

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Comportamento de um solo arenoso estabilizado com álcali  
ativação visando a pavimentação**

**Camila da Silva Martinatto**

Porto Alegre

2021

CAMILA DA SILVA MARTINATTO

**Comportamento de um solo arenoso estabilizado com álcali  
ativação visando a pavimentação**

Dissertação 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 Mestre em Engenharia.

Porto Alegre

2021

**CAMILA DA SILVA MARTINATTO**

**Comportamento de um solo arenoso estabilizado com álcali  
ativação visando a pavimentação**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE 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, 29 de junho de 2021

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Ph. D. Concordia University, Canadá  
Orientador

Prof. Luciano Pivoto Specht  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Coorientador

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Profª. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)**  
Drª. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. João Rodrigo Guerreiro Mattos (UFES)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Nuno Miguel Cordeiro Cristelo (UTAD)**  
Dr. pela Newcastle University - UK

**Dr. Andres Mauricio Lotero Caicedo (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, aos meus pais por todo o suporte e incentivo em meus estudos, assim como nos momentos difíceis que a distância de casa causa. À minha amada avó Eloisa, a qual é responsável por toda a essência do meu ser (saudades eternas).

Ao orientador Nilo Cesar Consoli pelos conhecimentos transmitidos, por ser tão receptivo e acolhedor e por ser um exemplo de pesquisador para todos do PPGEC. Por me ajudar em uma solução de nova temática e me fazer pensar que não devemos nos limitar ao que diz nas normas. Agradeço também ao orientador Luciano Pivoto Specht, por aceitar desenvolver esta pesquisa que me motiva muito na área de pavimentação, bem como ao laboratorista Fernando pela execução dos ensaios de módulo de resiliência. Aos professores de geotecnia da FURG, onde desenvolvi apreço por esta área.

Aos amigos que fiz no LEGG por divertirem os dias cansativos de ensaio e estudos, pela troca de conhecimentos e pela parceria além das atividades acadêmicas: Carol, Gio, Mariana e Suellen. Ao doutorando Hélder pela ajuda na execução dos ensaios.

Às minhas amizades de longa data!!

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado que permite a minha dedicação exclusiva ao desenvolvimento desta pesquisa.

## RESUMO

MARTINATTO, C. S. **Comportamento de um solo arenoso estabilizado com álcali ativação visando a pavimentação**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A técnica de melhoramento de solos é muito frequente diante de obras geotécnicas, entretanto a prática de solos artificialmente cimentados comumente faz uso de agentes químicos tradicionais, como o cimento Portland e a cal. Sob o ponto de vista ambiental, estes materiais não são considerados tecnicamente sustentáveis, o que atualmente torna-se uma grande preocupação. Conciliar a sustentabilidade e o desenvolvimento de novos materiais é, sem dúvidas, essencial para progredirmos em sociedade. Os cimentos álcali ativados surgiram recentemente, e são um potencial substituto aos materiais tradicionais. Isto se deve a possibilidade de utilizar resíduos e subprodutos, industriais e/ou domésticos, como precursores e ativadores para a produção, logo, a emissão de CO<sub>2</sub> e o consumo de energia são ínfimos. A presente pesquisa visa o emprego de dois resíduos para a técnica de ativação alcalina através da cerâmica vermelha, provenientes da indústria de construção e demolição, e a cal de carbureto, subproduto da produção de gás acetileno, ativados com soluções de hidróxido de sódio. Este novo material cimentante é utilizado como fonte de estabilização de um solo granular uniforme, onde é avaliado o desempenho perante aos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, rigidez inicial, durabilidade por ciclos de molhagem e secagem e módulo de resiliência. Ainda, buscou-se por uma análise mineralógica através de DRX para verificar os produtos de reação formados nesta estabilização. As variações da porosidade, do teor de agente cimentante utilizado, do teor de umidade de moldagem e do tempo de cura afetam significativamente o comportamento de todas as variáveis respostas, onde a resistência à compressão simples atingiu valores de 4,23 MPa aos 7 dias de cura e, 7,62 MPa aos 28 dias de cura. Pode-se perceber que há uma relação íntima entre o teor de agente cimentante e o teor de umidade de moldagem, os quais resultam em um impacto negativo quando considerada certas dosagens, em todos os ensaios. Diante disto, a análise mineralógica revelou a formação de um gel silicato de sódio e cálcio, o qual varia de intensidade conforme as variáveis controláveis. Por fim, foi possível relacionar os dados obtidos com a relação entre porosidade/teor volumétrico de agente cimentante, se mostrando adequada e compatível com a previsão do desempenho mecânico e que combinação dos materiais utilizados para a estabilização apresentam potencial para a utilização como camada de pavimento.

