001) e de ensaios CBR, que no Brasil são regidos pela norma NBR 9585:2017 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).

Existem diversas tentativas para utilização do resíduo de vidro na construção civil, uma delas é substituindo o agregado fino de concretos por vidro moído na mesma granulometria. Kuruppu e Chandratilake (2012) utilizaram vidro quebrado em granulometria de pedra como agregado em concreto para fins arquitetônicos em diferentes porcentagens. O resultado das placas de concreto para acabamento obtidas são exibidas na Figura 3.2. Estas placas apresentaram resistência mecânica satisfatória para as condições impostas além de utilizar um resíduo na sua composição.



Figura 3.2: painel de concreto para acabamento com a utilização de vidro como agregado.

(KURUPPU E CHANDRATILAKE, 2012)

Ganiron Jr. (2013) avaliou a performance da utilização de garrafas de vidro moídas como agregado fino em concretos. O autor substituiu a areia por vidro nas seguintes porcentagens, 25%, 50%, 75% e 100% e chegou nas seguintes conclusões:

- o uso do vidro, dependendo da porcentagem adicionada pode diminuir o fator água cimento;
- quanto maior a porcentagem de vidro adicionada menor é o peso específico do concreto;
- a substituição do agregado fino pelo vidro não é recomendada para fins estruturais;
- a adição de vidro no lugar do agregado miúdo reduz o módulo de elasticidade;
- a utilização do vidro diminui o custo do concreto.

Em Mohajerani et al. (2017) é possível encontrar a Figura 3.3 que ilustra a partir do resultado de diversos autores como a porcentagem de vidro no agregado fino de concreto influencia na sua resistência. Os resultados originais podem ser encontrados em Abdallah e Fan (2014), Adaway e Wang (2015), Ali e Tersawy (2012), Batayneh et al. (2007), Borhan (2012), Chan el al. (2006), Gautam et al. (2006), Ismail e Hashmi (2009), Lee et al. (2013), Limbachiya (2009), Malik et al. (2013), Malik et al. (2014), Park et al. (2004), De Oliveira et al. (2008), Rahim et al. (2004), Taha e Nounu (2008), Turgut e Yahlizade (2009) e Wang et al. (2014).

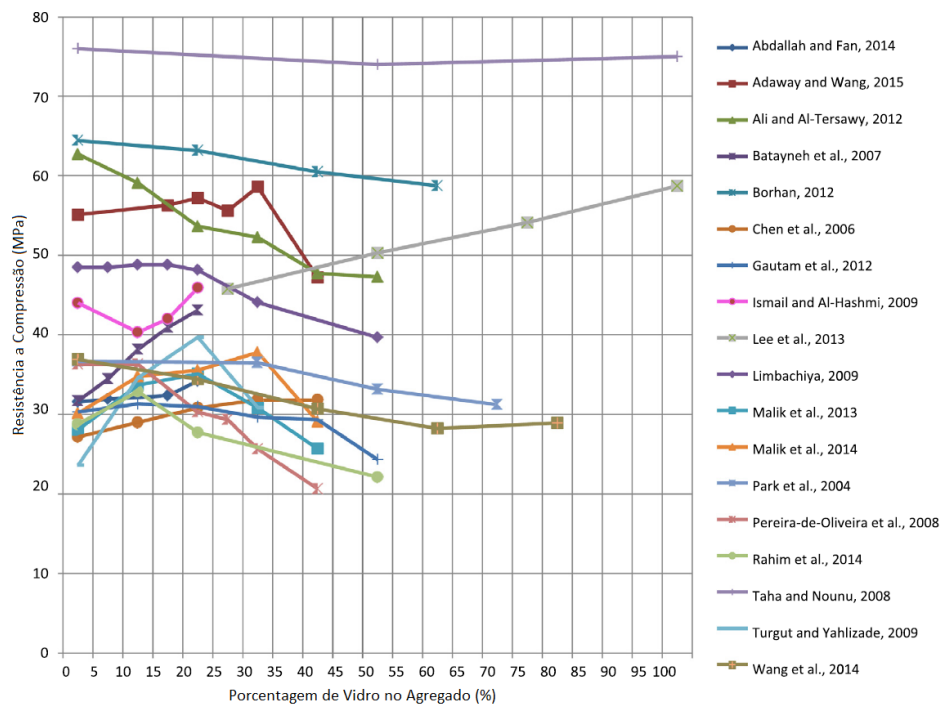


Figura 3.3: variação na resistência a compressão do concreto em relação a porcentagem de vidro substituindo o agregado fino. (adaptado de MOHAJERANI ET AL., 2017)



Salamatpoor e Salamatpoor (2017) avaliaram o efeito de vidro em forma granular adicionado em areias artificialmente cimentadas. Quanto maior a porcentagem de vidro moído adicionada maior foi a resistência do material. O autor realizou ensaios triaxiais e de compressão simples para avaliar a resistência das misturas e chegou a conclusão de que quanto maior a porcentagem de vidro adicionado, na faixa de valores testadas, maior ficou o ângulo de atrito interno do material, a coesão e conseqüentemente a resistência a compressão. Os seus resultados podem ser visualizados na Figura 3.4. Este aumento nos parâmetros constitutivos pode ter se dado devido a uma melhor distribuição granulométrica da mistura.

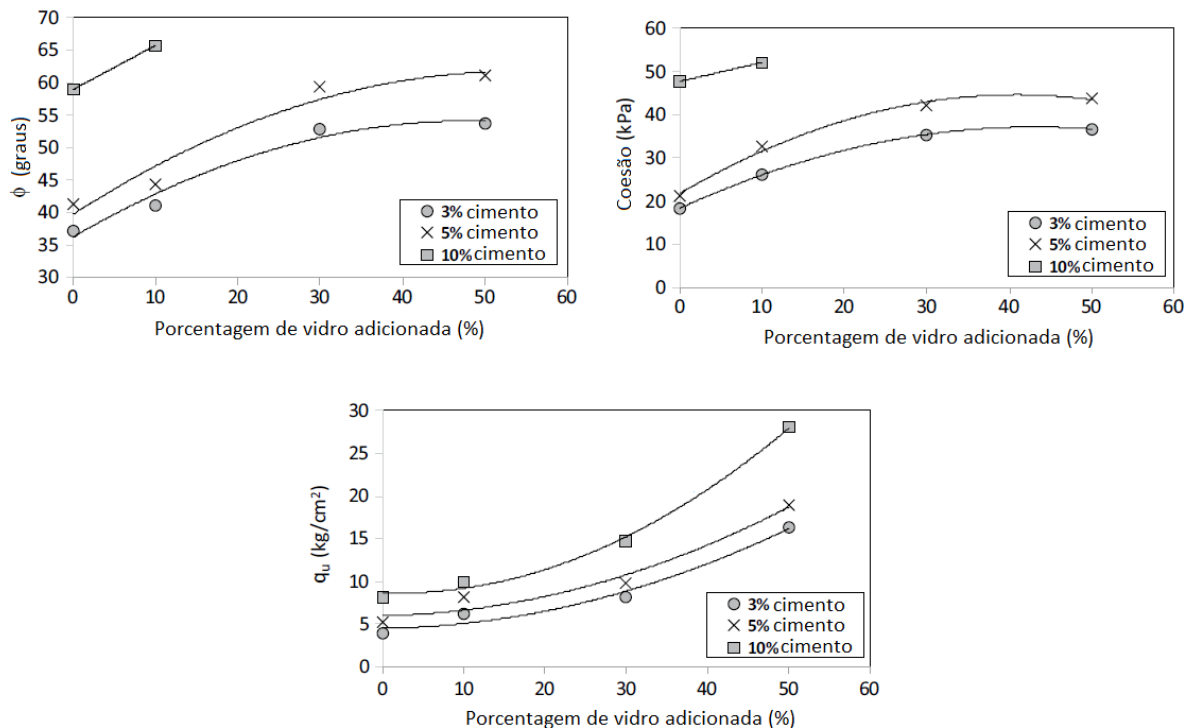


Figura 3.4: propriedades de uma areia artificialmente cimentada com a adição de vidro moído em forma granular. (adaptado de SALAMATPOOR E SALAMATPOOR, 2017)

Mohajerani et al. (2017) cita que um grande problema encontrado na utilização de vidro em forma granular é uma possível ocorrência de reações Alkali Agregado. Segundo FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (2013), havendo sílica reativa no interior do concreto, partículas de Cálcio irão reagir com ela (Figura 3.5) formando um gel álcali silicoso composto por Sódio, Potássio, Cálcio e Sílica que fica acumulado no entorno do agregado (Figura 3.6) o encapsulando, posteriormente o gel absorve água e se expande, gerando tensões de tração que podem vir a ser maiores que a resistência do material vindo a causar fissuras (Figura 3.7).

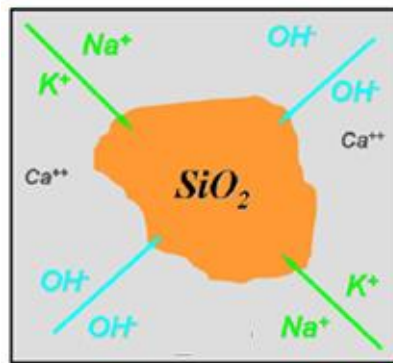


Figura 3.5: etapa I da reação álcali agregado.  
(FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2013)

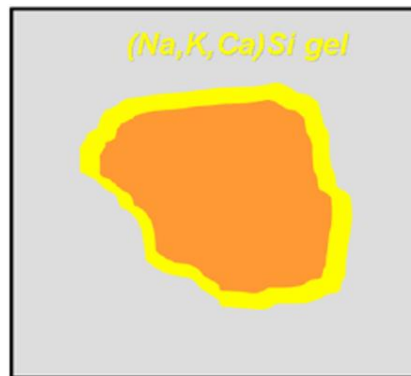


Figura 3.6: etapa II da reação álcali agregado.  
(FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2013)

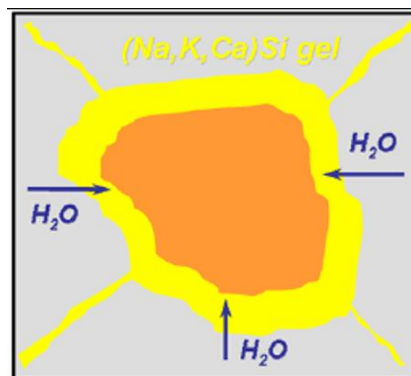


Figura 3.7: etapa III da reação álcali agregado.  
(FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2013)

Polley et al. (1998) em seu trabalho obtiveram a Figura 3.8, mostrando uma imagem microscópica da reação álcali agregado em uma argamassa. Na Figura 3.9 obtida de Nogueira (2010) é possível visualizar um bloco de fundações deteriorado pelas reações álcali agregado no seu concreto. Em ambos é possível observar as fissuras geradas por estas reações.

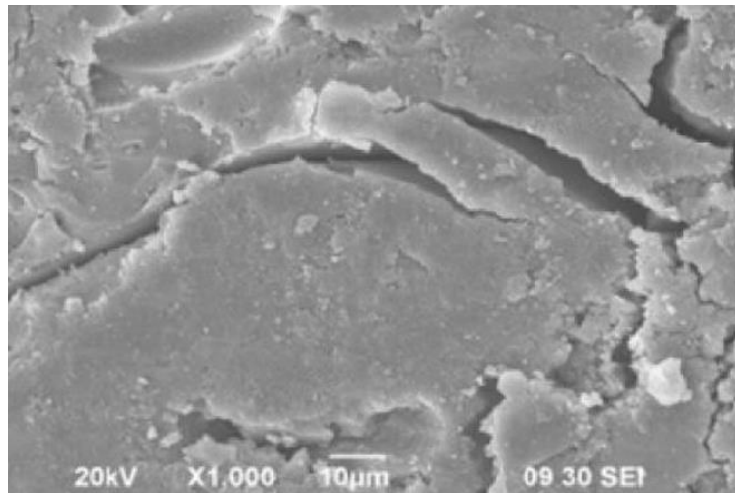


Figura 3.8: imagem de microscopia de uma reação álcali agregado em uma argamassa.  
(POLLEY ET AL., 1998)



Figura 3.9: bloco de fundações afetado por reações álcali agregado.  
(NOGUEIRA, 2010)

Uma forma de utilização do vidro em obras de Engenharia é com a substituição de parte do cimento por ele moído em forma de pó em concretos. Mohajerani et al. (2017) mostra na Figura 3.10 o resultado da pesquisa de diversos autores sobre a resistência de argamassas com a substituição do cimento por pó de vidro aos 28 dias de cura. Praticamente em todos os casos existe uma perda de resistência com relação a argamassa no seu estado inicial. Os resultados originais podem ser visualizados em (BIGNOZZI ET AL., 2015), (CARSANA ET AL., 2014), (DU E TAN, 2014), (DU ET AL., 2014), (DYER E DHIR, 2001), (IDIR ET AL., 2011), (DE OLIVEIRA, 2012), (SHAO E LÉBOUX, 2011), (SHAO ET AL., 1999) e (WANG ET AL., 2014).

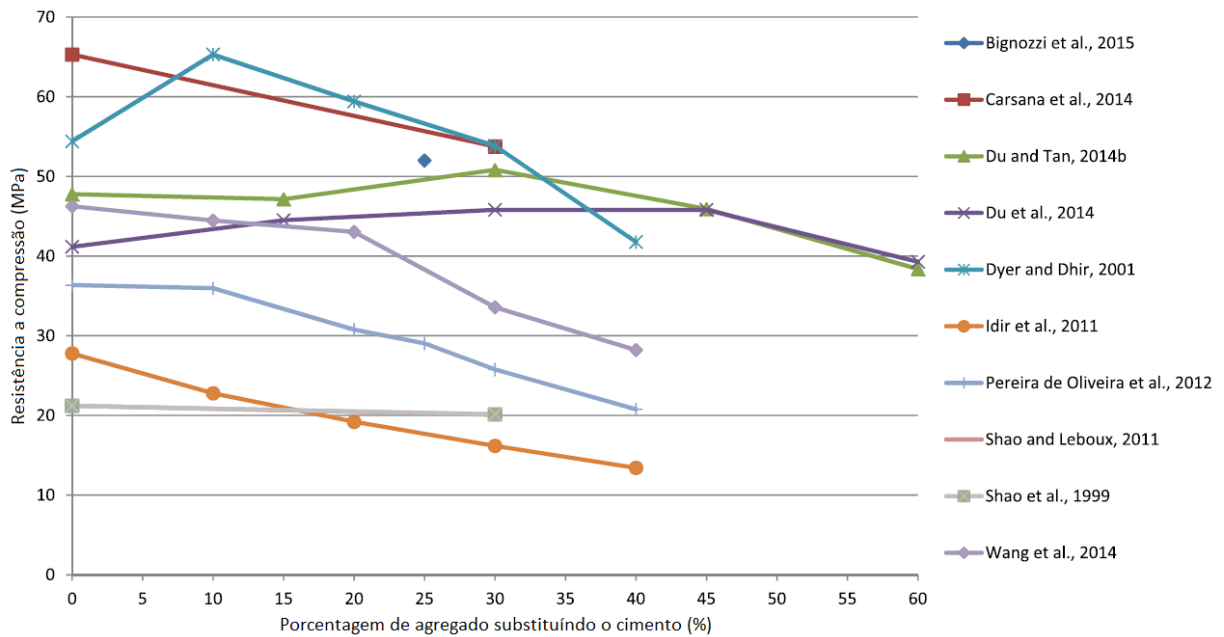


Figura 3.10: variação na resistência a compressão do concreto em relação a porcentagem de vidro substituindo o cimento. (adaptado de MOHAJERANI ET AL., 2017)

Islam et al. (2016) em seu estudo avaliou o efeito da substituição de parte do cimento de concretos por vidro em pó. O inovador na sua pesquisa foi visualizar o comportamento desta mistura ao longo do tempo, executando ensaios de compressão simples aos 7, 14, 28, 56, 90, 180 e 365 dias, substituindo 10, 15, 20 e 25 por cento do cimento por vidro. Similarmente os autores anteriormente citados, a substituição de parte do cimento por vidro causou reduções na resistência do material em curtos períodos, porém com grandes tempos de cura este efeito foi reverso e a mistura se tornou até mais resistente que a original. Neste caso o teor ótimo de substituição ficou em 20%. Os resultados do autor podem ser visualizados na Figura 3.11. Este fator indica que possivelmente o Cálcio liberado pelo cimento durante a sua hidratação vai reagindo ao longo do tempo com o silício proveniente do vidro, gerando assim um ganho de resistência maior ao longo do tempo. O autor ainda cita que o vidro possui características que permitem que ele seja classificado como um material pozolânico.

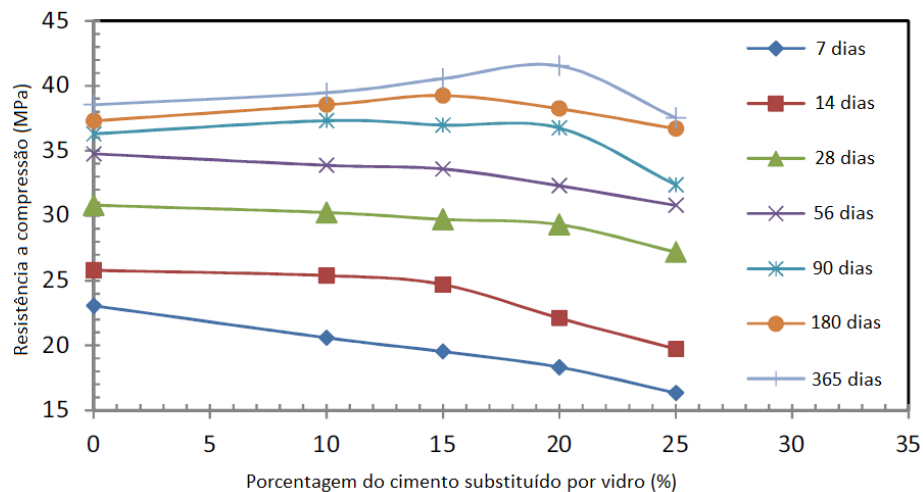


Figura 3.11: variação na resistência a compressão do concreto em relação a porcentagem de vidro substituindo o cimento ao longo do tempo. (adaptado de ISLAM ET AL., 2017)

Em solos finos autores como Benny et al. (2017) e Olufowobi et al. (2014) adicionaram pó de vidro em solos argilosos, a partir de ensaios realizados puderam concluir que a adição de pó de vidro ocasiona um aumento nos parâmetros constitutivos da mistura e conseqüentemente ganhos de resistência.

Gullu et al. (2017) em sua pesquisa analisou o comportamento de um solo argiloso, artificialmente cimentado com Cimento Portland, com a adição de pó de vidro, para a aplicação em colunas de solo cimento. Os autores concluíram que:

- o tempo necessário para que ocorra o ganho de resistência se torna maior quanto maior for a adição de pó de vidro;
- o teor de umidade necessário para uma eficácia melhor das misturas tende a diminuir com a adição do vidro;
- o vidro não altera o peso específico da mistura de maneira expressiva;
- existe um teor de vidro ótimo que maximiza o ganho de resistência nestas misturas, passando dele a adição do pó de vidro se torna prejudicial.

## 3.2 CINZAS PROVENIENTES DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

Atualmente diversos processos industriais geram resíduos em forma de cinzas, sendo que alguns deles podem vir a serem reutilizados devido a grande quantidade de sílica amorfa presente na sua estrutura. Neste item serão apresentadas as cinzas utilizadas nesta pesquisa e um pouco de trabalhos que já foram realizados com a utilização delas. As cinzas utilizadas são cinza de casca de arroz e cinza volante.

### 3.2.1 Cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz é um material proveniente da queima de cascas de arroz em usinas termoelétricas e neste item serão descritas algumas de suas propriedades e utilizações.

Cordeiro (2009), em seu estudo, avaliou como algumas propriedades da cinza de casca de arroz afetam as reações pozolânicas. A autora chegou à conclusão que diversos fatores controlam a pozolanicidade deste material, sendo eles o índice de amorfismo, o diâmetro das partículas e a relação água aglomerante.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), o volume de casca de arroz produzido é de aproximadamente 200kg a cada tonelada de arroz. Sua composição segundo Houston (1972) é composta principalmente por celulose, lignina e materiais orgânicos, sua estrutura é fibrosa, possui baixa densidade e conseqüentemente ocupa elevados volumes. Apesar de não ser considerado um resíduo perigoso ao ser humano ou ao meio ambiente conforme é classificado pela NBR 10.004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004) é um material de decomposição extremamente lenta, gerando transtornos pelo seu volume ocupado.

Cordeiro (2009) cita como algumas das utilizações da cinza de casca de arroz:

- adsorção de materiais como fenóis, chumbo e mercúrio de águas;
- melhoramento no desempenho de borrachas naturais;
- auxílio na sintetização de zeólitas e wollastonitas;
- ganho de resistência e durabilidade em concretos e argamassas e reduzir a sua porosidade;

- geração de sílica pura em pó ou gel.

De Paula (2013) e Bravo (2013) em seus estudos avaliaram o efeito da adição de cinza de casca de arroz em um solo orgânico artificialmente cimentado com cimento Portland e cal, respectivamente. Ambas as autoras concluíram que a adição de cinza de casca de arroz neste material gerou ganhos de resistência a tração para a mistura. Em alguns casos o ganho de resistência a tração foi menor do que a resistência a tração que a mistura teria sem a substituição do cimento ou cal pela cinza de casca de arroz. Na Figura 3.12 é possível visualizar a resistência a tração para um solo orgânico artificialmente cimentado com cal e cinza de casca de arroz para diferentes tempos de cura em função da razão entre a porosidade e o teor volumétrico de cal.

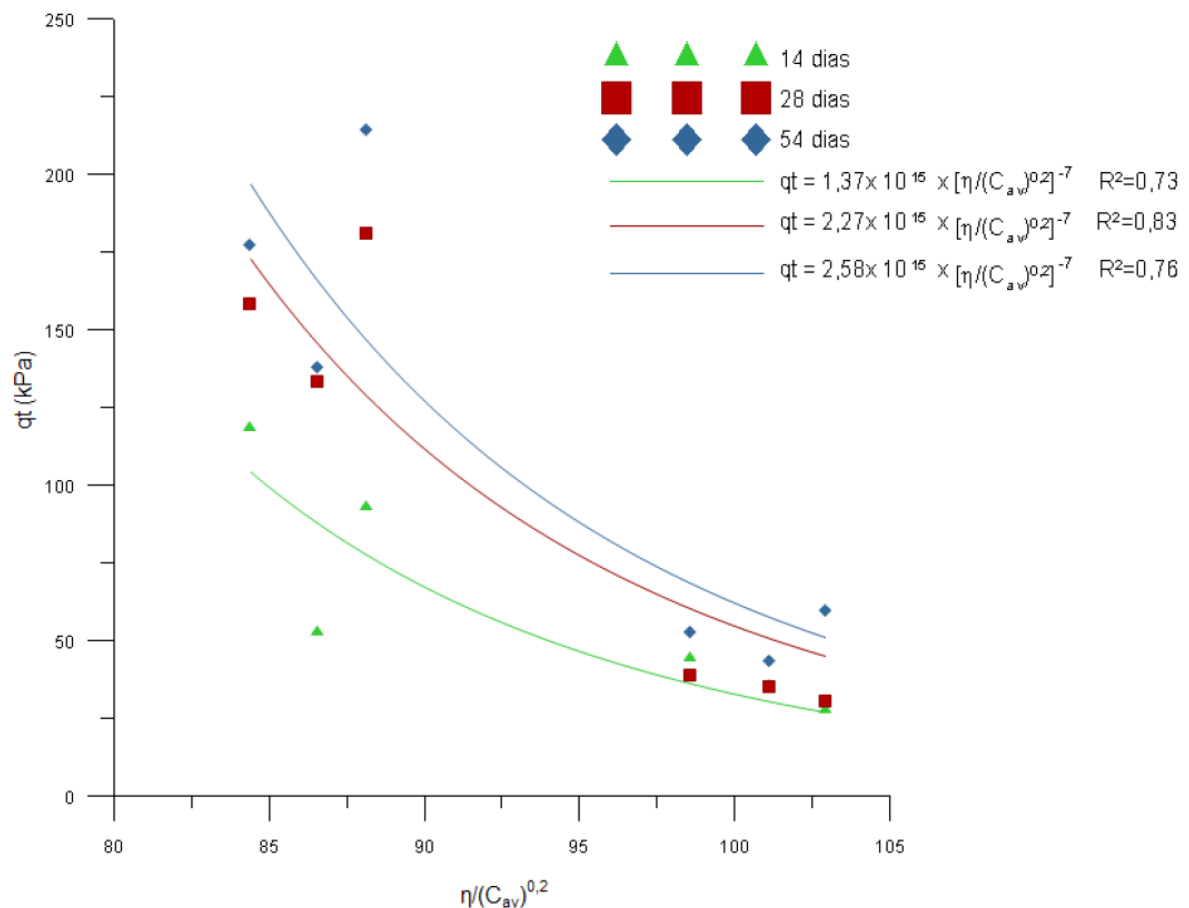


Figura 3.11: resistência a tração para um solo orgânico artificialmente cimentado com cal e cinza de casca de arroz para diferentes tempos de cura em função do  $\eta/L_{iv}$ . (BRAVO, 2013)

Na Figura 3.13 é possível visualizar a resistência a tração para um solo orgânico artificialmente cimentado com cimento Portland e cinza de casca de arroz para diferentes tempos de cura em função da razão entre a porosidade e o teor volumétrico de cal.

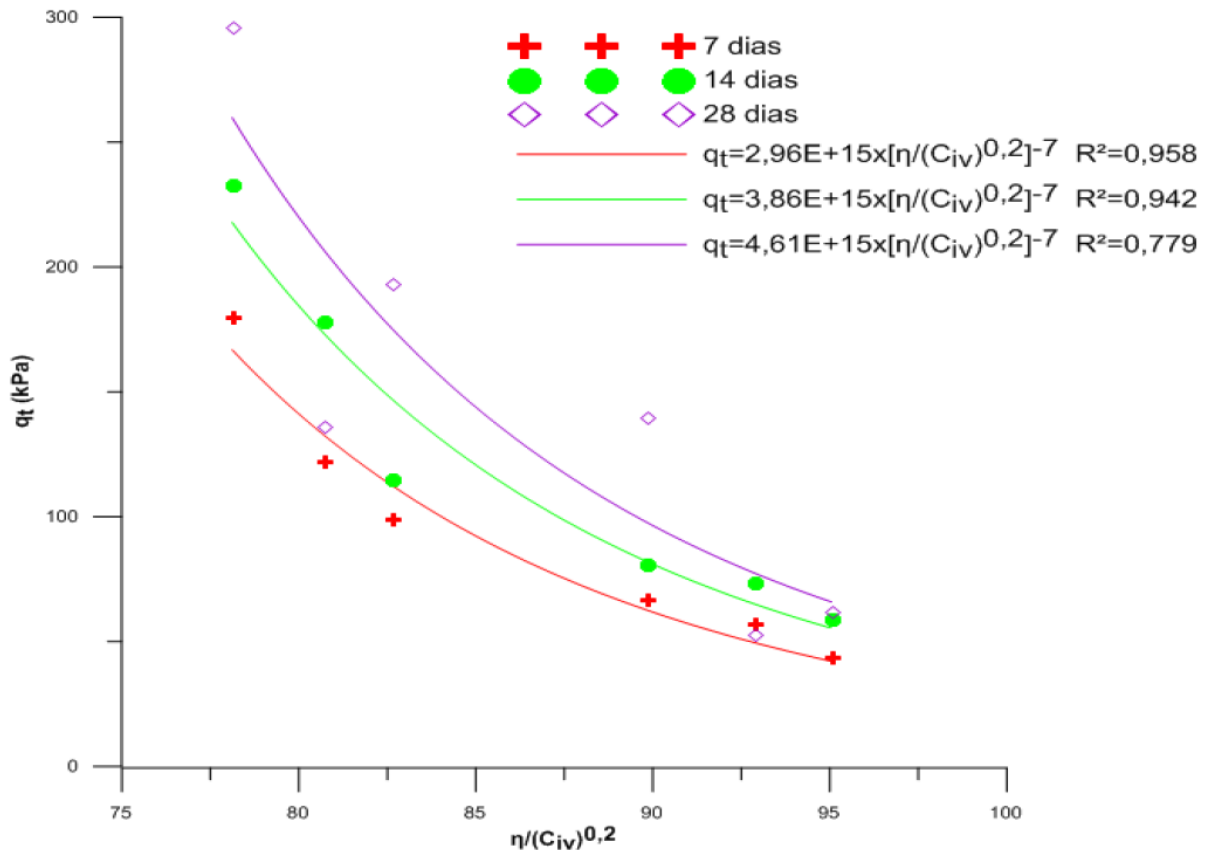


Figura 3.13: resistência a tração para um solo orgânico artificialmente cimentado com cimento e cinza de casca de arroz para diferentes tempos de cura em função do  $\eta/C_{iv}$ . (DE PAULA, 2013)

Winter et al. (2014) em seu estudo propuseram um novo tipo de ensaio para a obtenção da resistência de materiais artificialmente cimentados e na sua pesquisa utilizaram juntamente com o agente cimentante a cinza de casca de arroz.

### 3.2.2 Cinza volante

Segundo Wesche (2005), a cinza volante é um material sólido, de granulometria fina, resultante da combustão de carvão pulverizado em usinas termoelétricas. Este material é coletado através de coletores mecânicos ou separadores. Esta cinza reage com hidróxido de



cálcio a temperatura ambiente e pode ser chamado de um material pozolânico. O carvão que é queimado nas termoelétricas é um material extremamente heterogêneo e complexo e é formado no interior da terra em períodos entre 300 e 400 milhões de anos, sendo assim, a cinza volante têm diversas características que podem ser distintas de uma usina para outra.

Em Consoli et al. (2011B), os autores executaram uma pesquisa com a adição de cinza volante em arenito Botucatu, posteriormente estes dados foram utilizados em Consoli et al. (2013) onde foi comparado o efeito da adição de cinza volante com o efeito da adição de pó de pedra em um arenito Botucatu artificialmente cimentado com cal. Os autores citam que a reatividade da cinza volante acabou sendo bem maior que a reatividade dos outros materiais e isto se deve a grande quantidade de sílica presente. Na Figura 3.14 é possível ver os resultados obtidos pelos autores evidenciando o ganho de resistência que a mistura teve com a adição da cinza volante. Onde BRS significa Arenito Botucatu, PR pó de pedra e FA cinza volante.

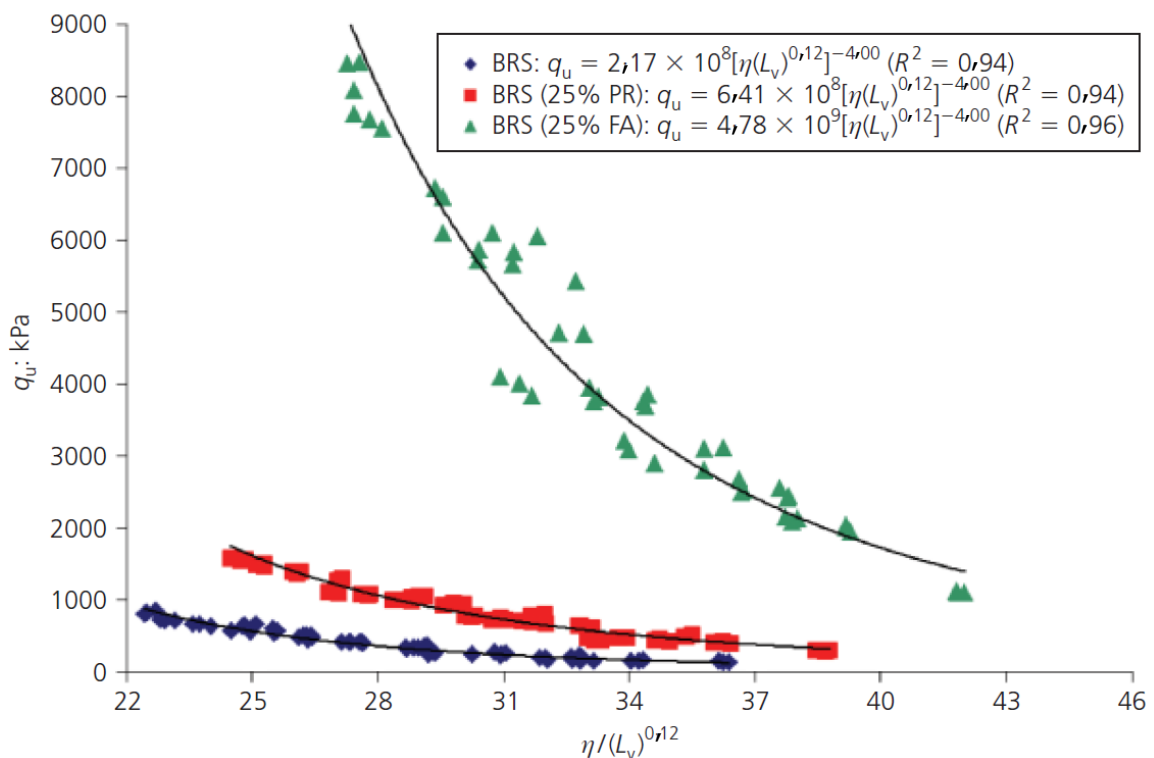


Figura 3.14: resistência a compressão para o arenito Botucatu com a adição de cal, cinza volante e pó de pedra em relação ao  $\eta/L_{iv}$ . (CONSOLI ET AL., 2013)

Da Rocha et al. (2013), em seu estudo, verificaram quais são os fatores que controlam a resistência de solos artificialmente comentados com o intuito de obter equações de dosagem com relação a resistência de Arenito Botucatu com a adição de cal e cinza volante. A cinza se mostrou um dos parâmetros chave para obtermos uma maior resistência no material com um menor gasto de cal. Consoli et al. (2016B) utilizaram uma mistura de cinza volante com cal de carbureto para a utilização como bloco de alvenaria.

### 3.3 CAL DE CARBURETO

Segundo Saldanha et al. (2018), a cal de carbureto, que também pode ser chamada de resíduo de carbureto é um material que acaba sendo gerado na produção de gás acetileno. Este produto é formado basicamente por hidróxido de cálcio com pequenas quantidades de carbonato de cálcio, óxido de silício e muitas vezes por alguns outros óxidos formados durante o processo.

A produção global de gás acetileno foi de aproximadamente 500.000 toneladas em 2014, gerando aproximadamente 1.423.000 toneladas de cal de carbureto. O Brasil tem capacidade de produzir até 12.000 toneladas por ano de gás acetileno, porém, gera em torno de 6.000 toneladas e com este processo produz todo ano mais de 17.000 toneladas de cal de carbureto. (MARKET RESEARCH STORE, 2015) (HORPIBULSUK ET AL., 2015) (DU ET AL., 2011)

Conforme citado em Saldanha et al. (2018), a cal de carbureto pode ser reciclada devido as suas propriedades químicas e físicas, podendo ser utilizada em diferentes processos, como agricultura, em indústrias, em estações de tratamento de água, na construção civil e em Engenharia Geotécnica para a estabilização de solos. Estes processos podem reduzir drasticamente o impacto gerado pelo descarte do resíduo em aterro e redução da necessidade de explorar minas de calcário. Um exemplo da redução do impacto ambiental gerada pela utilização da cal de carbureto é que para cada tonelada de cal produzida são geradas 1,1 toneladas de dióxido de carbono e são consumidos 240 litros de água. (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2009)

Handy e Wang (1966) em sua pesquisa estabilizaram uma argila altamente plástica com cal de carbureto e obtiveram resultados superiores ao obtidos com cales convencionais. Consoli et

al. (2001) estudou o comportamento de solos artificialmente cimentados com a utilização de cal de carbureto e cinza volante obtendo ganhos significativos de resistência e rigidez no material. Outros autores como Said (2009), Du et al. (2011), Horpibulsuk et al. (2013), Vichan e Rachan (2013) e Joel e Edeh (2013) estudaram o comportamento de solos artificialmente cimentados com a utilização de cal de carbureto.

Saldanha et al. (2018) enfatizam que a cal de carbureto possui potencial de utilização similar as cales hidratadas vendidas comercialmente além de ter um forte apelo ambiental. Elementos tóxicos podem ser encontrados neste resíduo, como por exemplo, foi encontrado por Ramasamy et al. (2002) em cales de carbureto geradas na Malásia, nos Estados Unidos e no Reino Unido.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão exibidos os materiais e ensaios utilizados, além do programa experimental da pesquisa.

### 4.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados serão descritos nos próximos itens.

#### 4.1.1 Areia de Osório

A areia de Osório é uma areia fina, de granulometria uniforme, com grãos arredondados característicos de um solo eólico e já foi utilizada e caracterizada por outros autores como Foppa (2016) e Marques (2016). Este material é extraído da cidade de Osório/RS cuja localização é exibida na Figura 4.1.



Figura 4.1: localização da cidade de Osório.  
(MARQUES, 2016)

A curva granulométrica da Areia de Osório, obtida a laser em um equipamento CILAS 1180: *Particle Size Analyser*, de propriedade do laboratório LACER/UFRGS, pode ser visualizada

na Figura 4.2, onde é possível, pelo formato da curva, identificar a uniformidade deste material.

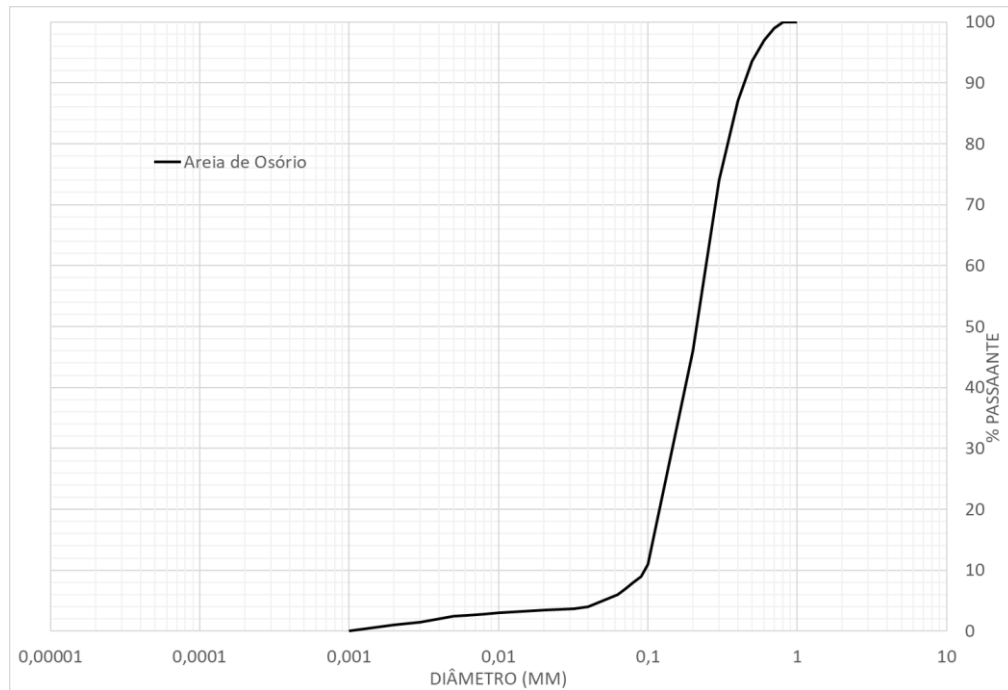


Figura 4.2: curva granulométrica da areia de Osório.

Na Figura 4.3 é possível observar as arestas arredondadas dos grãos da areia de Osório nas fotos de Microscopia eletrônica de varredura ampliados 40 e 500 vezes.



Figura 4.3: foto de microscopia eletrônica da areia de Osório ampliada 40 e 500 vezes.  
(MARQUES, 2009)

As propriedades físicas da areia de Osório são exibidas na Tabela 4.1. As faixas granulométricas estão conforme a ABNT NBR 6502/1995 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995). O ensaio de massa específica real dos grãos da amostra seguiu as recomendações da NBR NM 23/2001 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001a).

Tabela 4.1: propriedades físicas da areia de Osório.

| <b>Propriedades</b>                    | <b>Valores</b> |
|----------------------------------------|----------------|
| Densidade Real dos Grãos (G)           | 2,61           |
| % Pedregulho ( $d > 2$ mm)             | 0%             |
| % de Areia Grossa ( $0,6 < d < 2$ mm)  | 0%             |
| % de Areia Média ( $0,2 < d < 0,6$ mm) | 52%            |
| % de Areia fina ( $0,06 < d < 0,2$ mm) | 43%            |
| % de Silte ( $0,002 < d < 0,06$ mm)    | 4 %            |
| % de Argila ( $d < 0,002$ mm)          | 1%             |
| Diâmetro Efetivo ( $D_{10}$ ) mm       | 0,11           |
| Diâmetro ( $D_{30}$ ) mm               | 0,16           |
| Diâmetro ( $D_{50}$ ) mm               | 0,21           |
| Diâmetro ( $D_{60}$ ) mm               | 0,23           |
| Coefficiente de Uniformidade ( $C_u$ ) | 2,13           |
| Coefficiente de Curvatura ( $C_c$ )    | 1,04           |

#### 4.1.2 Arenito Botucatu

O arenito Botucatu é um solo residual de rocha sedimentar oriundo da formação Botucatu. Um mapa geológico mostrando esta formação é exibido na Figura 4.4. Este material já foi caracterizado em diversas pesquisas como em Foppa (2005) e Dalla Rosa (2009) e foi coletado no talude exibido na Figura 4.5, que se encontra na Rua Felipe Camarão, no Bairro Scharlau, em São Leopoldo/RS.

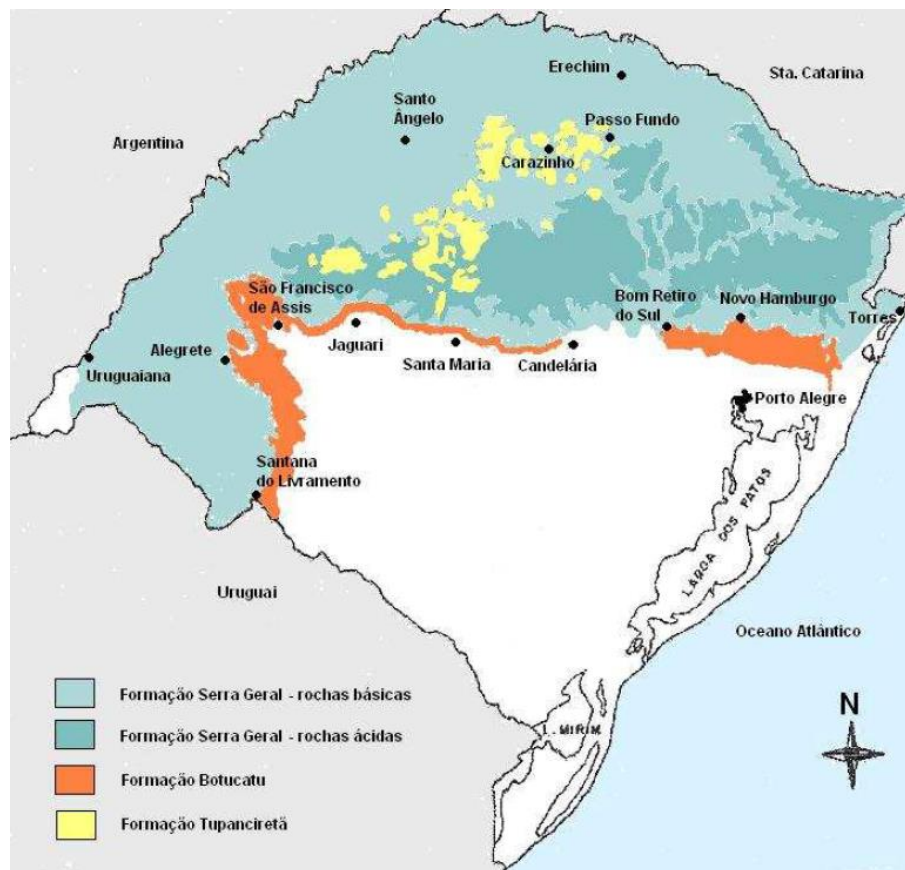


Figura 4.4: mapa geológico mostrando a formação Botucatu.  
(DALLA ROSA, 2009)



Figura 4.5: talude de onde foi retirado o arenito Botucatu.  
(DALLA ROSA, 2009)

O Arenito Botucatu consiste em uma areia siltosa e sua curva granulométrica obtida no equipamento CILAS 1180: *Particle Size Analyser* é exibida na Figura 4.6, onde é possível identificar uma curva característica de materiais com granulometria descontínua.

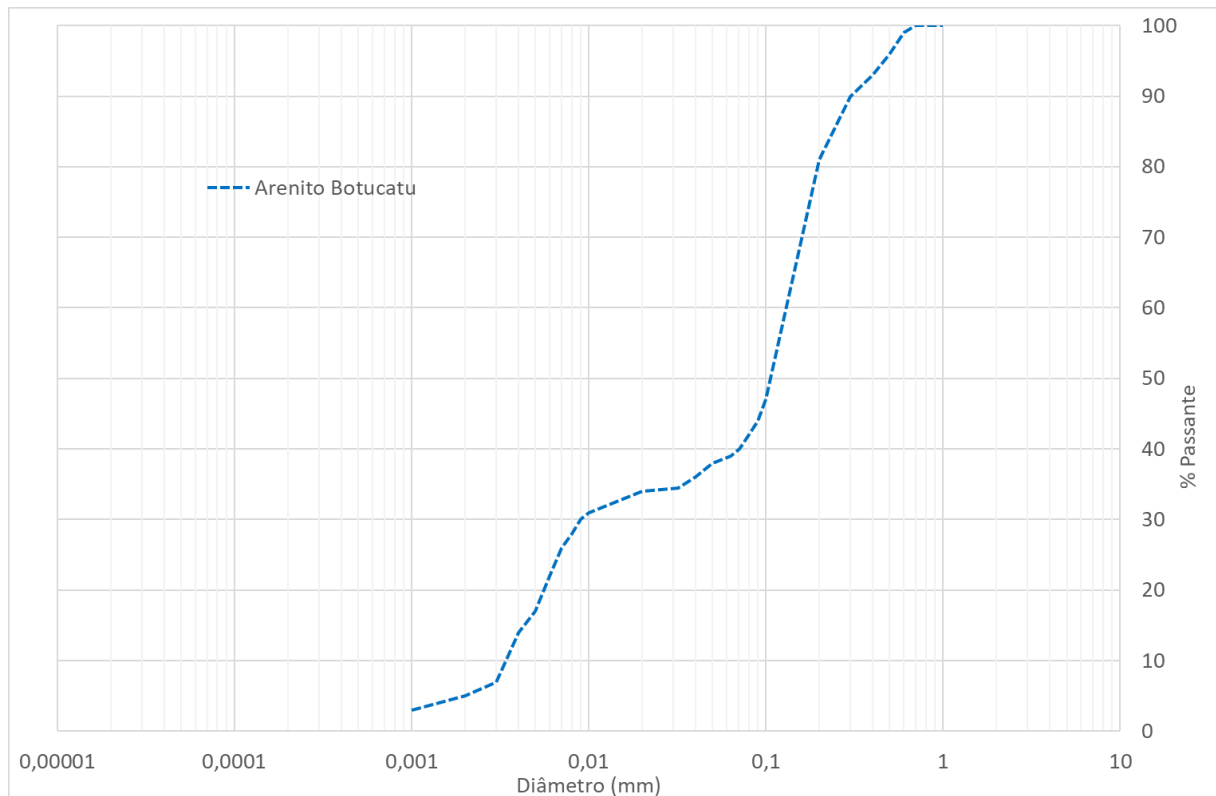


Figura 4.6: curva granulométrica do arenito Botucatu.

As propriedades físicas do arenito Botucatu são exibidas na Tabela 4.2. As faixas granulométricas estão conforme a ABNT NBR 6502/1995 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995). O ensaio de massa específica real dos grãos da amostra seguiu as recomendações da NBR NM 23/2001 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001a).