**Palavras-chave:** *álcali ativação; estabilização de solos; resíduo cerâmico e cal de carbureto; solos estabilizados para pavimentação; índice porosidade/teor volumétrico de agente cimentante.*

## ABSTRACT

MARTINATTO, C. S. **Comportamento de um solo arenoso estabilizado com álcali ativação visando a pavimentação**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The soil improvement technique is very common in geotechnical works, however the practice of artificially cemented soils commonly apply traditional chemical agents, such as Portland cement and lime. Considering the environmental impacts, these materials are not technically sustainable, which is currently a major concern. Reconciling sustainability and the development of new materials is undoubtedly essential for progress in society. Alkali-activated cements have recently appeared, and are a potential substitute for traditional materials. This is due to the possibility of using residues and by-products, industrial and/or domestic, as precursors and activators for production, therefore, CO<sub>2</sub> emissions and energy consumption are very small. The present research aims to use two wastes for the alkali activation technique through red ceramic wastes, from the construction and demolition industry, and carbide lime, a by-product of the production of acetylene gas, activated with sodium hydroxide solutions. This new binder is used as a source of stabilization for a uniform granular soil, where performance is evaluated by unconfined compression strength, splitting tensile test, initial shear strength, durability wetting -drying cycles and resilient modulus. Moreover, the microstructure of a few blends was evaluated through X-ray diffraction tests (XRD) to identify the reactions products that are expected to be formed. The variation in porosity, binder content, moisture content and curing time significantly altered the behavior of response variables, results show that unconfined compressive strength varies to 4,23 MPa after 7 days curing time to 7,62 MPa after 28 days curing time. There is a relation between binder content and moisture content, which results in negative impact considering some blends. Therefore, the XRD analyses identified sodium calcium silicate as a cementitious gel formed by alkali-activated process. The relationship between porosity/volumetric binder content is adequate and compatible to estimate the mechanical response of the blends that are suitable to use as cemented materials for pavements.

**Key-words:** *alkali-activated cement; soil stabilization; red ceramic wastes and carbide lime; cemented materials for pavements; porosity/volumetric binder content index.*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	16
1.2 OBJETIVO GERAL .....	17
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	18
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>20</b>
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	20
2.2 ASPECTOS GERAIS SOBRE A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS .....	20
2.2.1 Indústria cerâmica e a geração de resíduos .....	21
2.2.2 Cal de carbureto.....	23
2.3 MATERIAIS ÁLCALI ATIVADOS.....	23
2.3.1 Histórico .....	23
2.3.2 Influência do material precursor .....	25
2.3.3 O modelo conceitual para a geopolimerização .....	26
2.3.4 Álcali ativação com resíduos cerâmicos .....	29
2.4 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS .....	31
2.4.1 Reações pozolánicas envolvidas na estabilização de solos.....	32
2.4.2 Comportamento de solos estabilizados .....	34
2.4.3 Relações entre porosidade e o teor volumétrico de agente cimentante .....	37
2.4.4 Estabilização de solos com cimentos álcali ativados .....	42

2.4.5 Comportamento de camadas cimentadas em pavimentos.....	44
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>49</b>
3.1 MATERIAIS .....	49
3.1.1 Areia de Osório .....	49
3.1.2 Resíduo Cerâmico .....	51
3.1.3 Cal de Carbureto.....	54
3.1.4 Hidróxido de Sódio .....	57
3.2 MÉTODOS .....	57
3.2.1 Ensaio preliminares para a definição dos teores das misturas.....	60
3.3 Procedimento dos ensaios .....	66
3.3.1 Preparação das amostras.....	66
3.3.2 Resistência à compressão simples.....	67
3.3.3 Resistência à tração por compressão diametral.....	69
3.3.4 Módulo Cisalhante Inicial .....	69
3.3.5 Durabilidade .....	71
3.3.6 Módulo de Resiliência.....	72
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>75</b>
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	76
4.1.1 Relação entre a resistência à compressão simples com o índice $\eta/B_{iv}^k$ .....	81
4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	86



4.2.1	Relação entre a resistência à tração por compressão diametral com o índice $\eta/B_{iv}$ .....	88
4.3	RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	93
4.4	MÓDULO CISALHANTE INICIAL .....	95
4.4.1	Relação entre a rigidez inicial e o índice $\eta/B_{iv}$ .....	99
4.5	DURABILIDADE.....	102
4.5.1	Relação entre a durabilidade com o índice $\eta/B_{iv}$ .....	107
4.5.2	Relação entre a perda de massa acumulada e a resistência à compressão simples.....	111
4.6	MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....	113
4.6.1	Relação entre o módulo de resiliência com o índice $\eta/B_{iv}$ .....	117
4.7	ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX) .....	119
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>124</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	130
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>132</b>
<b>7</b>	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>141</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Modelo conceitual da geopolimerização.....	28
Figura 2.2: Microestrutura da Baekma River Sand (a) não cimentada, (b) fracamente cimentada – 4% de cimento, (c) medianamente cimentada – 8% de cimento e (d) fortemente cimentada – 16% de cimento. ....	35
Figura 2.3: Variação de resistência em função do teor de cimento, (a) compressão simples ( $q_u$ ), (b) tração por compressão diametral ( $q_t$ ).....	36
Figura 2.4: Variação da resistência compressão simples ( $q_u$ ) e resistência diametral ( $q_t$ ) em função da razão vazios/cimento ( $\eta/C_{iv}$ ).....	37
Figura 2.5: Relação entre a resistência à compressão simples e o volume de vazios/cimento.	38
Figura 2.6: Curva de dosagem $\eta/C_{iv}$ estabelecida para o solo residual Arenito Botucatu .....	39
Figura 2.7 – Normalização da resistência à compressão simples e resistência à tração para solos granulares, com cimentos e tempos de cura distintos .....	40
Figura 2.8: Resistência à compressão simples para a mistura de Areia de Osório, pó de vidro e cal de carbureto em função do índice $\eta/B_{iv}$ . ....	41
Figura 2.9: Comportamento de materiais sujeitos a um ciclo de carregamento.....	46
Figura 3.1: Curva granulométrica da Areia de Osório .....	50
Figura 3.2: Microscopia eletrônica de varredura da Areia de Osório, ampliada 40 vezes (esquerda) e ampliada 500 vezes (direita) .....	50
Figura 3.3: Processamento no moinho de martelos (esquerda), estocagem no material na empresa Graniplast (direita). ....	52
Figura 3.4: Curva granulométrica do resíduo cerâmico .....	52
Figura 3.5: Difratoograma de raio-X do resíduo cerâmico .....	54
Figura 3.6: Distribuição granulométrica da cal de carbureto .....	55
Figura 3.7: Difratoograma de raio X da cal de carbureto.....	56
Figura 3.8: Microscopia eletrônica de varredura da cal de carbureto, ampliada 400x (esquerda) e ampliada 800x (direita).....	57
Figura 3.9: Resultado do ensaio de compressão simples para as misturas.....	59
Figura 3.10: Microscopia eletrônica das amostras no teor ótimo, com: a) sem solução ativadora e b) com solução de teor de álcalis de $Na_2O$ de 4% (3mol).....	60
Figura 3.11: Ensaio de compactação proctor modificado, com adição de 20% e 30% de <i>binder</i> (70% RC + 30% CC) e escolha dos pontos de moldagem preliminar.....	62

Figura 3.12: Resistência à compressão simples dos ensaios preliminares em função do teor de álcalis Na <sub>2</sub> O .....	63
Figura 3.13: Distribuição dos níveis selecionados para as misturas.....	64
Figura 3.14: Ensaio de resistência à compressão simples .....	68
Figura 3.15: Ensaio de pulso ultrassônico: (a) onda de compressão e (b) onda de cisalhamento. ....	71
Figura 3.16: Deformações resilientes e permanentes sob carregamento cíclico .....	72
Figura 3.17: Ensaio de Módulo de Resiliência (a) vista geral da prensa e (b) posicionamento do corpo de prova .....	74
Figura 4.1: Resistência à compressão simples em função do teor de umidade de moldagem.	76
Figura 4.2: Resistência à compressão simples em função do agente cimentante.....	77
Figura 4.3: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a resistência à compressão simples .....	79
Figura 4.4: Gráfico de efeitos principais para a resistência à compressão simples.....	79
Figura 4.5: Relação entre a resistência à compressão simples e o índice $\eta/B_{iv}$ .....	82
Figura 4.6: Resistência à compressão simples normalizada.....	84
Figura 4.7: Resistência à compressão simples exposta em função do teor de umidade (a) para 7 dias de tempo de cura e (b) para 28 dias de tempo de cura .....	85
Figura 4.8: Resistência à tração por compressão diâmetral em função do teor de umidade de moldagem (a) para 7 dias de tempo de cura e (b) para 28 dias de tempo de cura.....	87
Figura 4.9: Resistência à tração por compressão diâmetral em função do agente cimentante (a) para 7 dias de tempo de cura e (b) para 28 dias de tempo de cura .....	88
Figura 4.10: Relação entre a resistência à tração por compressão diâmetral e o índice $\eta/B_{iv}$ .	89
Figura 4.11: Resistência à tração por compressão diâmetral padronizada .....	90
Figura 4.12: Resistência à tração por compressão diâmetral exposta em função do teor de umidade (a) para 7 dias de tempo de cura e (b) para 28 dias de tempo de cura.....	91
Figura 4.13: Relação entre a resistência à compressão simples e à compressão diâmetral em função do índice $\eta/B_{iv}$ (a) para 7 dias de tempo de cura e (b) para 28 dias de tempo de cura .	94
Figura 4.14: Relação entre a resistência à compressão simples e à compressão diâmetral.....	95
Figura 4.15: Rigidez inicial em função do teor de umidade (a) para 7 dias de tempo de cura e (b) para 28 dias de tempo de cura.....	96

Figura 4.16: Rigidez inicial em função do agente cimentante (a) para 7 dias de tempo de cura e (b) para 28 dias de tempo de cura.....	96
Figura 4.17: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a rigidez inicial .....	98
Figura 4.18: Gráfico de efeitos principais para a rigidez inicial .....	98
Figura 4.19: Relação entre a rigidez inicial e o índice $\eta/B_{iv}$ .....	100
Figura 4.20: Rigidez inicial normalizada .....	101
Figura 4.21: Módulo Cisalhante Inicial exposto em função do teor de umidade.....	102
Figura 4.22: Perda de massa individual ao longo dos ciclos.....	103
Figura 4.23: Perda de massa acumulada ao longo dos ciclos.....	104
Figura 4.24: Corpos de prova de maior perda de massa (PMA = 19,37%) e menor perda de massa (PMA = 2,18%) ao final do 12º ciclo, respectivamente .....	105
Figura 4.25: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para durabilidade.....	106
Figura 4.26: Gráfico de efeitos principais para a durabilidade.....	106
Figura 4.27: Relação entre a perda de massa acumulada ao longo dos ciclos e o índice $\eta/B_{iv}$ .....	109
Figura 4.28: Perda de massa acumulada ao longo dos ciclos exposta em função do teor de umidade (a) para 10% (b) para 15% .....	109
Figura 4.29: Perda de Massa Acumulada em função da resistência à compressão simples...	112
Figura 4.30: Módulo de Resiliência (a) em função do teor de umidade e (b) em função do teor de agente cimentante .....	114
Figura 4.31: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o módulo de resiliência.....	116
Figura 4.32: Gráfico de efeitos principais para o módulo de resiliência.....	116
Figura 4.33: Relação entre o módulo de resiliência com o índice $\eta/B_{iv}$ .....	118
Figura 4.34: Módulo de resiliência exposto em função do teor de umidade (a) para 10% e (b) para 15%.....	119
Figura 4.35: Difratoograma de raios-X para as amostras selecionadas.....	120