Tabela 4.2: propriedades físicas do arenito Botucatu.

| <b>Propriedades</b>                    | <b>Valores</b> |
|----------------------------------------|----------------|
| Densidade Real dos Grãos (G)           | 2,64           |
| % Pedregulho ( $d > 2$ mm)             | 0%             |
| % de Areia Grossa ( $0,6 < d < 2$ mm)  | 0%             |
| % de Areia Média ( $0,2 < d < 0,6$ mm) | 16%            |
| % de Areia fina ( $0,06 < d < 0,2$ mm) | 46%            |
| % de Silte ( $0,002 < d < 0,06$ mm)    | 33%            |
| % de Argila ( $d < 0,002$ mm)          | 5%             |
| Diâmetro Efetivo ( $D_{10}$ ) mm       | 0,0032         |
| Diâmetro ( $D_{30}$ ) mm               | 0,009          |
| Diâmetro ( $D_{50}$ ) mm               | 0,11           |
| Diâmetro ( $D_{60}$ ) mm               | 0,12           |
| Coefficiente de Uniformidade ( $C_u$ ) | 37,5           |
| Coefficiente de Curvatura ( $C_c$ )    | 0,21           |

#### 4.1.3 Pó de vidro

O vidro utilizado na pesquisa foi obtido do descarte de uma vidraçaria localizada na Avenida do Forte em Porto Alegre/RS. Após o recebimento do descarte, foram separados os resíduos de vidros planos de janelas e estes que foram moídos. A moagem ocorreu no Laboratório Tecnológico Mineral e Ambiental (LTM/UFRGS), primeiramente em um moinho de mandíbulas, posteriormente em um moinho de rolos para depois ser colocado em um moinho de bolas. O tempo de moagem no moinho de bolas foi de 4 horas e, após o processo, o vidro foi peneirado em uma peneira com abertura de 0,075mm (mesh #200) e o material que ficava retido retornava ao moinho de bolas. Após a moagem, todo o pó de vidro (aproximadamente 50kg) foi misturado para garantir a homogeneidade do material. Na Figura 4.7 é exibida a curva granulométrica do material após moagem e homogeneização obtida no equipamento CILAS 1180: *Particle Size Analyser*, mostrando um material siltoso.

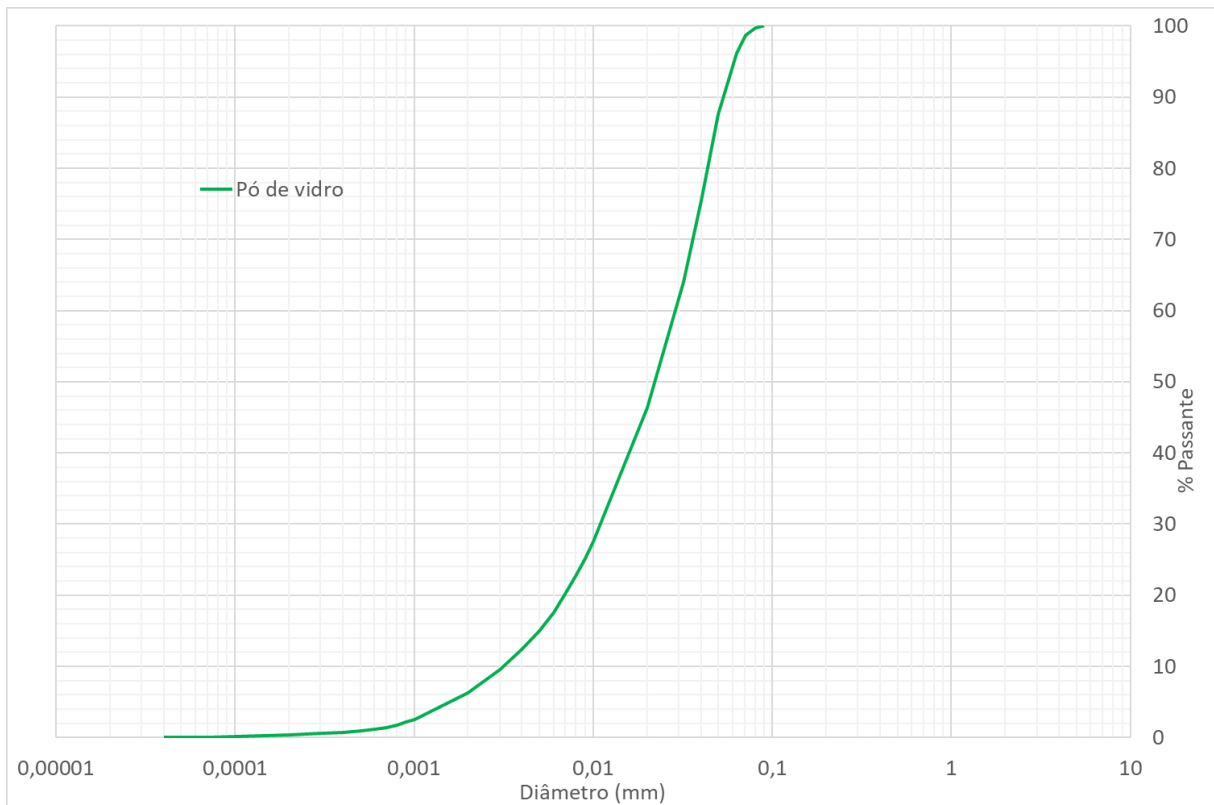


Figura 4.7: curva granulométrica do pó de vidro.

Na figura 4.8 é exibida uma fotografia de microscopia eletrônica com um aumento de 1000 vezes, mostrando as arestas angulares dos grãos.

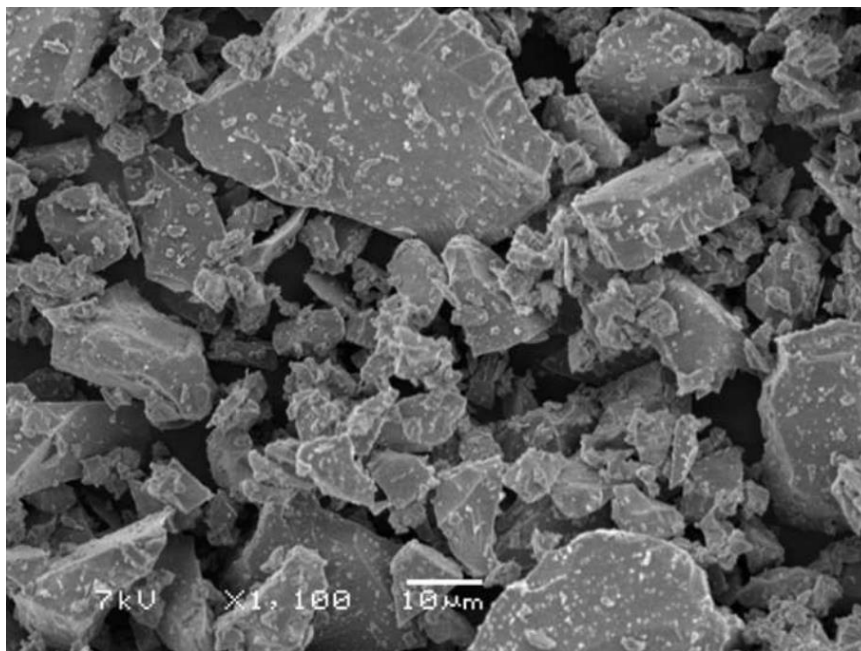


Figura 4.8: foto de microscopia eletrônica do pó de vidro.

As propriedades físicas do pó de vidro são exibidas na Tabela 4.3. As faixas granulométricas estão conforme a ABNT NBR 6502/1995 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995). O ensaio de massa específica real dos grãos da amostra seguiu as recomendações da NBR NM 23/2001 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001a).

Tabela 4.3: propriedades físicas do pó de vidro.

| <b>Propriedades</b>                    | <b>Valores</b> |
|----------------------------------------|----------------|
| Densidade Real dos Grãos (G)           | 2,44           |
| % Pedregulho ( $d > 2$ mm)             | 0%             |
| % de Areia Grossa ( $0,6 < d < 2$ mm)  | 0%             |
| % de Areia Média ( $0,2 < d < 0,6$ mm) | 0%             |
| % de Areia fina ( $0,06 < d < 0,2$ mm) | 0,5%           |
| % de Silte ( $0,002 < d < 0,06$ mm)    | 93,5%          |
| % de Argila ( $d < 0,002$ mm)          | 6,2%           |
| Diâmetro Efetivo ( $D_{10}$ ) mm       | 0,003          |
| Diâmetro ( $D_{30}$ ) mm               | 0,011          |
| Diâmetro ( $D_{50}$ ) mm               | 0,021          |
| Diâmetro ( $D_{60}$ ) mm               | 0,03           |
| Coefficiente de Uniformidade ( $C_u$ ) | 10             |
| Coefficiente de Curvatura ( $C_c$ )    | 1,34           |

#### 4.1.4 Cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz utilizada neste trabalho é comercializada com o nome de SILICA NOBRE SC-I e é produzida no município de Alegrete/RS pela empresa Sílica Verde do Arroz LTDA. O processo de fabricação se dá pelo controle de combustão por meio de leito fluidizado e, segundo o fabricante, sua composição consiste em pelo menos 94% de  $\text{SiO}_2$ . Este produto é vendido comercialmente com o nome de sílica de casca de arroz e maiores informações podem ser obtidas junto ao fabricante. A sua curva granulométrica gerada a partir de análise no equipamento CILAS 1180: *Particle Size Analyser* é exibida na Figura 4.9.

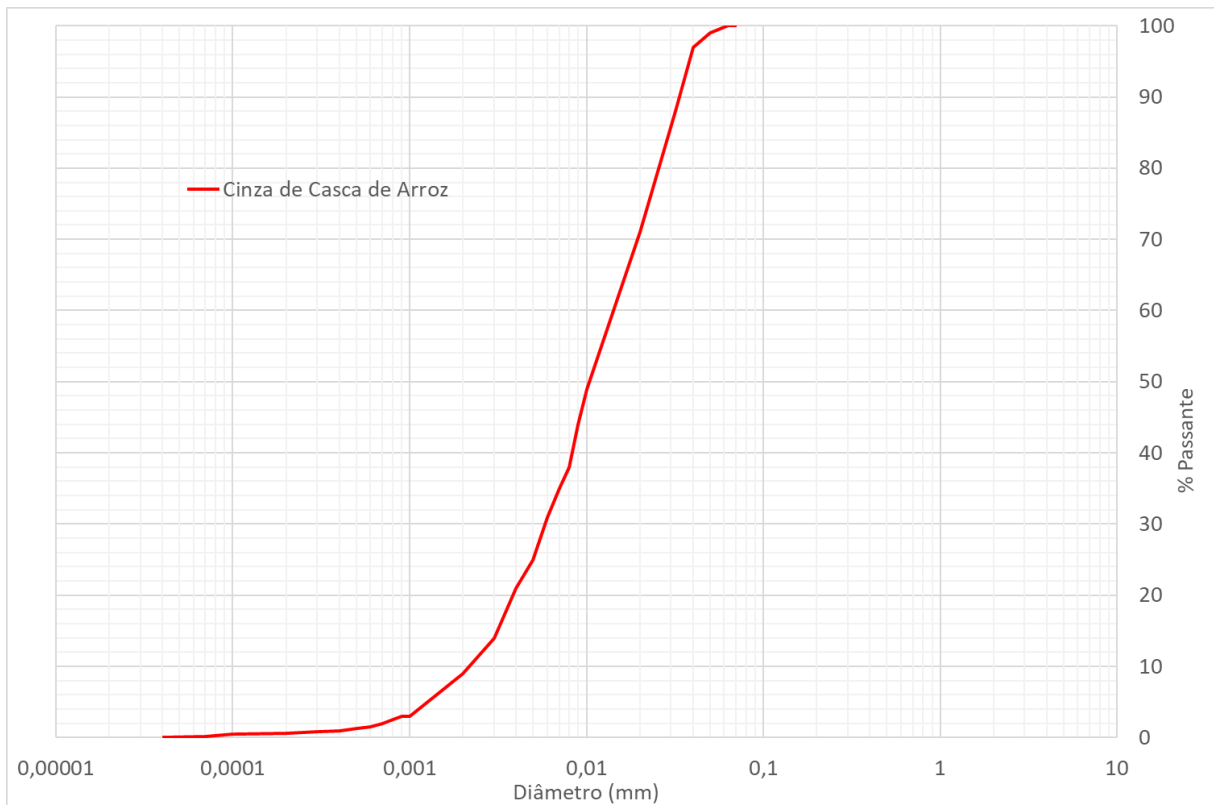


Figura 4.9: curva granulométrica da cinza de casca de arroz.

Na Figura 4.10 é exibida uma foto de microscopia eletrônica da cinza de casca de arroz com um aumento de 500 vezes.

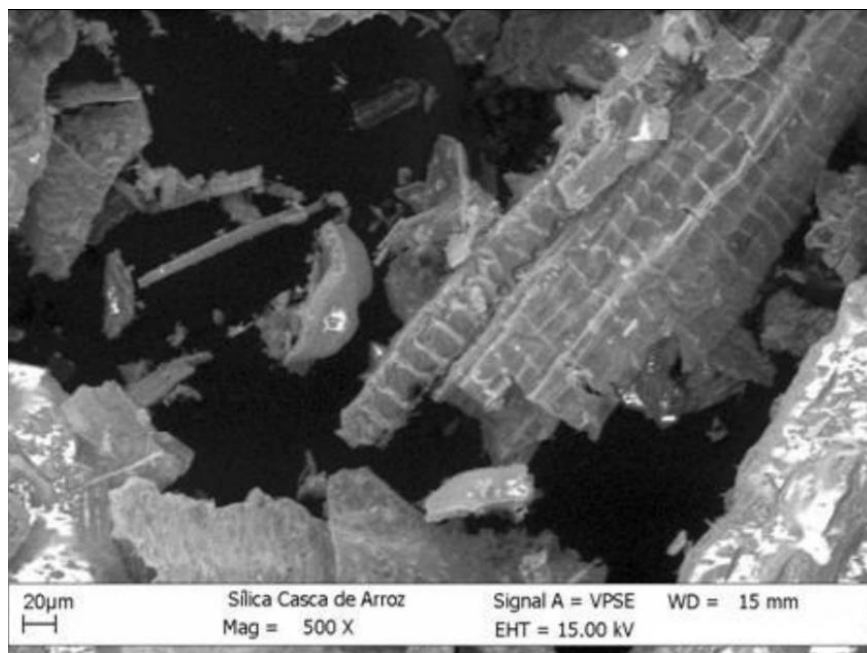


Figura 4.10: foto de microscopia eletrônica da cinza de casca de arroz.  
(GOMES E MARTON, 2014)

As propriedades físicas da cinza de casca de arroz são exibidas na Tabela 4.4. As faixas granulométricas estão conforme a ABNT NBR 6502/1995 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995). O ensaio de massa específica real dos grãos da amostra seguiu as recomendações da NBR NM 23/2001 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001a).

Tabela 4.4: propriedades físicas da cinza de casca de arroz.

| <b>Propriedades</b>                    | <b>Valores</b> |
|----------------------------------------|----------------|
| Densidade Real dos Grãos (G)           | 2,17           |
| % Pedregulho ( $d > 2$ mm)             | 0%             |
| % de Areia Grossa ( $0,6 < d < 2$ mm)  | 0%             |
| % de Areia Média ( $0,2 < d < 0,6$ mm) | 0%             |
| % de Areia fina ( $0,06 < d < 0,2$ mm) | 31%            |
| % de Silte ( $0,002 < d < 0,06$ mm)    | 61%            |
| % de Argila ( $d < 0,002$ mm)          | 8%             |
| Diâmetro Efetivo ( $D_{10}$ ) mm       | 0,0021         |
| Diâmetro ( $D_{30}$ ) mm               | 0,006          |
| Diâmetro ( $D_{50}$ ) mm               | 0,01           |
| Diâmetro ( $D_{60}$ ) mm               | 0,013          |
| Coefficiente de Uniformidade ( $C_u$ ) | 6,19           |
| Coefficiente de Curvatura ( $C_c$ )    | 1,31           |

#### 4.1.5 Cal de carbureto

A cal de carbureto utilizada na pesquisa é um resíduo oriundo da produção de gás acetileno em uma indústria localizada no estado do Rio Grande do Sul. A planta de produção tem uma capacidade de produção de 120 toneladas de acetileno por mês, gerando assim 342 toneladas de cal de carbureto. Este material é coletado em forma de pasta e, para a sua utilização, seco em estufa a 60°, durante 48 horas. A sua curva granulométrica é exibida na Figura 4.11.

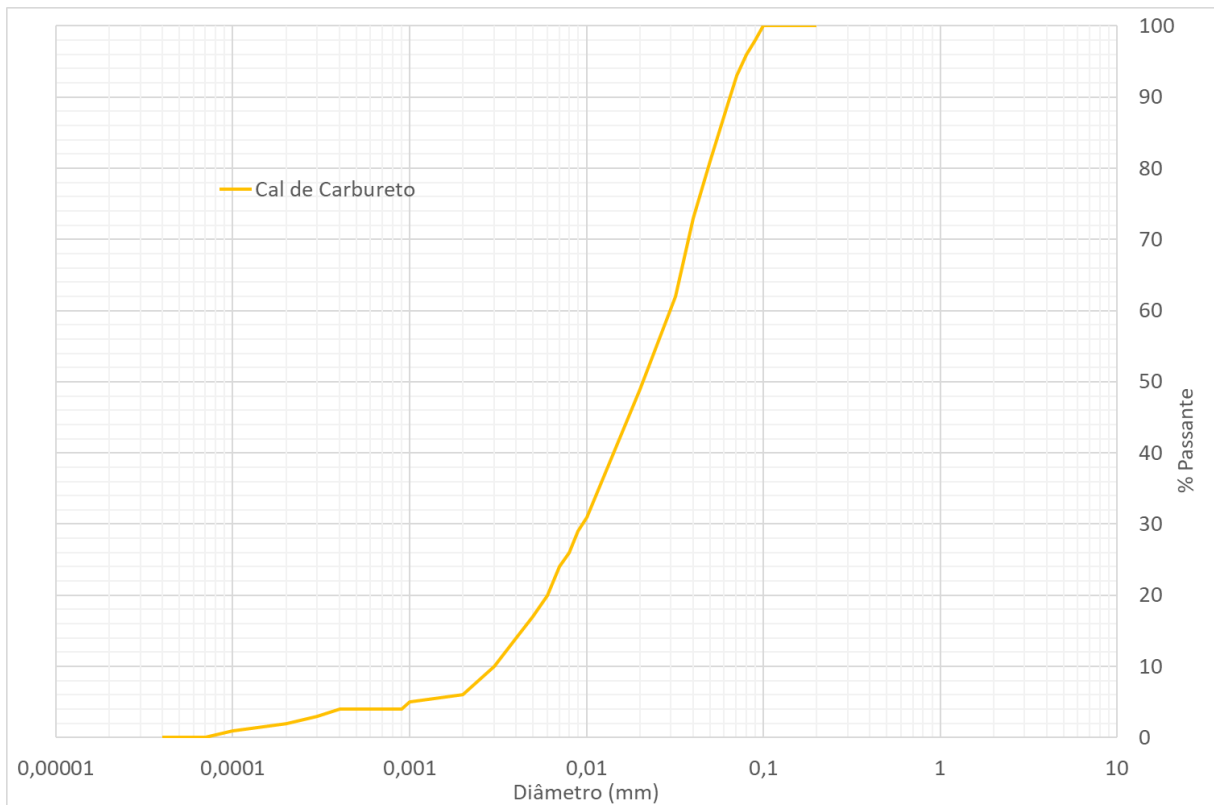


Figura 4.11: curva granulométrica da cal de carbureto.

Na Figura 4.12 é exibida uma foto de microscopia eletrônica da cal de carbureto.

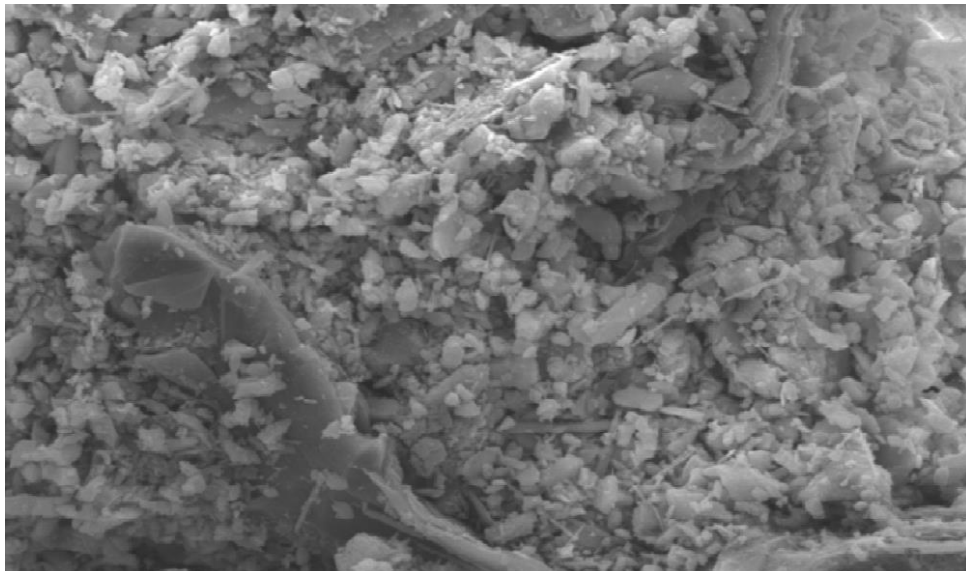


Figura 4.12: foto de microscopia eletrônica da cal de carbureto.  
(SALDANHA ET AL., 2014)

As propriedades físicas da cal de carbureto são exibidas na Tabela 4.5. As faixas granulométricas estão conforme a ABNT NBR 6502/1995 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA

DE NORMAS TÉCNICAS, 1995). O ensaio de massa específica real dos grãos da amostra seguiu as recomendações da NBR NM 23/2001 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001a). Mais informações sobre esta cal de carbureto podem ser encontradas em Saldanha et al. 2018.

Tabela 4.5: propriedades físicas da cal de carbureto.

| <b>Propriedades</b>                    | <b>Valores</b> |
|----------------------------------------|----------------|
| Densidade Real dos Grãos (G)           | 2,19           |
| % Pedregulho ( $d > 2$ mm)             | 0%             |
| % de Areia Grossa ( $0,6 < d < 2$ mm)  | 0%             |
| % de Areia Média ( $0,2 < d < 0,6$ mm) | 0%             |
| % de Areia fina ( $0,06 < d < 0,2$ mm) | 12%            |
| % de Silte ( $0,02 < d < 0,06$ mm)     | 82%            |
| % de Argila ( $d < 0,002$ mm)          | 6%             |
| Diâmetro ( $D_{10}$ ) mm               | 0,003          |
| Diâmetro ( $D_{30}$ ) mm               | 0,0092         |
| Diâmetro ( $D_{50}$ ) mm               | 0,02           |
| Diâmetro ( $D_{60}$ ) mm               | 0,03           |
| Coefficiente de Uniformidade ( $C_u$ ) | 10             |
| Coefficiente de Curvatura ( $C_c$ )    | 0,94           |

## 4.2 ENSAIOS UTILIZADOS

Nos próximos itens são exibidos os ensaios utilizados para a obtenção dos parâmetros de resistência, rigidez e durabilidade, bem como as normas utilizadas para a sua correta realização e os procedimentos de moldagem e cura dos corpos de prova.

### 4.2.1 Resistência

A resistência das amostras testadas foi verificada com a utilização do seu parâmetro  $q_u$ , que significa a resistência a compressão não confinada. A resistência a compressão não confinada das amostras foi obtida com ensaios de compressão simples, seguindo a norma brasileira NBR 12025/2012 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012c), em uma prensa mecânica com capacidade máxima de carga igual a 100 kN e com anéis dinamométricos com capacidade de carga de 10 kN e 50 kN. Estes anéis possuem resolução de 0,005 kN e 0,023 kN respectivamente. A prensa possui velocidade de subida constante de 1,14 mm/min. Para estes ensaios foram moldados corpos de prova cilíndricos com diâmetro

de aproximadamente 5 cm e altura de 10 cm. Na Figura 4.13 é exibida a prensa utilizada para os ensaios de compressão já com o anel dinamométrico de 10 kN.



Figura 4.13: prensa utilizada para os ensaios de compressão simples.

Antes da ruptura, todos os corpos de prova testados foram mantidos imersos em água durante 24 horas para evitar efeitos de sucção. Após a ruptura dos corpos de prova, foi anotada a máxima força aplicada pela prensa, e dividindo esta pela área do mesmo, foi obtida a resistência a compressão não confinada.

#### 4.2.2 Rigidez

A rigidez dos solos artificialmente cimentados utilizados para a presente pesquisa foi comparada através do módulo cisalhante a pequenas deformações ( $G_0$ ) e a sua medida foi obtida através de ondas ultrassônicas com a utilização com o equipamento *Pundit Lab Plus*, produzido pela empresa Proceq. Basicamente este equipamento mede a velocidade de propagação das ondas de compressão (ondas P) e cisalhantes (ondas S) no material a ser testado. O módulo cisalhante a pequenas deformações do material foi obtido multiplicando a



velocidade da onda cisalhante ao quadrado pela densidade deste. Na Figura 4.14, obtida no site do fabricante, é possível visualizar o equipamento utilizado.



Figura 4.14: *pundit lab plus*.  
(INTERNET: [www.proceq.com](http://www.proceq.com))

A medição da velocidade de propagação da onda no material sempre foi executada imediatamente antes da ruptura dos mesmos. Os sensores eram colocados perpendicularmente nas faces superiores e inferiores dos corpos de prova. Foram realizadas 3 medidas independentes em todos os corpos de prova e o resultado adotado foi a média destes. Em alguns casos a rigidez do material fugiu da faixa de valores admitida pelo equipamento e estes resultados foram descartados. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos com diâmetro de aproximadamente 5 cm e altura aproximada de 10 cm. Estes ensaios foram realizados em conformidade com a norma ASTM D2845 (ASTM, 2008).

#### 4.2.3 Durabilidade

Para os ensaios de durabilidade foram utilizados os procedimentos descritos na norma ASTM D559 (ASTM 2015), que rege os ensaios de durabilidade por molhagem e secagem. Foram moldados corpos de prova cilíndricos com aproximadamente 10 cm de diâmetro por 12,73 cm de altura. Após o período de cura os corpos de prova foram submetidos a 12 ciclos da seguinte maneira:

- o corpo de prova é deixado em uma estufa a 70°C mais ou menos 2°C durante 48 horas;
- após o corpo de prova ser retirado da estufa e esfriar, a massa destes é medida;

- ocorre a escovação das faces e laterais dos corpos de prova com uma escova de aço e com força aproximada de 15 N por 20 vezes;
- é executada a medição da massa final, comparando esta medida com a massa inicial do ciclo e assim é obtida a perda de massa que ocorreu durante o ciclo.
- o corpo de prova é deixado em imersão em água durante 5 horas;
- o corpo de prova volta para a estufa iniciando um novo ciclo.

#### 4.2.4 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram moldados com o auxílio de uma prensa com capacidade de 600 kN, mecânica, de propriedade da CIENTEC - Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul. A execução dos espécimes foi realizada em moldes devidamente preparados para esta finalidade, com a possibilidade de as amostras serem extrudadas mecanicamente após a moldagem. Os corpos de prova foram construídos em três camadas de massas idênticas, sempre havendo o cuidado de escarificar a interface entre uma e outra. Após a colocação da primeira camada, o corpo de prova era prensado e escarificado. A segunda camada era colocada, prensada e escarificada e posteriormente a terceira camada era colocada e prensada. Após estes procedimentos o corpo de prova era extrudado mecanicamente, pesado, medido e levado até o local de cura. Para as moldagens foi utilizada água destilada.

#### 4.2.5 Cura dos corpos de prova

Os corpos de prova foram curados a temperatura de 23° C, mais ou menos 2° C, envoltos em sacolas plásticas para não existir perda excessiva de umidade que impossibilite a continuidade das reações pozolânicas. Os períodos de cura foram de sete e cento e oitenta dias.

### 4.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nos próximos itens são exibidas as misturas executadas na presente pesquisa.

#### 4.3.1 Misturas de areia de Osório, vidro e cal de carbureto.

Através de estudos preliminares, foram definidos os teores de pó de vidro a serem utilizados nas misturas, sendo estes 10, 20 e 30%, bem como os teores de cal de carbureto de 3, 5 e 7%. Para determinar o peso específico aparente seco, foram executados ensaios de compactação com a energia modificada, seguindo a norma brasileira ABNT NBR 7182 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016) denominada solos - ensaio de compactação. O resultado do ensaio de compactação para as misturas estudadas é exibido na Figura 4.15.

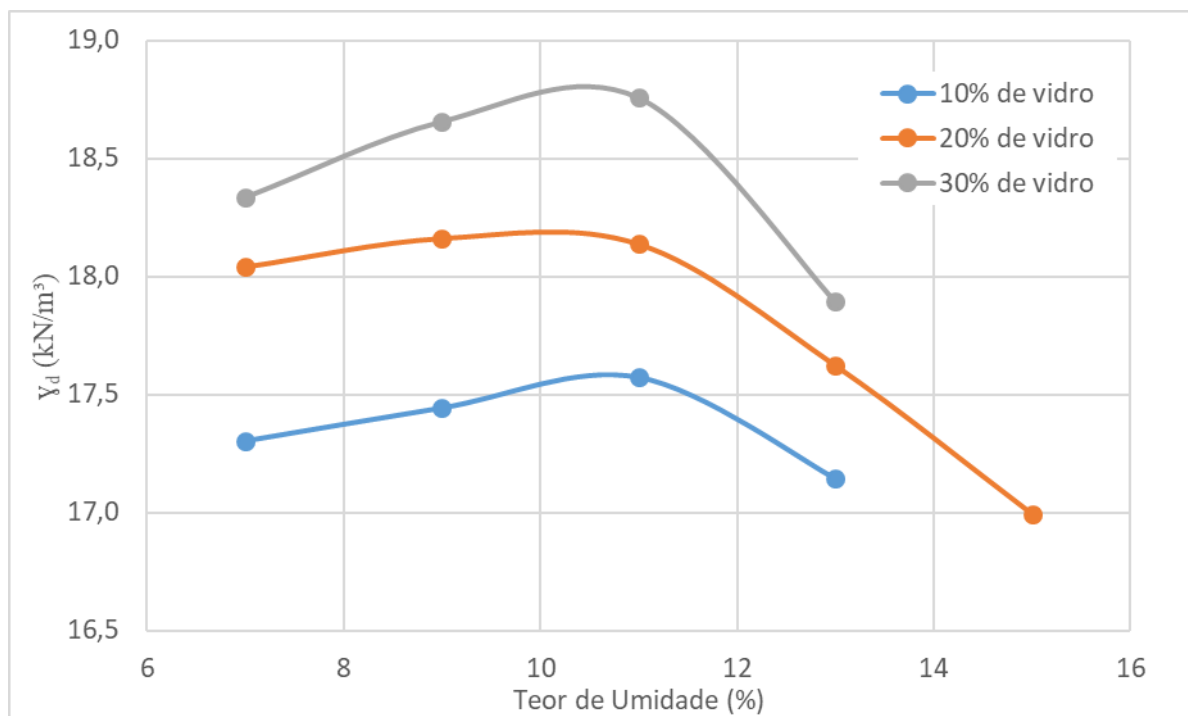


Figura 4.15: resultado do ensaio de compactação para areia de Osório com pó de vidro.

Com o teor de umidade ótimo encontrado igual a 11%, este foi definido como o teor de umidade de moldagem de todas as misturas. O peso específico aparente seco utilizado variou entre 15,5 kN/m<sup>3</sup> e 18,5 kN/m<sup>3</sup>, dependendo do teor de vidro adicionado. Na tabela 4.6 são exibidas todas as misturas executadas para os ensaios de resistência, rigidez e durabilidade para 7 dias de cura. Para todos os traços foram executados corpos de prova em triplicata.

Tabela 4.6: misturas de areia de Osório com pó de vidro e cal de carbureto para 7 dias de cura.

| <b>Mistura</b> | <b>% de vidro</b> | <b><math>\gamma_d</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b> | <b>% de cal</b> | <b>Mistura</b> | <b>% de vidro</b> | <b><math>\gamma_d</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b> | <b>% de cal</b> |
|----------------|-------------------|-------------------------------------------------|-----------------|----------------|-------------------|-------------------------------------------------|-----------------|
| <b>1</b>       | 10                | 15,5                                            | 3               | <b>15</b>      | 20                | 16,5                                            | 7               |
| <b>2</b>       | 10                | 15,5                                            | 5               | <b>16</b>      | 20                | 17,5                                            | 3               |
| <b>3</b>       | 10                | 15,5                                            | 7               | <b>17</b>      | 20                | 17,5                                            | 5               |
| <b>4</b>       | 10                | 16,5                                            | 3               | <b>18</b>      | 20                | 17,5                                            | 7               |
| <b>5</b>       | 10                | 16,5                                            | 5               | <b>19</b>      | 30                | 16,5                                            | 3               |
| <b>6</b>       | 10                | 16,5                                            | 7               | <b>20</b>      | 30                | 16,5                                            | 5               |
| <b>7</b>       | 10                | 17,5                                            | 3               | <b>21</b>      | 30                | 16,5                                            | 7               |
| <b>8</b>       | 10                | 17,5                                            | 5               | <b>22</b>      | 30                | 17,5                                            | 3               |
| <b>9</b>       | 10                | 17,5                                            | 7               | <b>23</b>      | 30                | 17,5                                            | 5               |
| <b>10</b>      | 20                | 15,5                                            | 3               | <b>24</b>      | 30                | 17,5                                            | 7               |
| <b>11</b>      | 20                | 15,5                                            | 5               | <b>25</b>      | 30                | 18,5                                            | 3               |
| <b>12</b>      | 20                | 15,5                                            | 7               | <b>26</b>      | 30                | 18,5                                            | 5               |
| <b>13</b>      | 20                | 16,5                                            | 3               | <b>27</b>      | 30                | 18,5                                            | 7               |
| <b>14</b>      | 20                | 16,5                                            | 5               | -              | -                 | -                                               | -               |

Com a finalidade de verificar as metodologias propostas, para outros períodos de cura com o mesmo material, foram realizados ensaios de resistência e rigidez para as misturas exibidas na Tabela 4.7 com 180 dias de cura.

Tabela 4.7: misturas de areia de Osório com pó de vidro e cal de carbureto para 180 dias de cura

| <b>Mistura</b> | <b>% de vidro</b> | <b><math>\gamma_d</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b> | <b>% de cal</b> | <b>Mistura</b> | <b>% de vidro</b> | <b><math>\gamma_d</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b> | <b>% de cal</b> |
|----------------|-------------------|-------------------------------------------------|-----------------|----------------|-------------------|-------------------------------------------------|-----------------|
| <b>1</b>       | 10                | 15,5                                            | 3               | <b>14</b>      | 20                | 16,5                                            | 5               |
| <b>2</b>       | 10                | 15,5                                            | 5               | <b>16</b>      | 20                | 17,5                                            | 3               |
| <b>3</b>       | 10                | 15,5                                            | 7               | <b>18</b>      | 20                | 17,5                                            | 7               |
| <b>5</b>       | 10                | 16,5                                            | 5               | <b>19</b>      | 30                | 16,5                                            | 3               |
| <b>7</b>       | 10                | 17,5                                            | 3               | <b>20</b>      | 30                | 16,5                                            | 5               |
| <b>9</b>       | 10                | 17,5                                            | 7               | <b>21</b>      | 30                | 16,5                                            | 7               |
| <b>10</b>      | 20                | 15,5                                            | 3               | <b>23</b>      | 30                | 17,5                                            | 5               |
| <b>11</b>      | 20                | 15,5                                            | 5               | <b>25</b>      | 30                | 18,5                                            | 3               |
| <b>12</b>      | 20                | 15,5                                            | 7               | <b>27</b>      | 30                | 18,5                                            | 7               |

#### 4.3.2 Misturas de arenito Botucatu, vidro e cal de carbureto

Com o intuito de verificar a metodologia proposta, para misturas de diferentes solos com o pó de vidro e a cal de carbureto, foram realizados ensaios de resistência, rigidez e durabilidade em um arenito Botucatu artificialmente cimentado, com 10, 20 e 30% de pó de vidro e 5, 8 e 11% de cal de carbureto para 7 e 180 dias de cura. Com 7 dias de cura não houve o tempo necessário para que ocorressem as reações pozolânicas e os corpos de prova se deterioraram na fase de imersão. Para a determinação do peso específico aparente seco das misturas e do teor de umidade na moldagem, foi utilizada a curva de compactação obtida em Foppa (2005) que é exibida na Figura 4.16.

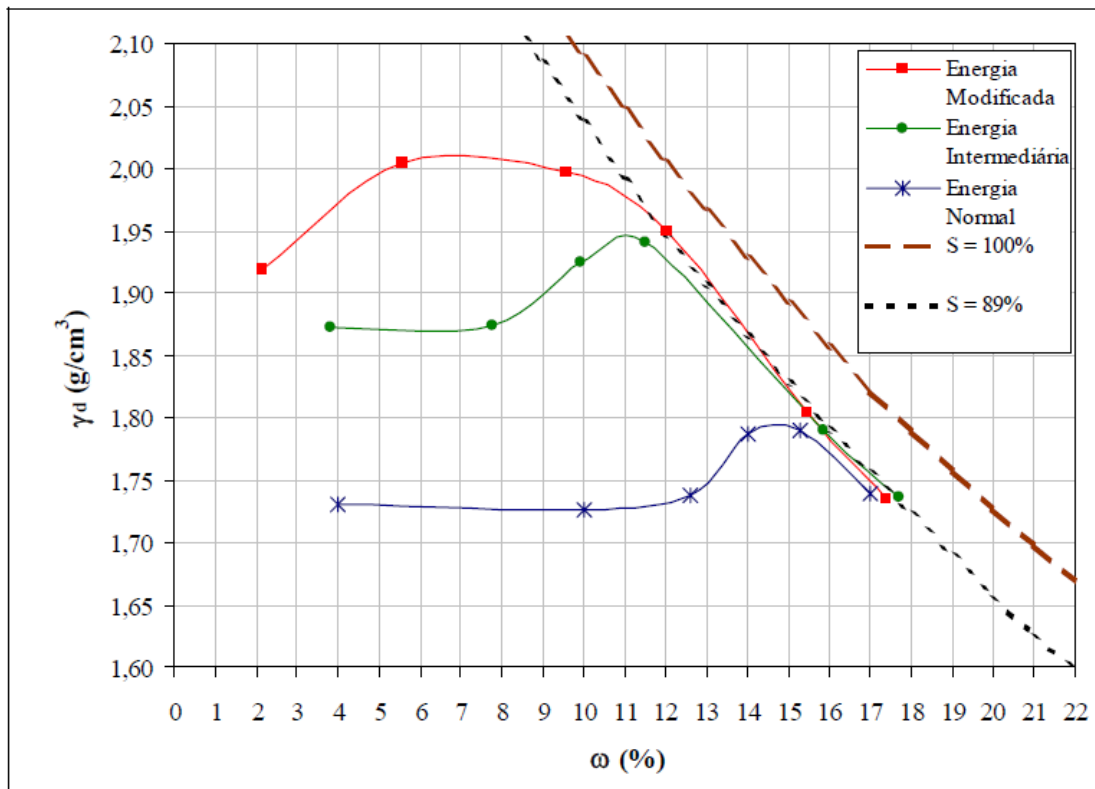


Figura 4.16: resultado do ensaio de compactação para o arenito Botucatu. (FOPPA, 2005).

Com base neste resultado, foi determinado o teor de umidade de moldagem das misturas em 11% e o peso específico aparente seco variou entre 16 kN/m<sup>3</sup> e 18 kN/m<sup>3</sup>. Foram moldadas amostras com o peso específico aparente seco igual 19 kN/m<sup>3</sup>, porém devido à grande fissuração destes elementos, estes resultados foram descartados. Na Tabela 4.8 são exibidas as misturas moldadas para os ensaios realizados.

Tabela 4.8: misturas de arenito Botucatu com pó de vidro e cal de carbureto para 180 dias de cura.

| Mistura   | % de vidro | $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) | % de cal | Mistura   | % de vidro | $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) | % de cal |
|-----------|------------|---------------------------------|----------|-----------|------------|---------------------------------|----------|
| <b>1</b>  | 10         | 15                              | 5        | <b>12</b> | 20         | 16                              | 8        |
| <b>2</b>  | 10         | 15                              | 8        | <b>13</b> | 20         | 16                              | 11       |
| <b>3</b>  | 10         | 15                              | 11       | <b>14</b> | 20         | 17                              | 8        |
| <b>4</b>  | 10         | 16                              | 5        | <b>15</b> | 30         | 15                              | 5        |
| <b>5</b>  | 10         | 16                              | 8        | <b>16</b> | 30         | 15                              | 8        |
| <b>6</b>  | 10         | 16                              | 11       | <b>17</b> | 30         | 15                              | 11       |
| <b>7</b>  | 10         | 17                              | 8        | <b>18</b> | 30         | 16                              | 5        |
| <b>8</b>  | 20         | 15                              | 5        | <b>19</b> | 30         | 16                              | 8        |
| <b>9</b>  | 20         | 15                              | 8        | <b>20</b> | 30         | 16                              | 11       |
| <b>10</b> | 20         | 15                              | 11       | <b>21</b> | 30         | 17                              | 8        |
| <b>11</b> | 20         | 16                              | 5        | -         | -          | -                               | -        |

#### 4.3.3 Misturas de areia de Osório, cinza de casca de arroz e cal de carbureto

Com o intuito de avaliar a aplicabilidade da metodologia proposta para outro tipo de mistura cimentante adicionada, foram realizados ensaios similares aos executados com vidro, ou seja, de resistência, rigidez e durabilidade com períodos de cura de 7 e 180 dias. As misturas utilizadas para a moldagem dos corpos de prova são exibidas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: misturas de arenito Botucatu com cinza de casca de arroz e cal de carbureto para 180 dias de cura.

| Mistura   | % de CCA | $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) | % de cal | Mistura   | % de CCA | $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) | % de cal |
|-----------|----------|---------------------------------|----------|-----------|----------|---------------------------------|----------|
| <b>1</b>  | 10       | 14,5                            | 5        | <b>15</b> | 20       | 15,5                            | 11       |
| <b>2</b>  | 10       | 14,5                            | 8        | <b>16</b> | 20       | 16,5                            | 5        |
| <b>3</b>  | 10       | 14,5                            | 11       | <b>17</b> | 20       | 16,5                            | 8        |
| <b>4</b>  | 10       | 15,5                            | 5        | <b>18</b> | 20       | 16,5                            | 11       |
| <b>5</b>  | 10       | 15,5                            | 8        | <b>19</b> | 30       | 14,5                            | 5        |
| <b>6</b>  | 10       | 15,5                            | 11       | <b>20</b> | 30       | 14,5                            | 8        |
| <b>7</b>  | 10       | 16,5                            | 5        | <b>21</b> | 30       | 14,5                            | 11       |
| <b>8</b>  | 10       | 16,5                            | 8        | <b>22</b> | 30       | 15,5                            | 5        |
| <b>9</b>  | 10       | 16,5                            | 11       | <b>23</b> | 30       | 15,5                            | 8        |
| <b>10</b> | 20       | 14,5                            | 5        | <b>24</b> | 30       | 15,5                            | 11       |
| <b>11</b> | 20       | 14,5                            | 8        | <b>25</b> | 30       | 16,5                            | 5        |
| <b>12</b> | 20       | 14,5                            | 11       | <b>26</b> | 30       | 16,5                            | 8        |
| <b>13</b> | 20       | 15,5                            | 5        | <b>27</b> | 30       | 16,5                            | 11       |
| <b>14</b> | 20       | 15,5                            | 8        | -         | -        | -                               | -        |

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo serão exibidos e discutidos os resultados obtidos a partir do programa experimental, detalhando os resultados das misturas de areia de Osório, vidro moído e cal de carbureto e, exibindo os resultados obtidos com outros materiais de maneira mais simplificada.

### 5.1 MISTURAS DE AREIA DE OSÓRIO, VIDRO E CAL DE CARBURETO AOS 7 DIAS DE CURA

Para a definição da metodologia de dosagem proposta no presente trabalho, a mistura chave utilizada foi a composta por areia de Osório, vidro e cal de carbureto, em diferentes quantidades, curadas com sete dias de cura. Neste subcapítulo serão exibidos os resultados dos ensaios de resistência, rigidez e durabilidade para este material.

#### 5.1.1 Resistência

Para uma melhor visualização do efeito de diferentes variáveis na mistura em questão, os resultados dos ensaios de compressão simples serão exibidos sempre colocando em evidência um fator. Primeiro será evidenciado o peso específico aparente seco, posteriormente o teor de vidro adicionado a mistura e finalmente o teor de cal de carbureto. Estes resultados são exibidos nos itens a seguir. Posteriormente serão exibidas algumas correlações em função de fatores descritos na literatura e a correlação proposta nesta tese.

##### 5.1.1.1 Resistência em função do $\gamma_d$ da mistura

Conforme esperado, quanto maiores os teores de vidro e de cal de carbureto na mistura, maior será a resistência a compressão (na faixa de valores utilizada na pesquisa). As Figuras de 5.1 a 5.4, representam o ganho de resistência a compressão das misturas, separando elas pelo seu peso específico aparente seco.

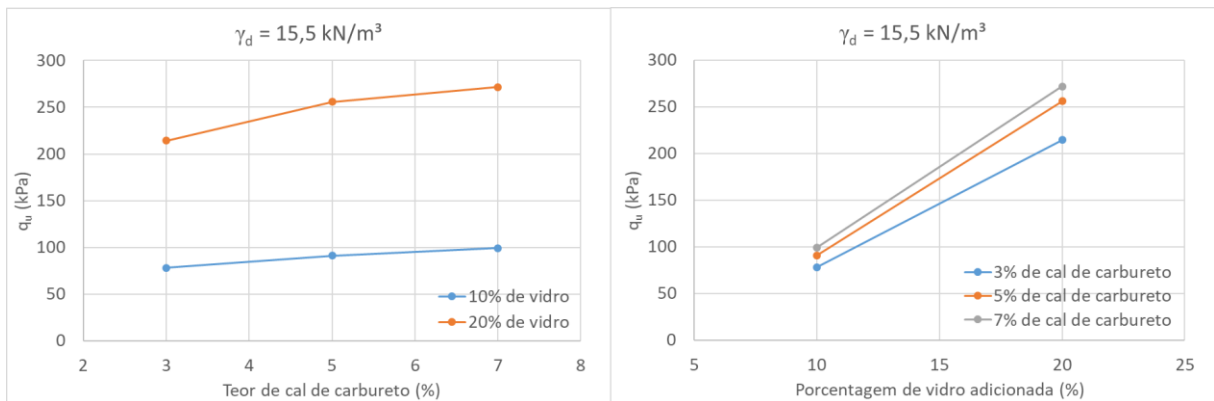


Figura 5.1:  $q_u$  da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para o  $\gamma_d = 15,5 \text{ kN/m}^3$  aos 7 dias de cura.

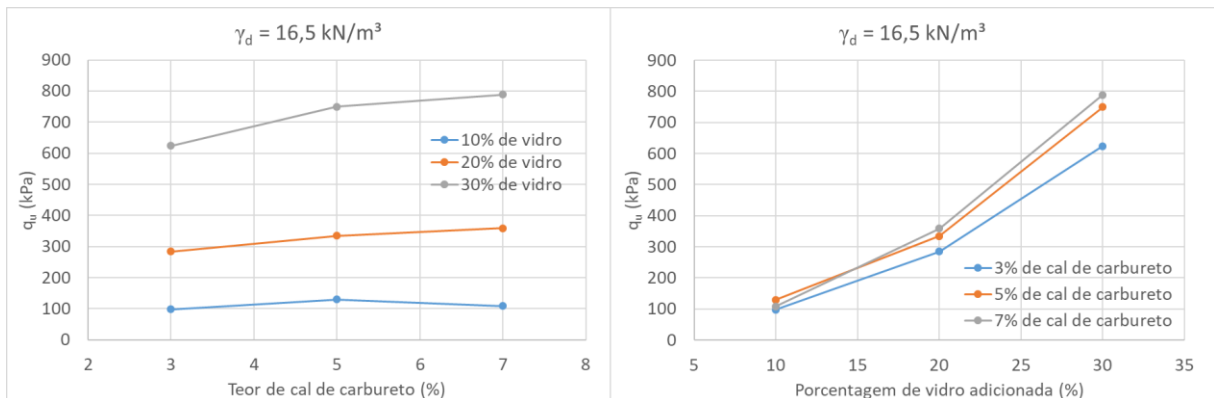


Figura 5.2:  $q_u$  da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para o  $\gamma_d = 16,5 \text{ kN/m}^3$  aos 7 dias de cura.

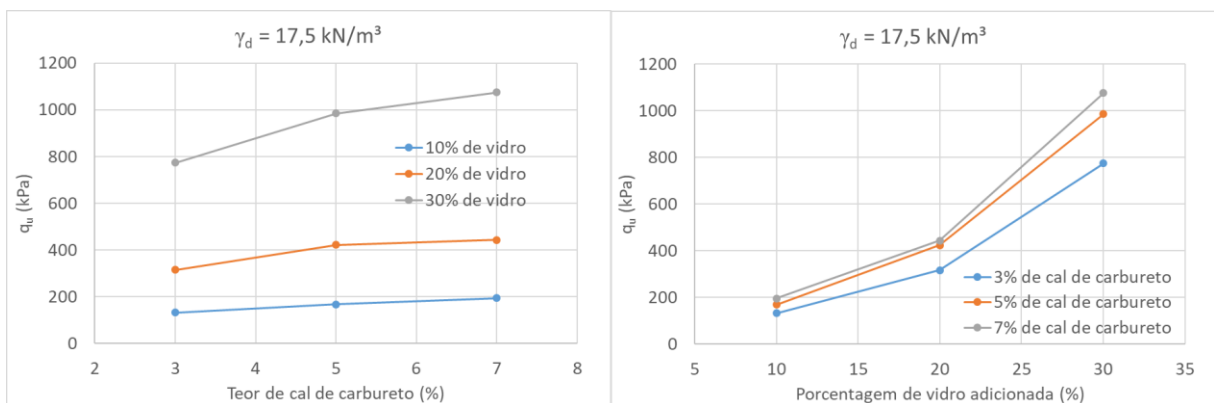


Figura 5.3:  $q_u$  da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para o  $\gamma_d = 17,5 \text{ kN/m}^3$  aos 7 dias de cura.



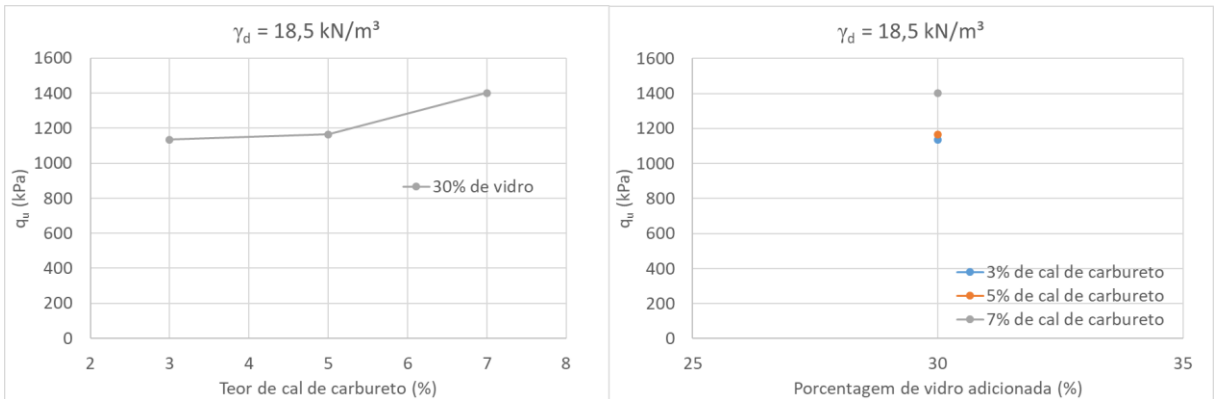


Figura 5.4:  $q_u$  da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para o  $\gamma_d = 18,5 \text{ kN/m}^3$  aos 7 dias de cura.

5.1.1.2 Resistência em função do teor de vidro da mistura

Nas Figuras de 5.5 a 5.7 é apresentada a resistência a compressão da mistura em questão, colocando em evidência o teor de vidro adicionado. Quanto maiores o  $\gamma_d$  e o teor de cal de carbureto, maior é a resistência a compressão.

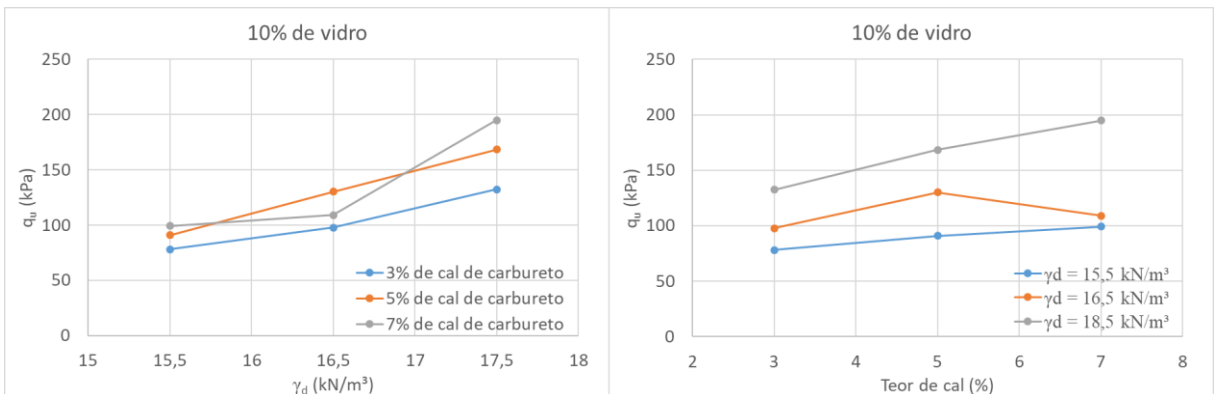


Figura 5.5:  $q_u$  da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 10% de vidro aos 7 dias de cura.

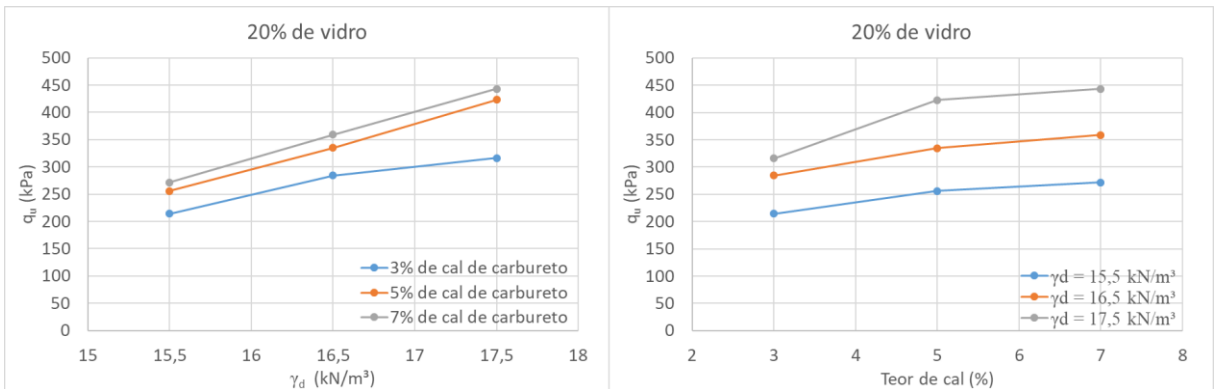


Figura 5.6:  $q_u$  da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 20% de vidro aos 7 dias de cura.

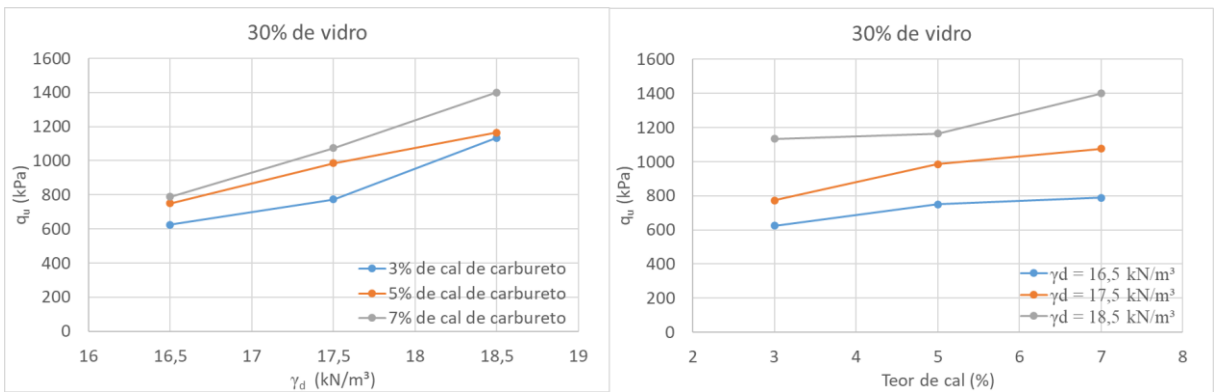


Figura 5.7:  $q_u$  da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 30% de vidro aos 7 dias de cura.

5.1.1.3 Resistência em função do teor de cal de carbureto da mistura

A resistência a compressão não confinada isolando as misturas pelo teor de cal de carbureto adicionado nestas é exibida nas Figuras de 5.8 a 5.10. é possível visualizar que quanto maiores o  $\gamma_d$  e o teor de vidro, maior a resistência a compressão.

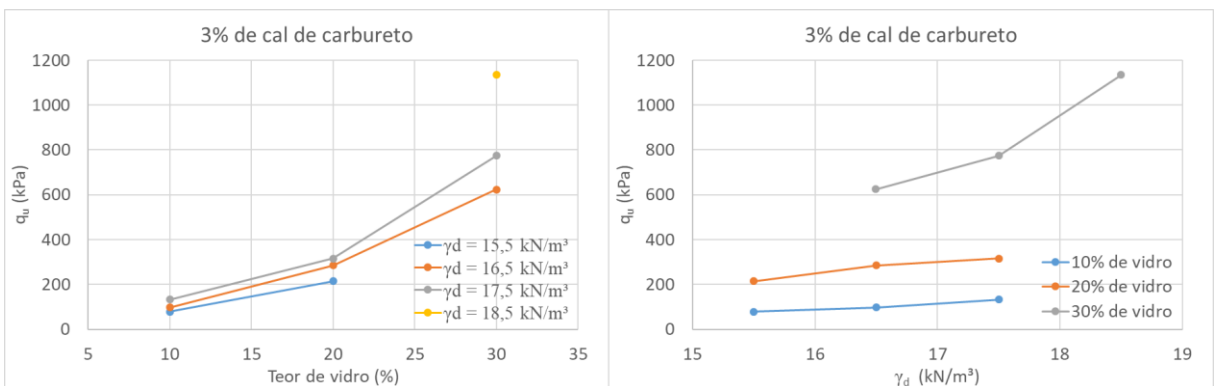


Figura 5.8:  $q_u$  da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 3% de cal aos sete dias de cura.

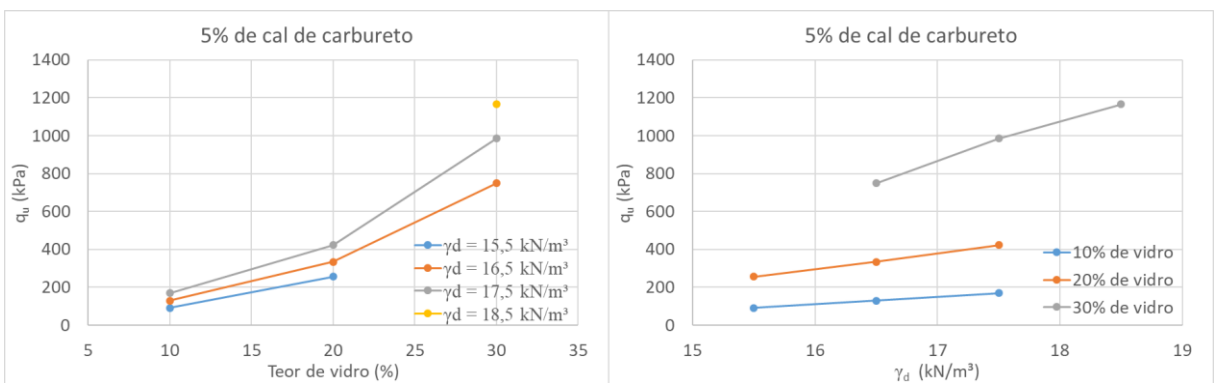


Figura 5.9:  $q_u$  da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 5% de cal aos sete dias de cura.

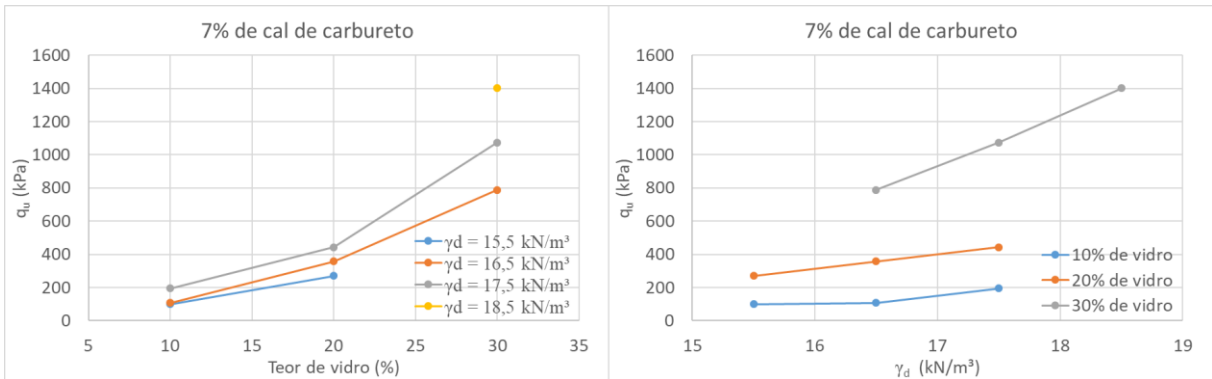


Figura 5.10:  $q_u$  da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 7% de cal aos sete dias de cura.

5.1.1.4 Resistência em função do fator  $\eta/L_{iv}$

Conforme obtido em Consoli et al. (2011a), foi possível correlacionar a resistência a compressão do solo artificialmente cimentado em questão, com a adição de vidro moído e cal de carbureto com o fator  $\eta/L_{iv}$ , com a utilização do expoente 0,11. O expoente externo encontrado na equação obtida é muito próximo para os três teores de vidro, condizendo com o que é descrito em Consoli et al. (2011b). Este resultado é exibido na Figura 5.11.

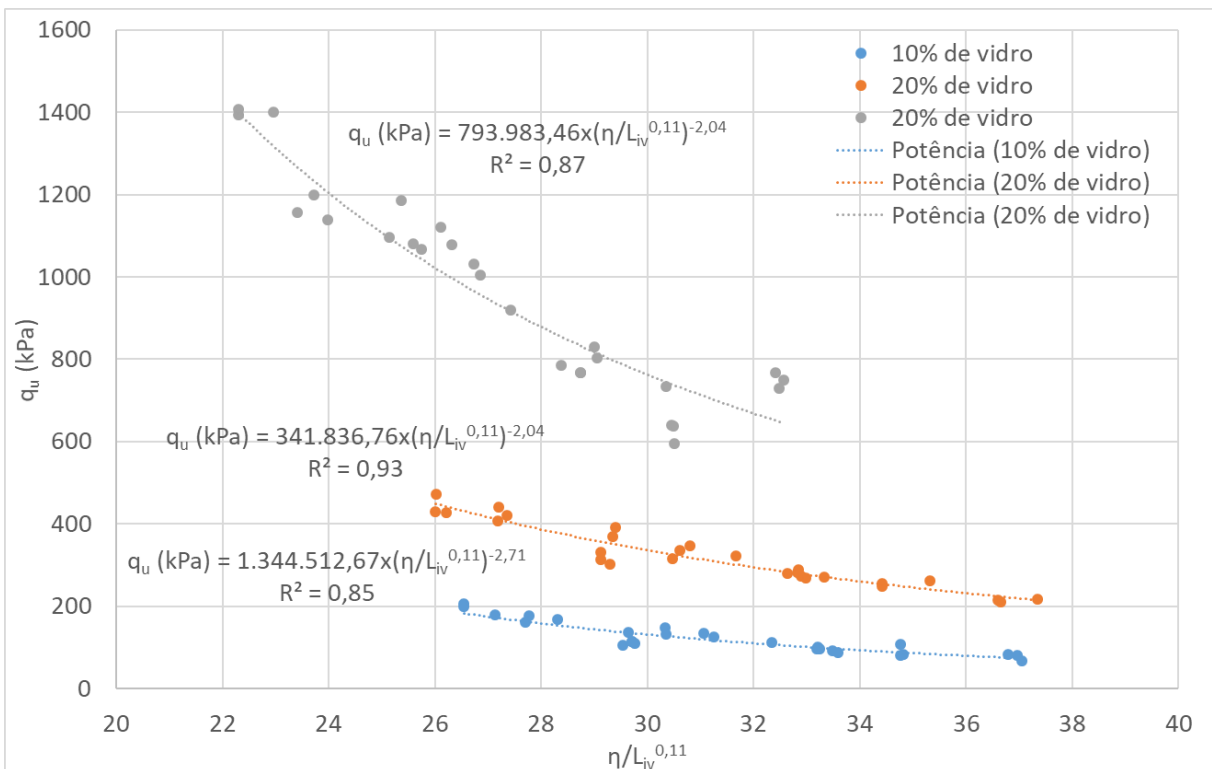


Figura 5.11:  $q_u$  em função do fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$  para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para sete dias de cura.

Conforme obtido em Consoli et al. (2016b), Consoli et al. (2017a) e Consoli et al. (2017b), é possível normalizar estas curvas em uma única dividindo a resistência a compressão ( $q_u$ ) pela resistência a compressão que cada um destes solos teria para um determinado  $\eta/L_{iv}^{0,11}$ . A Figura 5.12 exibe esta normalização dividindo o  $q_u$  pelo  $q_u$  para um  $\eta/L_{iv}^{0,11}=30$  para cada uma das curvas obtidas na Figura 5.11. Fica evidente a possibilidade de normalizar estas equações utilizando a metodologia descrita para a mistura em questão.

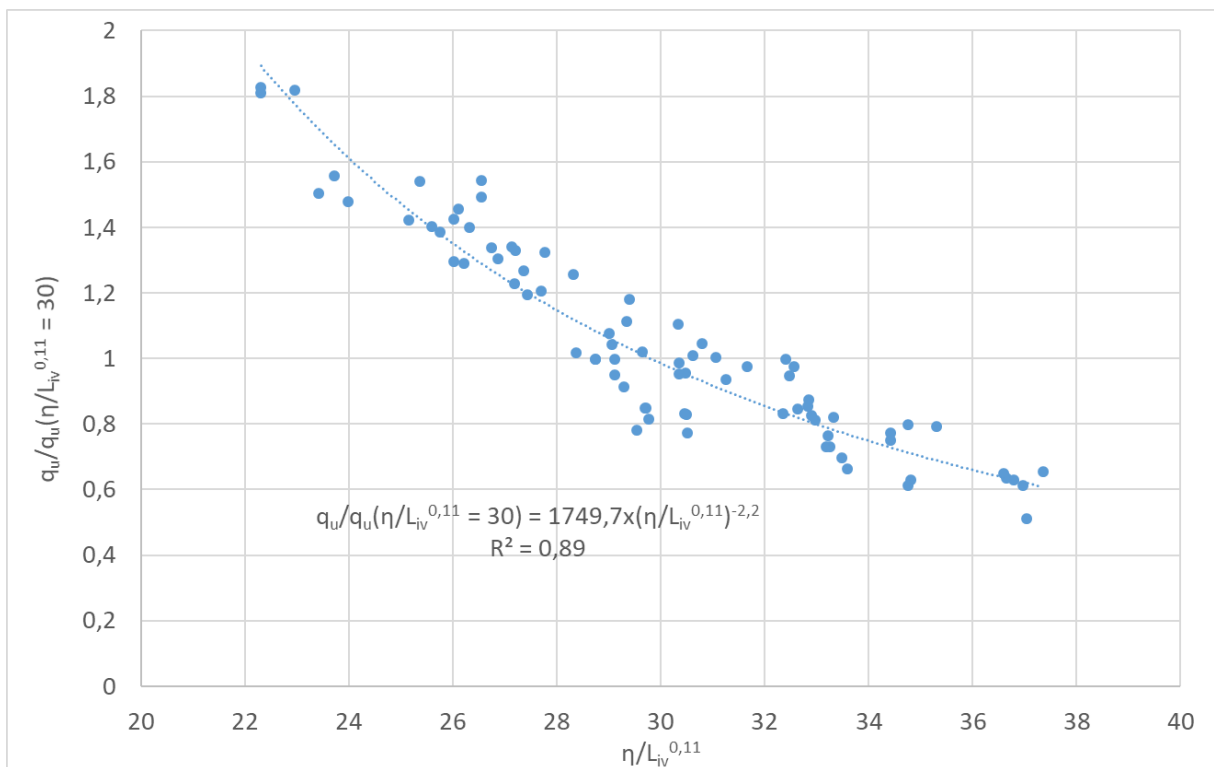


Figura 5.12:  $q_u/q_u(\eta/L_{iv}^{0,11}=30)$  em função do  $\eta/L_{iv}^{0,11}$  para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para sete dias de cura.

#### 5.1.1.5 Resistência em função do fator $\eta/B_{iv}$

É proposta nesta tese uma metodologia de análise do comportamento nunca antes verificada. Como bem conhecido na literatura, quando adicionadas em um solo arenoso, as cales não possuem sílica ou alumina em estado amorfo para reagirem e formarem os silicatos ou aluminatos de cálcio hidratado. Neste caso, a adição de uma sílica em estado amorfo, juntamente com a cal, é semelhante, em outras proporções, a adição de cimento Portland no material. Sendo assim, foi proposto o fator  $B_{iv}$ , que representa o teor volumétrico de agente cimentante na mistura, ou seja, o teor volumétrico de cal mais o teor volumétrico de pó vidro ou outra pozolana adicionada. É gerado então o fator  $\eta/B_{iv}$ , que com a utilização do expoente

0,28 (o mesmo utilizado para misturas de solos artificialmente cimentados com cimento Portland) no teor volumétrico de cimento, gerou uma ótima correlação com a resistência a compressão do material e o resultado pode ser verificado na Figura 5.13. O expoente externo -4,31 se aproxima bastante do valor teórico proposto por Diambra et al. (2017) para o  $\eta/C_{iv}$ , que é aproximadamente -3,6.

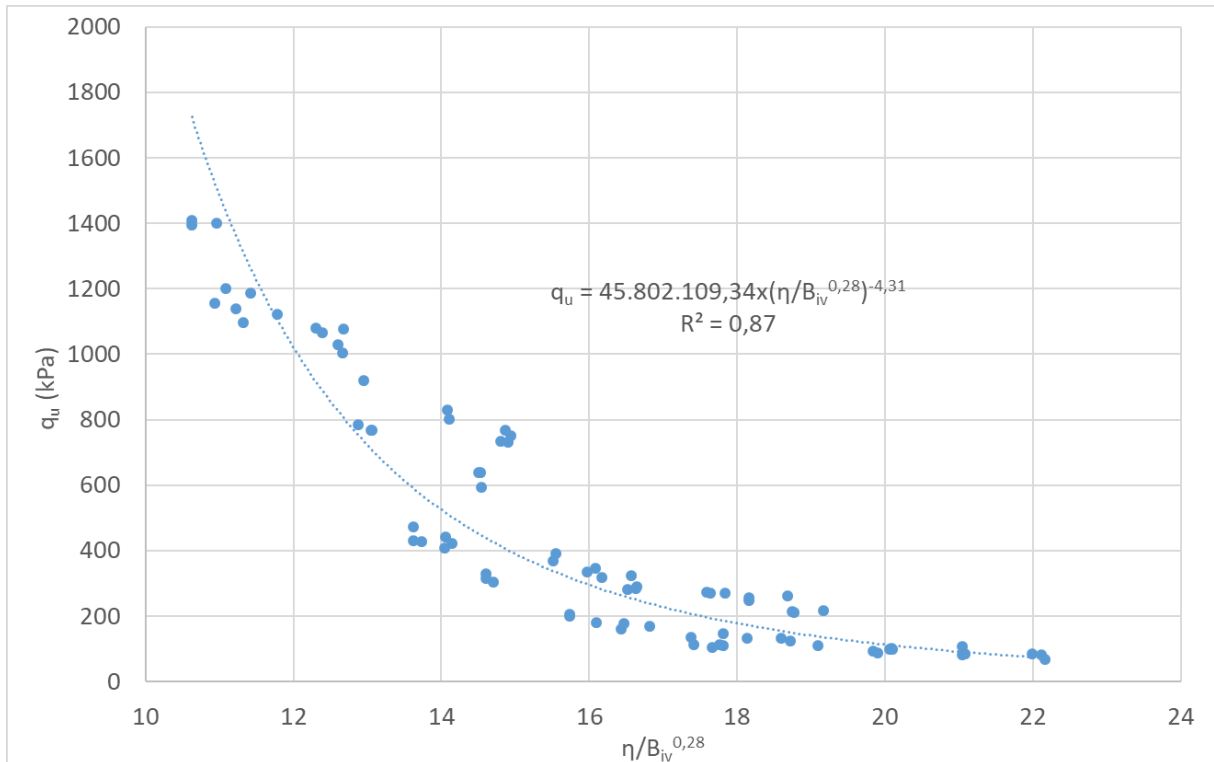


Figura 5.13:  $q_u$  em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para sete dias de cura.

### 5.1.2 Rigidez

Para uma melhor visualização do efeito de diferentes variáveis na mistura em questão, os resultados dos ensaios de medidas de velocidade das ondas ultrassônicas com o equipamento *Pundit Lab* serão exibidos em função do módulo cisalhante a pequenas deformações ( $G_0$ ). Para uma melhor exibição dos resultados é colocado em evidência um fator, primeiro o peso específico aparente seco, posteriormente o teor de vidro adicionado a mistura e finalmente o teor de cal de carbureto. Estes resultados são exibidos nos itens a seguir. Na sequência do trabalho serão exibidas algumas correlações em função de fatores descritos na literatura e a proposta nesta tese.

### 5.1.2.1 Rigidez em função do $\gamma_d$ da mistura

Conforme esperado, dentro dos limites do programa experimental, quanto maiores o teor de vidro e o teor de cal de carbureto adicionados, maior foi a rigidez. Estes resultados são expostos nas Figuras de 5.14 a 5.17.

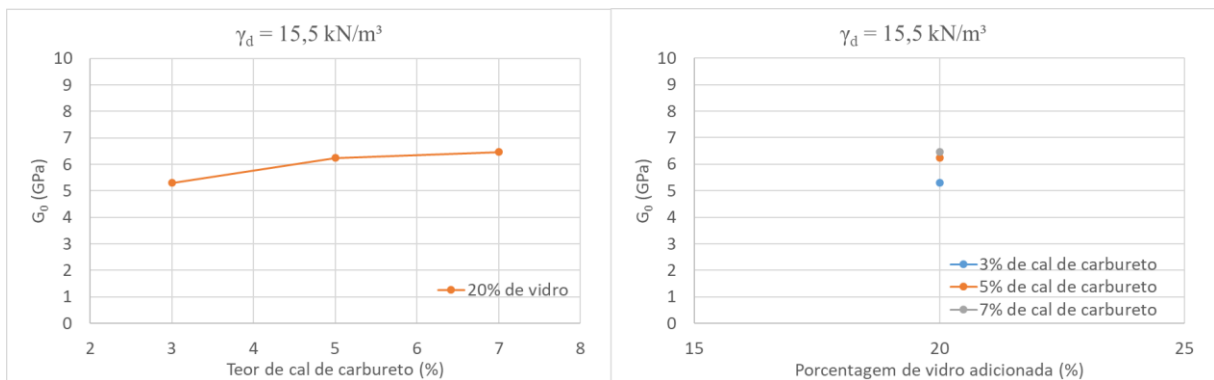


Figura 5.14:  $G_0$  da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para o  $\gamma_d = 15,5$   $\text{kN/m}^3$  para os sete dias de cura.

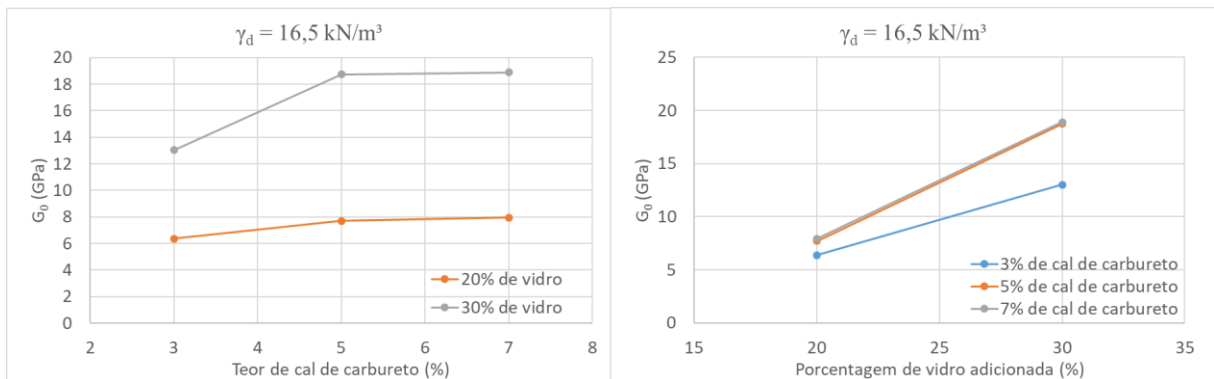


Figura 5.15:  $G_0$  da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para o  $\gamma_d = 16,5$   $\text{kN/m}^3$  para os sete dias de cura.

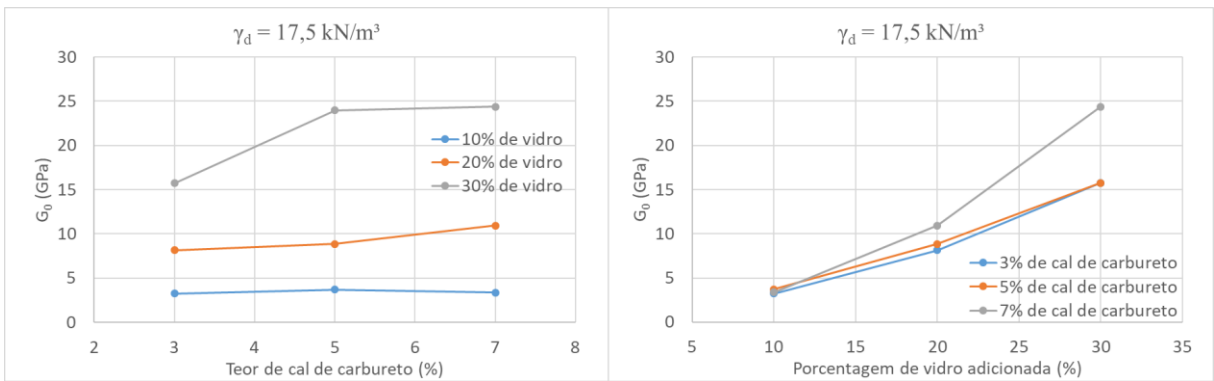


Figura 5.16:  $G_0$  da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para o  $\gamma_d = 17,5 \text{ kN/m}^3$  para os sete dias de cura.

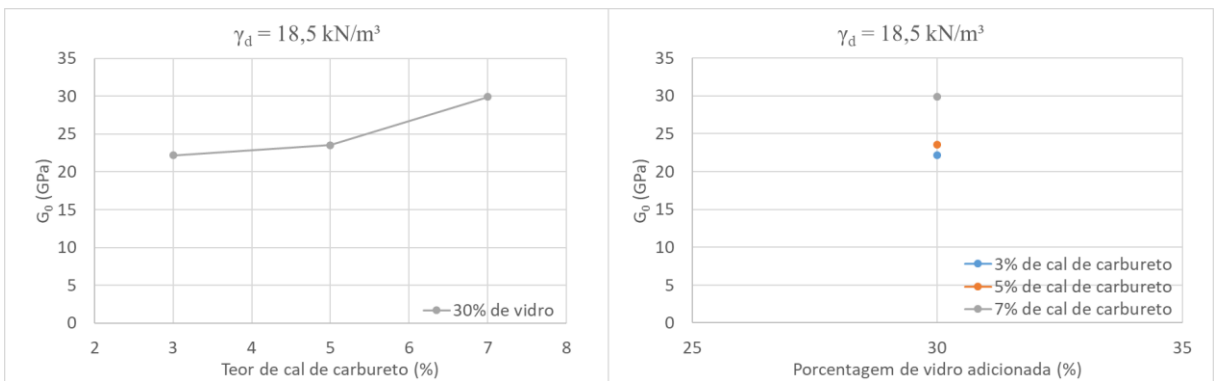


Figura 5.17:  $G_0$  da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para o  $\gamma_d = 18,5 \text{ kN/m}^3$  para os sete dias de cura.

### 5.1.2.2 Rigidez em função do teor de vidro da mistura

Nas Figuras de 5.18 a 5.20 é exposta a rigidez das misturas em questão colocando em evidência o teor de vidro adicionado. Quanto maiores o  $\gamma_d$  inicial e o teor de cal de carbureto, maior é a rigidez (nas faixas de valores testados na pesquisa).

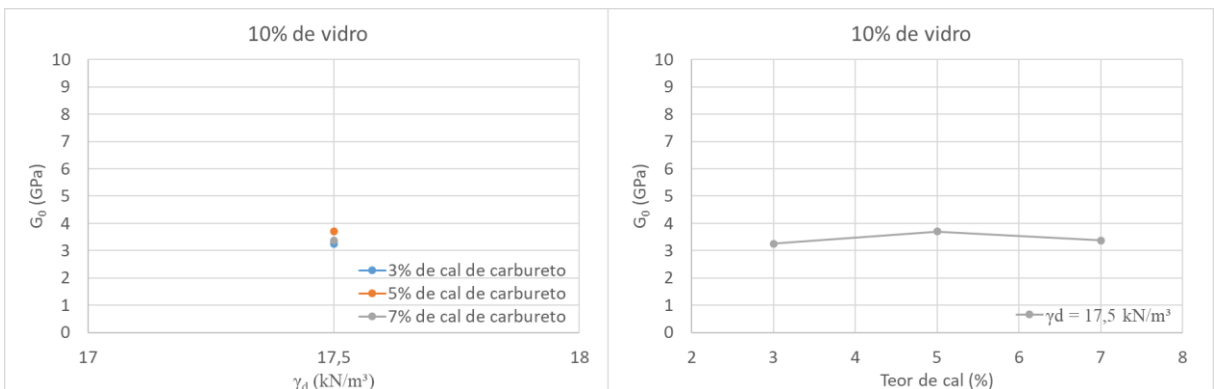


Figura 5.18:  $G_0$  da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 10% de vidro para os sete dias de cura.

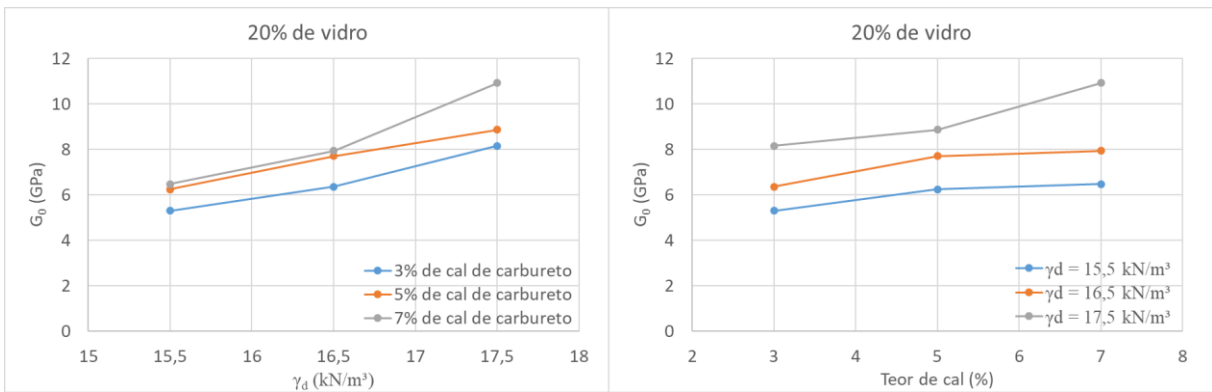


Figura 5.19: G<sub>0</sub> da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 20% de vidro para os sete dias de cura.

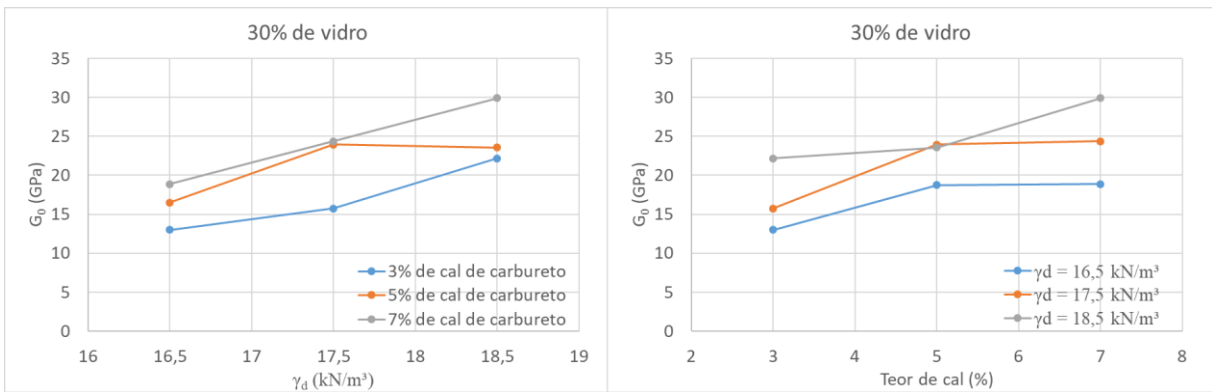


Figura 5.20: G<sub>0</sub> da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 30% de vidro para os sete dias de cura.

### 5.1.2.3 Rigidez em função do teor de cal de carbureto da mistura

Conforme exibido nas Figuras de 5.21 a 5.24, a rigidez deste solo artificialmente cimentado cresce conforme aumenta os teores de vidro e  $\gamma_d$  do mesmo (na faixa de valores utilizada na pesquisa).

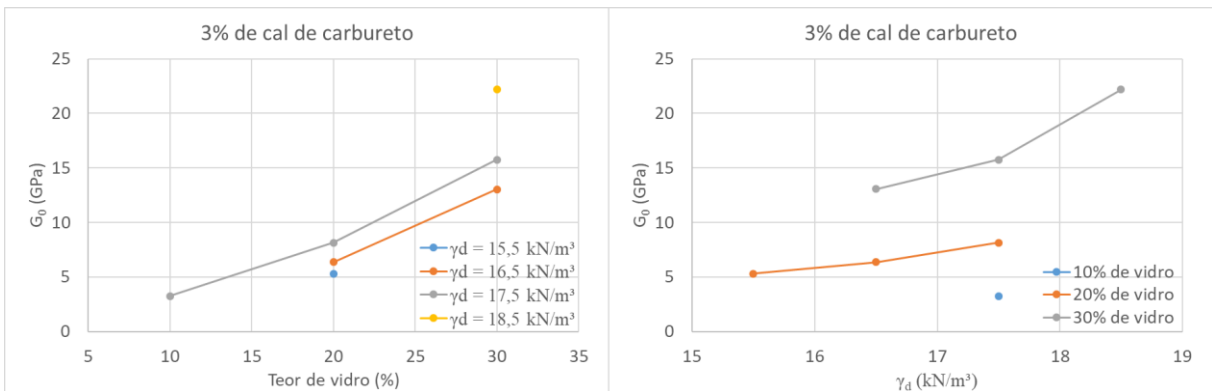


Figura 5.21: G<sub>0</sub> da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 3% de cal, para os sete dias de cura.



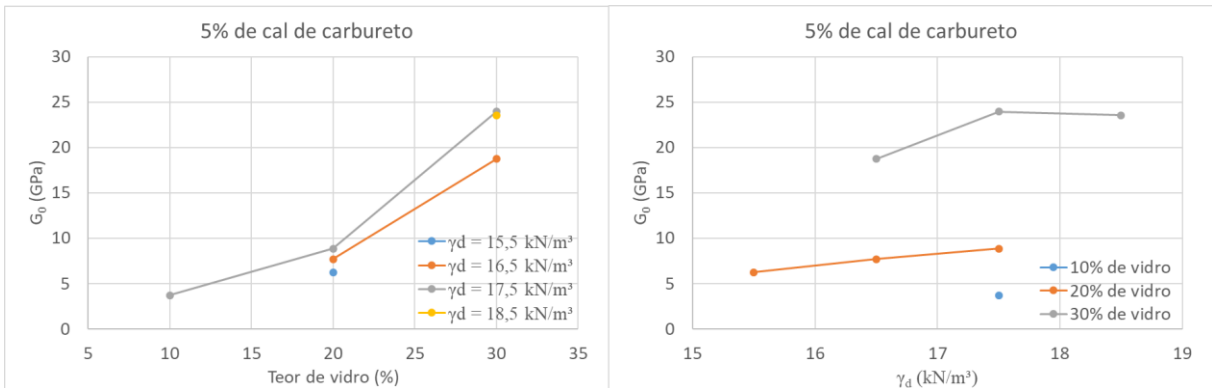


Figura 5.22: G<sub>0</sub> da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 5% de cal, para os sete dias de cura.

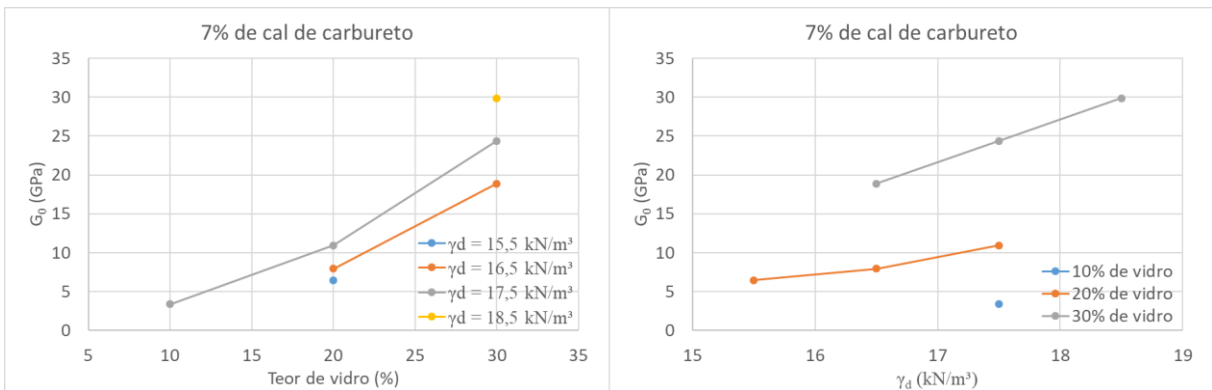


Figura 5.23: G<sub>0</sub> da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para 7% de cal, isolando o  $\gamma_d$ .

#### 5.1.2.4 Rigidez em função do fator $\eta/L_{iv}$

O módulo cisalhante a pequenas deformações ( $G_0$ ) se mostrou função do fator  $\eta/L_{iv}$  com um comportamento bem definido. Na Figura 5.24 é possível visualizar o  $G_0$  em função do fator  $\eta/L_{iv}$  utilizando o expoente 0,11 no teor volumétrico de cimento. Apesar de não ter uma precisão tão grande quanto a resistência, o comportamento do material pode ser descrito pelas equações exibidas na Figura citada. Não foi possível realizar medidas de rigidez para as misturas com 10% de vidro devido a rigidez destes materiais sair da faixa de trabalho do equipamento de leitura. É possível verificar que o expoente externo é muito próximo para as duas curvas, fato este que é bem consolidado na literatura.

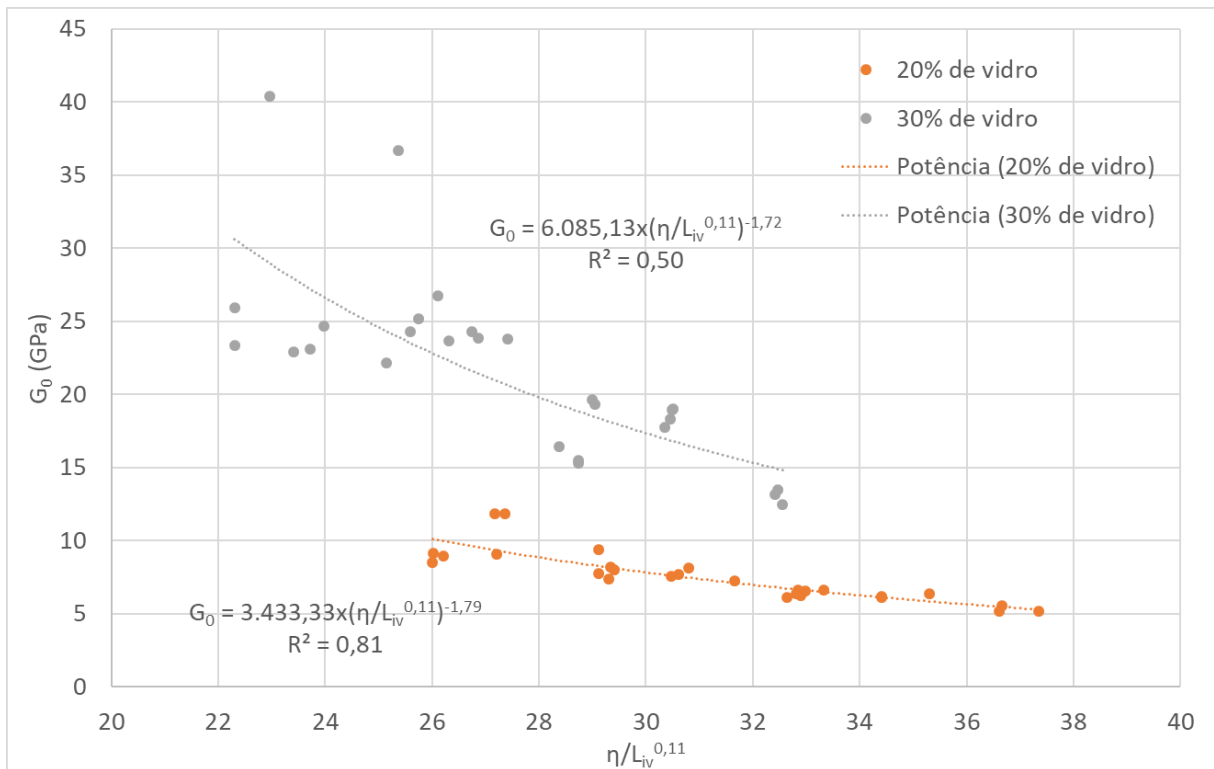


Figura 5.24:  $G_0$  em função do fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$  para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para sete dias de cura.

#### 5.1.2.5 Rigidez em função do fator $\eta/B_{iv}$

Correlacionar o módulo cisalhante a pequenas deformações ( $G_0$ ) com o fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  se mostrou válido. Não houve a precisão encontrada nos ensaios de compressão simples, porém foi obtida a correlação exibida na Figura 5.25. Inclusive o expoente externo (aproximadamente -3,15) também se assemelha ao expoente obtido por Diambra et al. (2017) para a resistência a compressão (aproximadamente -3,7).