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características físicas da Areia de Osório .....	51
Tabela 3.2 – Propriedades físicas do resíduo cerâmico.....	53
Tabela 3.3 – Composição química elementar do resíduo de cerâmica determinado por FRX.	53
Tabela 3.4 – Características físicas de cal de carbureto .....	55
Tabela 3.5 – Composição química da cal de carbureto .....	56
Tabela 3.6 – Fases e ensaios do programa experimental.....	58
Tabela 3.7 – Definição dos teores das variáveis controláveis adotadas no programa experimental .....	64
Tabela 3.8 – Características dos corpos de prova de acordo com os ensaios.....	66
Tabela 4.1: Resultados de Perda de Massa Acumulada (PMA) para os 8 tratamentos.....	105
Tabela 4.2: Comparativo entre os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos .....	111

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
CC	Cal de Carbureto
DRX	Difração de Raios-X
FRX	Fluorescência de Raios-X
IP	Índice de Plasticidade
LEGG	Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MR	Módulo de Resiliência (MPa)
PMA	Perda de Massa Acumulada
RC	Resíduo Cerâmico
TC	Temperatura de cura.
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria

## LISTA DE SIMBOLOS

$\gamma_d$	Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> )
$\eta$	Porosidade (%)
$\mu$	Coefficiente de Poisson;
$\sigma_d$	Tensão desvio aplicada repetidamente no eixo axial (MPa);
$\varepsilon_r$	Deformação específica axial resiliente (mm/mm).
$\Delta$	Deformação resiliente para aplicações da carga F (mm);
$B_{iv}$	Teor volumétrico de agente cimentante
$C_{iv}$	Teor volumétrico de cimento
F	Carga vertical repetida aplicada diametralmente ao corpo de prova (N);
$G_0$	Módulo cisalhante inicial (MPa)
H	Altura do corpo de prova (mm);
$q_u$	Resistência à compressão simples (MPa)
$q_t$	Resistência à tração (MPa);
$t_p$	Tempo da onda de compressão ( $\mu$ s)
$t_s$	Tempo da onda cisalhante ( $\mu$ s)
w	Teor de umidade (%)
$V_s$	Velocidade da onda cisalhante (m/s)
$V_p$	Velocidade da onda de compressão (m/s)

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Qualquer obra de engenharia necessita que os materiais utilizados sejam compatíveis com as solicitações de projeto. A engenharia geotécnica, por sua vez, é constantemente desafiada, já que os solos apresentam grande variabilidade e muitas vezes, são tidos como problemáticos por apresentarem baixa capacidade de suporte, comportamento colapsível, expansivos entre outros. A remoção de uma camada de solo que não exerce desempenho satisfatório é, em muitos casos, inviável do ponto de vista econômico e ambiental.

Diante disto, a técnica de estabilização de solos se faz uma alternativa extremamente necessária. A adição de agentes químicos para o melhoramento de propriedades de resistência, permeabilidade, compressibilidade e durabilidade vem sendo utilizada há muitos anos, o que ocasionou no emprego de materiais cimentantes convencionais, como o cimento Portland e a cal. O processo produtivo destes insumos está relacionado com a geração e emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), alta demanda energética e exploração de recursos de matérias primas, levando-nos a repensar sobre consumos que sejam de forma mais consciente e sustentáveis.

Nas últimas décadas, os cimentos originados a partir da técnica de ativação alcalina vem se mostrando uma alternativa em grande potencial para a substituição, total ou parcial, do cimento Portland e da cal, visto que propiciam excelentes rendimentos mecânicos. Para a obtenção deste novo material cimentante, deve-se destacar a inclusão de diferentes resíduos e subprodutos industriais e/ou domésticos, como principal fonte de matéria prima, o que contribui para um desenvolvimento sustentável onde a exploração de recursos naturais é cessada e os problemas de destinação final dos resíduos é contornado.

Visto que a álcali ativação pode ser aplicada a qualquer material precursor, que apresente teores suficientemente elevados e reativos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ , a busca por possíveis precursores vem sendo expandida para diferentes resíduos urbanos, industriais e de mineração. Neste contexto, busca-se avaliar a possibilidade de ativar alcalinamente dois diferentes tipos de resíduos



disponíveis no estado do Rio Grande do Sul: os resíduos de cerâmica vermelha e a cal de carbureto, de forma que seja possível a aplicabilidade para a técnica de solos artificialmente cimentados. Diversos autores comprovaram que os resíduos de cerâmica podem ser uma fonte de material precursor para a álcali ativação (PUERTAS et al., 2008; PACHECO-TORGAL; JALALI, 2009; REIG et al., 2013b; SUN et al., 2013; ROBAYO et al., 2016). A cal de carbureto é um resíduo da produção de gás acetileno, gerado mundialmente, e apresenta em sua composição grandes teores de hidróxido de cálcio livre sendo altamente alcalino, desta forma possui grande potencial para o desenvolvimento das reações com materiais de atividade pozolanicas (SALDANHA et al., 2018).

Por fim, têm-se a busca por materiais alternativos que possam ser empregados na construção de pavimentos. O modal rodoviário é o mais utilizado no país, contemplando 1.720.700 km de rodovias (CNT, 2019), por onde ocorre o tráfego de mais 70% do transporte cargas, bem como o transporte público e os veículos de passeio. Diante deste expressivo número, é notório o alto consumo de materiais para que seja implementada uma rodovia, sendo que durante anos buscou-se por agregados convencionais para tal finalidade, mas o que ocorre é que nem sempre estes mostram-se economicamente viáveis, o que remete a solução de utilizar materiais disponíveis que estejam próximos às margens das rodovias e que, eventualmente, necessitam de técnicas de melhoramento de solos.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é estudar o comportamento mecânico de um solo arenoso artificialmente cimentado através da técnica de ativação alcalina, a qual é composta por materiais tidos como subprodutos, a cal de carbureto e o resíduo cerâmico. Para que sejam incorporados novos conceitos de materiais estabilizados, compreender o comportamento geotécnico frente a ensaios mecânicos é imprescindível. Além disto, esta pesquisa visa a aplicabilidade em camadas de base e sub-base de pavimentos.

### 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar ao objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram delimitados em:

- a. Avaliar o comportamento das misturas adotadas frente aos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo cisalhante inicial, durabilidade por ciclos de molhagem e secagem e módulo de resiliência;
- b. Verificar a influência das variáveis de peso específico aparente seco, teor de agente cimentante empregado, teor de umidade de moldagem e o tempo de cura;
- c. Verificar a adequação das variáveis respostas em relação ao parâmetro porosidade/teor volumétrico de agente cimentante ( $\eta/Biv$ );
- d. Avaliar a microestrutura das misturas empregadas e identificar os produtos de reações formados, de forma a validar a álcali ativação para estabilização de solos.

### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para o desenvolvimento desta pesquisa, seguiu-se cinco etapas. A primeira, descrita no capítulo 1, consiste na identificação e relevância da pesquisa, abordando uma breve conceituação sobre os materiais álcali ativados e a estabilização de solos, direcionando a aplicação para pavimentação. A partir disto, é possível identificar os objetivos a serem cumpridos nesta pesquisa.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica consultada acerca dos assuntos considerados importantes para que haja uma compreensão dos conceitos abordados. No capítulo 3 encontra-se o programa experimental para que os objetivos traçados sejam concluídos. Também apresenta-se a definição dos fatores controláveis, a descrição dos materiais utilizados nesta pesquisa e o procedimento experimental para a realização dos ensaios.

O capítulo 4 descreve sobre os resultados obtidos e discussões sobre, de forma que seja possível o entendimento do comportamento geotécnico do solo artificialmente cimentado através da técnica de ativação alcalina. Buscou-se também uma análise estatística dos fatores que exercem influência nas variáveis respostas.

No capítulo 5 apresentam as principais conclusões obtidas com esta pesquisa, e algumas sugestões de pesquisas futuras para um melhor entendimento do comportamento do material analisado.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

No decorrer deste capítulo, será apresentada uma breve revisão da literatura sobre os materiais estudados, abordando desde os impactos ambientais da geração de resíduos ao comportamento mecânico de solos cimentados. Entende-se que os conceitos e definições aqui presentes, são de essencial conhecimento para um bom entendimento desta pesquisa.

Primeiramente é feita uma abordagem sobre os resíduos utilizados, pó cerâmico e a cal de carbureto, trazendo uma estimativa da produção nacional e mundial. Na sequência é apresentado os conceitos sobre a álcali ativação, começando com os materiais precursores mais estudados mundialmente e o conceito da geopolimerização. Aprofundando-se, será feito uma revisão do estado da arte sobre o desenvolvimento de cimentos álcali ativados através do resíduo cerâmico.

Posteriormente será apresentado os principais aspectos sobre a estabilização de solos, especificamente sobre solos granulares, bem como o índice de porosidade/teor volumétrico de agente cimentante. A partir disto, será apresentada a estabilização de solos por meio de álcali ativação. Também serão abordadas diretrizes relacionadas com a pavimentação, tendo em vista que este é o enfoque de aplicabilidade desta pesquisa.