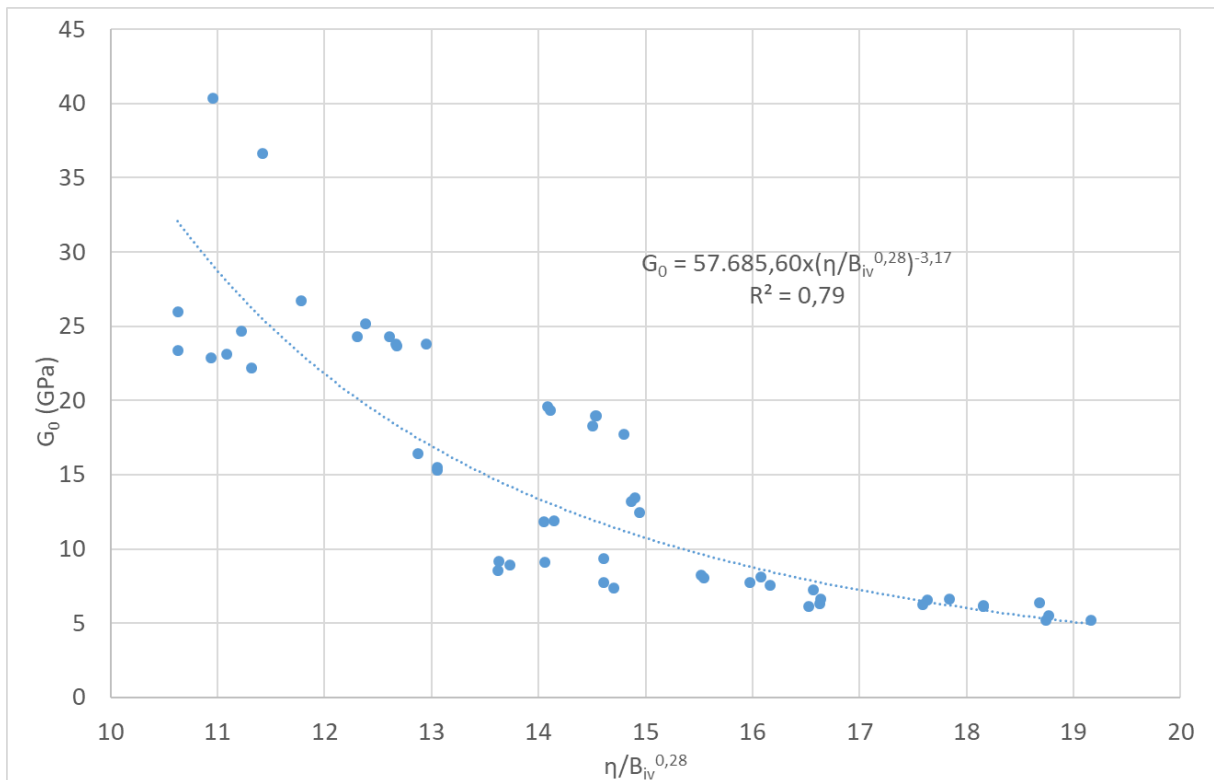


Figura 5.25:  $G_0$  em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto aos sete dias de cura.

### 5.1.3 Durabilidade

A durabilidade das misturas foi avaliada com ciclos de molhagem e secagem conforme explicitado no programa experimental. Este fator será exibido nos próximos itens de duas maneiras, a primeira evidenciando a perda de massa média em cada ciclo do ensaio, e a segunda evidenciando a perda de massa acumulada no final dos doze ciclos do ensaio. Estes dados serão exibidos em função do  $\gamma_d$  da mistura, do teor de vidro, do teor de cal de carbureto, da resistência, rigidez e de correlações propostas.

#### 5.1.3.1 Durabilidade em função do $\gamma_d$ da mistura

A perda de massa por ciclo e a perda de massa para a areia de Osório artificialmente cimentada com pó de vidro e cal de carbureto podem ser visualizadas nas Figuras de 5.26 a 5.29, onde estas foram separadas a partir do seu peso específico aparente seco. Para todos os casos, na faixa de valores testada, quanto maiores o teor de vidro e o teor de cal de carbureto adicionados, mais durável é este material. É possível visualizar a perda de massa quase nula dos corpos de prova com o  $\gamma_d$  igual a 18,5 kN/m<sup>3</sup> e a grande perda de massa obtida nas

misturas com  $\gamma_d = 15,5$ . Fica claro que, para este período de cura, este peso específico aparente seco igual a  $15,5\text{kN/m}^3$  não se mostrou satisfatório.

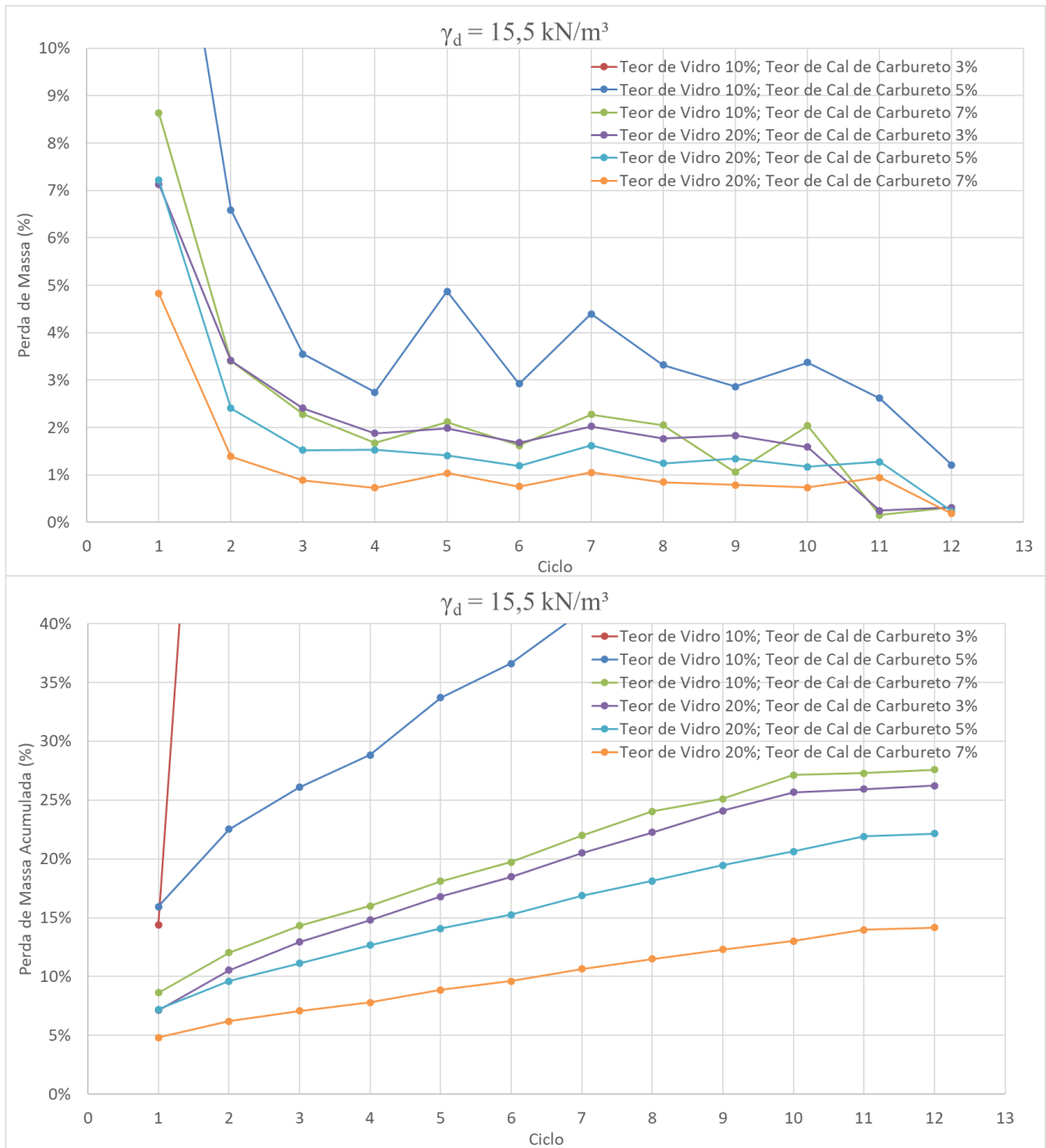


Figura 5.26: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com  $\gamma_d = 15,5 \text{ kN/m}^3$  para sete dias de cura.

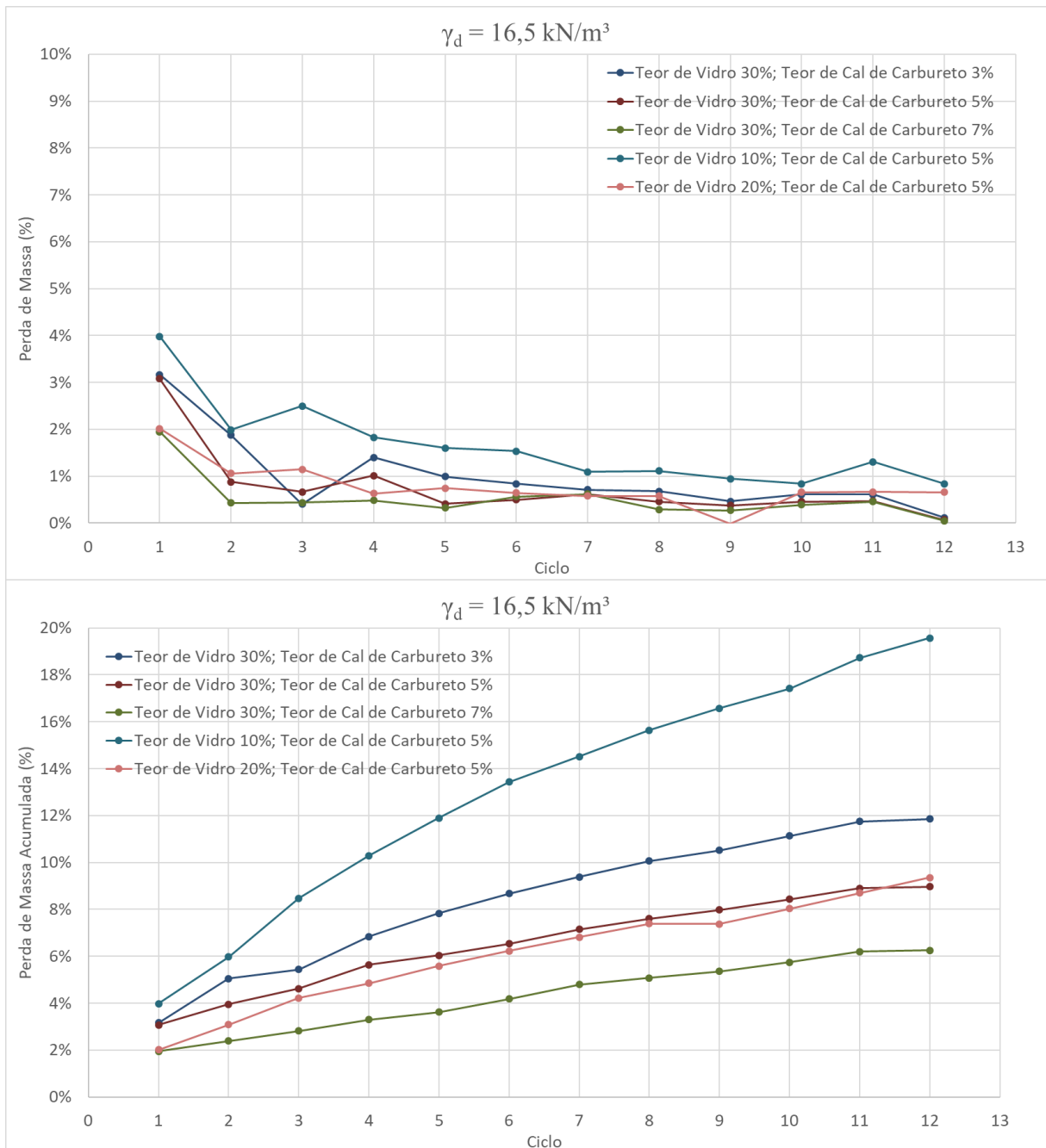


Figura 5.27: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com  $\gamma_d = 16,5 \text{ kN/m}^3$  para sete dias de cura.

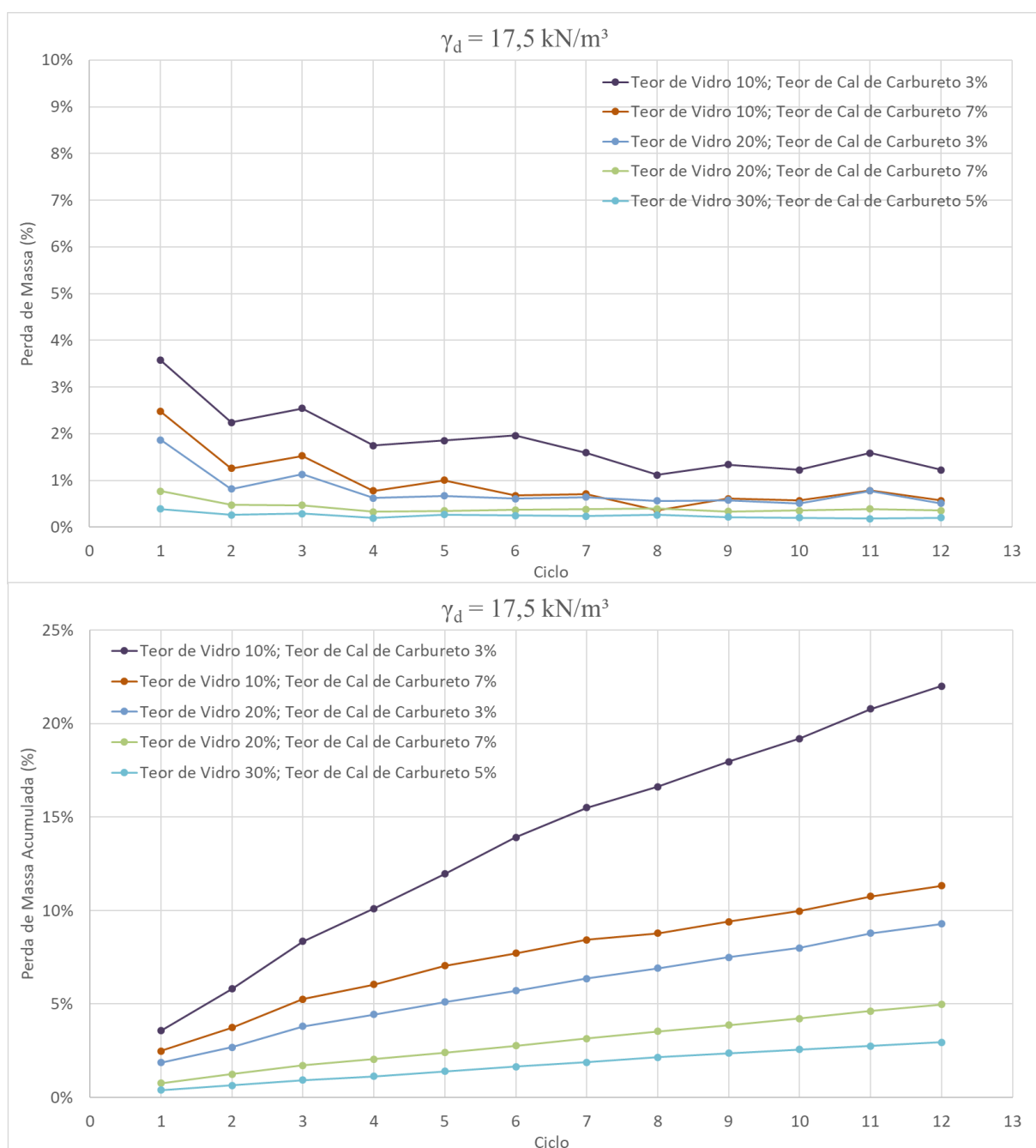


Figura 5.28: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com  $\gamma_d = 17,5 \text{ kN/m}^3$  para sete dias de cura.

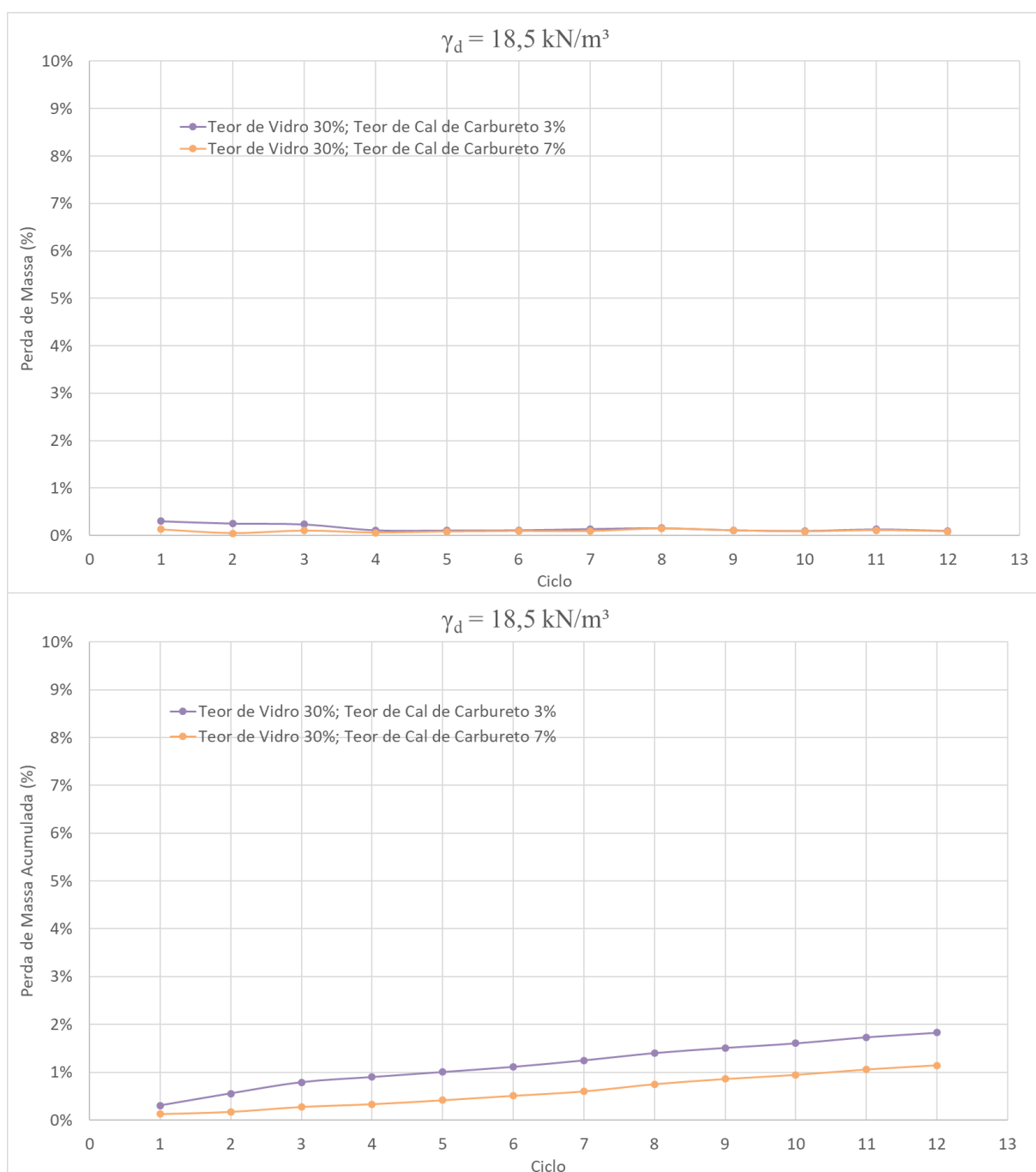


Figura 5.29: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com  $\gamma_d = 18,5 \text{ kN/m}^3$  para sete dias de cura.

### 5.1.3.2 Durabilidade em função do teor de vidro da mistura

Nas Figuras de 5.30 a 5.32 são exibidos os resultados do ensaio de durabilidade separando as amostras pelo seu teor de vidro adicionado. É possível visualizar que quanto maiores o  $\gamma_d$  e o teor de cal de carbureto, maior a durabilidade da mistura. Todas as amostras com 10% de vidro tiveram perda de massa acumulada maior que 10%, indicando que, para este período de cura, este traço não é satisfatório.

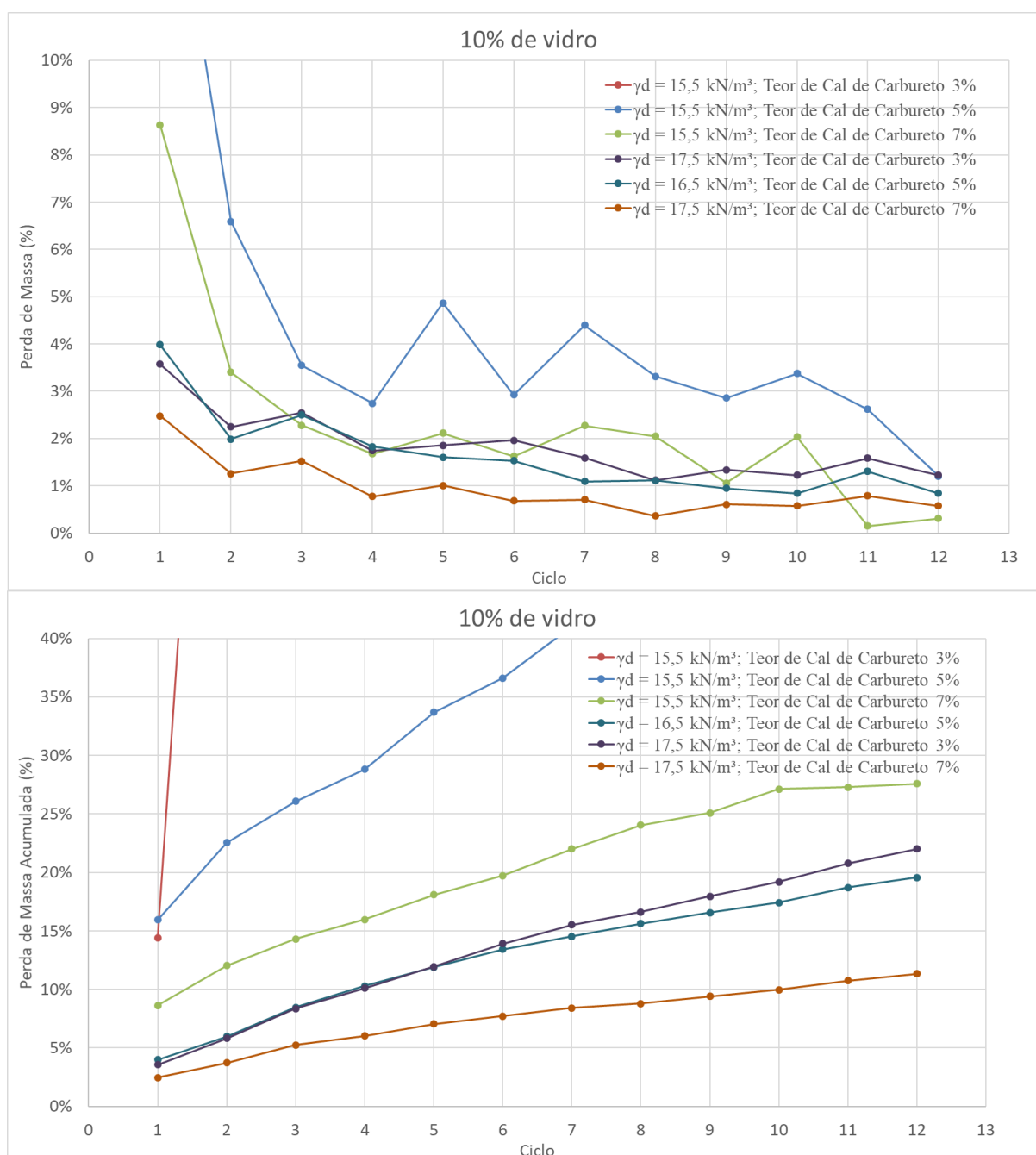


Figura 5.30: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com 10% de vidro para sete dias de cura.



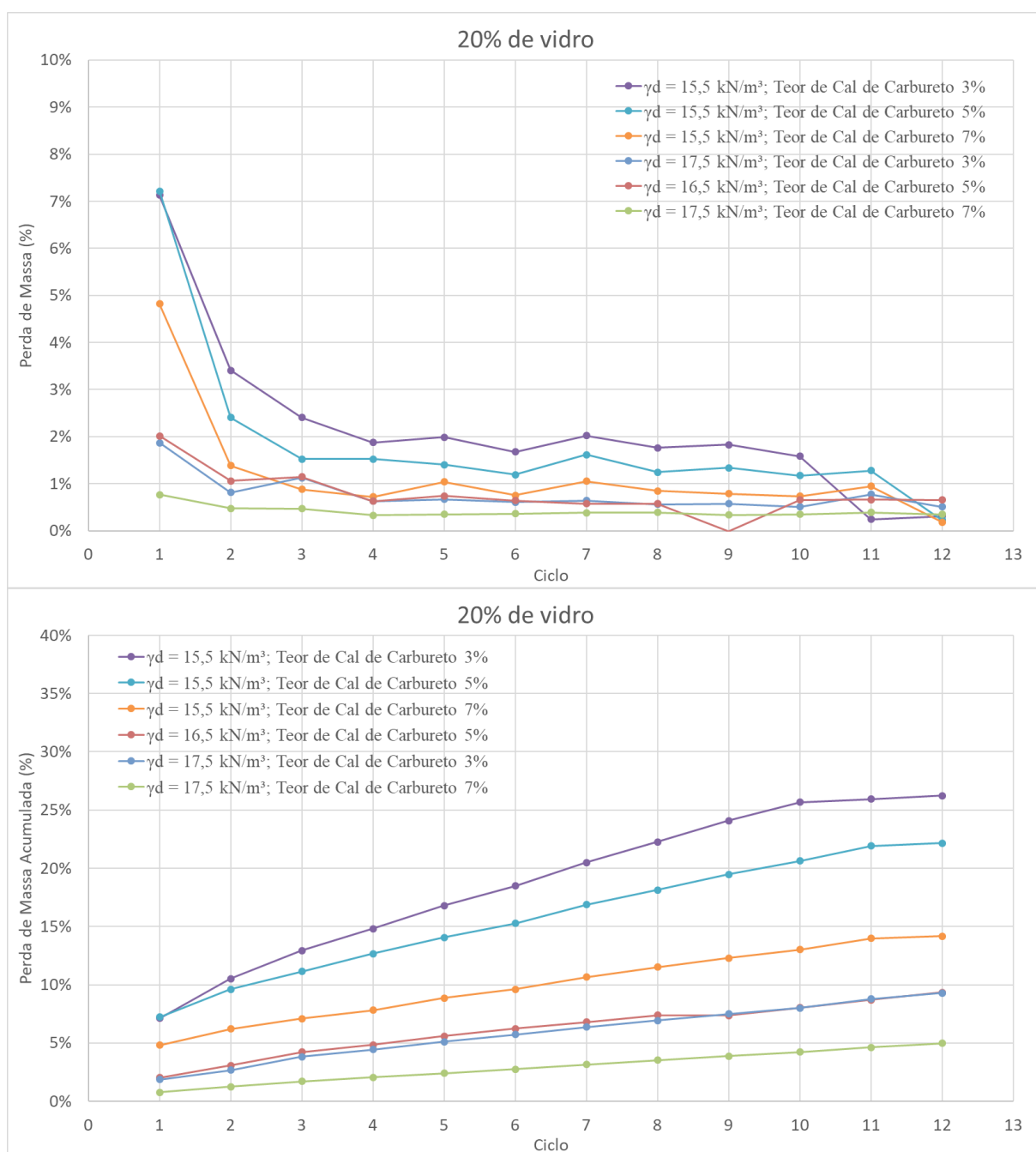


Figura 5.31: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com 20% de vidro para sete dias de cura.

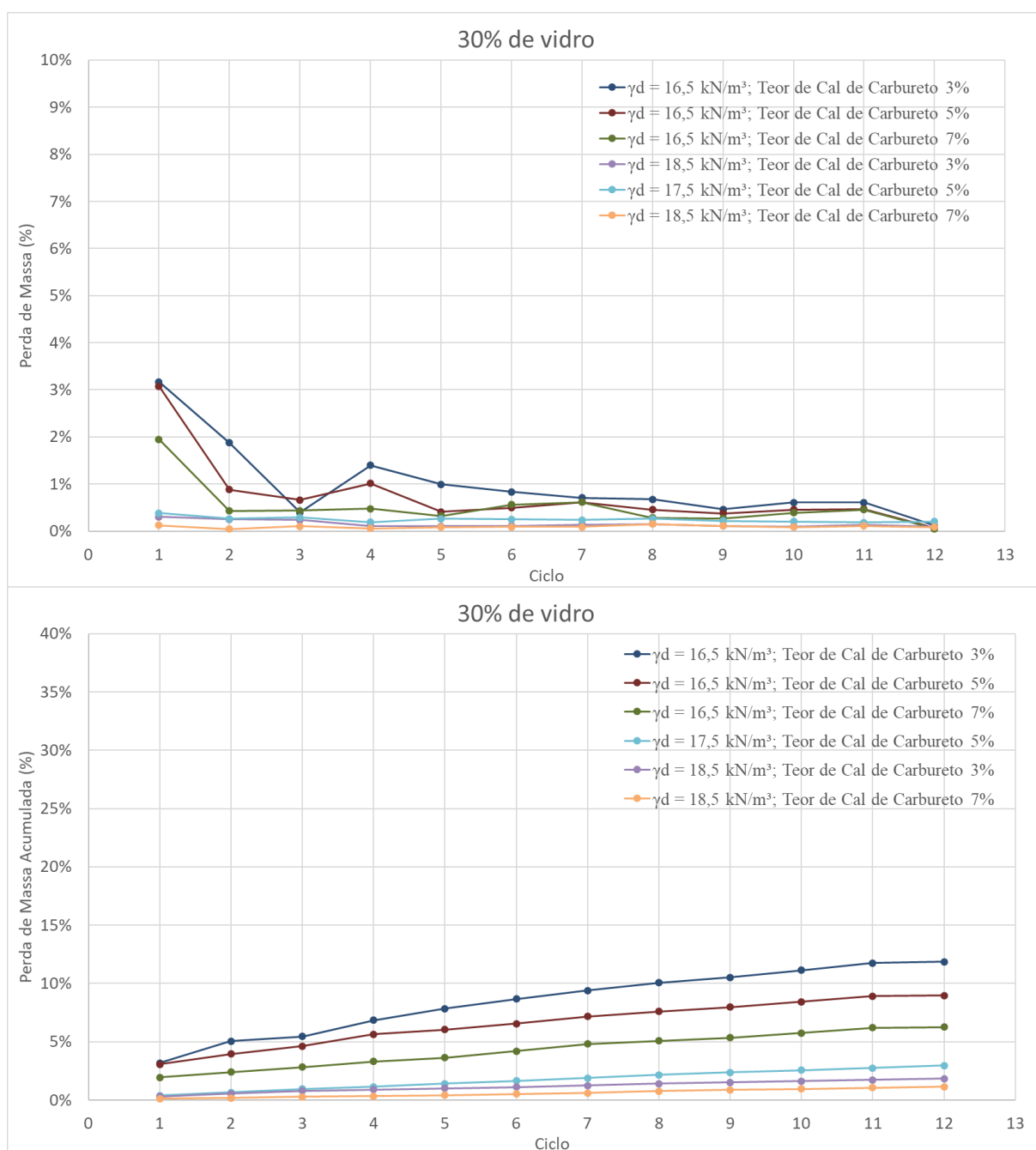


Figura 5.32: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com 30% de vidro para sete dias de cura.

### 5.1.3.3 Durabilidade em função do teor de cal de carbureto da mistura

Nas Figuras de 5.33 a 5.35 são exibidos os resultados dos ensaios de durabilidade para a mistura areia de Osório, vidro moído e cal de carbureto, para 7 dias de cura, separados pelo teor de cal. É possível visualizar que, quanto maiores o teor de vidro e o  $\gamma_d$  da mistura, maior a durabilidade do material, para as faixas de valores testados.

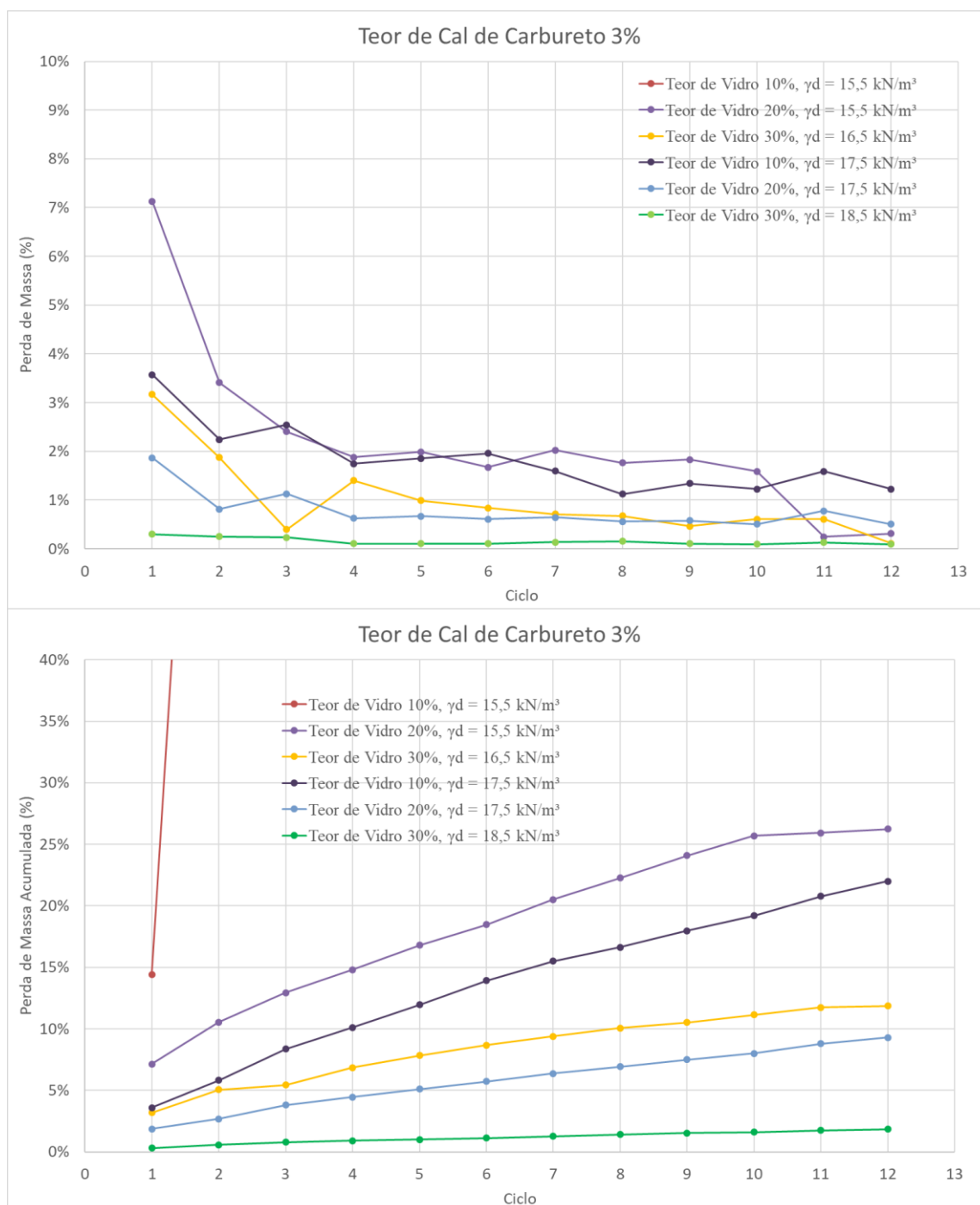


Figura 5.33: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com 3% de cal de carbureto para sete dias de cura.

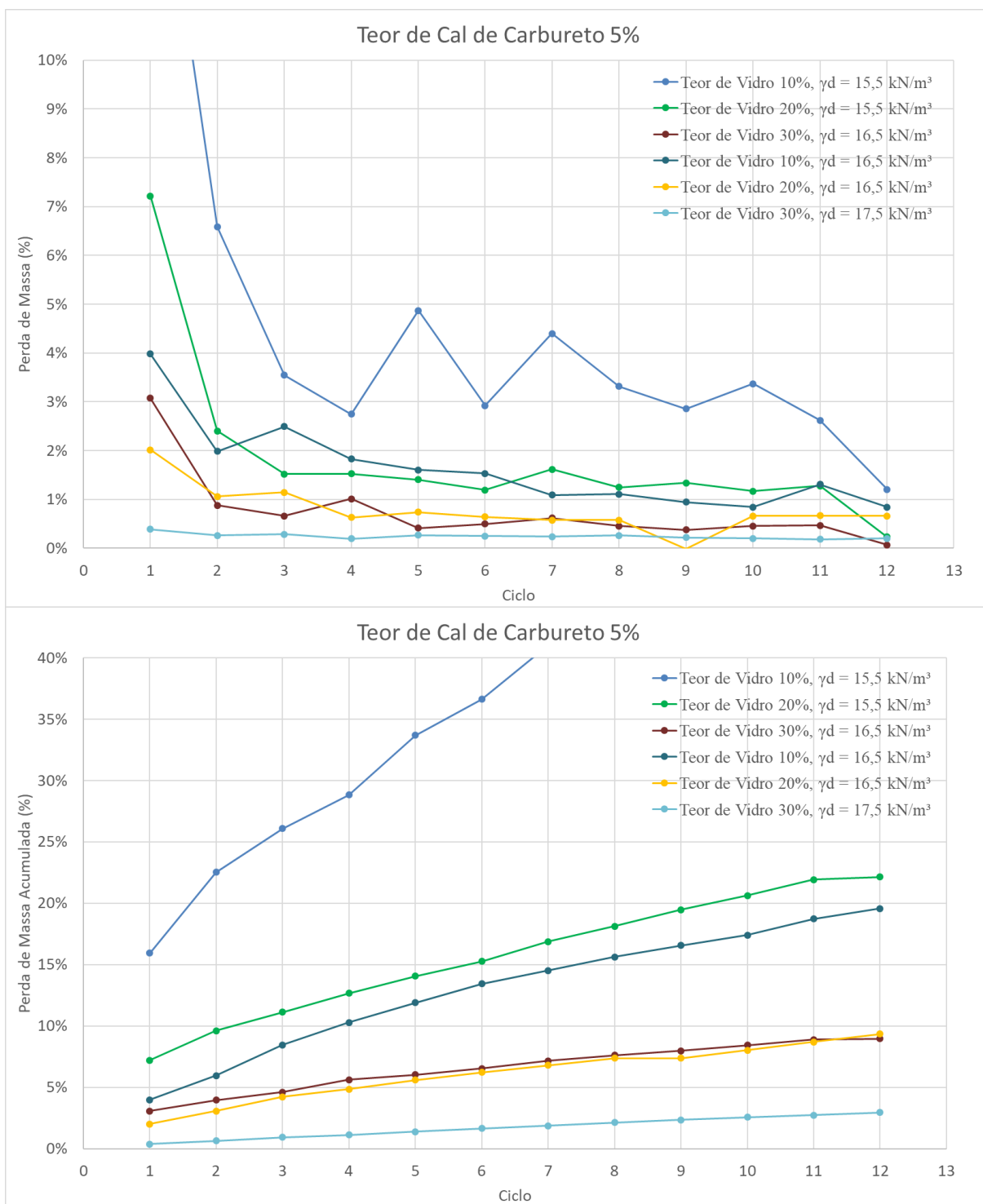


Figura 5.34: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com 5% de cal de carbureto para sete dias de cura.

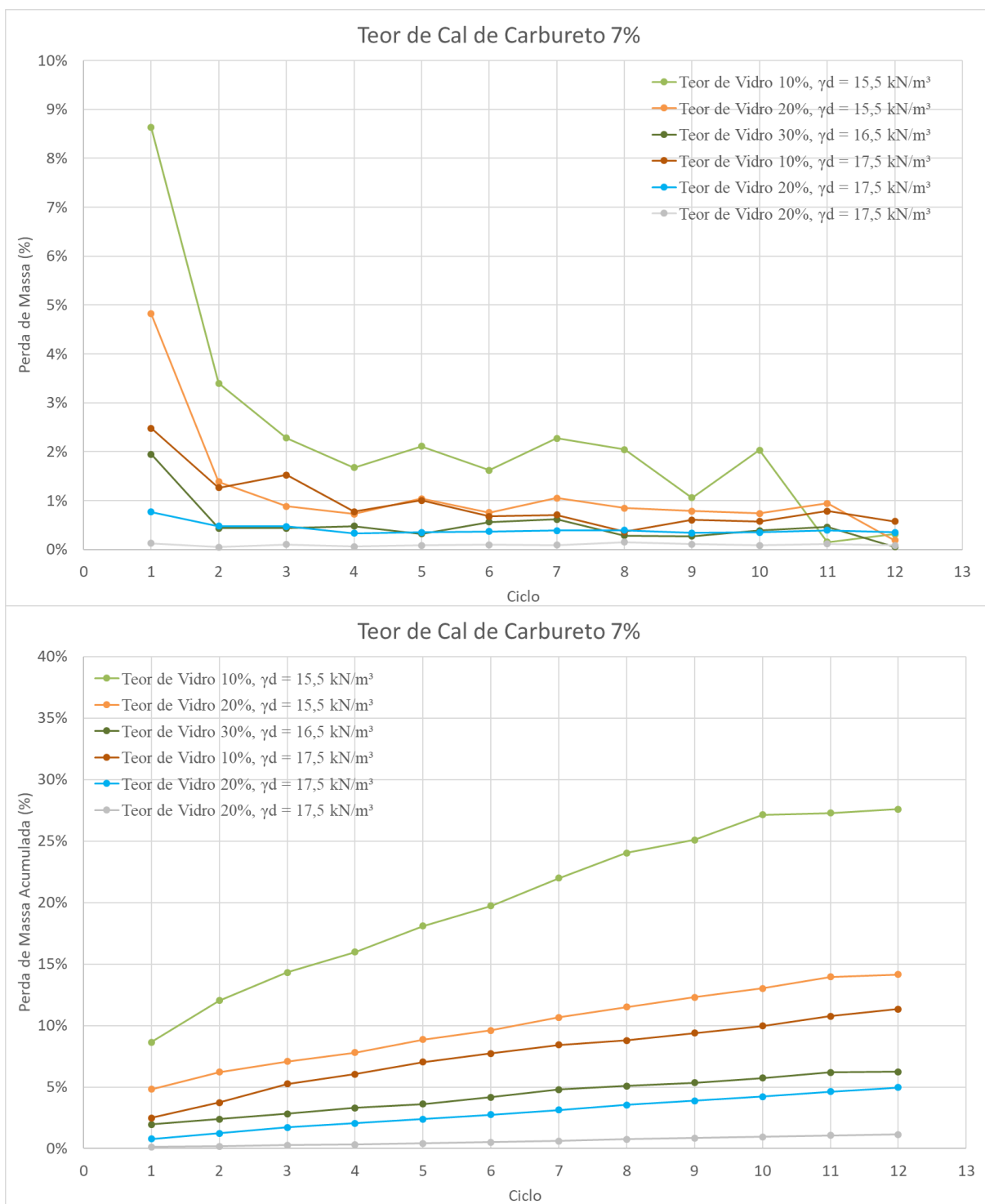


Figura 5.35: perda de massa para a mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto com 7% de cal de carbureto para sete dias de cura.

#### 5.1.3.4 Durabilidade em função da resistência e da rigidez

A durabilidade da mistura se mostrou função da resistência a compressão do material. Quanto maior a resistência a compressão obtida, melhor a durabilidade. Na Figura 5.36 é possível visualizar a perda de massa por ciclo, e acumulada, em função da resistência a compressão do material.

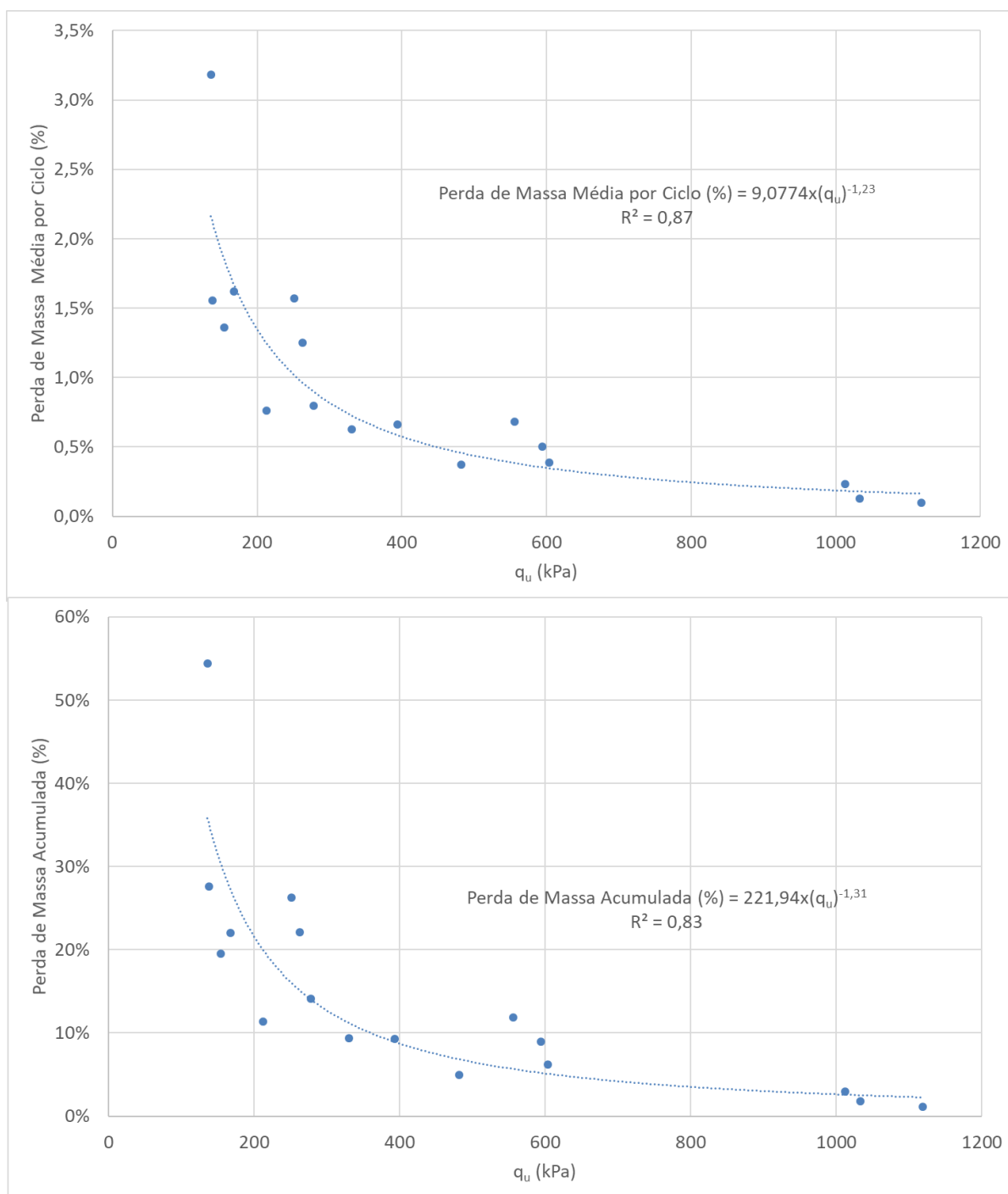


Figura 5.36: durabilidade da mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto em função de  $q_u$  para os sete dias de cura.

A Figura 5.37 exibe a tendência que a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto tem de apresentar uma maior durabilidade para materiais com rigidez maior, tanto observando a perda de massa média por ciclo, quanto a perda de massa acumulada, após os 12 ciclos.