### **2.2 ASPECTOS GERAIS SOBRE A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS**

O crescimento populacional é intimamente relacionado com o desenvolvimento econômico da sociedade, e com isto, uma série de mudanças no consumo de recursos renováveis e não renováveis é causada. Como consequência direta, vem ocorrendo o aumento na produção de resíduos gerados pelo homem. Nesse cenário, o gerenciamento de resíduos torna-se importantíssimo pois desenvolvimento e meio ambiente devem andar lado a lado. Entretanto, boa parte dos resíduos não possuem destinação sanitária correta, causando grandes danos ambientais muitas vezes irreversíveis e, além disto, o nível de degradação ambiental causado

pelo homem é cada vez mais agravante. Desta forma, é nosso dever pensar em técnicas possam minimizar as alterações ambientais presentes e futuras, sendo a reutilização de resíduos uma prática que vem crescendo cada vez mais em pesquisas, visando a busca de materiais mais sustentáveis.

### 2.2.1 Indústria cerâmica e a geração de resíduos

De acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM, 2020) os materiais cerâmicos correspondem a todos os materiais inorgânicos e não metálicos, os quais são obtidos geralmente após tratamento térmico em altas temperaturas. Por ser um setor muito amplo, é dividido em segmentos conforme a matéria prima, propriedades e utilização. São estes: a cerâmica vermelha, que compreende os materiais empregados na construção civil (tijolos, telhas, blocos e etc); placas cerâmicas de revestimento conhecidos como azulejos, porcelanatos, grês, lajotas e etc; as cerâmicas brancas, que em geral são recobertos por uma camada vítrea incolor tais como as louças sanitárias, louças de mesa e isoladores elétricos; os materiais refratários; abrasivos; vidros e a cerâmica avançadas, desenvolvida a partir de matéria prima sintética. Em um panorama global de produção de cerâmica, o setor de peças de revestimento alavanca o Brasil para o terceiro lugar mundial de manufatura, ficando atrás da China com 43,4% da produção total e da Índia (CERAMIC WORLD REVIEW, 2019).

Dentro destas classificações dos produtos, os materiais de cerâmica vermelha são os de interesse nesta pesquisa. Estimativas da Associação Nacional da Indústria Cerâmica – ANICER, a indústria de cerâmica vermelha é responsável por 4,8% da indústria da construção civil, visto que, os blocos estruturais, tijolos e telhas representam 90% das alvenarias e coberturas construídas no Brasil. Nesse sentido, trata-se de uma atividade muito importante para a economia do País, sendo o setor formado por 6.903 empresas responsáveis por cerca de 4% do Produto Interno Bruto – PIB nacional. Segundo Cabral Junior et al. (2008), os pequenos empreendimentos familiares, as olarias, e os de médio porte acabam tendo deficiência de produção e gestão quanto aos processos produtivos tecnológicos, resultando em volumes expressivos de resíduos durante o processo de fabricação.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia – MME (2009), as perdas do processo fabril ocorrem na conformação das peças, podendo ser reincorporadas ao sistema produtivo, e as

perdas pós queima, compondo os resíduos de peças defeituosas, que dependem de fatores como matéria prima empregada, tecnologia de fabricação, controle de qualidade, transporte e manuseio. As perdas na etapa pós-queima, podem chegar de 5% a 20% conforme o grau de tecnologia empregado no processo produtivo. Desta forma, aproximadamente 7,1 bilhões de peças/ano são categorizadas como resíduo. Além dos resíduos provenientes da própria fabricação, existem também os resíduos oriundos da construção civil. Os números deste setor são muito expressivos, visto que a China, os Estados Unidos e os países da União Europeia produzem 605,5 milhões de toneladas por ano, sendo que aproximadamente 45% destes resíduos são atribuídos aos produtos cerâmicos como tijolos, telhas e cerâmicas de revestimento (ROBAYO et al., 2016).

A principal matéria prima para a produção de materiais cerâmicos são as argilas. Entende-se por argila a fração fina de um solo, onde as partículas minerais apresentam diâmetro inferior a 2  $\mu\text{m}$ , e são compostas predominantemente por partículas microcristalinas, denominadas como minerais de argilas com estrutura laminar ou argilominerais (GRIMM, 1968 apud BERGAYA; LAGALY, 2006). Conforme o arranjo estrutural de tetraedros de silício, octaedros de alumínio e o espaçamento basal, caracterizam-se diversos argilominerais que, segundo Cabral Junior et al. (2008), os grupos da caulinita, montmorilonita e illita são os mais importantes no uso cerâmico.

Segundo Linares; Huertas; Capel (1983), os minerais de argila ao serem submetidos ao processo térmico sofrem uma série de transformações, as quais se iniciam com a desidratação e a aparição de fase vítrea, e posteriormente a formação de novas fases cristalinas. Estas novas fases cristalinas são reflexos dos elementos químicos presentes na matriz mineralógica da argila, das impurezas e também, da fração mais grosseira tal como os minerais de quartzo, feldspato e carbonatos. Sendo assim, todos estes minerais são decompostos e reagem entre si para dar lugar a uma “fase de alta temperatura” e a fase vítrea, a qual proporciona a resistência mecânica das peças cerâmicas.

## 2.2.2 Cal de carbureto

O resíduo carbureto de cálcio, também denominado como cal de carbureto, é proveniente do processo de produção do gás acetileno ( $C_2H_2$ ) e é composto principalmente pelo hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ), pequenas porções de carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) e dióxido de silício ( $SiO_2$ ). Segundo Saldanha et al. (2018), o *Market Research Store* em 2015 relatou que a produção global de gás acetileno gerou 1.423.000 toneladas de resíduo, e espera-se que este valor aumente em 3% até 2020. Já no Brasil vem sendo produzidos 6.000 toneladas por ano de gás acetileno, o que resulta em 17.100 toneladas de cal de carbureto.

Devido à grande quantidade de  $Ca(OH)_2$  livre em sua composição e a baixa presença de impurezas, a reciclagem deste resíduo torna-se potencial para ser utilizada em diferentes aplicações. Na engenharia geotécnica vem sendo aplicado na estabilização de diferentes solos, diferentes autores (Consoli et al., 2001, 2019a, 2019b; Horpibulsuk et al., 2013; Phummiphan et al., 2016; Saldanha et al., 2018) já verificaram que a adição deste material em misturas com pozolanas, melhoram as propriedades mecânicas de resistências, rigidez e durabilidade.

## 2.3 MATERIAIS ÁLCALI ATIVADOS

### 2.3.1 Histórico

O primeiro estudo sobre materiais ativado alcalinamente se deu através de Kuhl, em 1908, onde foi relatado e patenteado o comportamento entre a mistura de escórias e sulfato alcalino, o que levou ao desenvolvimento de cimentos supersulfatados, principalmente nos países onde a escória continha alto teor de alumina, tal como na Bélgica, Alemanha e França (JOHN, 1995). Por volta dos anos 40, a prática da adição de carbonato de sódio, cloreto de sódio, sulfato de sódio ou sulfato de cálcio para acelerar o ganho de resistência dos cimentos produzidos a base de escórias, era muito comum. De acordo com Purdon (1940 apud JOHN, 1995) as escórias, de fato, apresentam propriedades cimentantes, mas as reações necessárias para obter-se produtos com boas características mecânicas eram muito lentas, inviabilizando o uso sozinho. Desta forma, Purdon realizou uma série detalhada de mais de 30 combinações de argamassas produzidas através de escórias de alto forno (alto teor de cálcio) e hidróxido de sódio ( $NaOH$ )

como ativador alcalino, conhecido como cimento sem clínquer, o qual atingiu níveis resistências comparadas a do cimento Portland. (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014; KRIVENKO, 2017).

Entretanto, foi a partir de 1957 que o professor ucraniano Victor Glukhovsky descobriu a possibilidade de obter aglomerantes através da álcali ativação entre materiais contendo baixo teor de cálcio e elevado teor de Silício (Si) e Alumínio (Al), tal como as argilas, distinguindo do precursor que vinha sendo estudado, as escórias de alto forno. Estes materiais aluminosilicatos foram submetidos a soluções de metais alcalinos, e denominado por Glukhovsky, de solo-cimento o novo aglomerante que fora produzido, devido a semelhança com rochas naturais e de características cimentantes. De acordo com o material inicial, o aglomerante pode ser categorizado em dois grupos: Sistemas Alcalinos ( $\text{Me}_2\text{O}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ) e Sistemas Alcalinos-Terrosos ( $\text{Me}_2\text{O}-\text{MeO}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ), onde Me = Na, K e M = Ca, Mg (SHI, KRIVENKO; ROY, 2006; KRIVENKO, 2017).

O termo geopolímero foi difundido por Davidovits (1979), ao se referir à reação entre materiais abundantes em aluminosilicatos sólidos e uma solução aquosa altamente concentrada de álcalis hidróxidos ou silicatos. A busca por esta pesquisa se originou devido aos grandes incêndios na França na década de 70, motivando Davidovits na busca de um material polimérico que fosse resistente ao calor, não inflamável e não combustível, resultando em diversas patentes. A fonte de aluminosilicatos utilizada era pioneira, através da calcinação da caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3-2\text{SiO}_2-2\text{H}_2\text{O}$ ), quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e NaOH submetidos a temperaturas de  $150^\circ\text{C}$  (DAVIDOVITS, 1979).

Desde que as descobertas de aglomerantes obtidos a partir da síntese de matérias primas (naturais ou subprodutos industriais) e metais alcalinos, diversas nomenclaturas tem sido comumente apresentadas na literatura, tais como: Solo-Cimento (GLUKHOVSKY, 1979), geopolímero ou polímero inorgânico (DAVIDOVITS, 1979), geocimento (KRIVENKO, 1994 apud DUXSON et al., 2007), cimento álcali ativado (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, PALOMO; PUERTAS, 1999), concreto polimérico inorgânico (SOFI et al., 2007). De acordo com Pacheco-Torgal et al. (2015), esta proliferação de nomenclaturas diferentes adotada pelos



autores, mas que descrevem o mesmo material, reflete em dificuldades para que os materiais álcali ativados se tornem uma alternativa ao cimento Portland. Visto que, não se tem um consenso sobre o nome científico, o autor relaciona estas divergências com a falta de bom senso da comunidade científica, o que acaba resultando com que pesquisas relevantes não apareçam em buscas simples no meio acadêmico por falta da palavra-chave correta.