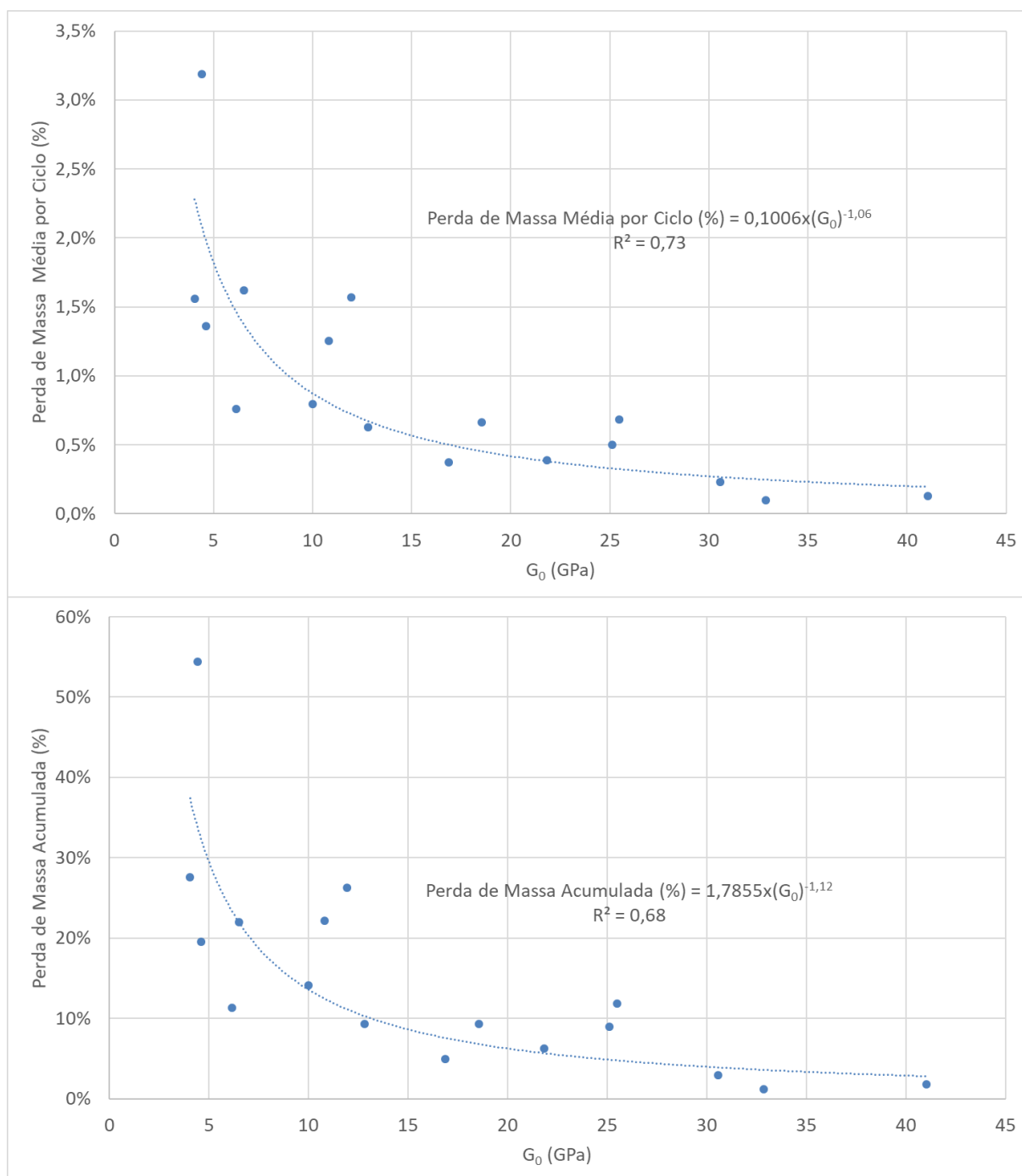


Figura 5.37: durabilidade da mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto em função de  $G_0$  para os sete dias de cura.

#### 5.1.3.4 Durabilidade em função do fator $\eta/B_{iv}$

O Fator  $\eta/B_{iv}$  mostrou também governar a durabilidade deste solo artificialmente cimentado. Na Figura 5.38 é possível observar a perda de massa em função do  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , mostrando uma ótima correlação para a perda de massa média por ciclo e para a perda de massa acumulada.

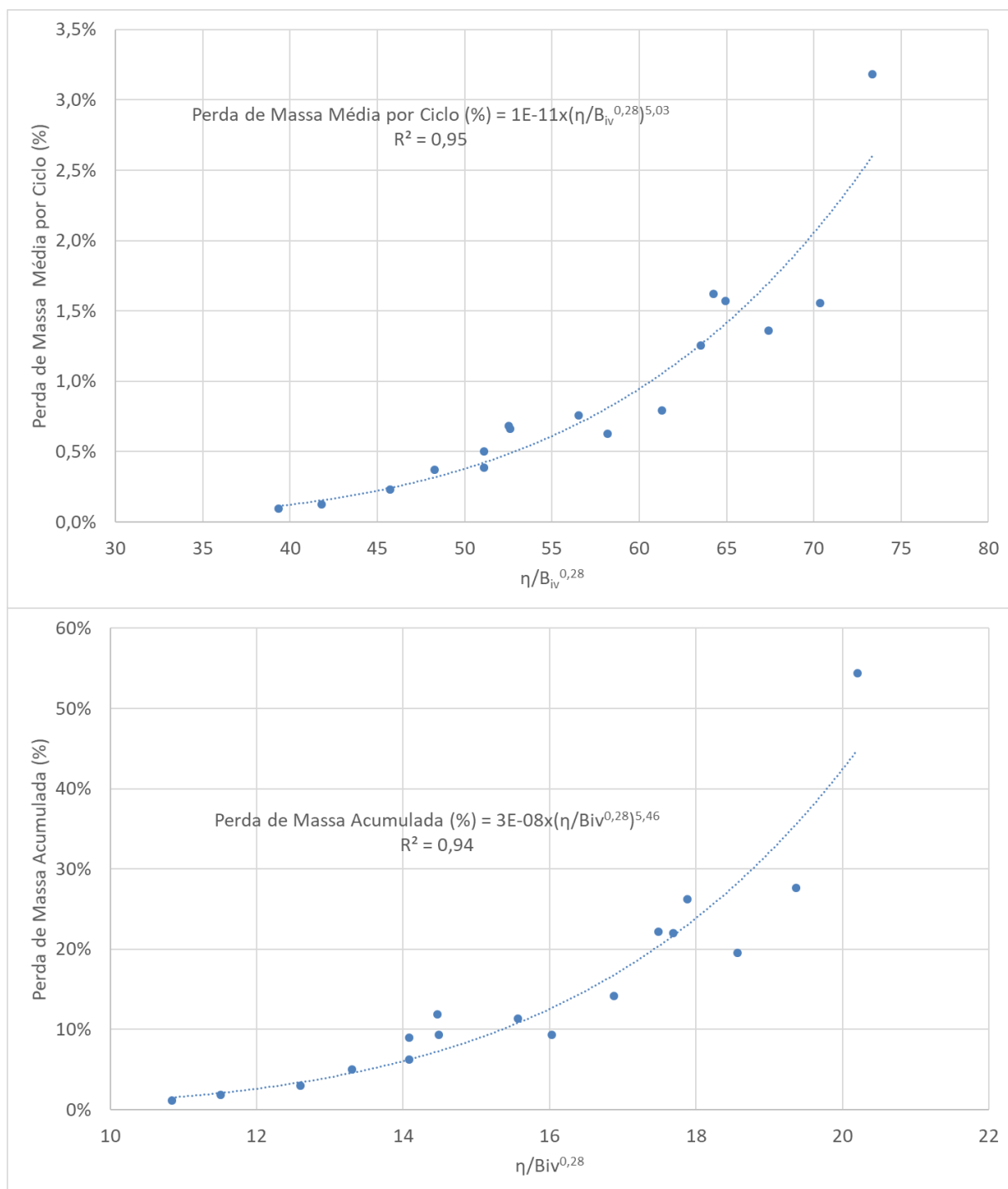


Figura 5.38: durabilidade da mistura areia do Osório, vidro e cal de carbureto em função de  $\eta/B_{iv}$  para os sete dias de cura.



#### 5.1.4 Rigidez em função da resistência do material

Para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto, a relação entre a resistência a compressão e o módulo cisalhante para pequenas deformações se mostrou linear, explicando assim a similaridade entre os coeficientes nas correlações obtidas para ambos os fatores. Na Figura 5.39 é possível visualizar a relação entre o  $G_0$  e o  $q_u$  bem como a equação de comportamento.

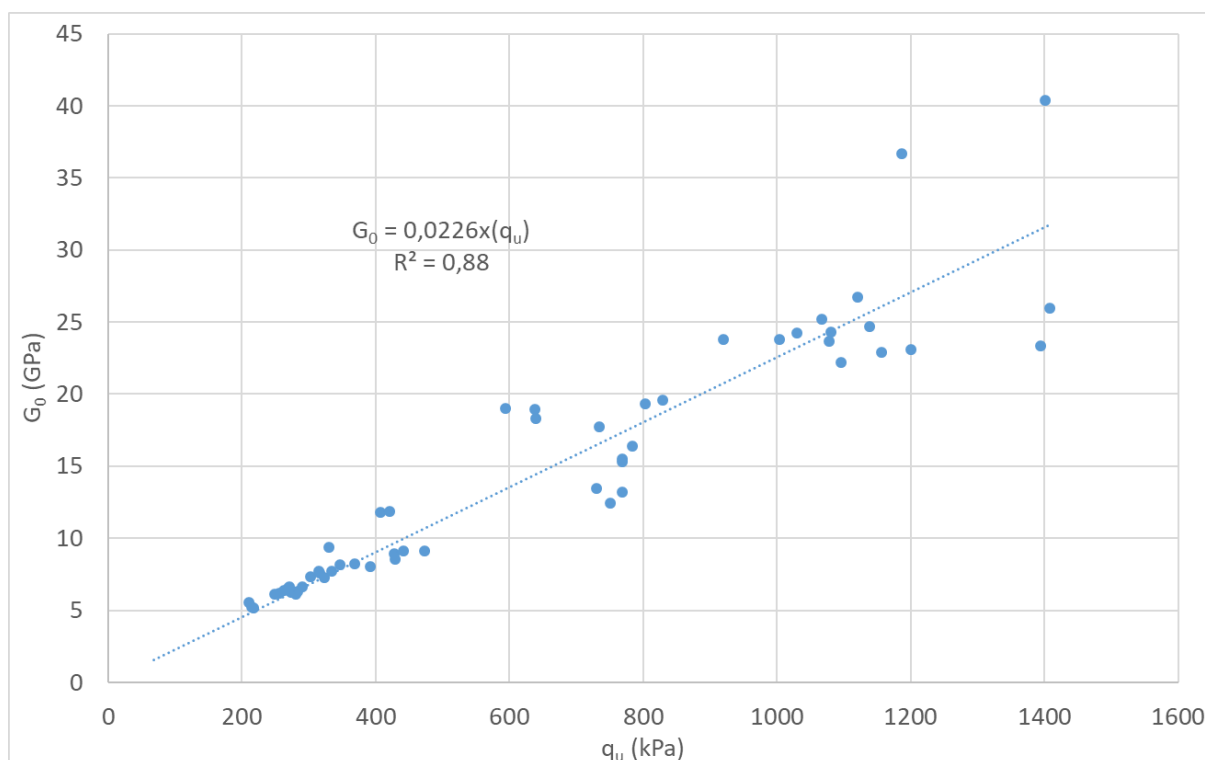


Figura 5.39:  $G_0$  em função de  $q_u$  da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para os sete dias de cura.

## 5.2 MISTURAS DE AREIA DE OSÓRIO, VIDRO E CAL DE CARBURETO AOS 180 DIAS DE CURA

Com o intuito de validar as conclusões obtidas com o plano experimental principal, cujos resultados foram exibidos no item 5.1, para outros períodos de cura, foram realizados ensaios com a mesma mistura, porém com 180 dias de cura e estes são exibidos dos próximos itens.

### 5.2.1 Resistência

A resistência a compressão não confinada representada pelo  $q_u$  das misturas de areia de Osório, vidro e cal de carbureto, aos cento e oitenta dias de cura, em função do fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$ , é exibida na Figura 5.40 para 10, 20 e 30% de vidro adicionado. Nesta figura é possível visualizar as curvas características de comportamento do material.

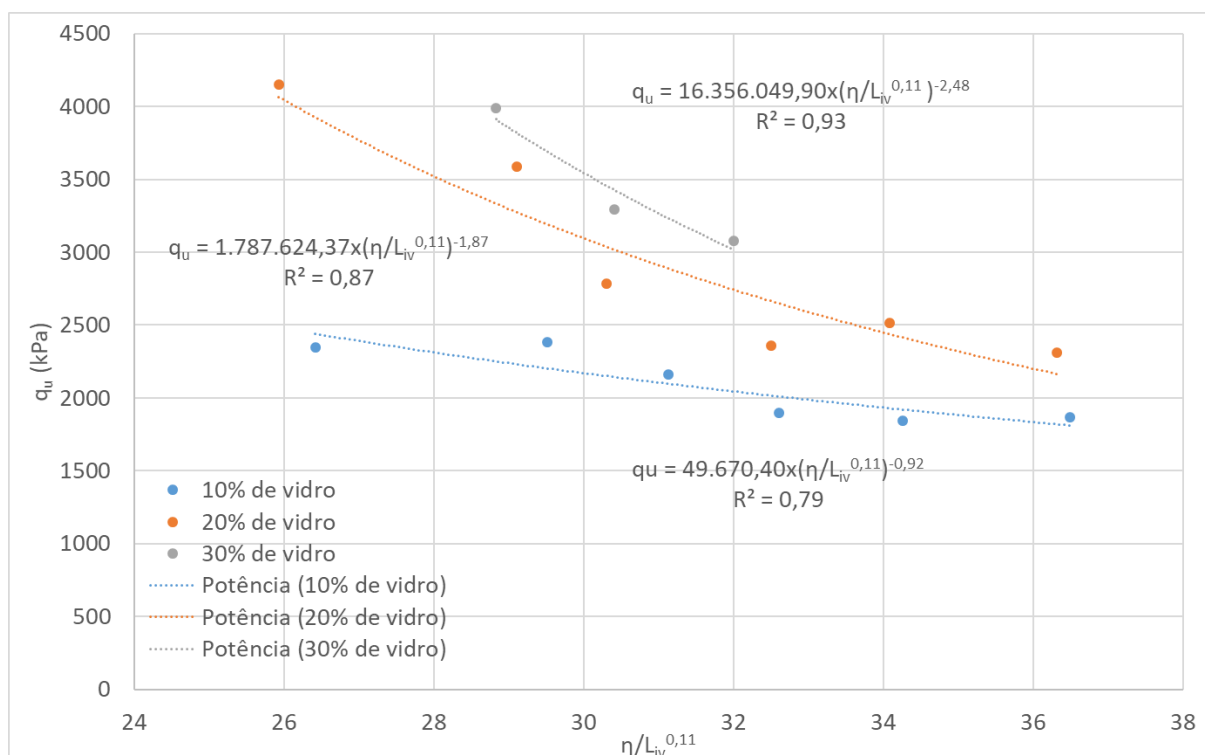


Figura 5.40:  $q_u$  em função do fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$  para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.

Da mesma maneira que para os sete dias de cura, a resistência das misturas acima foi normalizada pela metodologia proposta por Consoli et al. (2016b), Consoli et al. (2017a) e Consoli et al. (2017b) e com isso foi possível transformar estas curvas em uma única, dividindo a resistência a compressão ( $q_u$ ) pela resistência a compressão que cada um destes solos teria para um determinado  $\eta/L_{iv}^{0,11}$ . Esta normalização é exibida na Figura 5.41.

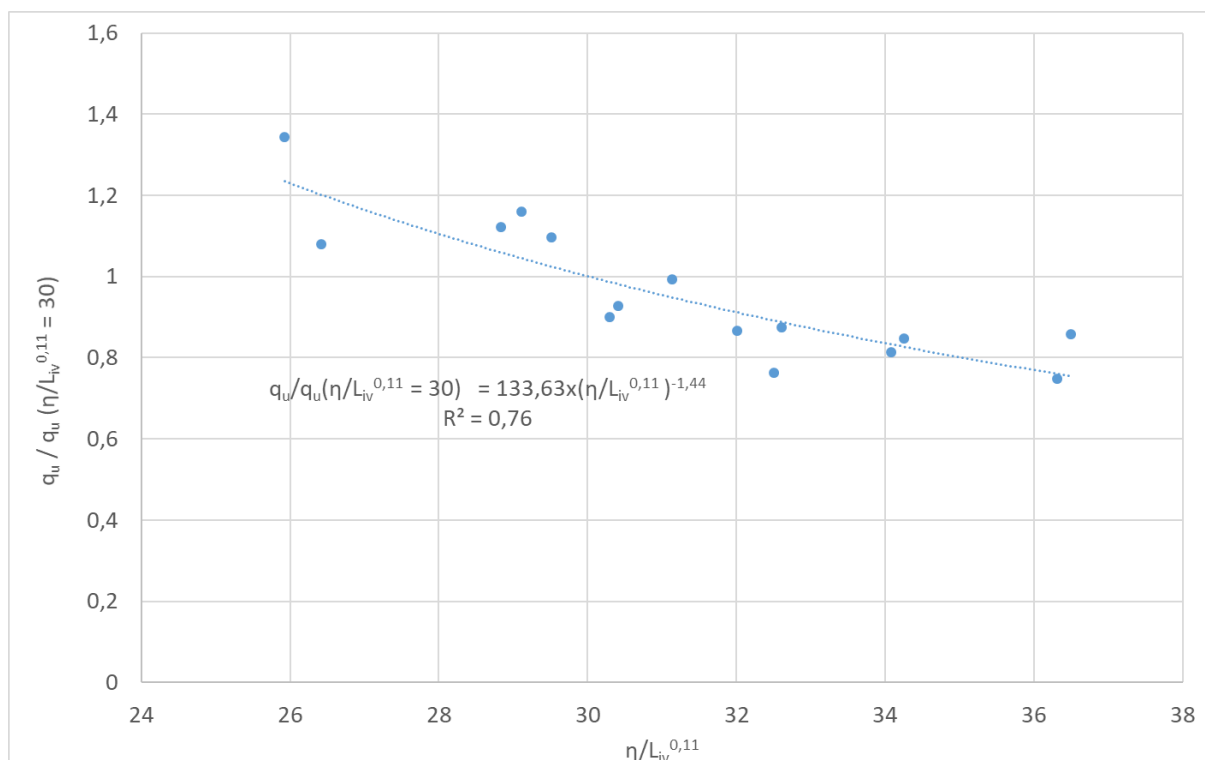


Figura 5.41:  $q_u / q_u(\eta/L_{iv}^{0,11}=30)$  em função do  $\eta/L_{iv}^{0,11}$  para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.

A correlação entre a resistência a compressão e o fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  se mostrou satisfatória, comprovando que também é válida para a mistura de areia de Osório, vidro e cal de carbureto aos cento e oitenta dias de cura. A correlação é diferente da encontrada para os sete dias, porém isso é esperado já que aos cento e oitenta dias as reações pozolânicas tiveram muito mais tempo para ocorrer, adquirindo assim ganhos superiores de resistência em relação aos sete dias de cura.

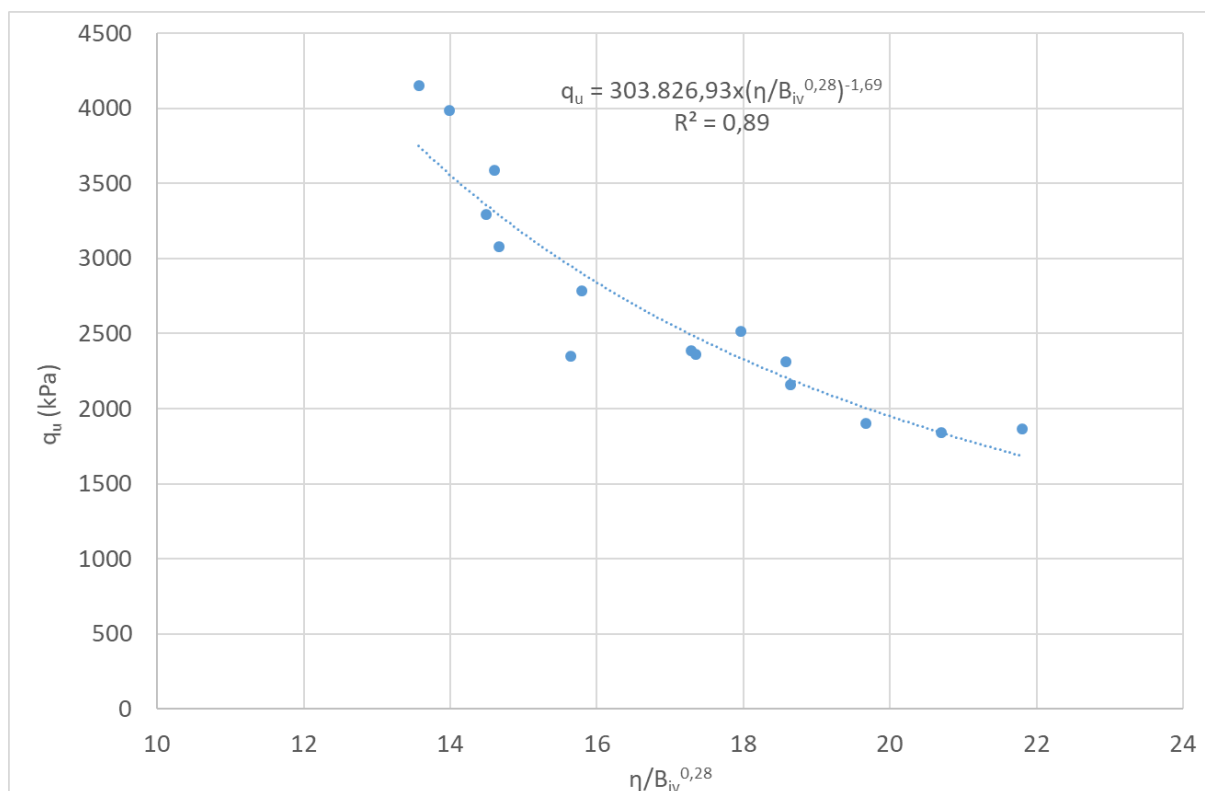


Figura 5.42:  $q_u$  em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.

### 5.2.2 Rigidez

A rigidez das misturas de areia de Osório, vidro e cal de carbureto, aos cento e oitenta dias de cura, em função do fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$ , representada pelo  $G_0$ , é exibida na Figura 5.40 para 10, 20 e 30% de vidro adicionado. Nesta figura é possível visualizar as curvas características de comportamento do material.

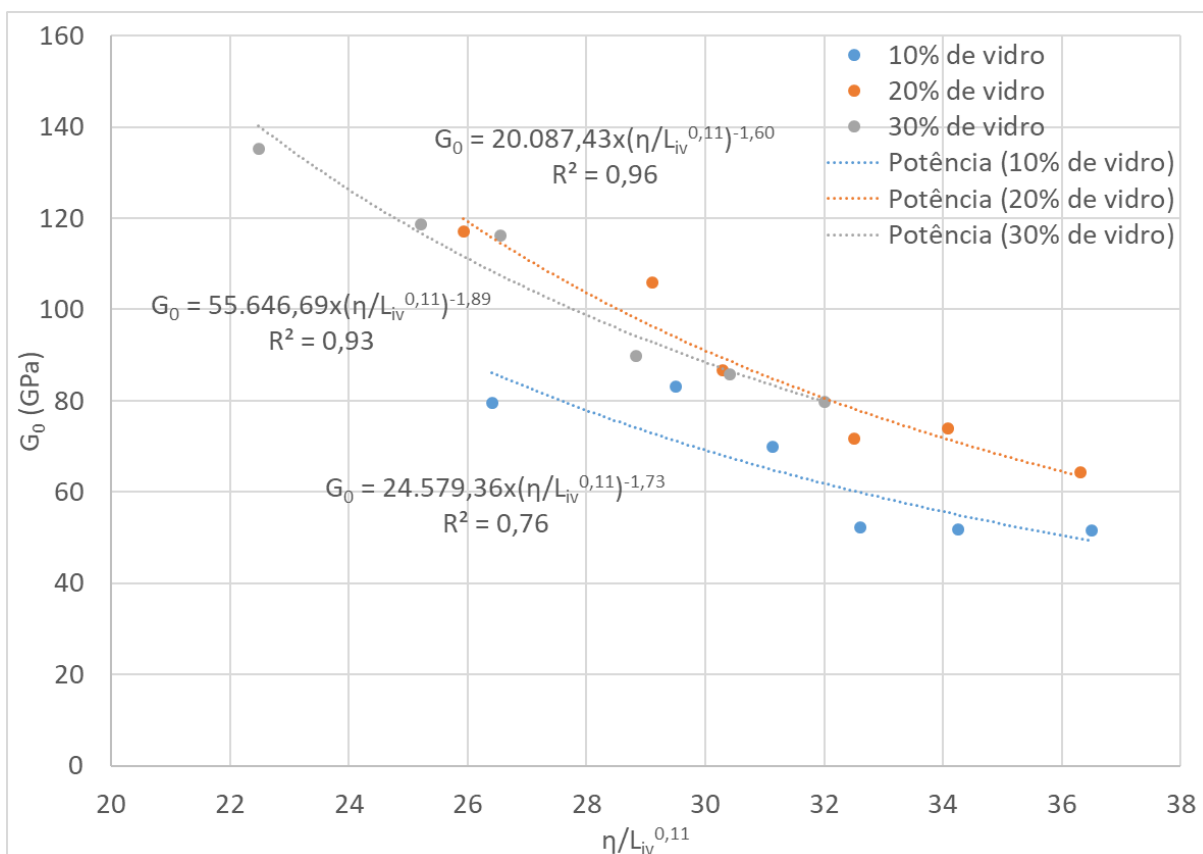


Figura 5.43:  $G_0$   $q_u$  em função do fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$  para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.

A correlação entre o módulo cisalhante a pequenas deformações ( $G_0$ ) e o fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  se mostrou satisfatória, comprovando que também é válida para a mistura de areia de Osório, vidro e cal de carbureto aos cento e oitenta dias de cura. A correlação é diferente da encontrada para os sete dias, porém isso é esperado, já que aos cento e oitenta dias, as reações pozolânicas tiveram muito mais tempo para ocorrer, adquirindo assim ganhos superiores de rigidez em relação aos sete dias de cura.

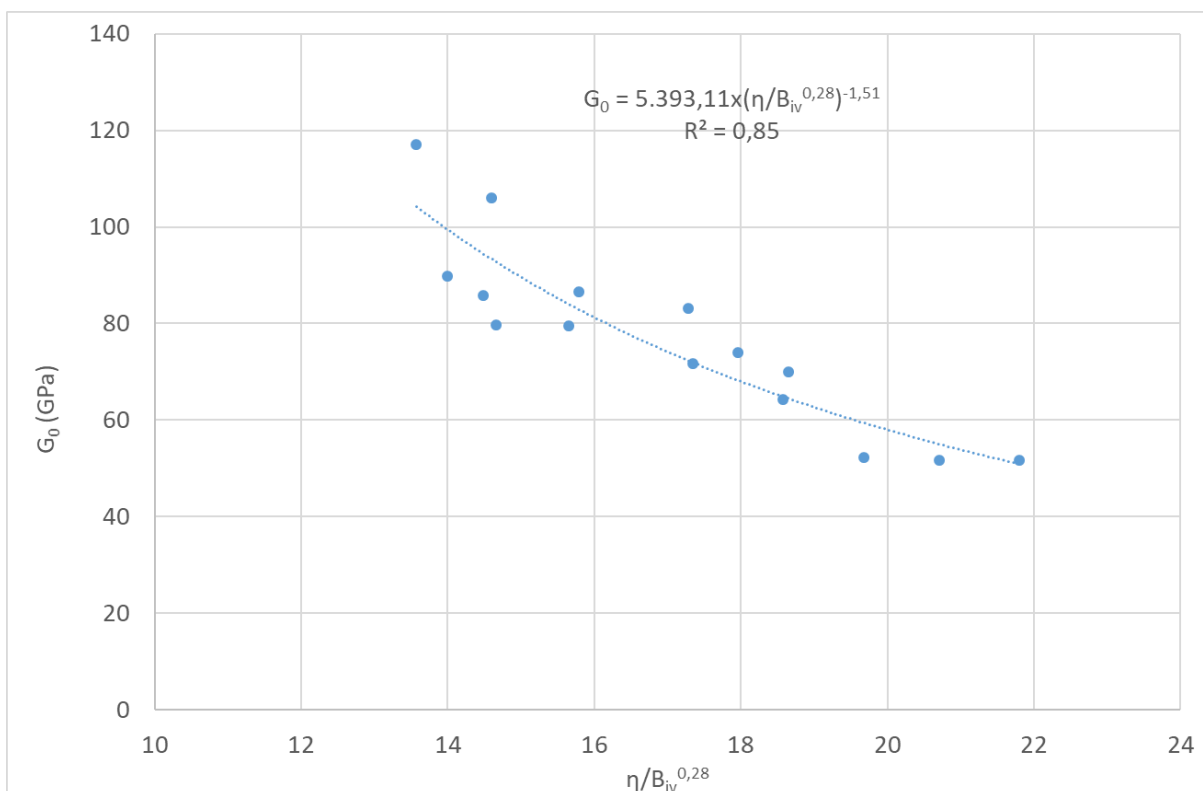


Figura 5.44:  $G_0$  em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.

### 5.2.3 Rigidez em função da resistência do material

Para a mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto, bem como para os sete dias de cura, aos cento e oitenta dias, a relação entre a resistência a compressão e o módulo cisalhante para pequenas deformações se mostrou linear, explicando assim a similaridade entre os coeficientes nas correlações obtidas para ambos os fatores. Na Figura 5.45 é possível visualizar a relação entre o  $G_0$  e o  $q_u$ , bem como a equação de comportamento. A inclinação da reta que define este comportamento é similar a inclinação da reta obtida no comportamento da mesma mistura aos 7 dias de cura.

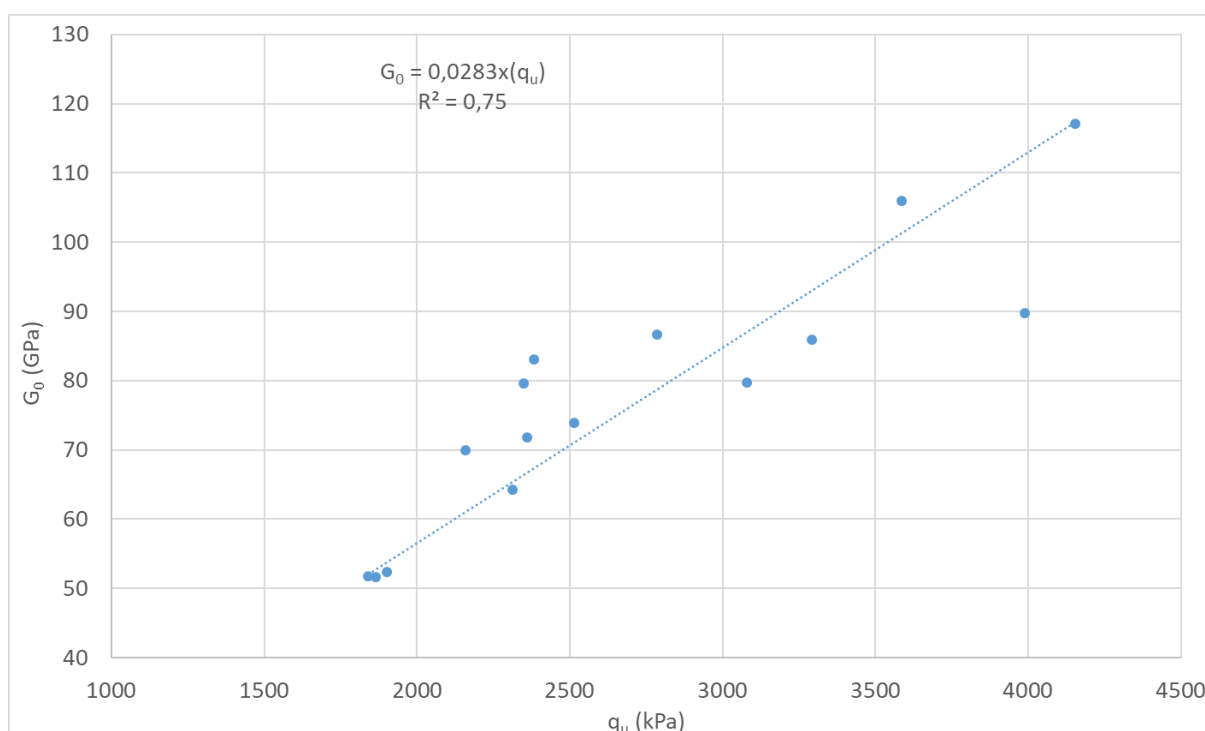


Figura 5.45:  $G_0$  em função de  $q_u$  da mistura areia de Osório, vidro e cal de carbureto para os cento e oitenta dias de cura.

### 5.3 MISTURAS DE AREIA DE OSÓRIO, CCA E CAL DE CARBURETO AOS 7 DIAS DE CURA

Com o intuito de validar as conclusões obtidas com o plano experimental inicial, cujos resultados foram exibidos no item 5.1, para outras fontes de sílica, foram realizados ensaios em misturas semelhantes, porém com cinza de casca de arroz (CCA) ao invés do vidro. Os resultados são exibidos dos próximos itens. Foram realizados, além dos ensaios de resistência e rigidez, ensaios de durabilidade, para assim validar uma possível utilização desta mistura em fins práticos.

#### 5.3.1 Resistência

A resistência a compressão, representada pelo  $q_u$ , das misturas de areia de Osório, CCA e cal de carbureto, aos sete dias de cura, em função do fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$  é exibida na Figura 5.46, para 10, 20 e 30% de cinza de casca de arroz adicionada. Nesta figura é possível visualizar as curvas características de comportamento do material.

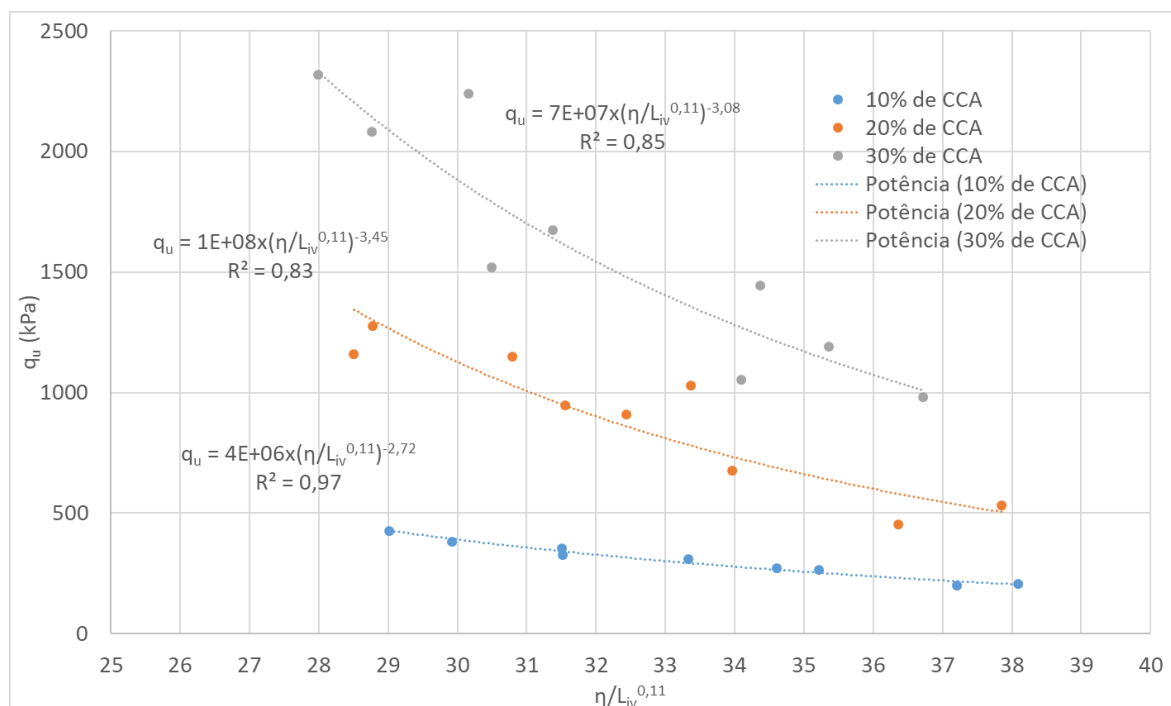


Figura 5.46:  $q_u$  em função do fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$  para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para sete dias de cura.

A correlação entre a resistência a compressão e o fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  se mostrou satisfatória, comprovando que também é válida para a mistura de areia de Osório, CCA e cal de carbureto aos sete dias de cura e é exibida na Figura 5,47.

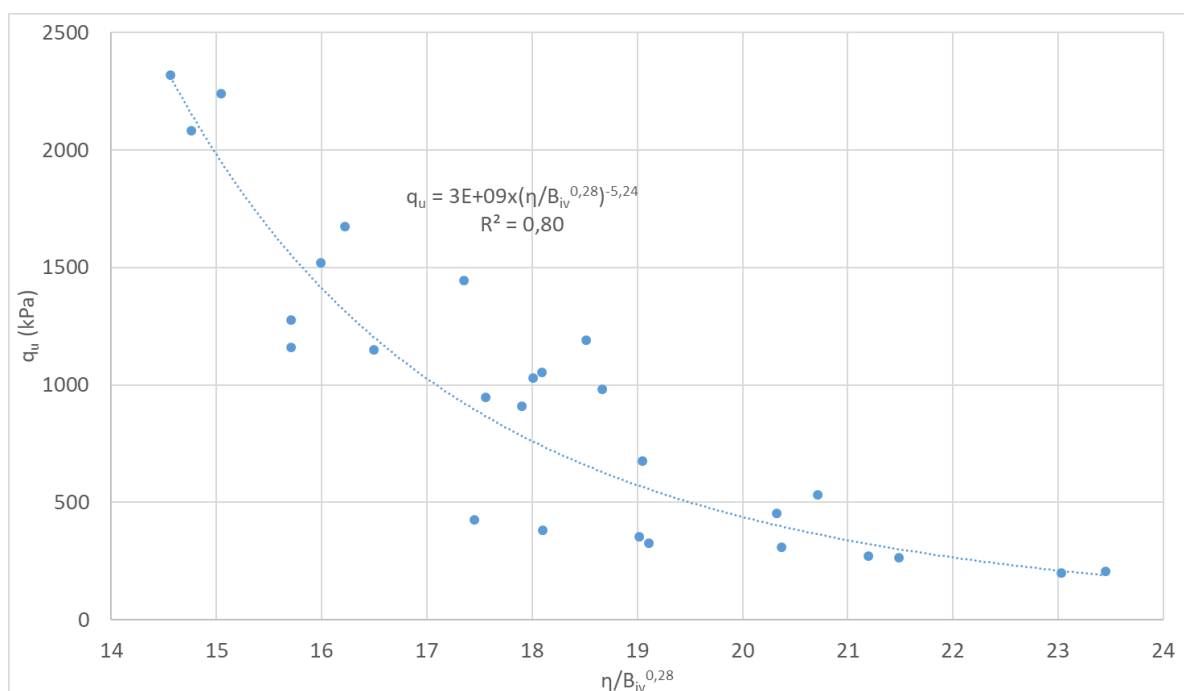


Figura 5.47:  $q_u$  em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para sete dias de cura.



### 5.3.2 Rigidez

A rigidez das misturas de areia de Osório, CCA e cal de carbureto, aos sete dias de cura, em função do fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$  e representada pelo  $G_0$ , é exibida na Figura 5.48 para 10, 20 e 30 % de CCA adicionada. Nesta figura é possível visualizar as curvas características de comportamento do material.

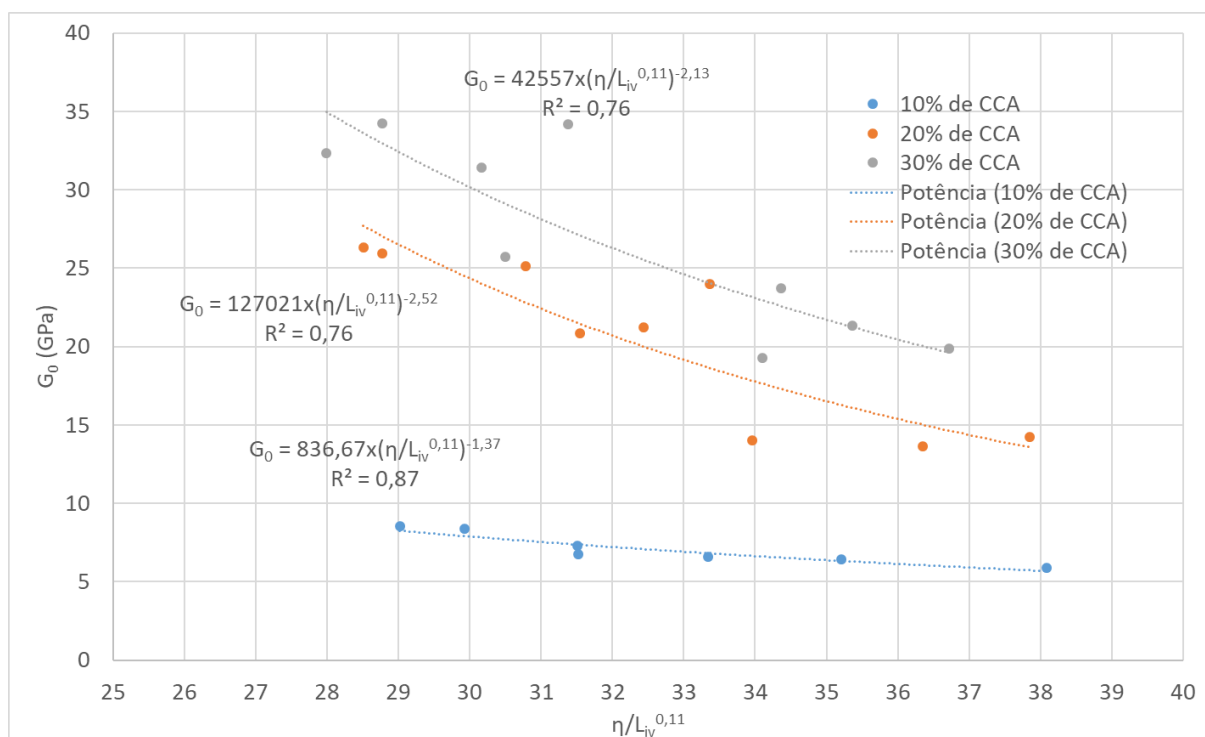


Figura 5.48:  $G_0$  em função do fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$  para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para sete dias de cura.

A correlação entre o módulo cisalhante a pequenas deformações ( $G_0$ ) e o fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  também se mostrou satisfatória, comprovando que é válida para a mistura de areia de Osório, cinza de casca de arroz e cal de carbureto aos sete dias de cura e esta é exibida na Figura 5.49.

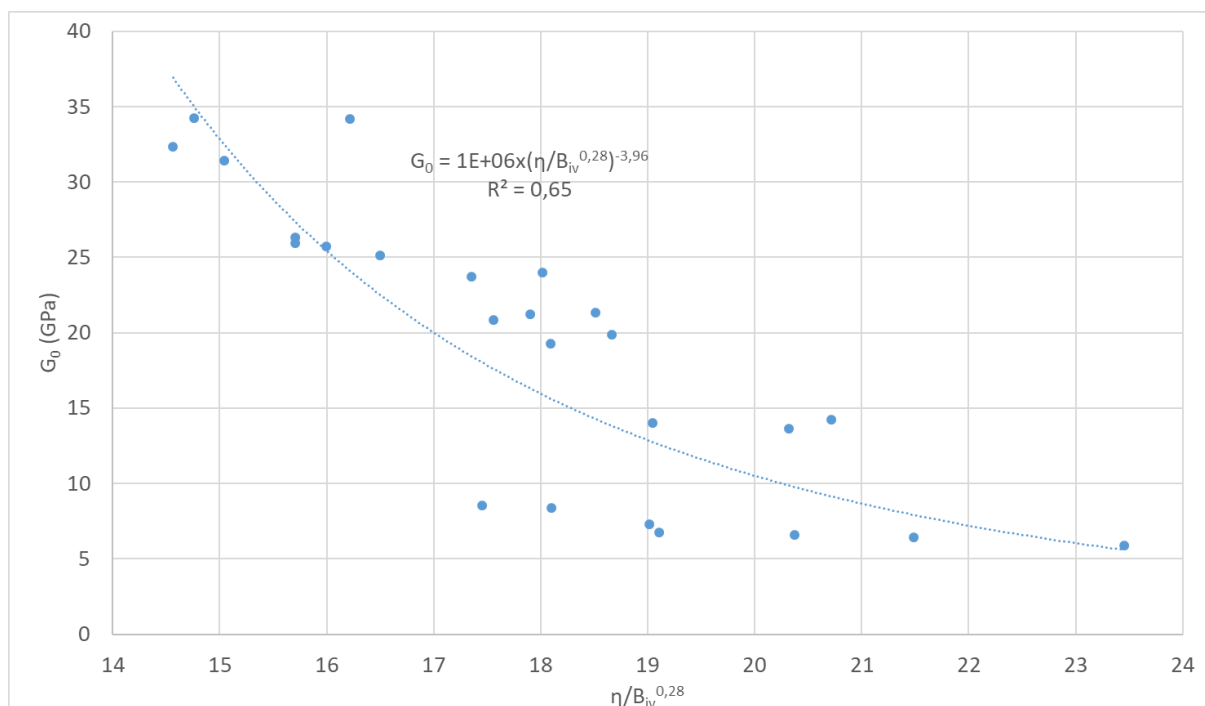


Figura 5.49:  $G_0$  em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para sete dias de cura.

### 5.3.3 Durabilidade

Os ensaios de durabilidade nas misturas de areia de Osório, cinza de casca de arroz e cal de carbureto mostraram um material satisfatório no quesito durabilidade. Nenhuma amostra teve perda de massa acumulada superior a 10%, ficando inclusive, praticamente todas, bem abaixo disto. Na Figura 5.50 é exibido o resultado do ensaio de durabilidade para estas misturas em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .

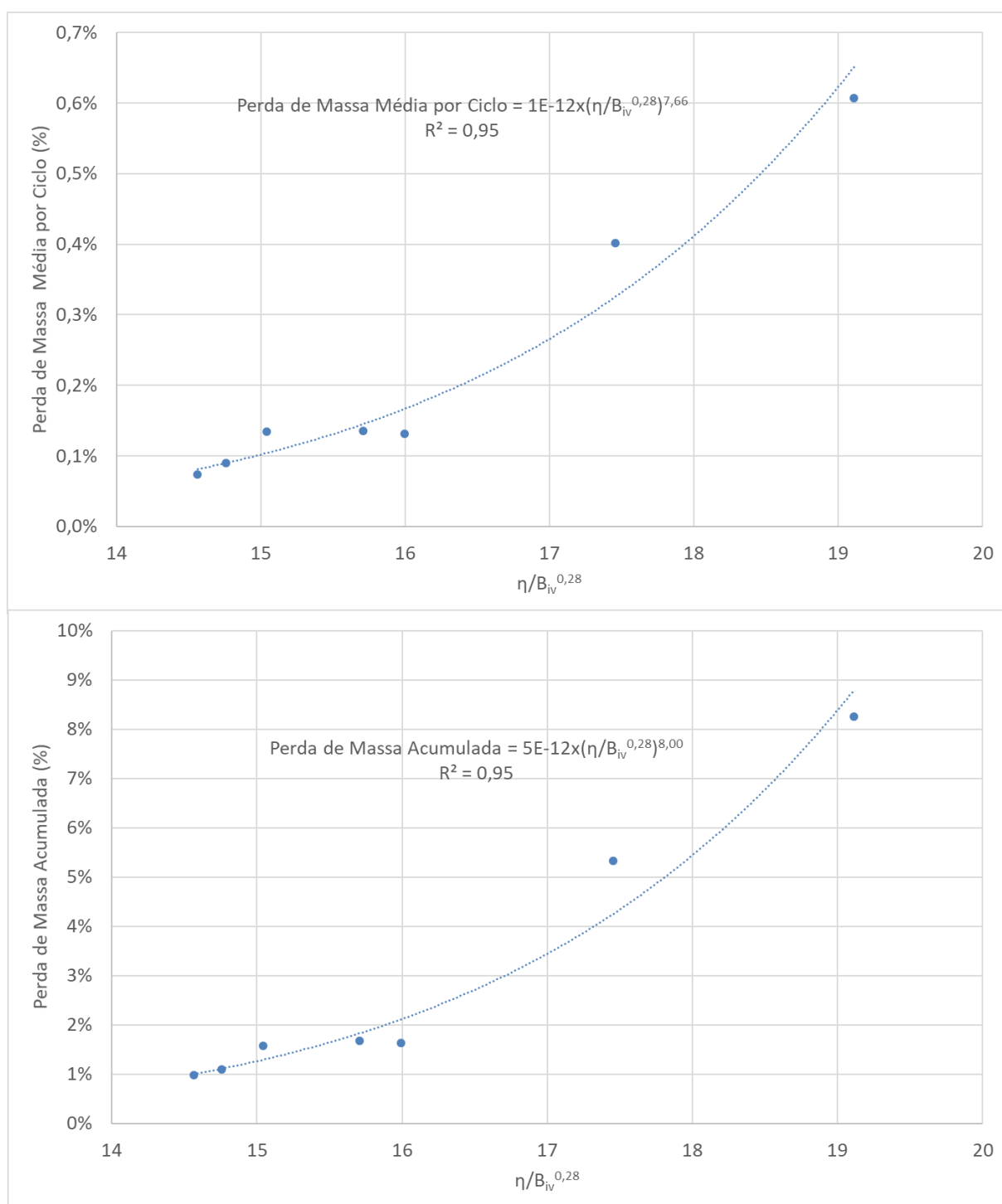


Figura 5.50: durabilidade em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para sete dias de cura.

### 5.3.4 Rigidez em função da resistência do material

Para a mistura areia de Osório, cinza de casca de arroz e cal de carbureto, bem como para as misturas com a utilização vidro, a relação entre a resistência a compressão e o módulo cisalhante para pequenas deformações se mostrou linear, e este resultado é exibido na Figura 5.51.

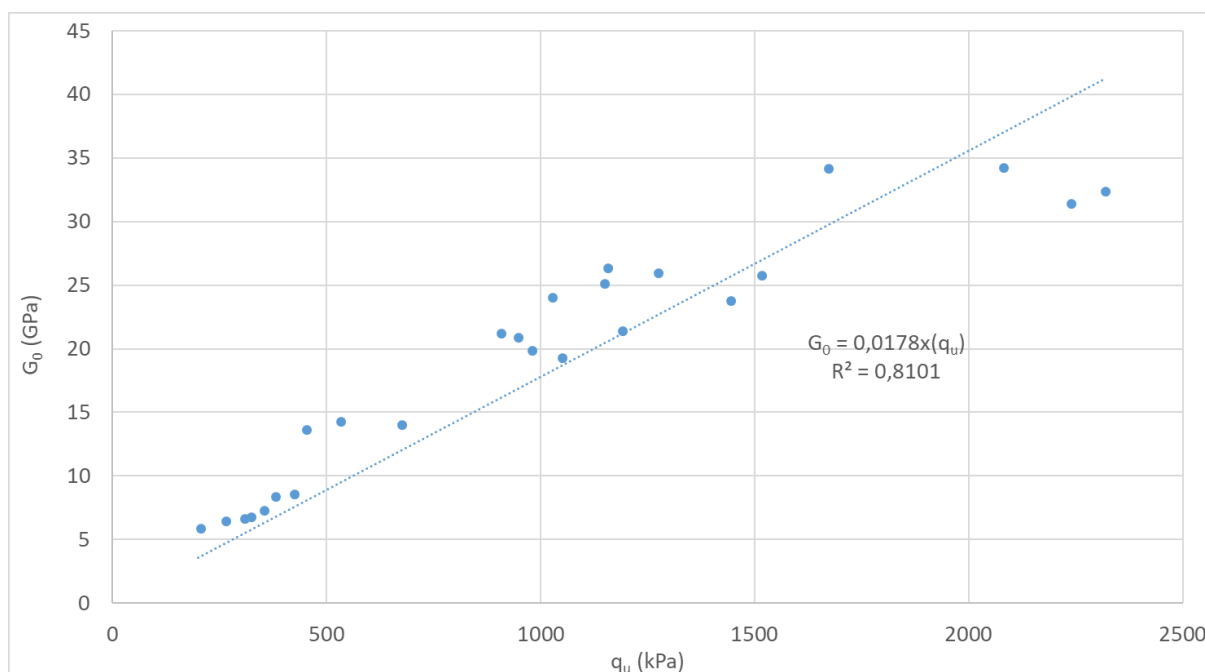


Figura 5.51:  $G_0$  em função de  $q_u$  da mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para os sete dias de cura.

## 5.4 MISTURAS DE AREIA DE OSÓRIO, CCA E CAL DE CARBURETO AOS 180 DIAS DE CURA

Com o intuito de validar as conclusões obtidas com o plano experimental, cujos resultados foram exibidos no item 5.1, para outras fontes de sílica, em diferentes períodos de cura, foram realizados ensaios em misturas semelhantes, porém com cinza de casca de arroz (CCA) ao invés do vidro aos 180 dias de cura. Os resultados são exibidos dos próximos itens. Foram realizados além dos ensaios de resistência e rigidez, ensaios de durabilidade, para validar uma possível utilização desta mistura em fins práticos.

### 5.4.1 Resistência

A resistência a compressão, representada pelo  $q_u$ , das misturas de areia de Osório, CCA e cal de carbureto, aos cento e oitenta dias de cura, em função do fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$ , é exibida na Figura 5.52 para 10, 20 e 30% de cinza de casca de arroz adicionada. Nesta figura é possível visualizar as curvas características de comportamento do material.

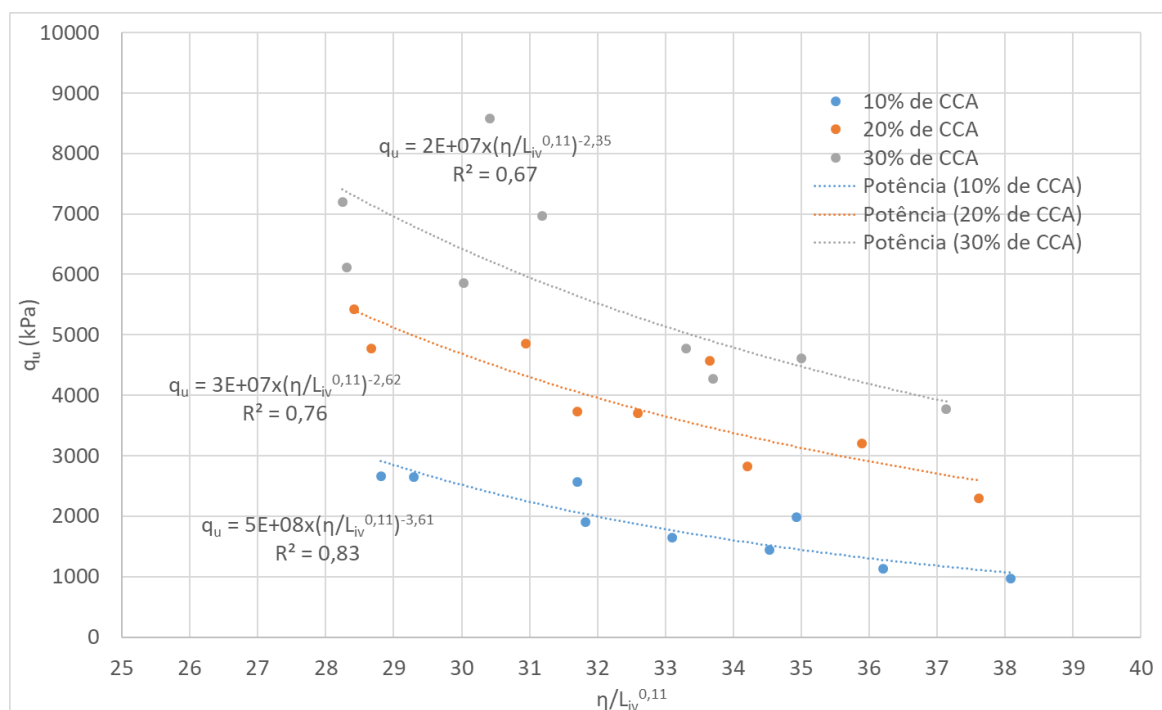


Figura 5.52:  $q_u$  em função do fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$  para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.

A correlação entre a resistência a compressão e o fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  se mostrou satisfatória, comprovando que também é válida para a mistura de areia de Osório, CCA e cal de carbureto aos cento e oitenta dias de cura e é exibida na Figura 5.53.

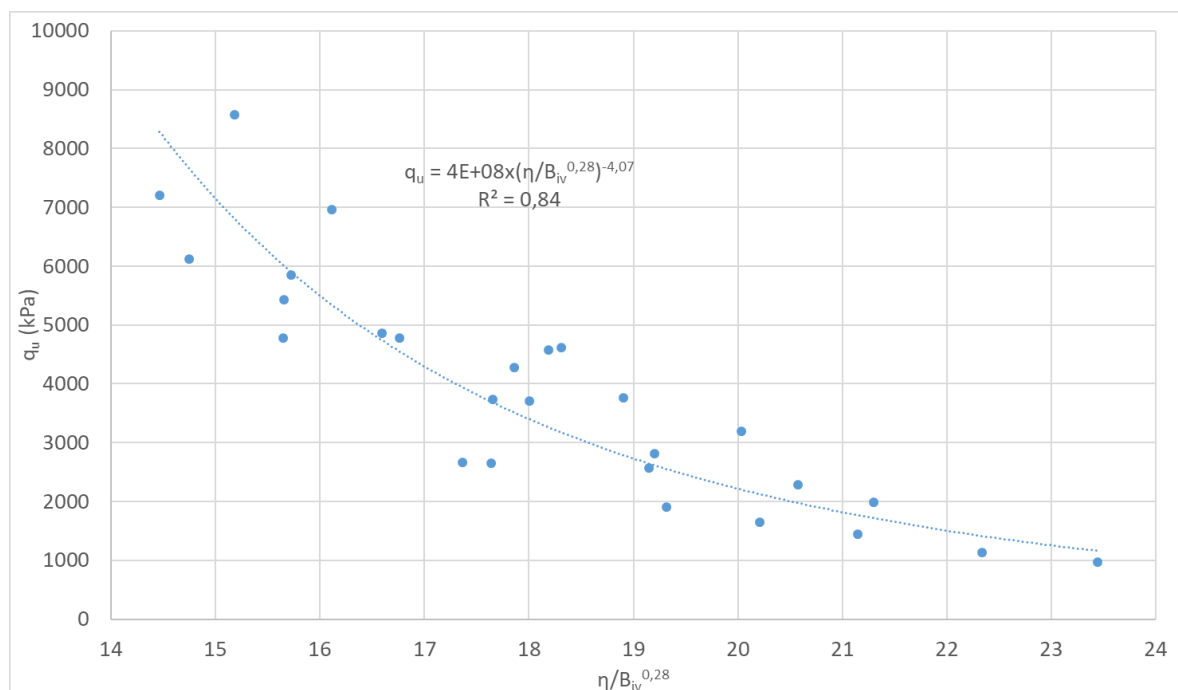


Figura 5.53:  $q_u$  em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.

#### 5.4.2 Rigidez

A rigidez das misturas de areia de Osório, CCA e cal de carbureto, aos cento e oitenta dias de cura, em função do fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$ , e representada pelo  $G_0$ , é exibida na Figura 5.54 para 10, 20 e 30% de CCA adicionada. Nesta figura é possível visualizar as curvas características de comportamento do material.

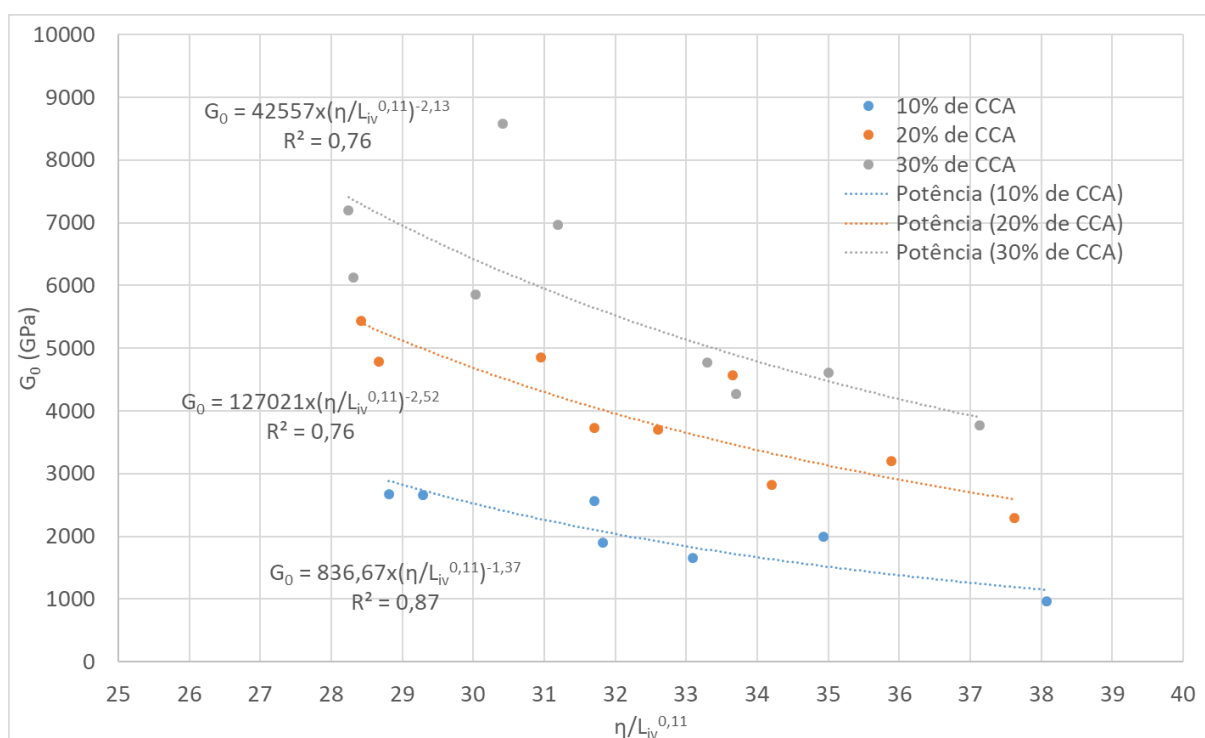


Figura 5.54:  $G_0$  em função do fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$  para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.

A correlação entre o módulo cisalhante a pequenas deformações ( $G_0$ ) e o fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , apesar de uma maior dispersão dos resultados, também se mostrou satisfatória, comprovando que é válida para a mistura de areia de Osório, cinza de casca de arroz e cal de carbureto aos cento e oitenta dias de cura e esta é exibida na Figura 5.55.

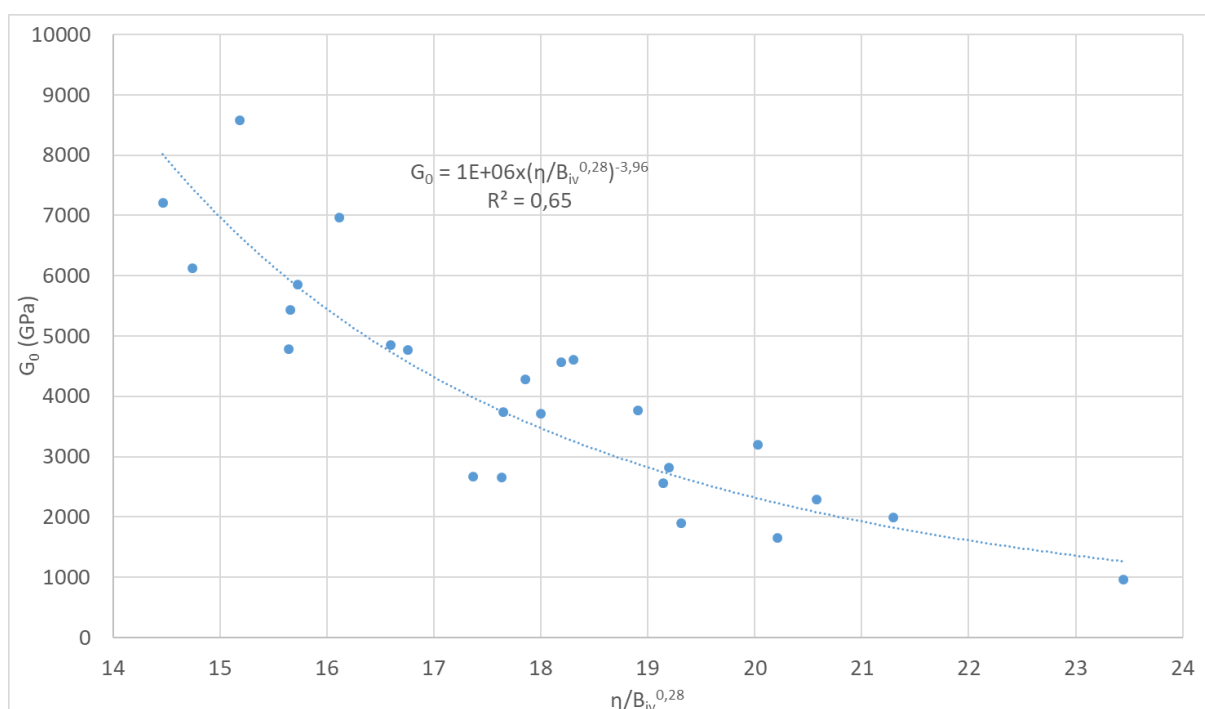


Figura 5.55:  $G_0$  em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.

### 5.4.3 Durabilidade

Os ensaios de durabilidade, aos cento e oitenta dias de cura, nas misturas de areia de Osório, cinza de casca de arroz e cal de carbureto, mostraram um material satisfatório no quesito durabilidade. Nenhuma amostra teve perda de massa acumulada superior a 10%, ficando inclusive praticamente todas bem abaixo disto. Na Figura 5.56 é exibido o resultado do ensaio de durabilidade para estas misturas em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .



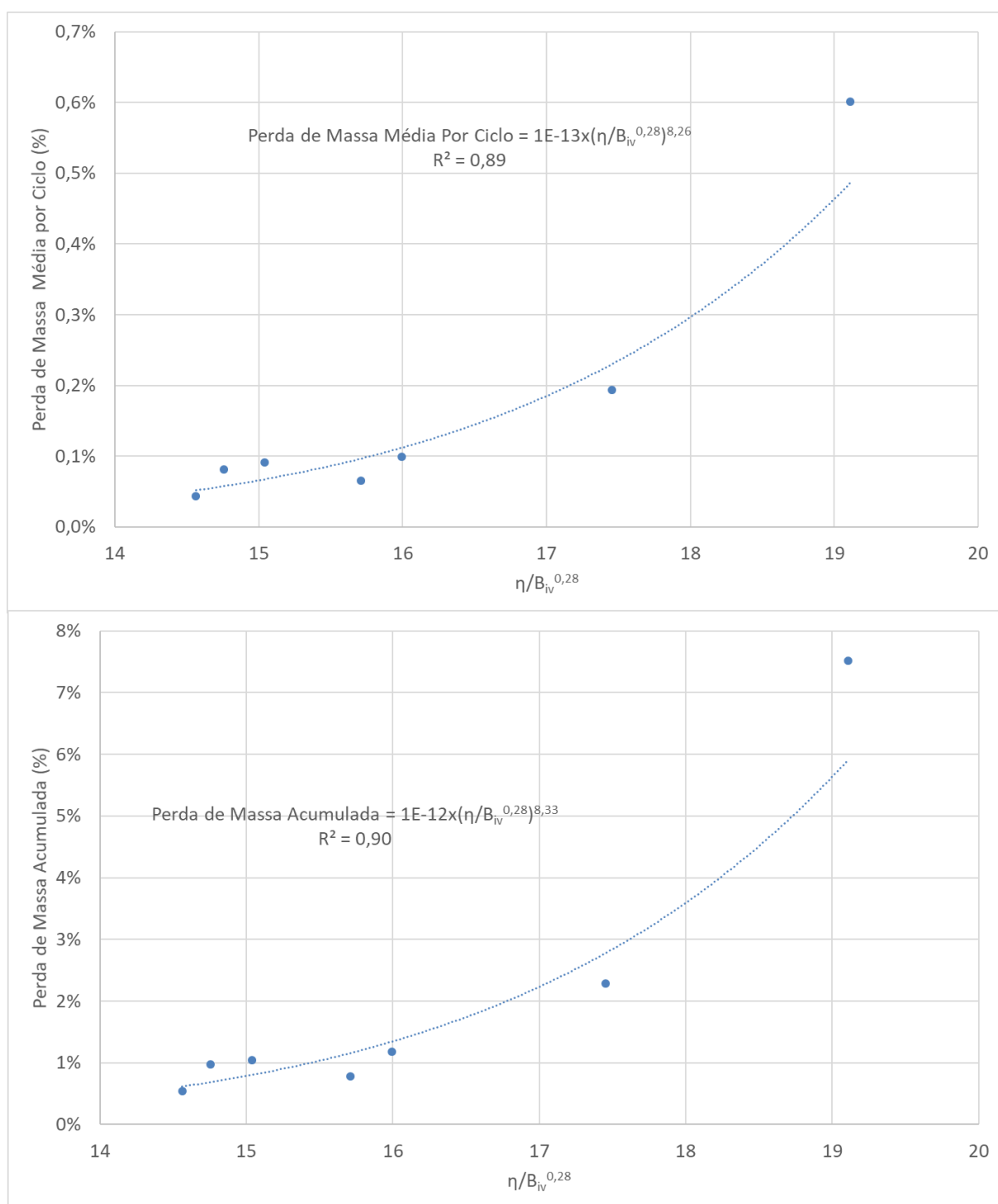


Figura 5.56: durabilidade em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para a mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.

#### 5.4.4 Rigidez em função da resistência do material

Para a mistura areia de Osório, cinza de casca de arroz e cal de carbureto, bem como para as misturas utilizando vidro, existe uma relação entre a resistência a compressão e o módulo cisalhante para pequenas deformações, apesar de uma correlação não muito boa, este resultado é exibido na Figura 5.57.

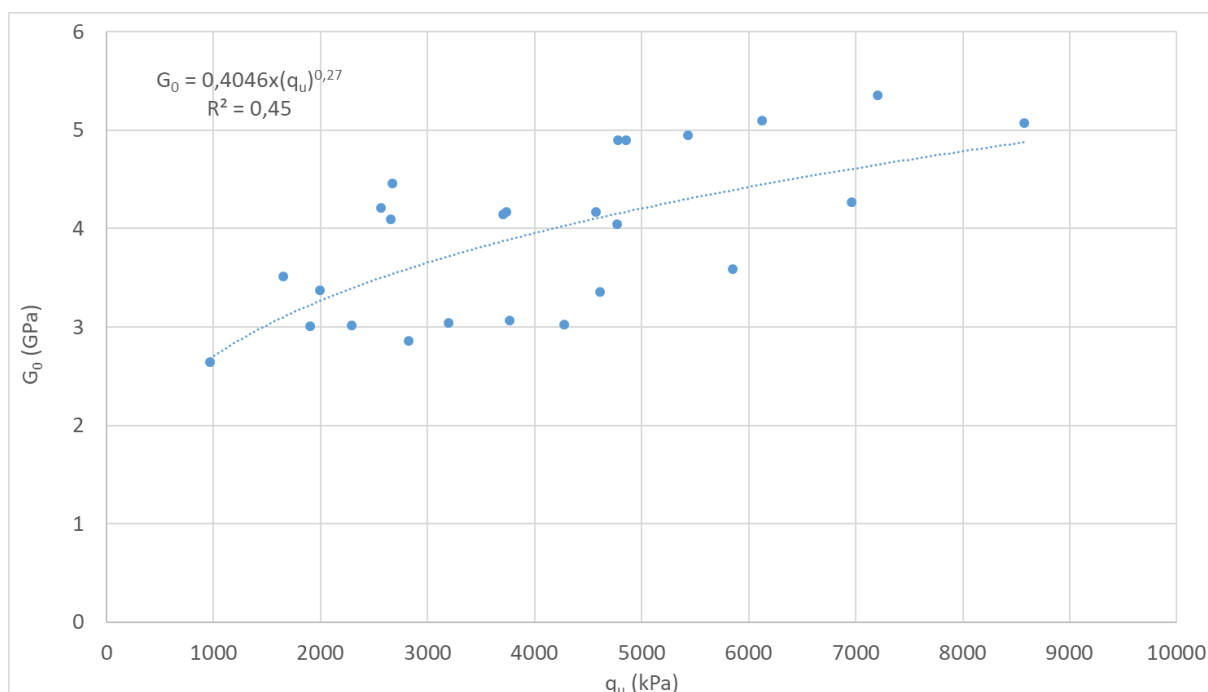


Figura 5.57:  $G_0$  em função de  $q_u$  da mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para os cento e oitenta dias de cura.

### 5.5 MISTURAS DE ARENITO BOTUCATU, VIDRO E CAL DE CARBURETO AOS 180 DIAS DE CURA

Com o intuito de validar as conclusões obtidas com o plano experimental, cujos resultados foram exibidos no item 5.1, para outro tipo de solo arenoso, foram realizados ensaios em misturas semelhantes, porém com arenito Botucatu ao invés de areia de Osório, aos 180 dias de cura. Os resultados são exibidos dos próximos itens. Foram realizados, além dos ensaios de resistência e rigidez, ensaios de durabilidade para validar uma possível utilização desta mistura em fins práticos.

### 5.5.1 Resistência

A resistência a compressão, representada pelo  $q_u$ , das misturas de arenito Botucatu, vidro e cal de carbureto, aos cento e oitenta dias de cura, em função do fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$ , é exibida na Figura 5.58 para 10, 20 e 30% de vidro adicionado. Nesta figura é possível visualizar as curvas características de comportamento do material.

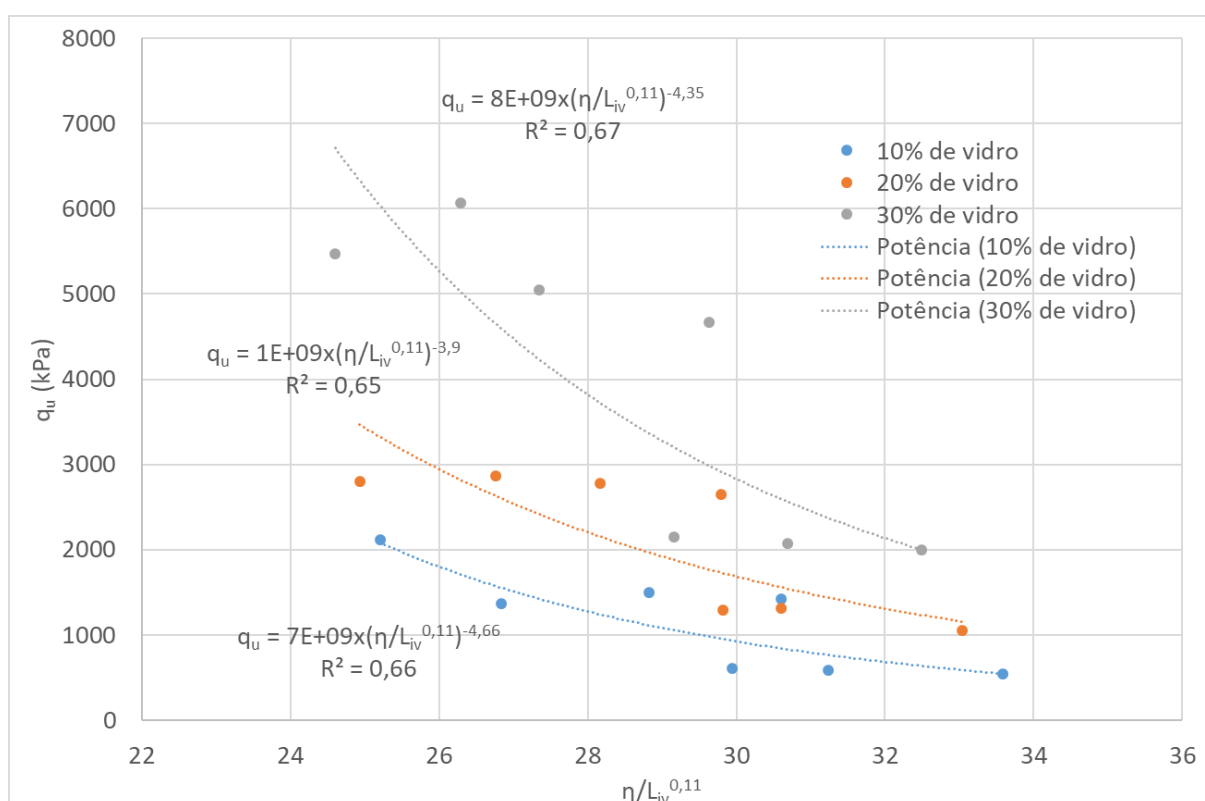


Figura 5.58:  $q_u$  em função do fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$  para a mistura de arenito Botucatu, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.

A correlação entre a resistência a compressão e o fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  se mostrou satisfatória, comprovando que também é válida para a mistura de arenito Botucatu, vidro e cal de carbureto, aos cento e oitenta dias de cura. Esta correlação é exibida na Figura 5.59.

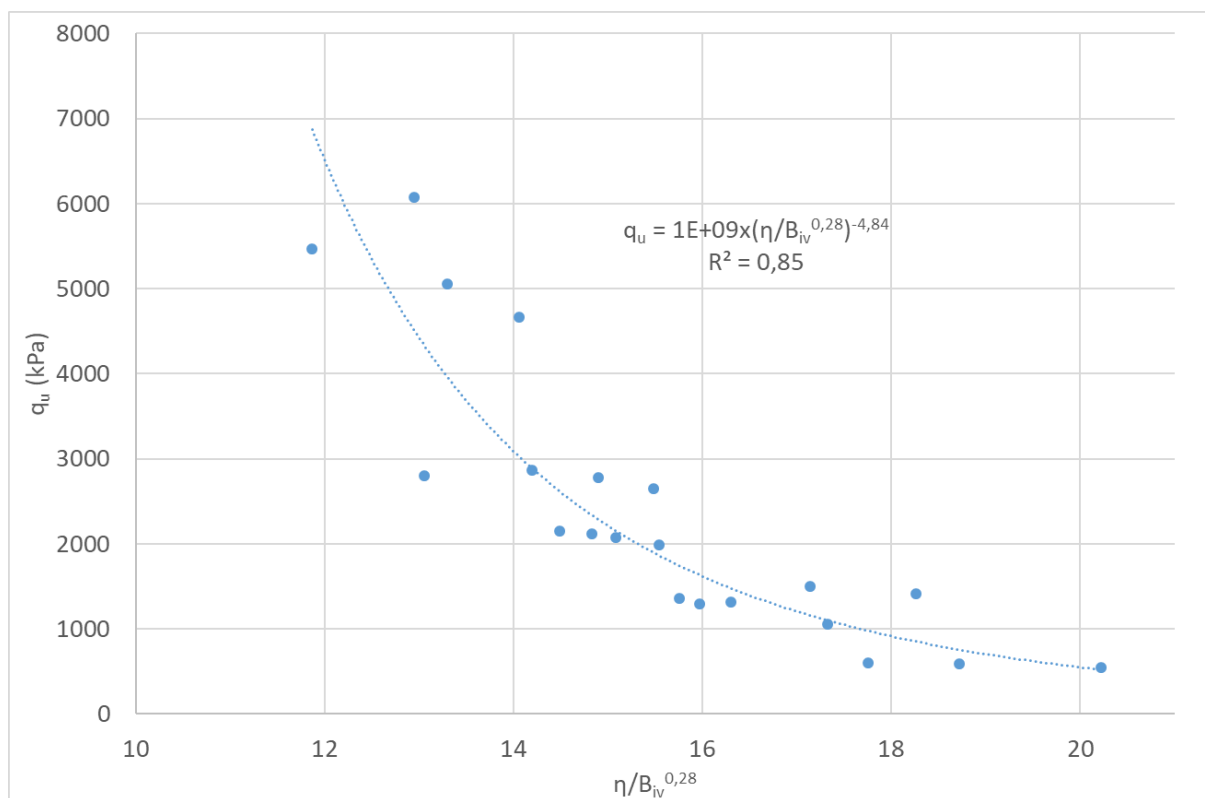


Figura 5.59:  $q_u$  em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para a mistura de arenito Botucatu, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.

### 5.5.2 Rigidez

A rigidez das misturas de arenito Botucatu, vidro e cal de carbureto, aos cento e oitenta dias de cura, em função do fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$ , e representada pelo  $G_0$ , é exibida na Figura 5.60 para 10, 20 e 30% de vidro adicionado. Nesta figura é possível visualizar as curvas características de comportamento do material.

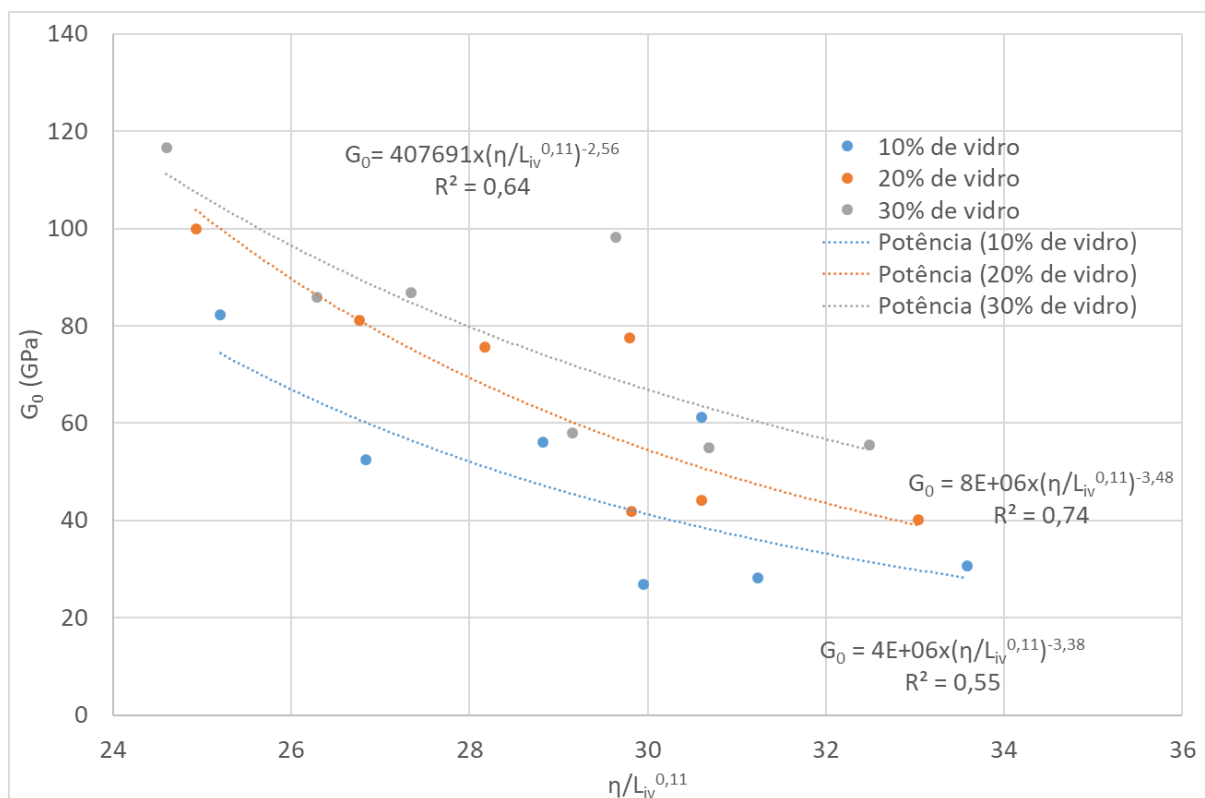


Figura 5.60:  $G_0$  em função do fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$  para a mistura de arenito Botucatu, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.

A correlação entre o módulo cisalhante a pequenas deformações ( $G_0$ ) e o fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  também se mostrou satisfatória, comprovando que é válida para a mistura de arenito Botucatu, vidro e cal de carbureto aos cento e oitenta dias de cura e esta é exibida na Figura 5.61.

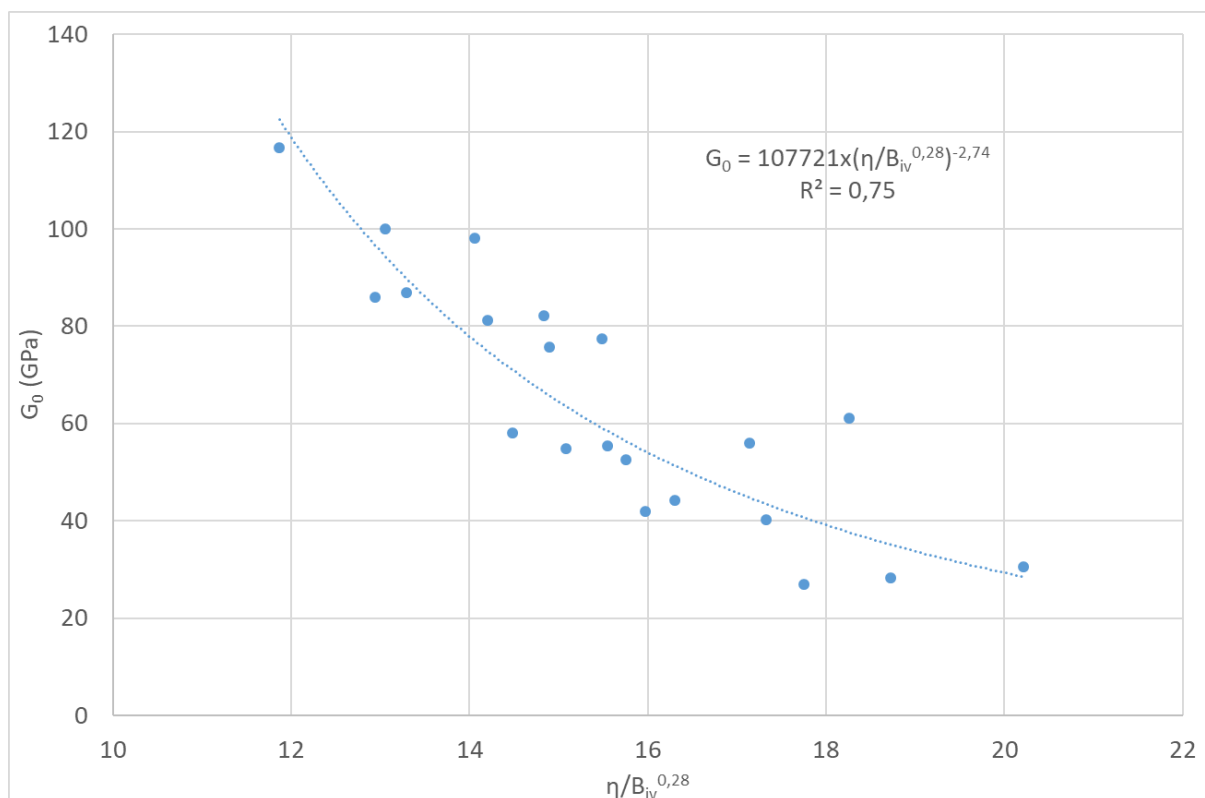


Figura 5.61:  $G_0$  em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para a mistura de arenito Botucatu, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.

### 5.5.3 Durabilidade

Os ensaios de durabilidade, aos cento e oitenta dias de cura, nas misturas de arenito Botucatu, vidro e cal de carbureto, mostraram um material satisfatório no quesito durabilidade. Nenhuma amostra teve perda de massa acumulada superior a 10%, ficando inclusive praticamente todas bem abaixo disto. Na Figura 5.62 é exibido o resultado do ensaio de durabilidade para estas misturas em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .

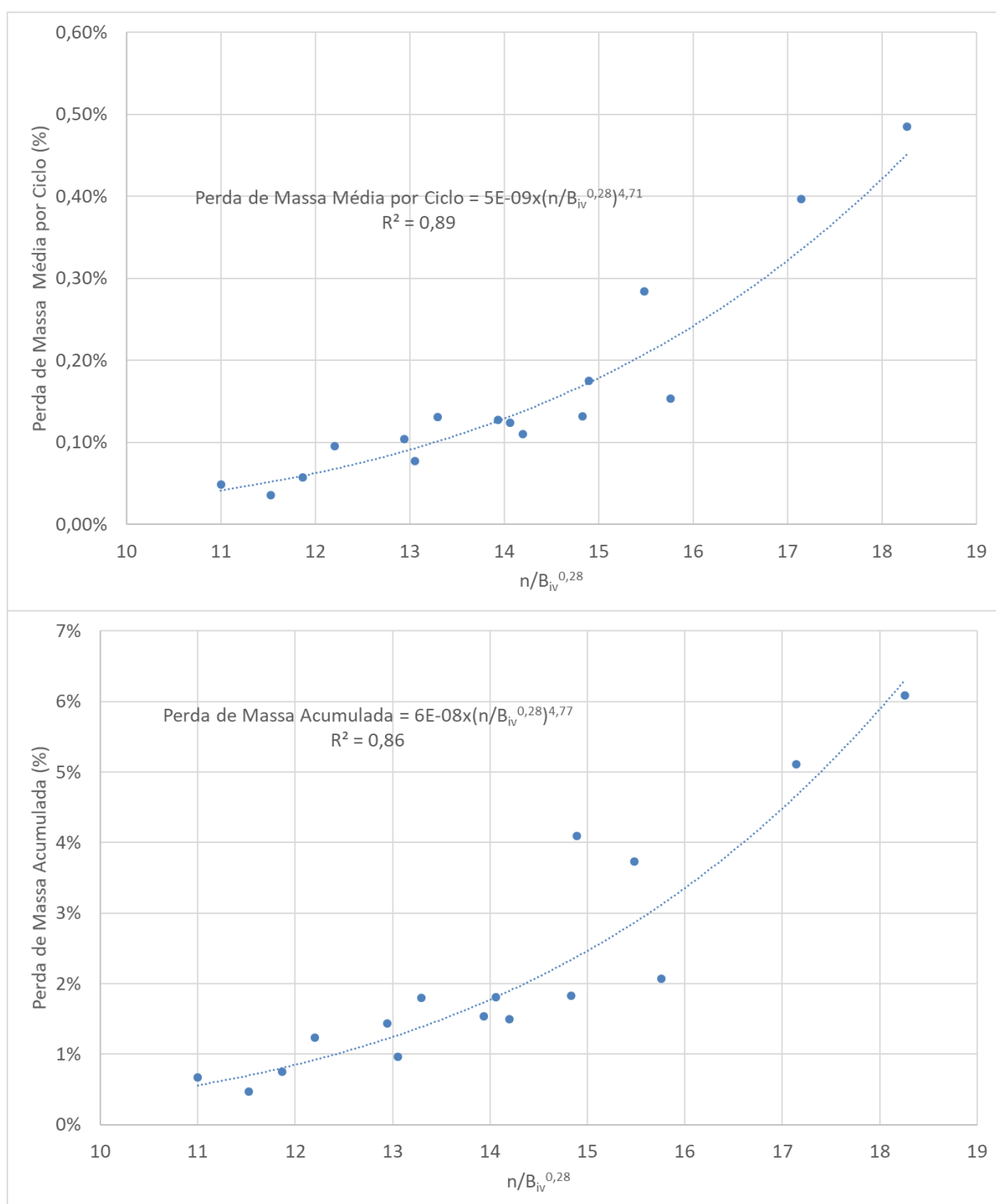


Figura 5.62: durabilidade em função do fator  $n/B_{iv}^{0,28}$  para a mistura de arenilo Botucatu, vidro e cal de carbureto para cento e oitenta dias de cura.

#### 5.5.4 Rigidez em função da resistência do material

Para a mistura arenito Botucatu, vidro e cal de carbureto, bem como para as misturas utilizando areia de Osório, existe a relação entre a resistência a compressão e o módulo cisalhante para pequenas deformações. Apesar de uma correlação não muito boa, que não se mostrou linear, este resultado é exibido na Figura 5.63.

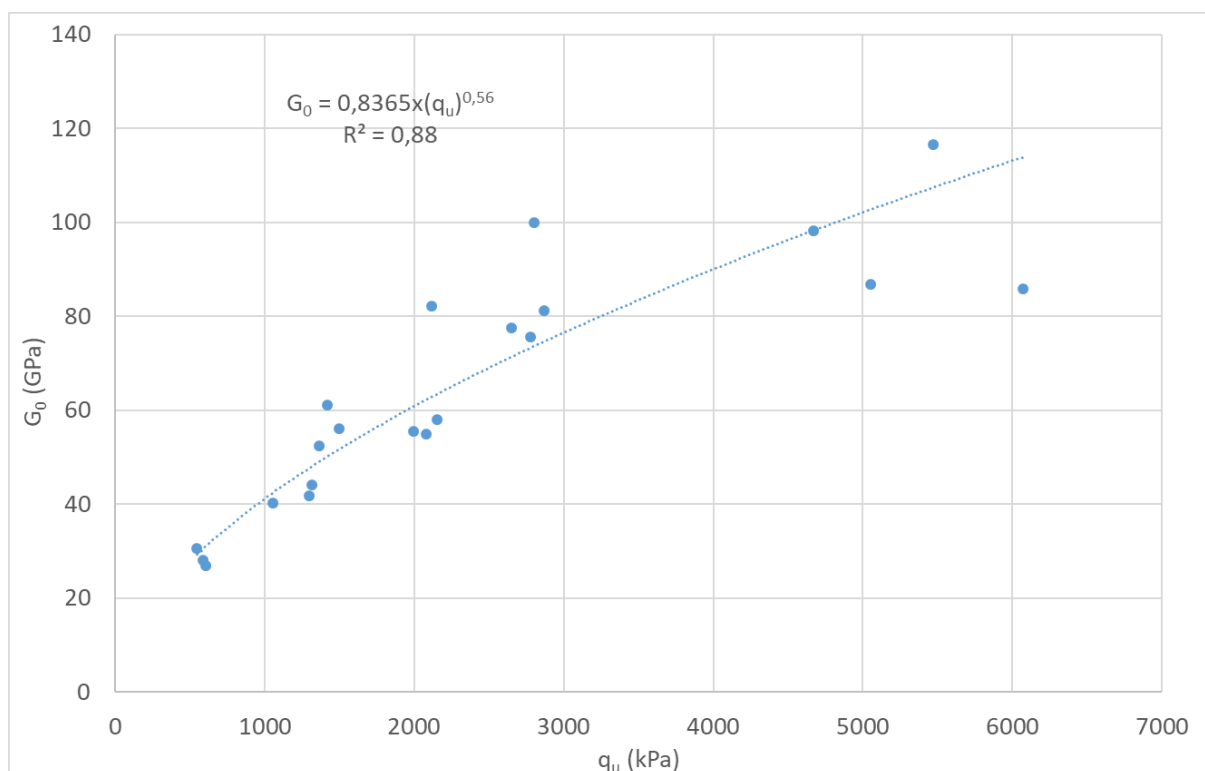


Figura 5.63:  $G_0$  em função de  $q_u$  da mistura areia de Osório, CCA e cal de carbureto para os cento e oitenta dias de cura.



## 6 DISCUSSÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo será exibida a discussão sobre resultados obtidos no programa experimental e a comparação destes dados com dados de pesquisas anteriores.

### 6.1 UTILIZAÇÃO DE PÓ VIDRO E CAL DE CARBURETO PARA CIMENTAR ARTIFICIALMENTE SOLOS ARENOSOS

Neste item são discutidos os ganhos de resistência, rigidez e durabilidade, obtidos nos ensaios realizados, nas misturas de areia de Osório, pó de vidro e cal de carbureto.

O pó de vidro junto com a cal de carbureto se mostrou um excelente agente cimentante para a areia de Osório e para o Arenito Botucatu. Em todos os casos, quanto maiores o teor de pó de vidro, o teor de cal de carbureto e o peso específico aparente seco, dentro da faixa de valores testada no programa experimental, maiores foram a resistência, a rigidez e a durabilidade das misturas.

Foram obtidas, para sete dias de cura, resistências a compressão variando na ordem de 100 a 1200 kPa, módulos cisalhantes a pequenas deformações na ordem de 5 a 40 GPa e perdas de massa acumuladas nos ensaios de durabilidade variando de menos de 1 até quase 60%. Para os 180 dias de cura, a resistência a compressão das misturas variou entre 2 e 4MPa aproximadamente e o módulo cisalhante a pequenas deformações variou entre 40 e 150GPa. Esta variabilidade mostrou o quanto a adição de materiais ou compactação podem resultar em um aumento de resistência, rigidez e durabilidade em areias artificialmente cimentadas com pó de vidro e cal de carbureto.

Para os sete dias de cura, as misturas com o peso específico aparente seco igual a  $15,5\text{kN/m}^3$  não se mostraram adequadas no quesito durabilidade, bem como as misturas com 10 % de vidro. Possivelmente, para maiores tempos de cura, estes materiais se mostrariam mais duráveis, sendo isso baseado na resistência e rigidez que estas amostras tiveram aos 180 dias de cura. A falta de durabilidade de material não necessariamente inviabiliza a sua utilização para fins práticos, é possível utiliza-los contando com algum tipo de confinamento adequado para a situação.

Conforme visto nas Figura 5.11 e 5.24, é possível relacionar a resistência a compressão das misturas e o módulo cisalhante a pequenas deformações, com o Fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$ , proposto por Consoli et al. (2011a), onde foi obtida uma equação características de cada um destes fatores, para cada um dos teores de vidro adicionado, inclusive com expoentes semelhantes. No quesito resistência foi possível aplicar a metodologia proposta em Consoli et al. (2016b), Consoli et al. (2017a) e Consoli et al. (2017b) obtendo uma equação única, que é exibida na Figura 5.12.

Foi possível correlacionar todas as misturas contendo pó de vidro e cal de carbureto com o fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , chegando a ótimas correlações em todas as propriedades testadas e este fato será comprovado nos itens seguintes.

## 6.2 VALIDAÇÃO DO FATOR $\eta/B_{IV}$ PARA A ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA DE AREIAS ARTIFICIALMENTE CIMENTADAS

A nova metodologia proposta no presente trabalho, que correlaciona a resistência a compressão de solos arenosos com o fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , se mostrou válida para todos os solos testados, conforme ilustrado na Figura 6.1. Com exceção da mistura areia de Osório, pó de vidro e cal de carbureto, com 180 dias de cura, na qual possivelmente as reações pozolânicas cessaram em algumas misturas, devido à falta de sílica em estado amorfo, antes do final do período de cura, todas os outros materiais obtiveram um expoente externo com valor de aproximadamente 4, indicando assim uma similaridade no comportamento.

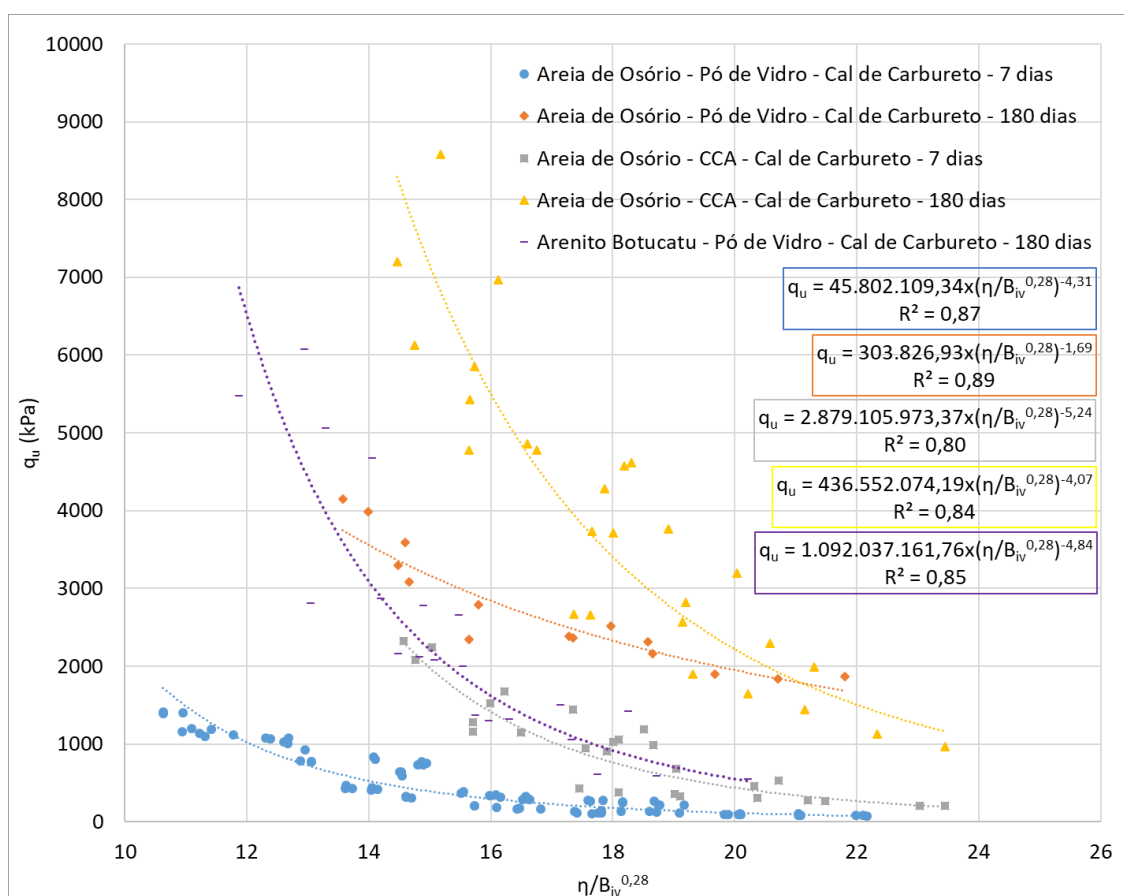


Figura 6.1:  $q_u$  das misturas testadas em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .

A normalização proposta por Consoli et al. (2016b), Consoli et al. (2017a) e Consoli et al. (2017b), para o fator  $\eta/L_{iv}$  e  $\eta/C_{iv}$ , após análise, se mostrou possível de ser aplicada no fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  com excelentes resultados, conforme exibido na Figura 6.2. Esta metodologia consiste em dividir todas as resistências à compressão obtidas por uma resistência à compressão com um determinado fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  (neste caso 17). Foi possível chegar em uma relação única de resistência em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , para todas as misturas do trabalho, tanto para a areia de Osório quanto para o Arenito Botucatu e para os diferentes resíduos adicionados a mistura, mostrando assim a validade da metodologia proposta no presente trabalho e a sua grande faixa de aplicabilidade.

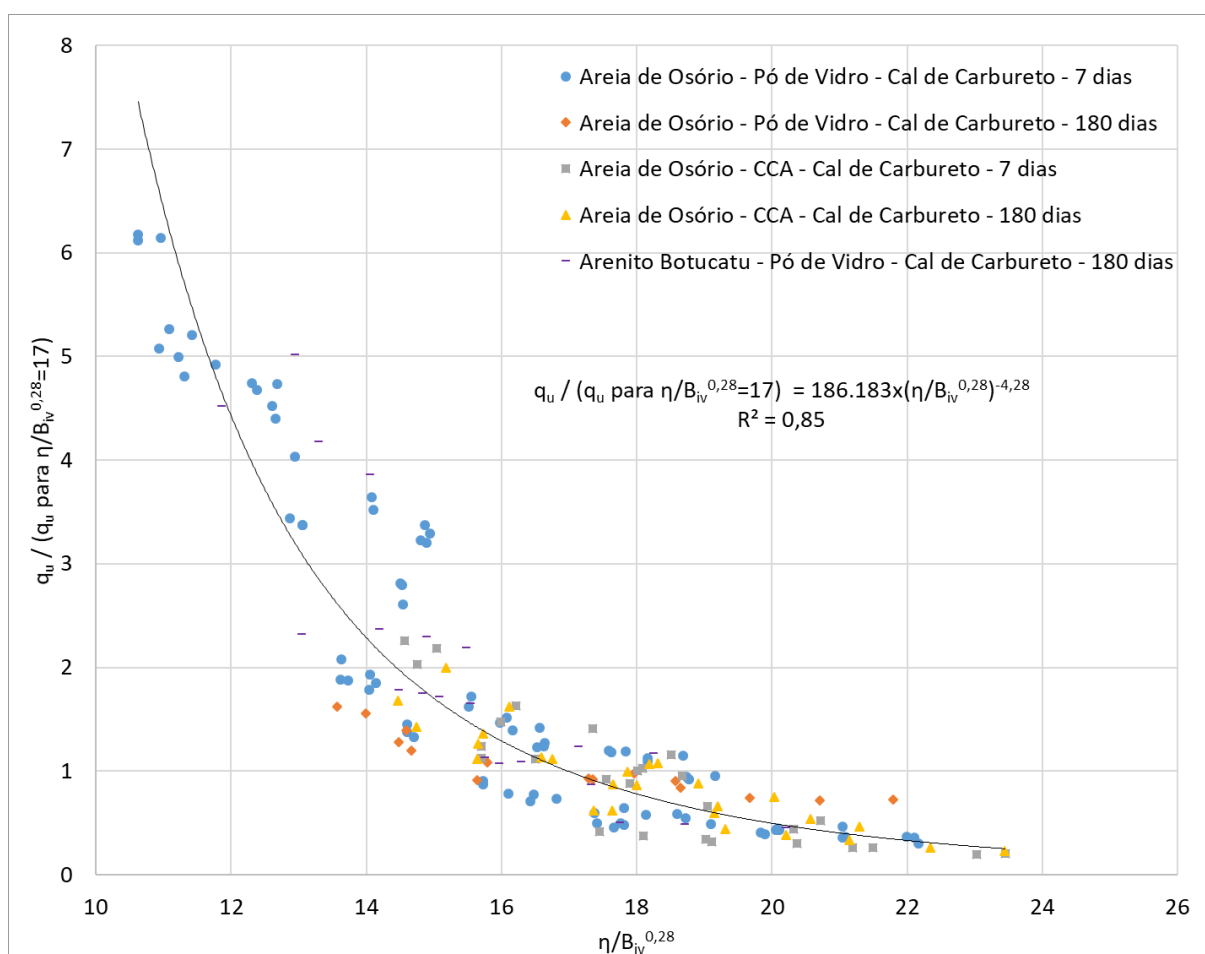


Figura 6.2:  $q_u$  das misturas testadas normalizados e em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .

Com o intuito de confirmar a validade da correlação entre a resistência a compressão e o fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , foram utilizados os dados obtidos por DALLA ROSA (2009), que em sua pesquisa adicionou cinza volante e cal hidratada no arenito Botucatu com 28, 60, 90, 180 e 365 dias de cura. Seu estudo, em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  é exibido na Figura 6.3. É possível verificar a aplicabilidade da metodologia de dosagem proposta e a obtenção de ótimas correlações entre a resistência e  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ . Existe uma similaridade entre o expoente externo das equações entre os diferentes tempos de cura e, inclusive, com os ensaios realizados nesta pesquisa utilizando outros materiais.

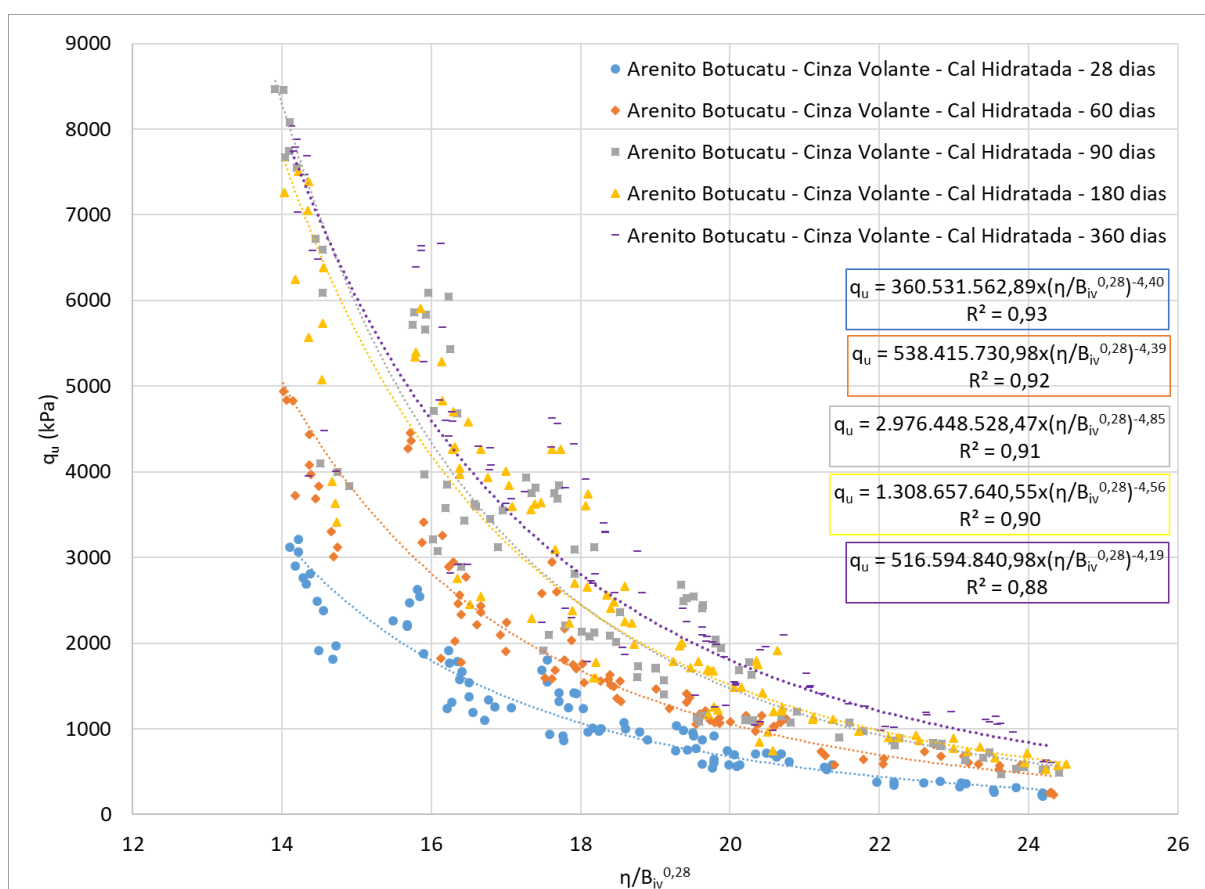


Figura 6.3:  $q_u$  das misturas testadas por DALLA ROSA (2009) em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .

Novamente foi aplicada a normalização de Consoli et al. (2016b), Consoli et al. (2017a) e Consoli et al. (2017b), porém com os dados de Dalla Rosa (2009). Este resultado pode ser visualizado na Figura 6.4, onde existe uma ótima correlação entre as variáveis.

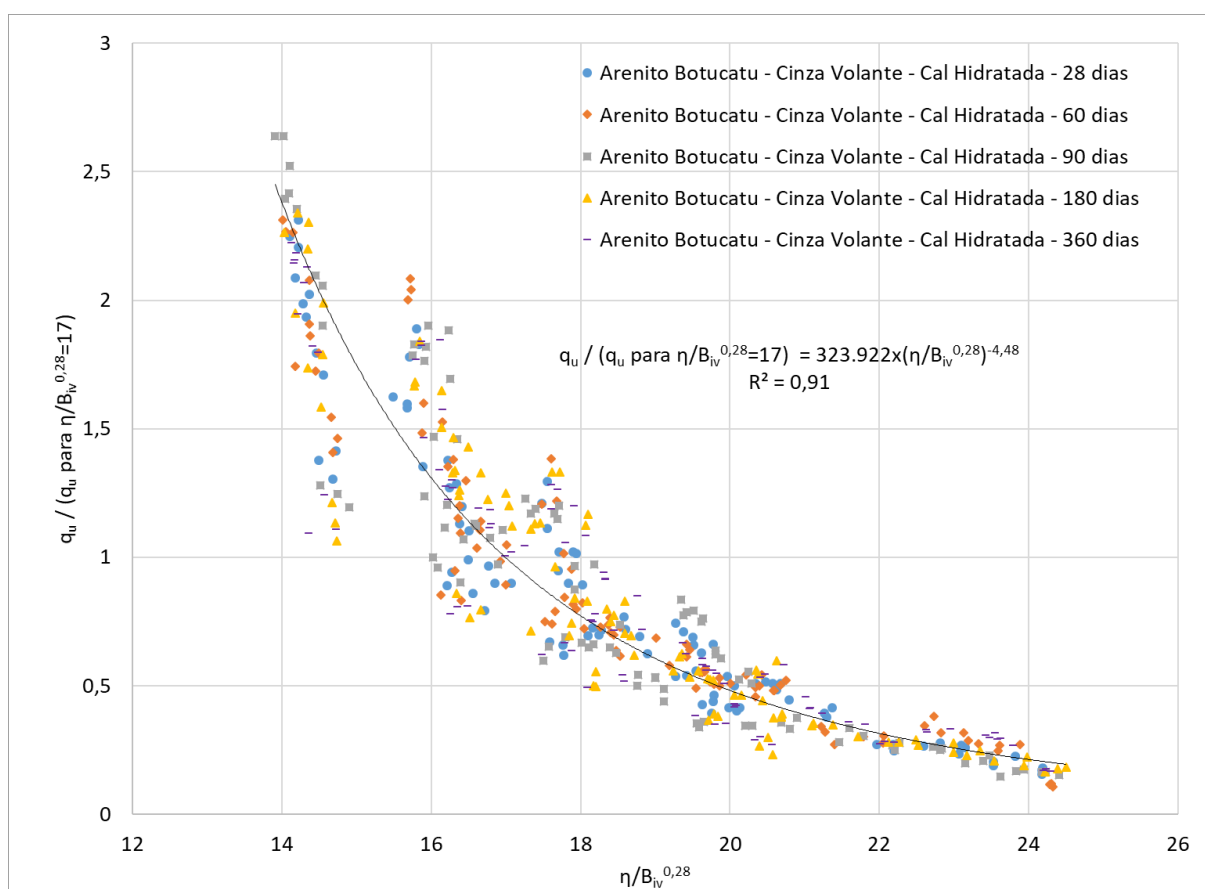


Figura 6.4:  $q_u$  das misturas de Dalla Rosa (2009) normalizados e em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .

Com a utilização dos dados obtidos durante a presente pesquisa e por Dalla Rosa (2009), foi possível verificar a metodologia proposta em função da resistência para uma grande gama de variáveis, sendo elas o tipo de solo, o tipo de agente cimentante, o tipo de pozolana adicionada e o tempo de cura das misturas. Na Figura 6.5 é exibida a normalização de todas as resistências, normalizadas com o  $q_u$  para  $\eta/B_{iv}^{0,28}=17$ , em função de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .

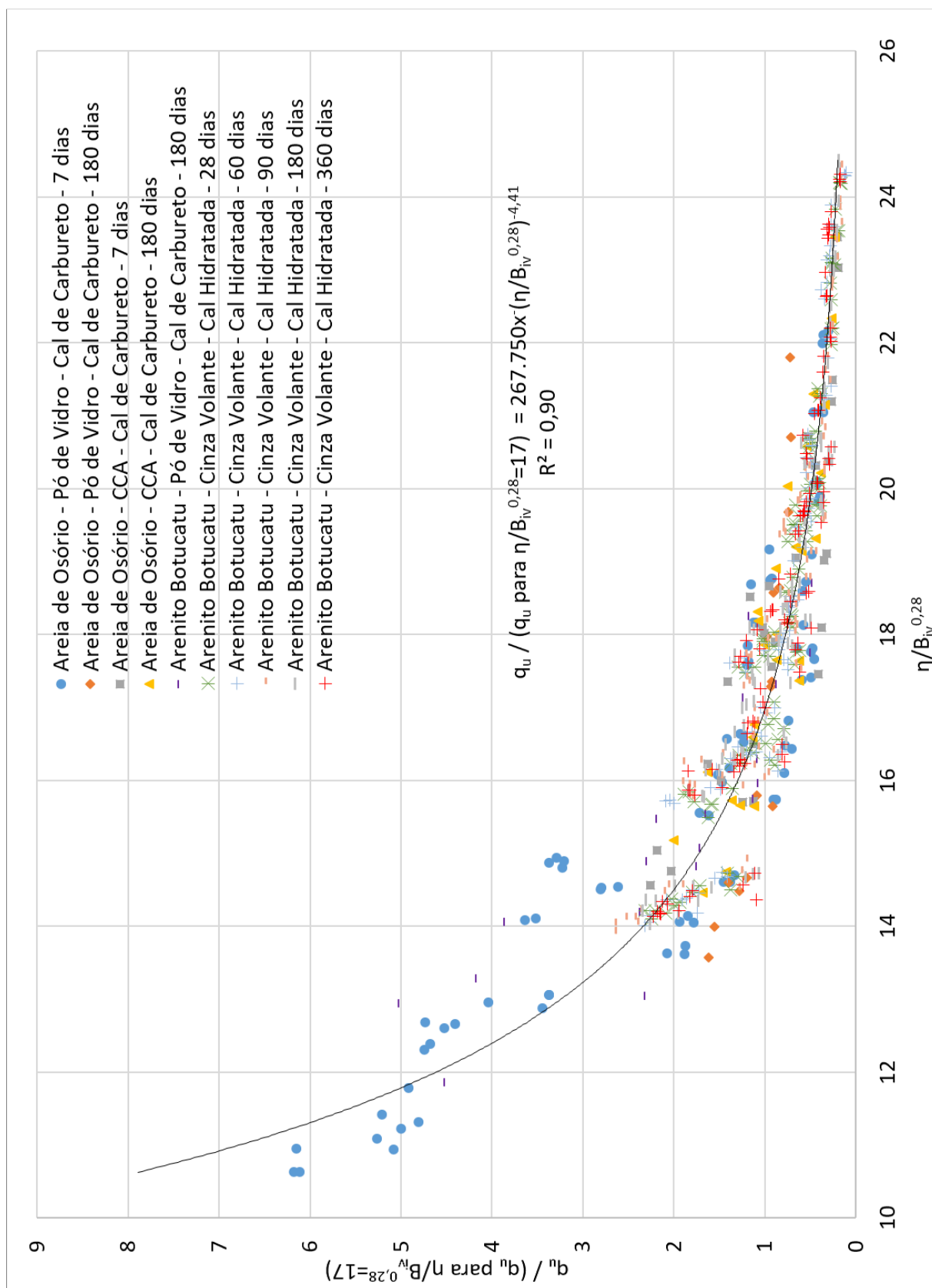


Figura 6.5:  $q_u$  das misturas testadas e obtidas de Dalla Rosa (2009) normalizados e em função do fator  $\eta/B_{IV}^{0,28}$ .

Com o intuito de confirmar a validade da correlação entre a resistência a compressão e o fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  com a utilização de cimento Portland, foram utilizados os dados obtidos por Caberlon (2008), que cimentou artificialmente a areia de Osório com diferentes tipos de cimento Portland e diferentes períodos de cura, os dados obtidos por Foppa (2005), que melhorou o arenito Botucatu com a utilização de cimento Portland com sete dias de cura e os dados obtidos por Consoli et al. (2016c), que melhoraram resíduos de mineração de ouro com a utilização de cimento CPV. Neste caso, o teor volumétrico de agente cimentante é o próprio teor volumétrico de cimento. A resistência obtida nestas misturas, em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , são exibidas na Figura 6,6, bem como a equação característica de cada uma destas.

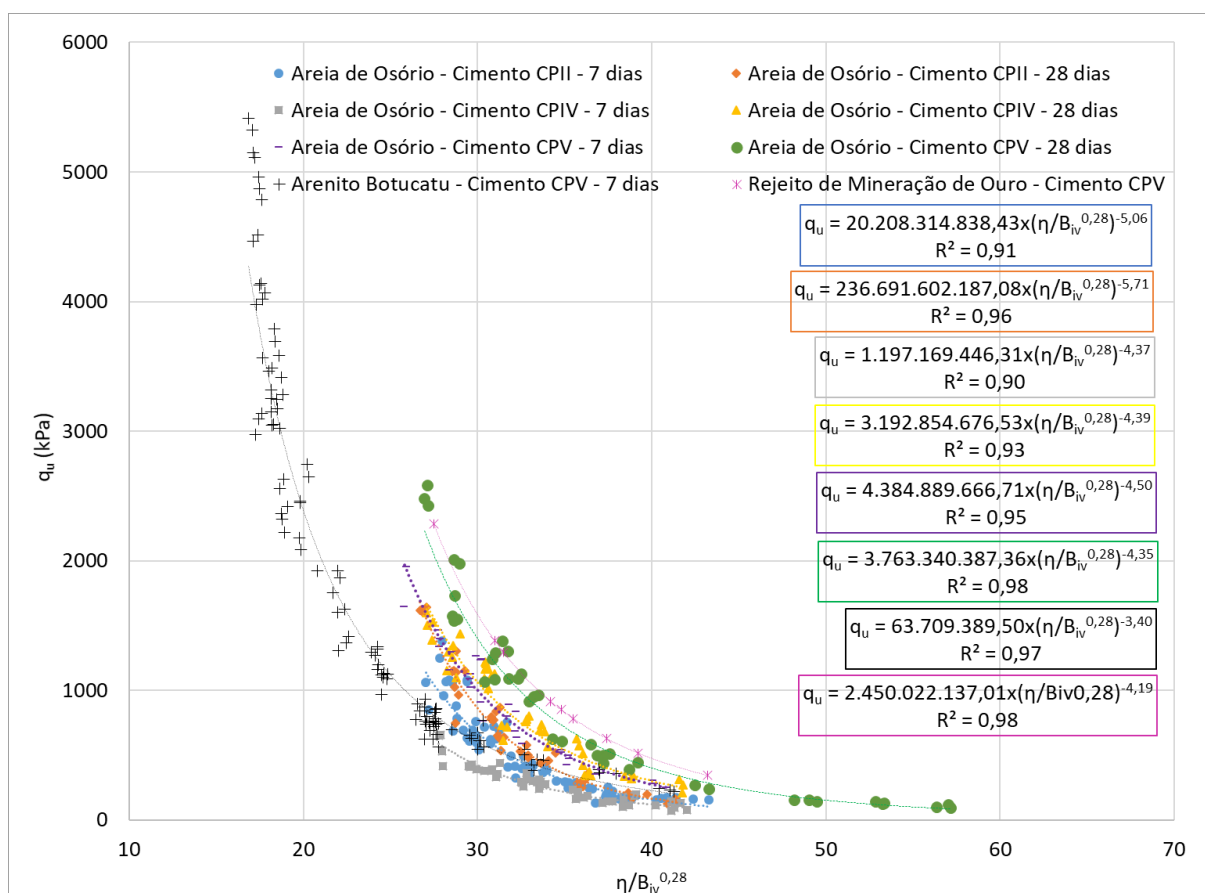


Figura 6.6:  $q_u$  das misturas testadas por Caberlon (2008), Foppa (2005) e Consoli (2016c) em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .

Bem como nos casos anteriores o expoente externo se mostrou próximo para todas as misturas, indicando assim a possibilidade de normalização dos resultados. Com estes dados foi aplicada a normalização proposta por Consoli et al. (2016b), Consoli et al. (2017a) e



Consoli et al. (2017b), com a utilização do fator  $\eta/B_{IV}^{0,28}$ . O resultado desta normalização se mostrou possível e é exibido, junto com a sua equação característica na Figura 6.7.

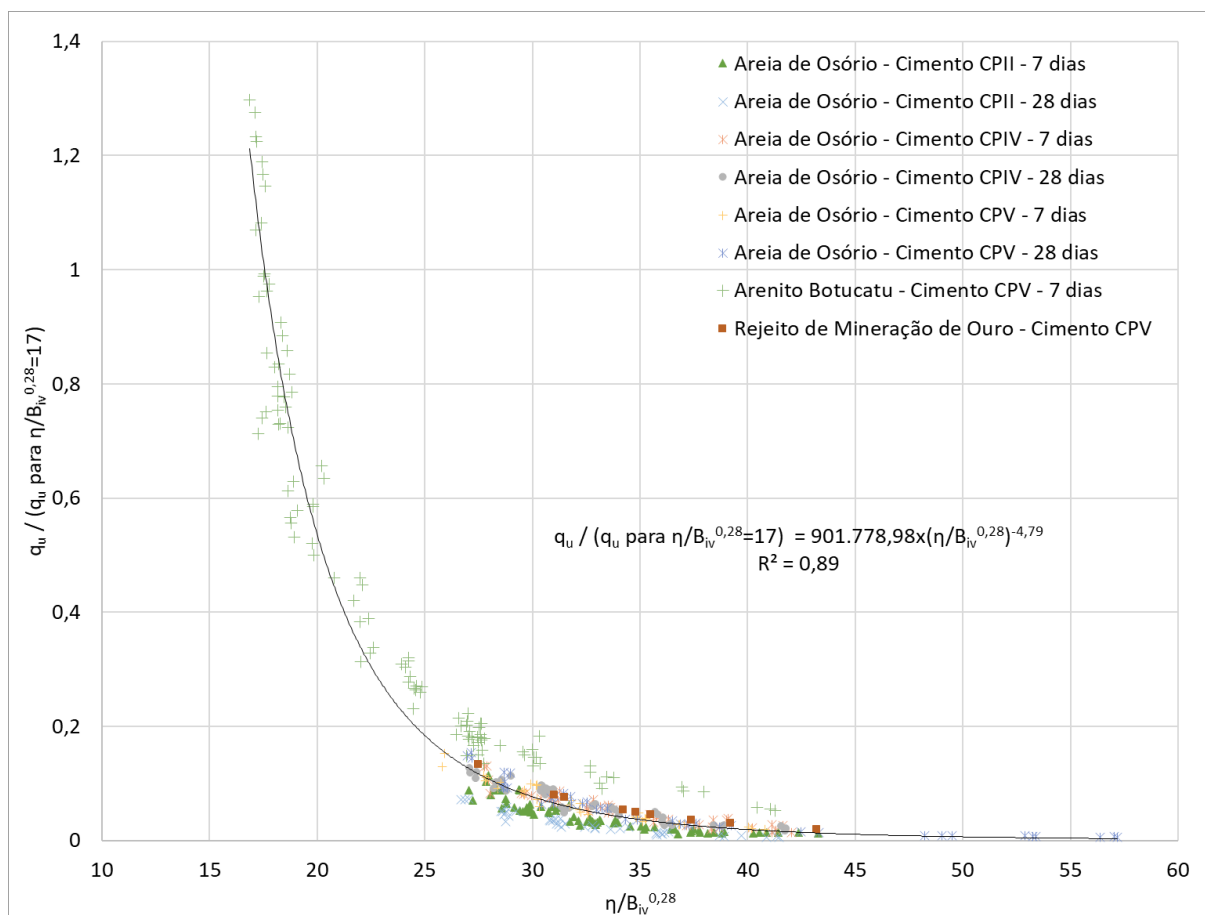


Figura 6.7:  $q_u$  das misturas de Caberlon (2008), Foppa (2005) e Consoli et al. (2016c) normalizados e em função do fator  $\eta/B_{IV}^{0,28}$ .

Comparando os expoentes externos da normalização com os dados obtidos durante esta pesquisa, que foi -4,28, com a normalização obtida a partir dos dados de Dalla Rosa (2009), que foi -4,48, e o com os resultados obtidos a partir dos dados de Caberlon (2008), Foppa (2005) e Consoli et al. (2016c), que foi -4,79, é possível visualizar a similaridade de comportamento entre os diferentes materiais. Juntando todos os resultados anteriores em um único gráfico, foi possível chegar a uma única curva, com uma única equação, com um comportamento único e uma baixa dispersão. Este gráfico e a equação característica são exibidos na Figura 6.8 e na Figura 6.9 (em escala logarítmica). É possível afirmar que o comportamento das misturas solo/pozolana/cal, com a utilização do fator  $\eta/B_{IV}^{0,28}$ , pode ser comparado com o comportamento obtido com a utilização de cimento Portland no melhoramento de solos.

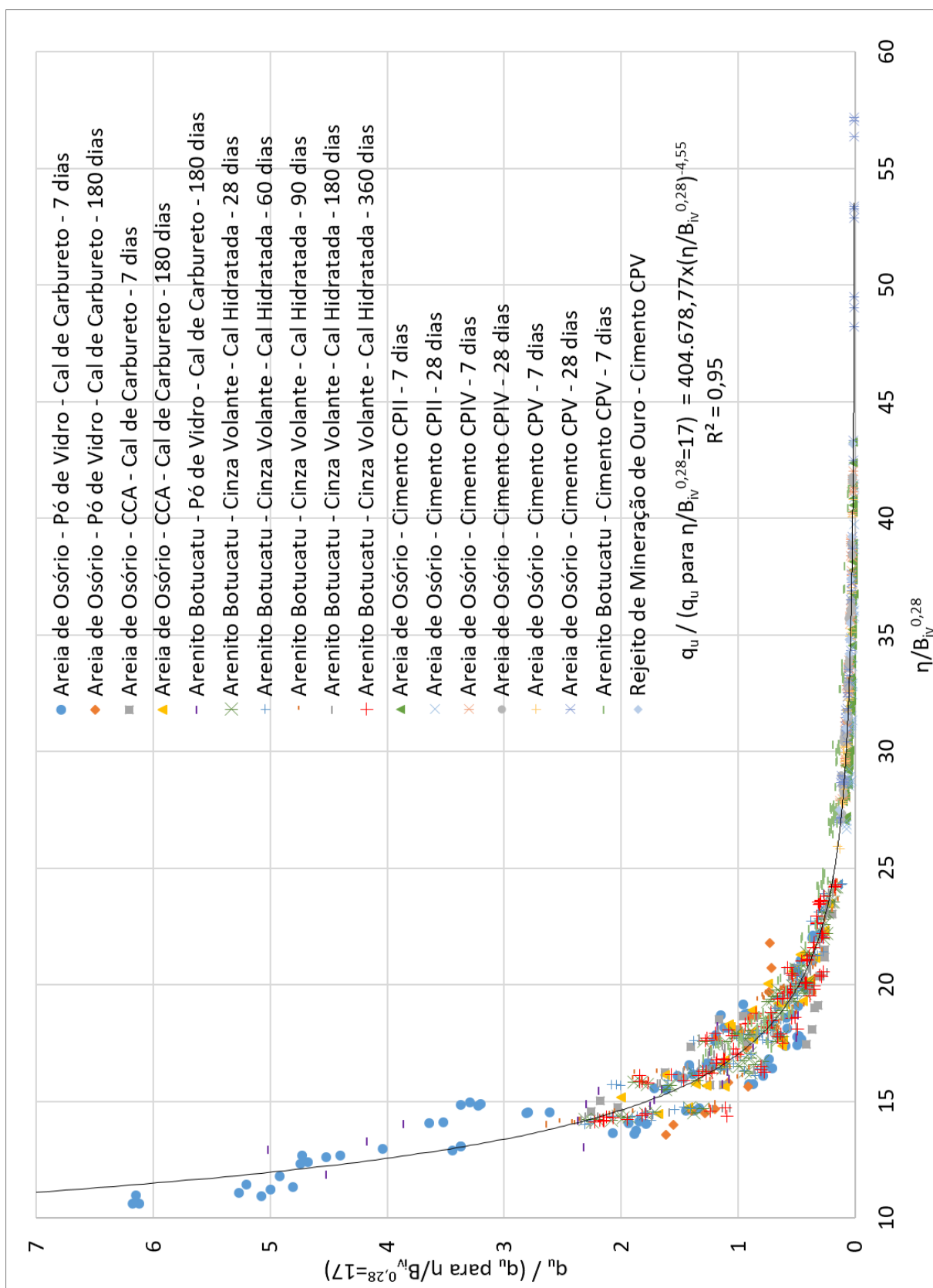


Figura 6.8:  $q_u$  das misturas testadas e obtidas de Dalla Rosa (2009), Caberlon (2008), Foppa (2005) e Consoli et al. (2016c) normalizados e em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .

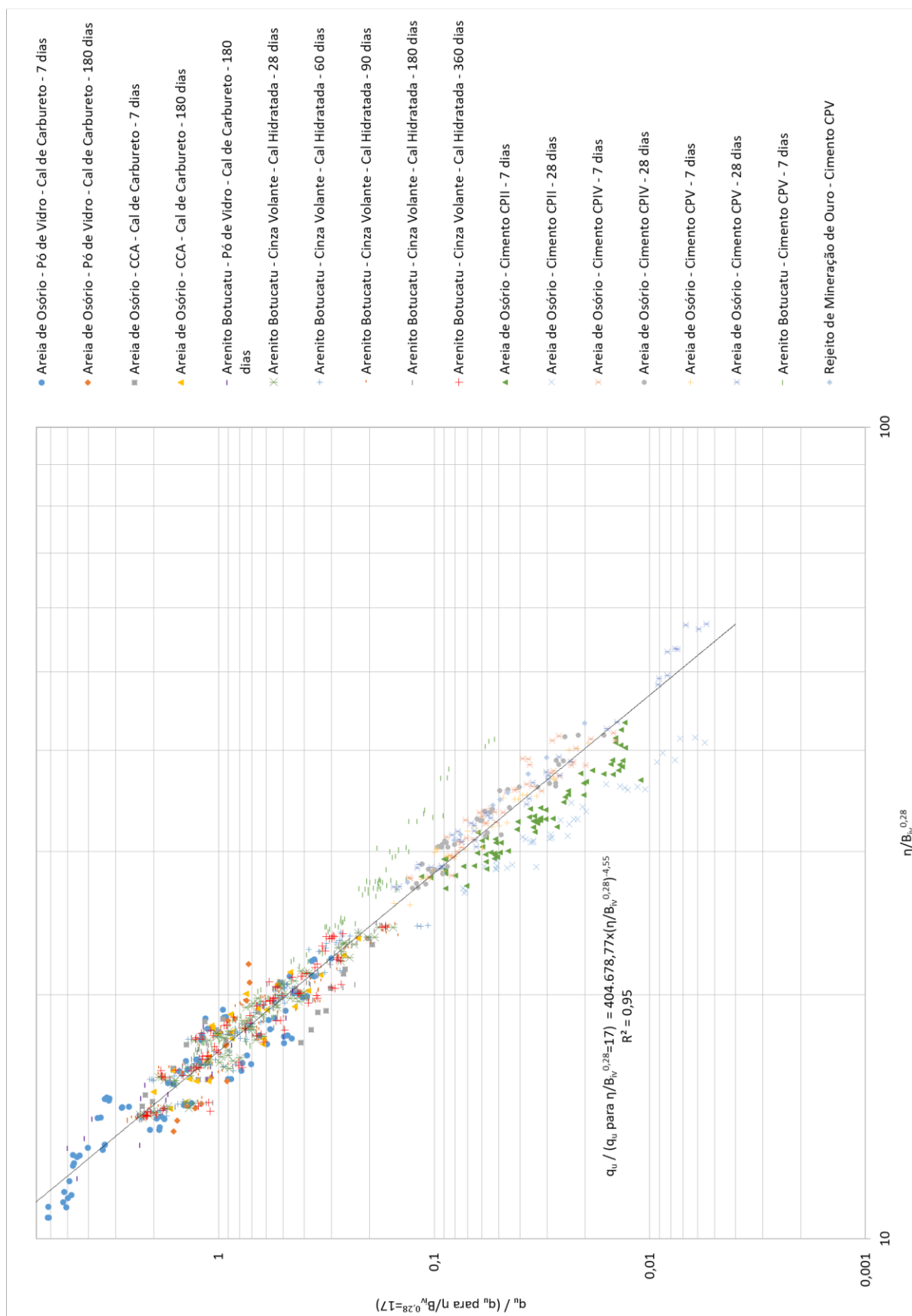


Figura 6.9:  $q_u$  das misturas testadas e obtidas de Dalla Rosa (2009), Caberlon (2008), Foppa (2005) e Consoli et al. (2016c) normalizados e em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  na escala logarítmica.

### 6.3 VALIDAÇÃO DO FATOR $\eta/B_{IV}$ PARA A ESTIMATIVA DE RIGIDEZ DE AREIAS ARTIFICIALMENTE CIMENTADAS

Bem como para a resistência a compressão, a nova metodologia proposta no presente trabalho, que correlaciona o módulo cisalhante a pequenas deformações de solos arenosos com o fator  $\eta/B_{IV}^{0,28}$ , se mostrou válida para todos os solos testados conforme ilustrado na Figura 6.10. Apesar da correlação obtida com a rigidez apresentar uma dispersão um pouco maior nos resultados que a correlação obtida com a resistência a compressão, o fator  $\eta/B_{IV}^{0,28}$  se mostrou um parâmetro chave na rigidez de areias artificialmente cimentadas e com comportamento bem definido. É possível obter uma equação para cada tipo de mistura e período de cura. Foi observada também uma similaridade entre os expoentes externos.

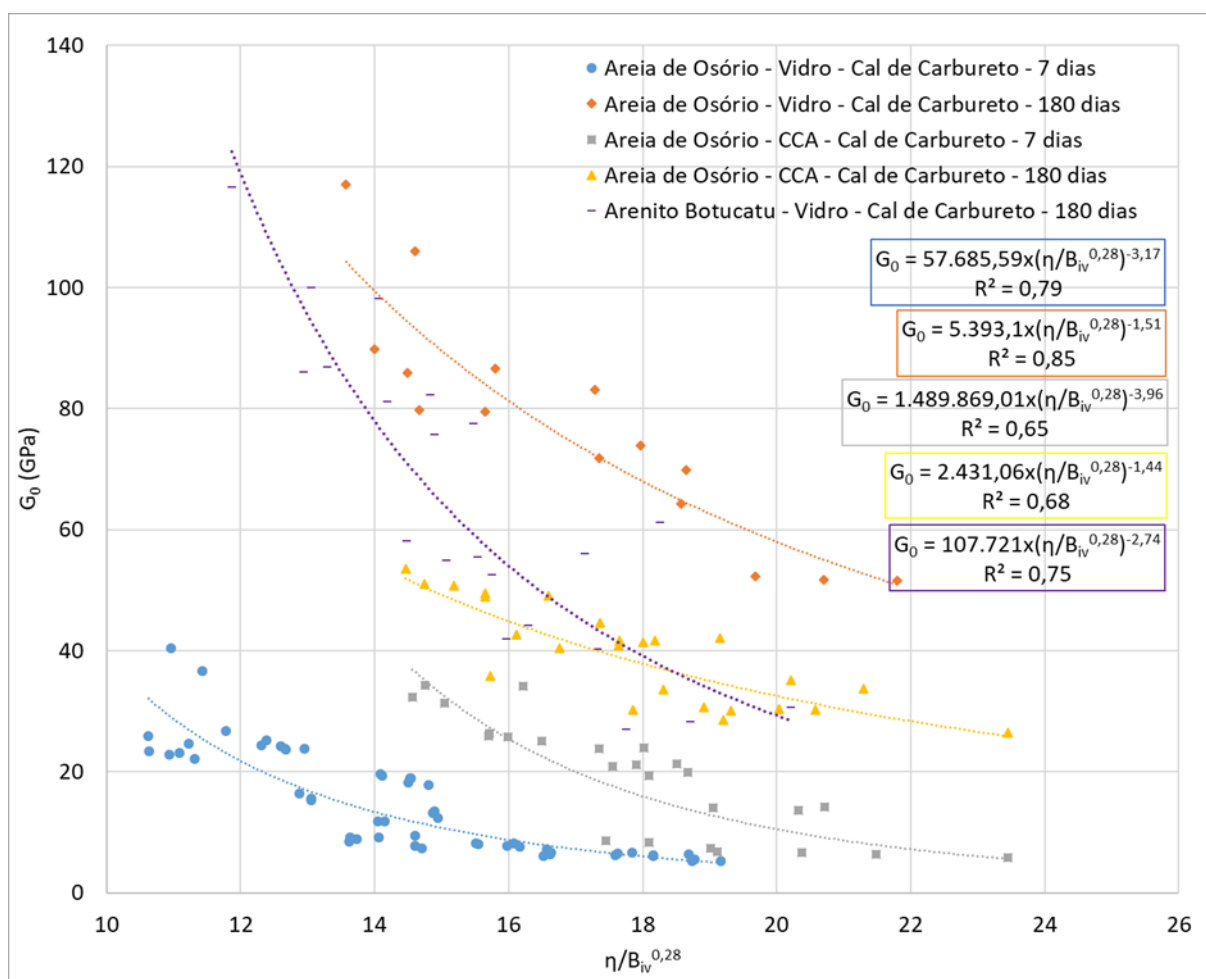


Figura 6.10:  $G_0$  das misturas testadas em função do fator  $\eta/B_{IV}^{0,28}$ .

Com este método, se torna possível normalizar o módulo cisalhante a pequenas deformações de todas as curvas, dividindo os valores de  $G_0$ , pelo  $G_0$  encontrado para um determinado  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  (neste caso 17). O resultado desta operação pode ser visualizado na Figura 6.11, onde é possível observar o comportamento desta correlação e a equação obtida.

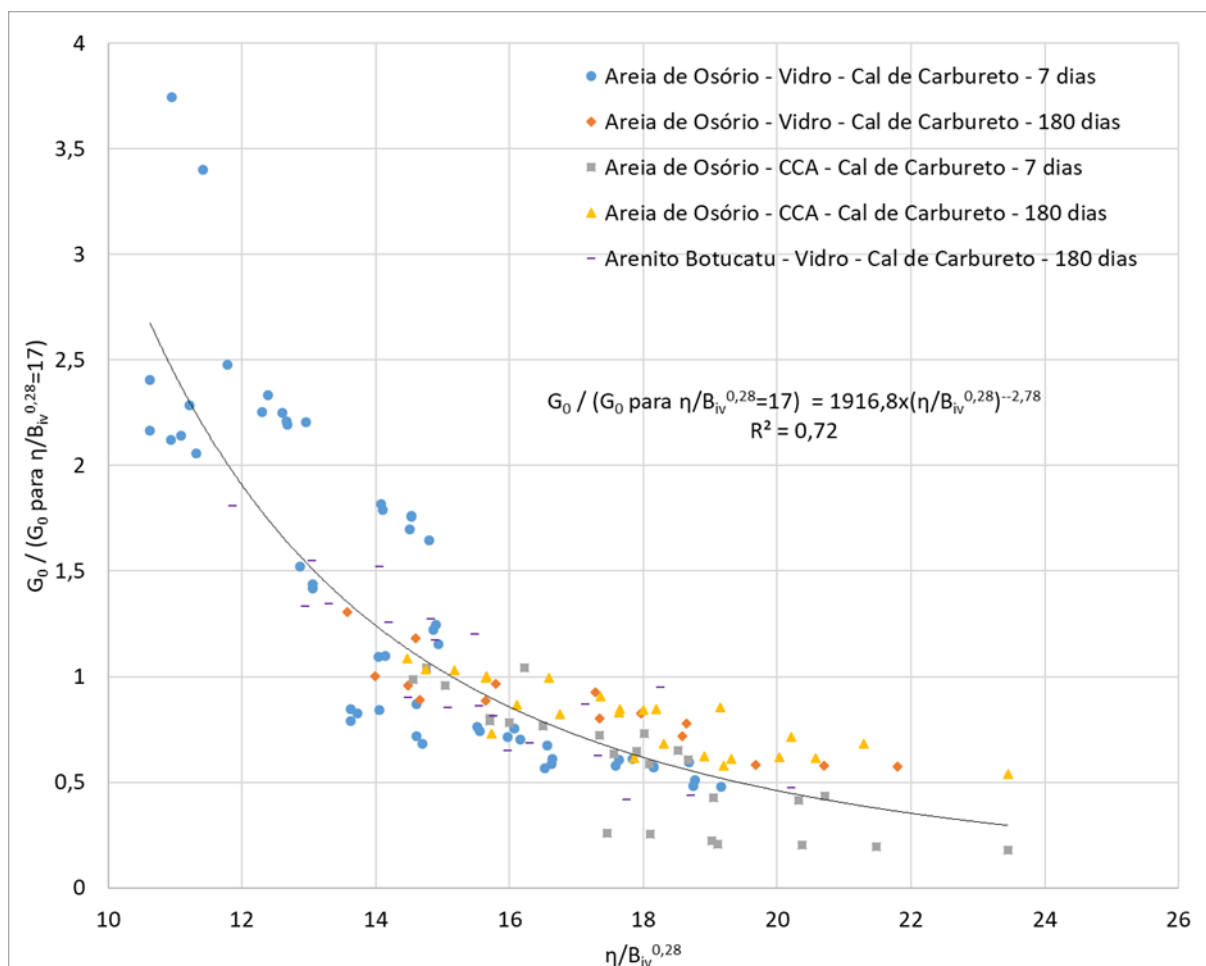


Figura 6.11:  $G_0$  das misturas testadas normalizados e em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .

Para validar a normalização obtida na Figura 6.10 com dados de outras pesquisas, foram adicionadas as medidas de  $G_0$  obtidas por Consoli et al. (2016c), que em seu trabalho executaram a estabilização de rejeitos de mineração de ouro com a utilização de cimento Portland. Na figura 6.12 é possível visualizar a correlação gerada com os resultados da presente pesquisa, juntamente com os dados obtidos pelos autores previamente citados, evidenciando a similaridade no comportamento e a correlação obtida. A mesma correlação é exibida na Figura 6.13, porém em escala logarítmica.

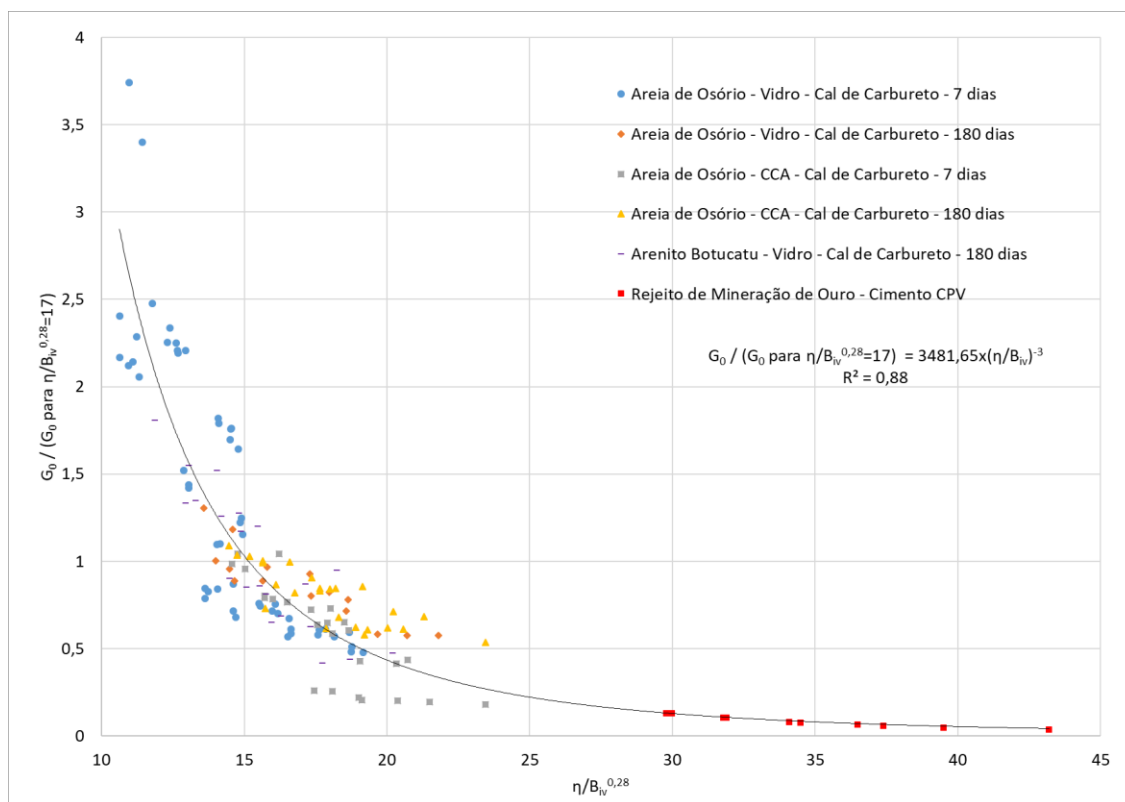


Figura 6.12:  $G_0$  das misturas testadas normalizados e em função do fator  $\eta/B_v^{0,28}$  juntamente com os dados de Consoli et al. (2016c).

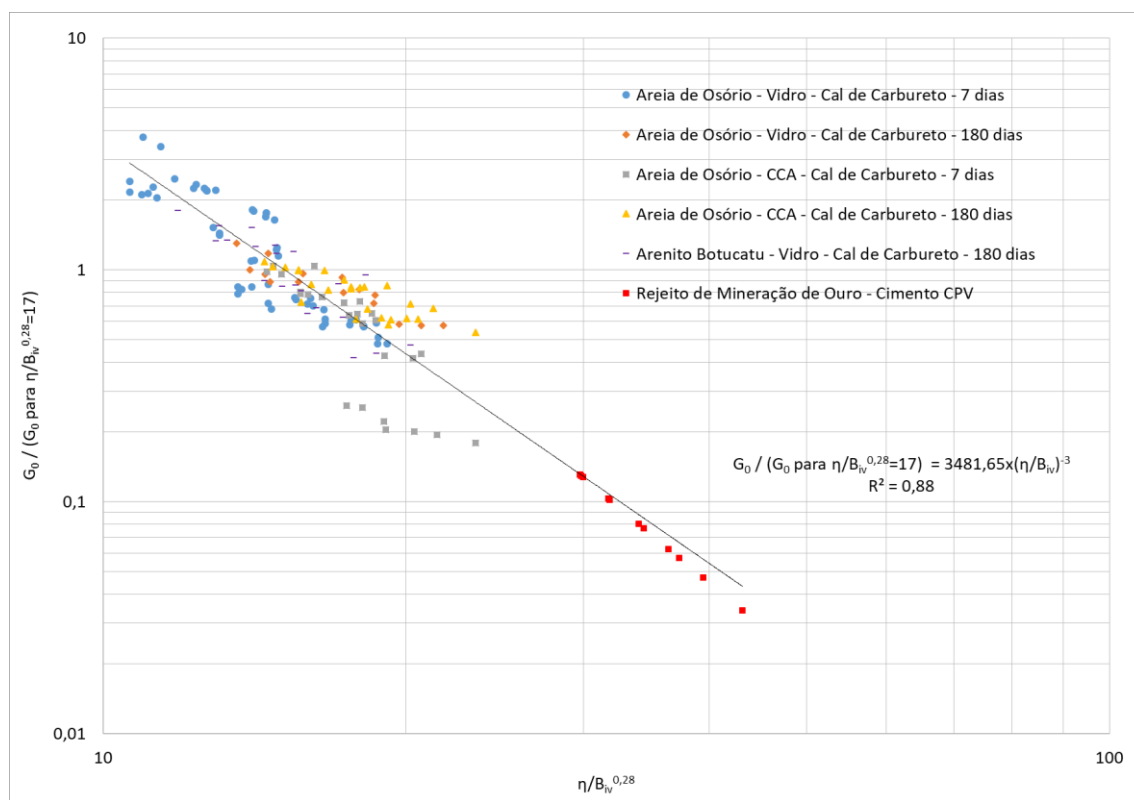


Figura 6.13:  $G_0$  das misturas testadas normalizados e em função do fator  $\eta/B_v^{0,28}$  juntamente com os dados de Consoli et al. (2016c) em escala logarítmica.

## 6.4 VALIDAÇÃO DO FATOR $\eta/B_{IV}$ PARA A ESTIMATIVA DE DURABILIDADE DE AREIAS ARTIFICIALMENTE CIMENTADAS

A durabilidade se mostrou função do fator  $\eta/B_{IV}^{0,28}$  para as misturas utilizadas, tanto para a areia de Osório, quanto para o Arenito Botucatu, e todas as variáveis testadas. Os resultados de perda de massa média por ciclo (Figura 6.14) e perda de massa acumulada (Figura 6.15) mostraram excelentes correlações com  $\eta/B_{IV}^{0,28}$ . Com estas figuras é possível afirmar que a durabilidade de uma areia artificialmente cimentada pode ser estimada com a utilização desta metodologia.

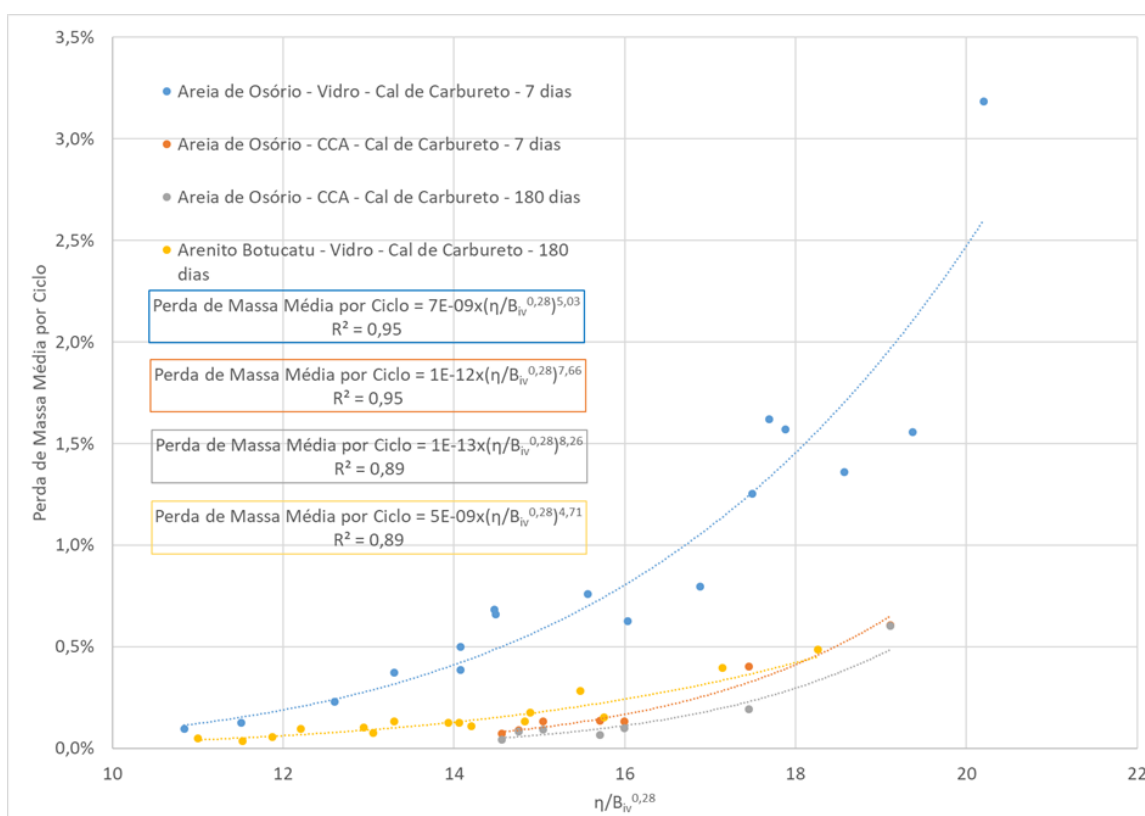


Figura 6.14: perda de massa média por ciclo das misturas testadas em função do fator  $\eta/B_{IV}^{0,28}$ .

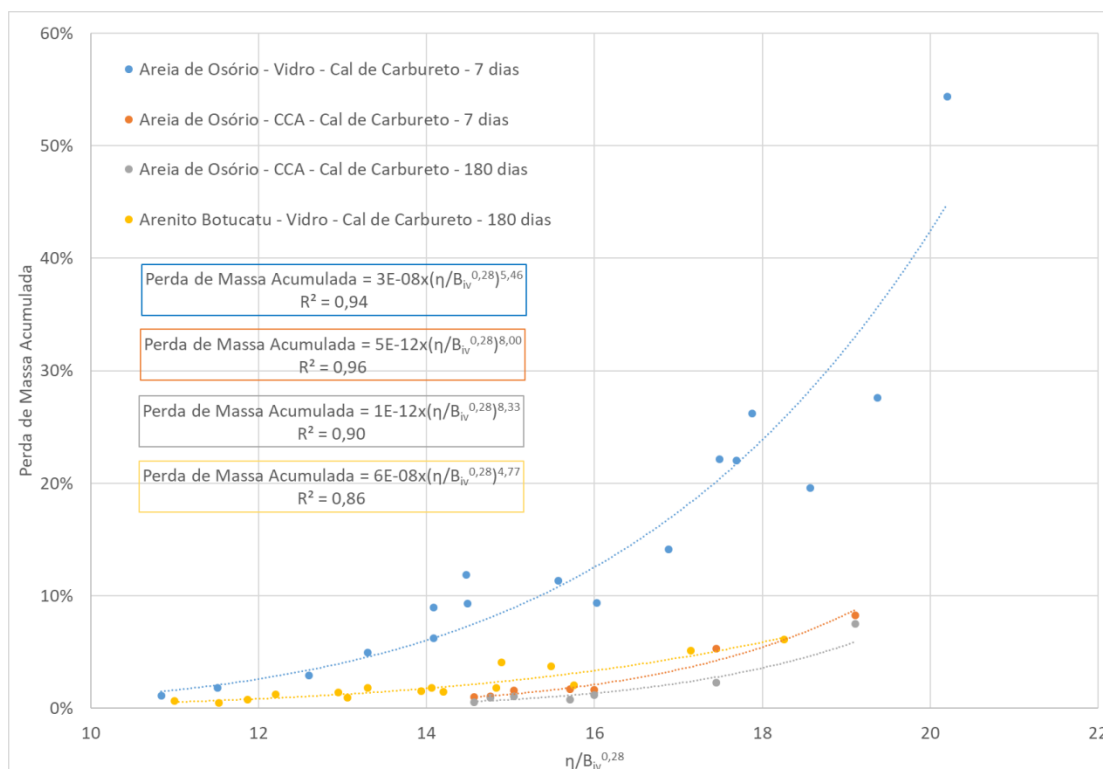


Figura 6.15: perda de massa acumulada das misturas testadas em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .

Bem como para a resistência e para a Rigidez, é apresentada uma normalização da perda de massa média por ciclo (PMMC) e da perda de massa acumulada (PMA), em função do  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , para todos as misturas testadas. Os resultados podem ser visualizados respectivamente nas Figuras 6.16 e 6.17. Novamente houve uma clara definição do comportamento dos materiais e foram obtidas equações que o descrevem. Houve uma maior dispersão nos resultados obtidos para os maiores valores de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , provavelmente devida a quebra de pedaços dos corpos de prova durante a realização dos ensaios (quanto maior o  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , menor é a resistência e a rigidez do material).



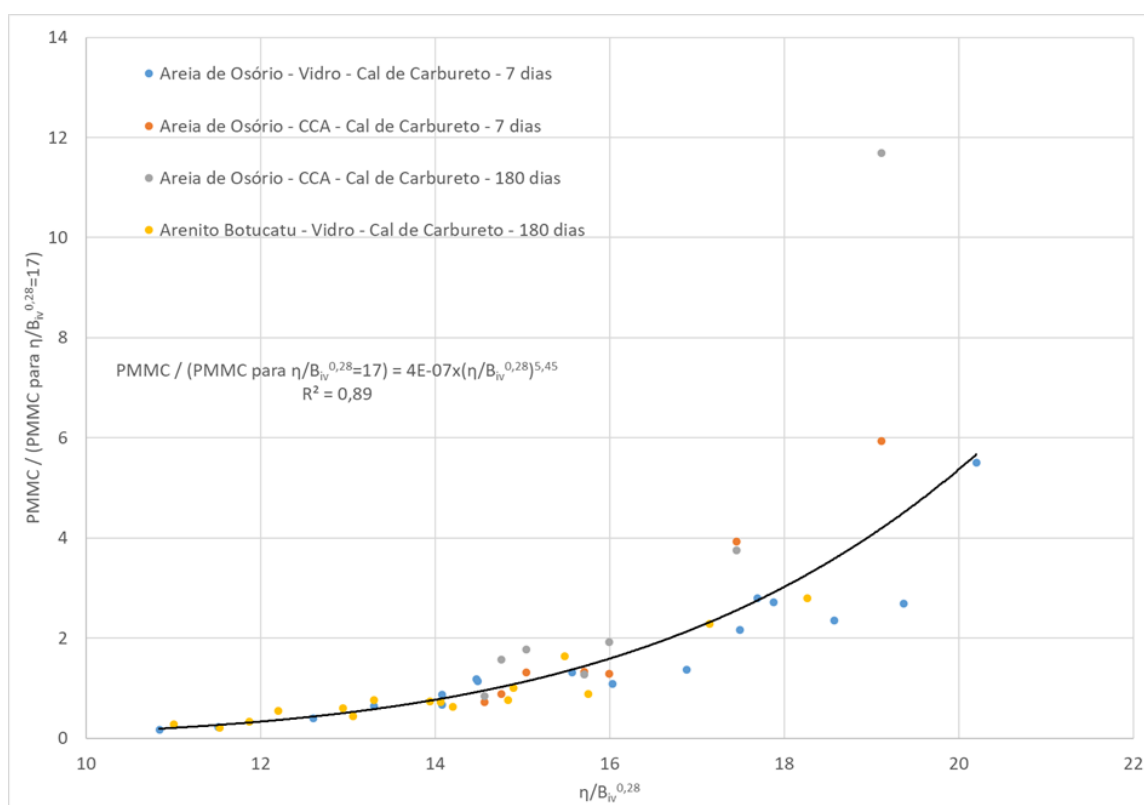


Figura 6.16: perda de massa média por ciclo das misturas testadas normalizados e em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .

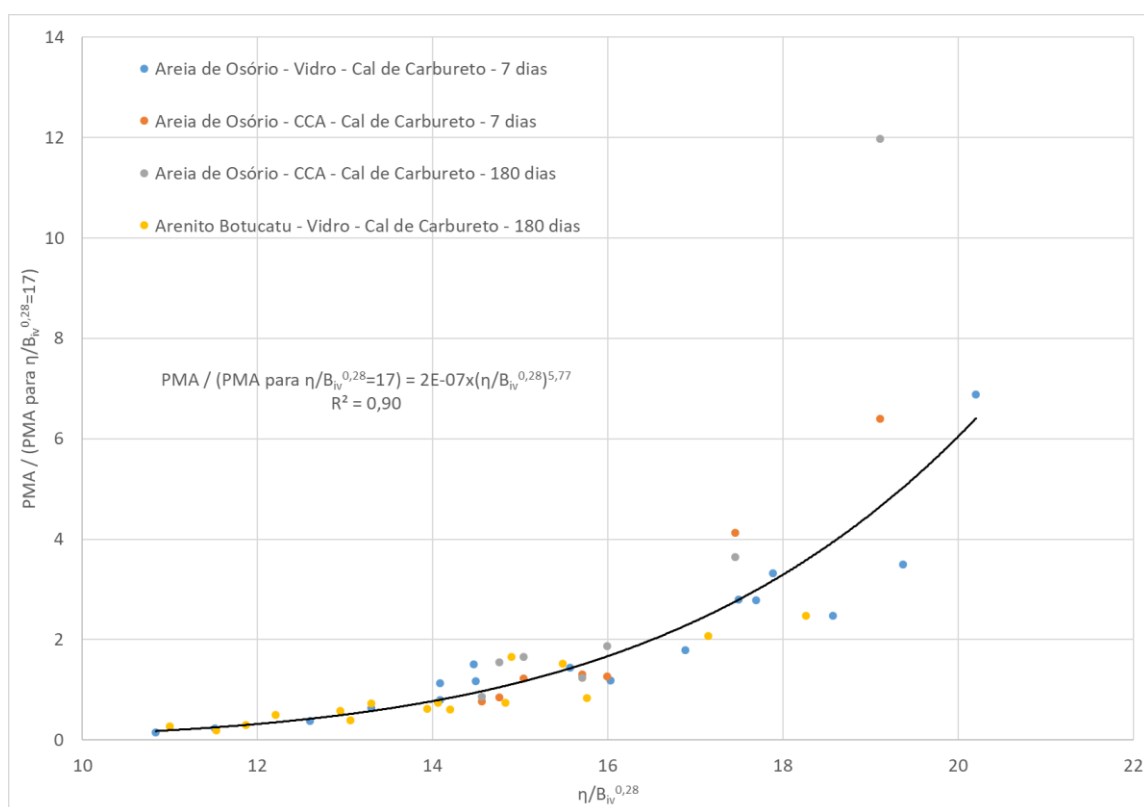


Figura 6.17: perda de massa acumulada das misturas testadas normalizados e em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .

Comparando a perda de massa acumulada nos ensaios realizados no presente trabalho, com a perda de massa acumulada obtida nos ensaios realizados por Consoli et al. (2016c) em resíduos de mineração de ouro estabilizados com a utilização de cimento Portland, utilizando a normalização aplicada anteriormente, foi obtida a Figura 6.18, em escala normal, e a Figura 6.19, em escala logarítmica. É possível visualizar que todos os materiais analisados possuem uma similaridade de comportamento quanto a perda de massa em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .

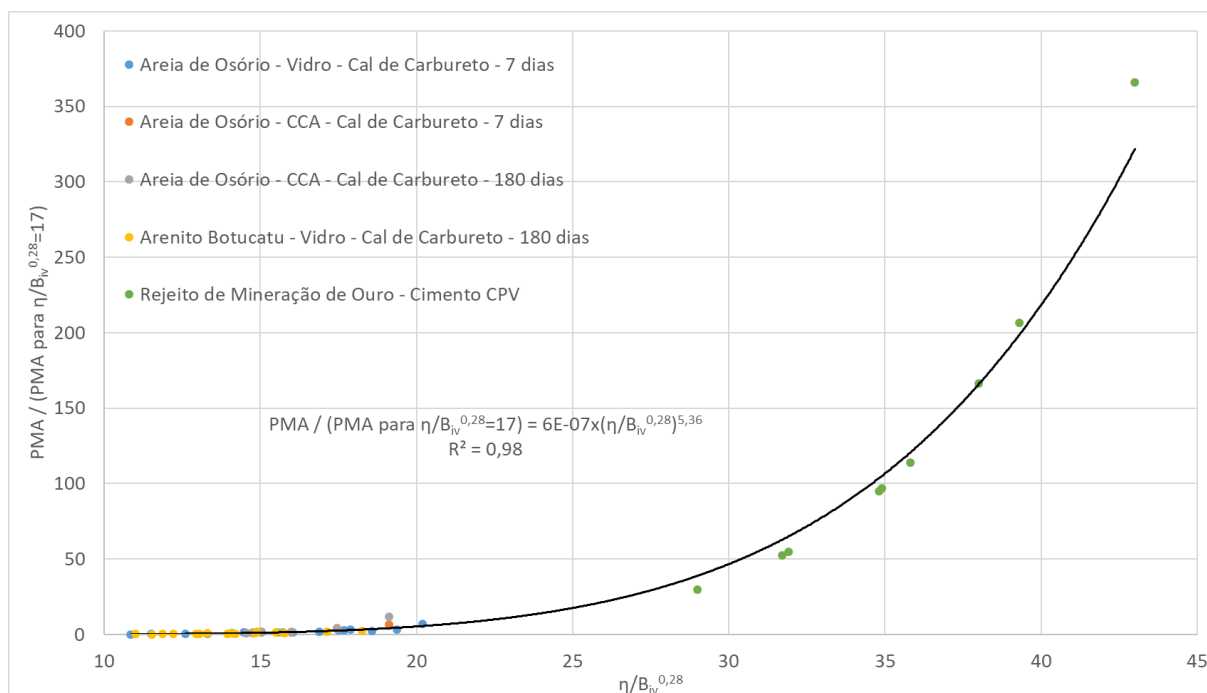


Figura 6.18: perda de massa acumulada das misturas testadas e obtidas por Consoli et al. (2016c), normalizados e em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .

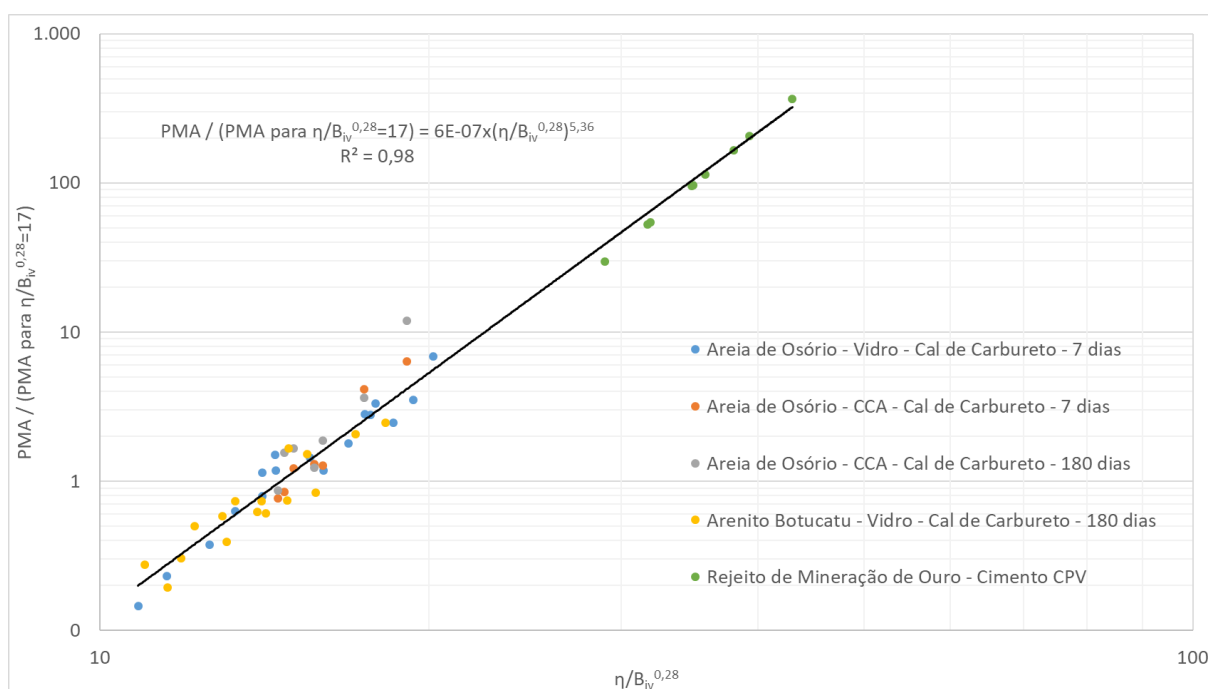


Figura 6.19: perda de massa acumulada das misturas testadas e obtidas por Consoli et al. (2016c), normalizados e em função do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  em escala logarítmica.

## 7 CONCLUSÕES

As conclusões obtidas com o presente trabalho são descritas nos próximos parágrafos.

O pó de vidro junto com a cal de carbureto se mostrou funcional para ser utilizado como um agente cimentante, gerando ganhos de resistência, rigidez e durabilidade nas misturas avaliadas.

O ganho de resistência das misturas de areia de Osório, pó de vidro e cal de carbureto, aos sete dias de cura, se mostrou satisfatório. Foi visto que, na faixa de valores testados, quanto maior o teor de pó de vidro, de cal de carbureto e o peso específico aparente seco, mais resistente se tornou a mistura. Possivelmente exista um teor ótimo de mistura, onde a adição de materiais a mais pode vir a gerar um decréscimo na resistência, porém estes valores não se encontraram presentes na abrangência do programa experimental.

O acréscimo de rigidez das misturas de areia de Osório, pó de vidro e cal de carbureto, aos sete dias de cura, se mostrou satisfatório. Foi visto que, na faixa de valores testados, quanto maior o teor de pó de vidro, de cal e o peso específico aparente seco, mais rígida se tornou a mistura. Possivelmente exista um teor ótimo de mistura, onde a adição de materiais a mais pode vir a gerar um decréscimo na rigidez, porém estes valores não se encontraram presentes na abrangência do programa experimental.

A durabilidade da de areia de Osório com pó de vidro e cal de carbureto, aos sete dias de cura, se mostrou satisfatória para a maioria dos traços utilizados. Porém, em todas as misturas com a menor densidade, e em todas com 10% de pó de vidro, houveram perdas de massa acumuladas após o final dos 12 ciclos superiores a 10%, sendo assim, estas foram consideradas sem a durabilidade necessária para uma utilização prática neste período de cura, sem a existência de um confinamento adequado. Estas misturas, com baixa durabilidade, aos cento e oitenta dias de cura se mostraram muito mais rígidas e resistentes, aumentando assim certamente a durabilidade.

A resistência e a rigidez das misturas de areia de Osório, pó de vidro e cal de carbureto se mostraram linearmente proporcionais, gerando ótimas correlações. A durabilidade também se mostrou função da resistência e da rigidez, mostrando que a partir de e uma certa resistência e

rigidez este solo artificialmente cimentado possui durabilidade satisfatória para os sete dias de cura.

A metodologia aplicada por Consoli et al. (2011a) se mostrou possível de ser aplicada, sendo possível achar uma correlação, para as misturas de areia de Osório, pó de vidro e cal de carbureto, para cada teor de vidro adicionado com o fator  $\eta/L_{iv}^{0,11}$ , com a resistência e com a rigidez, com pequeníssima dispersão. A semelhança entre os expoentes externos da levou a indicar uma possível normalização como a encontrada em Consoli et al. (2016b), Consoli et al. (2017a) e Consoli et al. (2017b) que foi satisfatoriamente comprovada.

Foi possível obter uma correlação única para todos os teores de pó de vidro, para as misturas de areia de Osório, pó de vidro e cal de carbureto, para os sete dias de cura, com a utilização da metodologia proposta do presente trabalho, comparando a resistência, a rigidez e a durabilidade do material em função de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ . O expoente externo 0,28 se mostra similar ao indicado na literatura para solos artificialmente cimentados com cimento Portland.

Com a mistura de areia de Osório, pó de vidro e cal de carbureto, com 180 dias de cura, foi possível validar a metodologia proposta para a resistência e rigidez em função de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , para um período de cura distinto do inicialmente analisado.

Com as misturas de arenito Botucatu, pó de vidro e cal de carbureto, foi possível validar a metodologia proposta para a resistência, rigidez e durabilidade em função do  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , para um diferente tipo de solo granular.

Com as misturas de areia de Osório, cinza de casca de arroz e cal de carbureto foi possível validar a metodologia proposta para a resistência, rigidez e durabilidade em função do  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , para uma diferente pozolana adicionada e diferentes períodos de cura, sete e cento e oitenta dias.

Comparando os dados da pesquisa com os resultados obtidos por Dalla Rosa (2009), foi possível validar a metodologia proposta para a resistência em função de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , para uma diferente fonte de cálcio na mistura, sendo esta uma cal hidratada comercial.

Comparando os dados da pesquisa com os resultados obtidos por Caberlon (2008), Foppa (2005) e Consoli et al. (2016c) foi possível validar a metodologia proposta para a resistência em função de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , para um diferente agente cimentante, o cimento Portland.

Com a comparação entre os dados obtidos com os resultados da pesquisa de Consoli et al. (2016c), foi possível validar a metodologia proposta em função de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , para a rigidez e a durabilidade, para solos artificialmente cimentados com cimento Portland.

Em todas as misturas, conforme esperado, quanto maior a resistência maior a rigidez e consequentemente maior a durabilidade, ou seja, todas estas propriedades são diretamente proporcionais.

Foi possível com a metodologia proposta por Consoli et al. (2016b), Consoli et al. (2017a) e Consoli et al. (2017b), obter uma única curva de resistência em função de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para todos os materiais analisados, gerando uma ótima correlação com mais de 1000 pontos analisados. Foi mostrada com metodologias similares a grande abrangência da relação entre a resistência, a rigidez e a durabilidade do fator  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  proposto no presente trabalho.

Os agentes cimentantes utilizados mostraram comportamento compatível com o cimento Portland quando adicionados em um solo para melhorar a sua resistência, mostrando ser totalmente válido considerar como um agente cimentante uma mistura gerada por uma fonte  $Ca(OH)_2$  e uma fonte de sílica amorfa. A resistência obtida com os diferentes agentes cimentantes é muito distinta, porém, o comportamento em função de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  é bastante similar.

## 7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São sugestões para trabalhos futuros:

- verificar a influência de pó de vidro de diferentes origens em solos artificialmente cimentados;
- verificar a utilização de pó de vidro em diferentes granulometrias em solos artificialmente cimentados;
- analisar o comportamento de diferentes cales adicionadas juntamente com pó de vidro em solos artificialmente cimentados;
- realizar misturas de pó de vidro com cimento Portland em solos artificialmente cimentados e verificar o comportamento destes;
- utilizar a metodologia de dosagem proposta em solos coesivos.

## REFERÊNCIAS

ABDALLAH, S.; FAN, M. Characteristics of concrete with waste glass as fine aggregate replacement. **International Journal of Engineering and Technical Research**. 2, 11-17, 2014.

ADAWAY, M.; WANG, Y. Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete - Effects on compressive strength. **Electronic Journal of Structural Engineering**. 14, 116-122, 2015.

ALI, E. E.; AL-TERSAWY, S. H. Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete. **Construction and Building Materials**. 35, 785-791, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2845: Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock**. 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 559: Standard test method for wetting and drying compacted soil-cement mixtures**. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Solo – Rochas e solos – Terminologia**. 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica**. 2001a.

\_\_\_\_\_. **NBR 14697: Vidro laminado**. 2001b.

\_\_\_\_\_. **NBR 14698: Vidro temperado**. 2001c.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004: Resíduos Sólidos**. 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 51: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão Los Angeles**. 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 11798: Materiais para base de solo-cimento - Requisitos**. 2012a.

\_\_\_\_\_. **NBR 12253: Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento**. 2012b.

\_\_\_\_\_. **NBR 12025: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio**. 2012c.

\_\_\_\_\_. **NBR 16096: Solo-cimento - Determinação do grau de pulverização - Método de ensaio**. 2012d.

\_\_\_\_\_. **NBR 12023: Solo-cimento - Ensaio de compactação.** 2012e.

\_\_\_\_\_. **NBR 12024: Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento.** 2012f.

\_\_\_\_\_. **NBR 13554: Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem - Método de ensaio** 2012g.

\_\_\_\_\_. **NBR 12254: Solo-cimento - Execução de base de solo-cimento - Procedimento.** 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182: Solos – Ensaio de compactação.** 2016a.

\_\_\_\_\_. **NBR 7199: Vidros na construção civil - Projeto, execução e aplicações.** 2016b.

\_\_\_\_\_. **NBR 9895: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio.** 2017.

BATAYNEH, M.; MARIE, I.; ASI, I. Use of selected waste materials in concrete mixes. **Waste Management.** 27, 1870-1876, 2007.

BAUER, F. **Materiais de construção.** Rio de Janeiro: LTC, 5ª ed., 1994.

BENNY, J. R.; JOLLY, J.; MAREENA, S. J.; THOMAS, M. Effect of glass powder on engineering properties of clayey soil. **International Journal of Engineering Research & Technology.** 6, 2017.

BERGADO, D. T.; ANDERSON, L. R.; MUIRA, N.; BALASUBRAMANIAM, A. S. **Soft ground improvement:** In Lowland and Other Environments. New York: American Society of Civil Engineers, 1996.

BIGNOZZI, M. C.; SACCANI, A.; BARBIERI, L.; LANCELLOTTI, I. Glass waste as supplementary cementing materials: the effects of glass chemical composition. **Cement and Concrete Composites.** 55, 45-52, 2015.

BORHAN, T. M. Properties of glass concrete reinforced with short basalt fibre. **Materials & Design.** 42, 265-271, 2012.

BRAVO, M. D. **Estabilização de um solo mole orgânico: avaliação da variação de resistência com o acréscimo de cal, cinza de casca de arroz o microssílica.** 2013. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.



CABERLON, R.C. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatância de uma areia artificialmente cimentada.** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CARSANA, M.; FRASSONI, F.; BERTOLINI, L. Comparison of ground waste glass with other supplementary. **Cement and Concrete Composites.** 45, 39-45, 2014.

CASTRO, F. J. C. O. **Contribuição ao conhecimento e à determinação da reatividade de solos sesquídicos utilizando o hidróxido de cálcio: aplicação ao processo de geopolimerização (estabilização).** 1995. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Reio de Janeiro.

CHEN, C.H.; WU, J. K.; YANG, C. C. Waste E-glass particles used in cementitious mixtures. **Cement and Concrete Research.** 36, 449-456, 2006.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. Ficha técnica do vidro. Disponível em: < <http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/6/vidro>>, 2018.

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.**, 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(197), 197–205. 2007.

CONSOLI, N. C.; LOPES JUNIOR, L. S.; HEINECK, K. S. Key parameters for the strength control of lime stabilized soils. **Journal of Materials in Civil Engineering,** 10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:5(210), 210–216. 2009.

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.**, 10.1061/(ASCE)GT .1943-5606.0000278, 759–763. 2010.

CONSOLI, N.C.; LOPES JUNIOR, L.S.; PRIETTO, P.D.M.; FESTUGATO, L.; CRUZ, R.C. Variables controlling stiffness and strength of lime-stabilized soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.**, v. 137, p. 628-632, 2011a.

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, A.; SALDANHA R. B. Variables governing strength of compacted soil–fly ash–lime mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering.** Vol. 23, No.4, pp 432-440. 2011b.

CONSOLI, N. C.; LOPES JUNIOR, L. S.; DALLA ROSA, A.; MASUERO, J. R. The strength of soil industrial by products lime blends. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers,** 166, 431-440, 2013.

CONSOLI, N. C.; FERREIRA, P. M. V.; TANG, C. S.; MARQUES, S. F. V.; FESTUGATO, L.; CORTE, M. B. A unique relationship determining strength of silty/clayey soils – Portland cement mixes. **Soils and Foundations** 56 1082–1088, 2016a.

CONSOLI, N. C.; DE PAULA, T. M.; BORTOLOTTI, M. S.; DE BARROS, L. M.; PEREIRA, F.; ROCHA, M. M. Coal fly ash carbide lime admixtures as an alternative to concrete masonry blocks: influence of ash grounds. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2016b.

CONSOLI, N. C.; DA SILVA, A. P.; NIERWINSKI, H. P.; SOSNOSKI, J. Durability, strength, and stiffness of compacted gold tailings – cement mixes. **Canadian Geotechnical Journal**. 2016c.

CONSOLI, N.C.; TOMASI, L.F. The impact of dry unit weight and cement content on the durability of sand–cement blends. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement**. 2017.

CONSOLI, N. C.; SAMANIEGO, R. A. Q.; MARQUES, S. F. V.; VENSON, G. I., PASCHE, E.; VELÁSQUEZ, L. E. G. Single model establishing strength of dispersive clay treated with distinct binders. **Canadian Geotechnical Journal** 2017a.

CONSOLI, N. C.; MARQUES, S. F. V.; FLOSS, M. F.; FESTUGATO, L. Broad-Spectrum Empirical Correlation Determining Tensile and Compressive Strength of Cement-Bonded Clean Granular Soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, -1-1, 2017b.

CONSOLI, N.C.; IBRAIM, E.; DIAMBRA, A.; FESTUGATO, L.; MARQUES, S.F.V. A Sole Empirical Correlation Expressing Strength of Fine-Grained Soils - Lime Mixtures. **Soils and Rocks**, São Paulo, 40(2): 147-153, 2017c.

CONSOLI, N. C.; HOCH, B. Z.; FESTUGATO, L.; DIAMBRA, A.; IBRAIM, E.; DA SILVA, J. K. Compacted Chalk Putty–Cement Blends: Mechanical Properties and Performance. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 30, 2, 2017d.

CONSOLI, N. C.; DA SILVA, J. K.; FILHO, S.; RIVOIRE, A. B. Compacted clay-industrial wastes blends: Long term performance under extreme freeze-thaw and wet-dry conditions. **Applied Clay Science**. 146, 404–410, 2017e.

CONTAINER RECYCLING INSTITUTE. **Glass Containers**. Disponível em: <<http://www.container-recycling.org/index.php/glass-containers>>, 2017.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DA ROCHA, C. G.; CONSOLI, N. C.; JOHANN, A. D. R. Greening stabilized rammed earth: devising more sustainable dosages based on strength controlling equations. **Journal of Cleaner Production**. 66, 19-26, 2014.

DA ROCHA, C. G.; PASSUELLO, A.; CONSOLI, N. C.; SAMANIEGO, R. A. Q.; KANAZAWA, N. M. Life cycle assessment for soil stabilization dosages: A study for the Paraguayan Chaco. **Journal of Cleaner Production**, 139, 309-318, 2016.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos Parâmetros-Chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal** 2009. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DE OLIVEIRA, L. A. P.; GOMES, J. P.; SANTOS, P. Mechanical and Durability Properties of Concrete with Ground Waste Glass Sand. **in: International Conference on Durability of Building Materials and Components**, Istanbul, Turkey, 2008.

DE PAULA, T. M. **Melhoramento de solos: adição de cimento, microssílica e cinza de casca de arroz em um silte orgânico**. 2013. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DIAMBRA A.; IBRAIM, E.; PECCIN, A.; CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L. Theoretical Derivation of Artificially Cemented Granular Soil Strength. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**., -1-1, 2017.

DOMONE, P.; ILLSTON, J. **Construction Materials**. New York: Spon Press, 2010.

DU, Y. J.; ZHANG, Y. Y.; LIU, S. Y. Investigation of strength and California bearing ratio properties of natural soils treated by calcium carbide residue. **Geo-Frontiers**. 2011.

DU, H.; TAN, K. H. Waste glass powder as cement replacement in concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**. 12, 468-477, 2014.

DU, H.; GAO, H. J.; LI, W. Pozzolanic reaction of glass powder and its influences on concrete properties. **in: 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials**. Southern Cross University, Byron Bay, NSW, 267-272, 2014.

DYER, T. D.; DHIR, R.K. Chemical reactions of glass cullet used as cement component. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 13, 412-417, 2001.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. FHWA-HIF-13-019. **Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book**. Washington DC, 2013.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FOPPA, D. **Novo método para cálculo da capacidade de carga de fundações superficiais assentes sobre camada de reforço em solo-cimento.** 2016. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GANIRON JR., T. U. G. Use of recycled glass bottles as fine aggregates in concrete mixture. **International Journal of Advanced Science and Technology.** 61, 17-28, 2013.

GAUTAM, S. P.; SRIVASTAVA, V.; AGARWAL, V. C. Use of glass wastes as fine aggregate in concrete. **Journal of Academia and Industrial Research.** 1, 320-322, 2012.

GOMES, C. E. M.; MARTON, L. F. M. Otimização do consumo de cimento por meio da adição da Sílica da casca do arroz (SCA. **Congresso Luso Brasileiro de Materiais e Construções Sustentáveis**, 1, 1-10, 2014.

GULLU, H.; CANAKCI, H.; AL ZANGANA, I. F. Use of cement based grout with glass powder for deep mixing. **Construction and Building Materials.** 137, 12-20, 2017.

HANDY, R. L.; WANG, J. W. H. Evaluation of carbide waste lime for soil stabilization. **Iowa Research Board Project HR-111.** 1966.

HERZOG, A.; MITCHELL, J. K. Reactions accompanying stabilization of clay with cement. **Highway Research Record**, 36, p. 146-171, 1963.

HORPIBULSUK, S.; PHETCHUAY, C.; CHINKULKIJNIWAT, A. CHOLAPHATSORN, A. Strength development in silty clay stabilized with calcium carbide residue and fly ash. **Soils and Foundations.** 53, 477-486, 2013.

HORPIBULSUK, S.; KAMPALA, A.; PHETCHUAY, C.; UDOMCHAI, A.; ARULRAJAH, A. Calcium carbide residue: A cementing agent for sustainable soil stabilization. **Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA.** 46, 22-27, 2015.

HOUSTON, D. F. **Rice – chemistry and technology.** Saint Paul: American Association of Cereal Chemists, 1972.

IDIR, R.; CYR, M.; HAMOU, A. T. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. **Construction and Building Materials.** 24, 1309-1312, 2010.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization: principle and practice.** Melbourne: Butterworths, 1972.

ISLAM, G. M. S.; RAHMAN, M. H.; KAZI, N. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. **International Journal of Sustainable Built Environment.** Article in Press, Accepted in: 2016.

ISMAIL, Z. Z.; AL-HASHMI, E. A. Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. **Waste Management**. 29, 655-659, 2009.

JOEL, M.; EDEH, J. E. Soil modification and stabilization potential of calcium carbide waste. **Advanced Materials Research**. 824, 29-36, 2013.

JOHANN, A. D. R. **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. 272 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

KURUPPU, G.; CHANDRATILAKE, R. Use of recycle glass as a coarse aggregate in concrete. **In: World Construction Conference 2012 - Global Challenges in Construction Industry**, Colombo, Sri Lanka, 2012.

LEA, F. M. **The chemistry of cement and concrete**. London: Edward Arnod, 1956.

LEE, G.; POON, C. S.; WONG, Y. L.; LING, T. C. Effects of recycled fine glass aggregates on the properties of dry-mixed concrete blocks. **Construction and Building Materials**. 38, 638-643, 2013.

LIMBACHIYA, M. C. Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete. **Construction and Building Materials**. 23, 1078-1083, 2009.

MALIK, M. I.; BASHIR, M.; AHMAD, S.; TARIQ, T.; CHOWDHARY, U. Study of concrete involving use of waste glass as partial replacement of fine aggregates. **Journal of Engineering Mechanics**. 6, 08-13, 2013.

MALIK, M.I.; MANZOOR, A.; AHMAD, B.; ASIMA, S.; ALI, R.; BASHIR, M. Positive potential of partial replacement of fine aggregates by waste glass (<600 Micron) in concrete. **International Journal of Civil Engineering and Technology**. 5, 146 – 153, 2014.

MARKET RESEARCH STORE Acetylene Gas Market for Chemical Production, Welding &Cutting and Other Applications: global industry perspective, comprehensive analysis and forecast, 2014-2020. **Market Research Store Report**. 110 pp., 2015.

MARQUES, S. F. V. **Comportamento de uma areia artificialmente cimentada até altas tensões de confinamento**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MINDESS, S. YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete**. New Jersey: Pearson Education, 2003.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Perfil da Cal**. 2009.

MOHAJERANI, A.; VAJNA, J.; CHEUNG, T. H. H.; KURMIS, H.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S. Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review. **Construction and Building Materials**. 156, 443 – 467, 2017.

MOORE, R. K.; KENNEDY, T. W.; HUDSON, W. R. Factors Affecting the Tensile Strength of Cement-Treated Materials. **Highway Research Record: Soil Stabilization: Multiple Aspects**, Washington, D. C: HRB, n.315, p.64-80, 1970.

NOGUEIRA, K. A. **Reação álcali agregado: diretrizes e requisitos da ABNT NBR 15577/2008**. Monografia do Curso de Especialização em Construção Civil. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais 2010.

NUNEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação**. 1991. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

OLUFOWOBI, J.; OGUNDOJU, A.; MICHAEL, B.; ADERINLEWO O. Clay soil stabilisation using powdered glass. **Journal of Engineering Science and Technology**. 9, 541-558, 2014.

PARK, S.B.; LEE, B.C.; KIM, J.H. Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. **Cement and Concrete Research**. 34, 2181-2189, 2004.

POLLEY, C.; CRAMER, S. M.; DE LA CRUZ, R. Potential for using waste glass in portland cement concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 10, 210-219, 1998.

PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARIA, S. Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils. **Transportation Research Record, Washington**, 1652, p. 215-227, 1999.

RAHIM, N.L.; AMAT, R. C.; IBRAHIM, N.M.; SALEHUDDIN, S.; MOHAMMED, S. A.; RAHIM, M. A. Utilization of recycled glass waste as partial replacement of fine aggregate in concrete production. **Materials Science Forum**. 803, 16-20, 2014.

RAMASAMY, P.; PERIATHAMBY, A.; IBRAHIM, S. Carbide sludge management in acetylene producing plants by using vacuum filtration. **Waste Management & Research**, 20, 536-540, 2002.

RILHO, A. S. **Melhoramento de um solo mole com o uso de agentes cimentantes**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING S. Lime requirement for stabilization. **Transportation Research Board Annual Meeting**, 79, 2000.

SAID, J. M.; TAIB, S. N. L. Peat stabilization with carbide lime. **Journal of Civil Engineering**. 7, 1-6, 2009.

SALAMATPOOR, S.; SALAMATPOOR, S. Evaluation of adding crushed glass to different combinations of cement-stabilized sand. **International Journal of Geo-Engineering**. 8, 2017.

SALDANHA, R. B.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MALMANN, J. E. C.; CONSOLI, N. C.; REDDY, K. R. Physical-Mineralogical-Chemical Characterization of Carbide Lime: An Environmental-Friendly Chemical Additive for Soil Stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**. In press, accepted in: 2018.

TAHA, B.; NOUNU, G. Utilizing waste recycled glass as sand/cement replacement in concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 21, 709-721, 2009.

SHAO, Y.; LÉBOUX, P. **Feasibility of using ground waste glass as a cementitious material, recycling and reuse of glass cullet**. Thomas Telford, Dundee, Scotland, United Kingdom, 2001.

SHAO, Y.; LEFORT, T.; MORAS, S.; RODRIGUEZ, D. Studies on concrete containing ground waste glass. **Cement and Concrete Research**. 30, 91-100, 1999.

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

TURGUT, P.; YAHLIZADE, E. S. Research into concrete blocks with waste glass. **International Journal of Environmental Science and Engineering**. 3, 186-192, 2009.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. 2003. 247 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VICHAN, S.; RACHAN, R. Chemical stabilization of soft Bangkok clay using blend of calcium carbide residue and biomass ash. **Soils and Foundations**. 5, 272-281, 2013.

WANG, H. Y.; ZENG, H. H.; WU, J. Y. A study on the macro and micro properties of concrete with LCD glass. **Construction and Building Materials**. 50, 664-670, 2014.

WARTMAN, J.; GRUBB, D. G.; NASIM, A. S. M. Select Engineering Characteristics of Crushed Glass. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 16, 526-539, 2004.

WESCHE, K. **Fly Ash in Concrete: Properties and Performance**. Report of Technical Committee 67-FAB. London: RILEM, 2005.

WINTER, D. **Melhoramento de um solo mole orgânico com o uso de cimentação**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

WINTER, D.; RILHO, A. S.; CONSOLI, B. S.; CONSOLI, N. C. A prompt procedure for prediction of strength in artificially cemented soft soils. **Journal of Geo-Engineering Sciences**. 1, 95-100, 2014.