### 2.3.2 Influência do material precursor

Uma vasta gama de matérias primas naturais e de subprodutos industriais vem sendo utilizados como fonte precursora de aluminosilicatos na ativação alcalina, os mais difundidos é o metacaulim, as escórias de alto forno e as cinzas volantes. Conforme as características de cada material utilizado, bem como a do ativador alcalino, há variações quanto ao processo de hidratação e nas características microestruturais do aglomerante formado, causando diferentes propriedades mecânicas no material alcáli ativado.

Glukhovsky propôs uma divisão de materiais álcali ativados em dois grupos: sistemas alcalinos e sistemas alcalinos-terrosos. Anos depois, com as diferentes fontes de aluminosilicatos estudadas, foram divididos em: materiais álcali-ativados alto cálcio e materiais álcali-ativados baixo cálcio (KRIVENKO, 2017; PACHECO-TORGAL et al., 2015; PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

No sistema alto cálcio são utilizados materiais ricos em cálcio e sílica, tal como as escórias de alto forno em que os teores de  $\text{SiO}_2 + \text{CaO}$  representam mais do que 70% da composição mineralógica. Neste caso, o produto da reação é a formação do gel C-A-S-H, similar ao C-S-H formado no cimento Portland. Conforme Provis; Bernal (2014), a escória de alto forno reage lentamente com a água para formar o aglomerante, desta forma a solução alcalina acelera as reações permitindo que o material atinja um endurecimento em poucas horas ou dias, o que é de extrema valia no âmbito de propriedades como resistência e rigidez dentro da engenharia civil.

Já para o sistema baixo cálcio, os materiais utilizados apresentam em sua composição mineralógica alto teor de alumínio e sílica e baixo teor de cálcio, como é o caso do metacaulim e da cinza volante Classe F. O principal produto formado é o gel N-A-S-H<sup>1</sup>, um polímero

inorgânico tridimensional ou **geopolímero**. Pode-se entender que, para Provis; Van Deventer (2014), os geopolímeros são classificados como uma subcategoria de materiais álcali-ativados, que dependem fortemente do material precursor. Neste contexto, Duxson et al. (2005) apresentam relações entre as propriedades mecânicas e microestruturais de geopolímeros sintetizados a partir do metacaulim e de cinza volante Classe F, fontes de aluminosilicatos que podem parecer similares mas que apresentam grandes diferenças na microestrutura do geopolímero.

A formação do geopolímero é sintetizada através de reações químicas, sendo assim é importante que se entenda quais os processos que o material sofre, o qual é denominado de geopolimerização.

### 2.3.3 O modelo conceitual para a geopolimerização

De maneira geral, o geopolímero é o produto gerado através das reações da síntese de uma fonte precursora de aluminosilicatos e de uma solução aquosa, de elevado pH, de hidróxidos e silicatos alcalinos, resultando em um material com propriedades cimentantes (DUXSON et al., 2006). Baseado na sua estrutura química, Davidovits (1979) os designou como Polisialatos, sendo sialato uma abreviação para silício-oxi-alumínio. Estes polisialatos são formados por tetraedros de silicatos ( $\text{SiO}_4$ ) e aluminatos ( $\text{AlO}_4$ ) conectados através de átomos de oxigênio, sendo assim a Equação (2.1) representa este material.



Onde M é um cátion de potássio (K), sódio (Na) entre outros, visto que os íons positivos devem estar presentes para balancear a carga negativa do  $\text{Al}^{3+}$ . A letra n representa o grau de policondensação e z é o monômero de repetição sendo 1,2 ou 3.

Com o intuito de explicar o processo de geopolimerização, Glukhovsky (1994) propôs um mecanismo geral das reações de ativação dos materiais com baixo teor de cálcio, consistindo

em três estágios: 1: destruição – coagulação, 2: coagulação – condensação e, 3: condensação – cristalização.

No primeiro estágio, as partículas sólidas Me-O, Si-O-Si, Al-O-Al e Al-O-Si encontradas no material precursor são quebradas devido a presença do íon  $\text{OH}^-$  na solução alcalina. Os aluminatos da solução alcalina formam complexas ligações, como  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  ou  $\text{Al}(\text{OH})_6^{3-}$ . No segundo estágio, a acumulação de espécies iônicas favorece o contato das partículas desagregadas e a policondensação começa, formando grupos de estruturas coaguladas. Os monômeros de sílica reagem e formam ligações Si-O-Si que reagem com outros monômeros, formando polímeros. Por último, no terceiro estágio, a presença de partículas oriundas da fase sólida juntamente com as micropartículas resultantes da condensação, favorecem a precipitação. A composição mineralógica do material precursor, a natureza da solução alcalina e o processo de cura do material determinam a composição do material cristalizado, o gel N-A-S-H (SHI; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2011; PACHECO-TORGAL et al., 2015).

Este mecanismo foi estendido por Palomo et al. (2005), onde os autores utilizaram ativação alcalina com cinza volante, baseados através da análise microestrutural MAS-NMR (*Magic Angle Spinning – Nuclear Magnetic Resonance*). Este modelo começa com a dissolução dos aluminossilicatos presentes na cinza volante quando entram em contato com a solução alcalina, formando monômeros de aluminatos e silicatos. As pequenas moléculas aglutinam e formam grandes moléculas, as quais precipitam em forma de um gel, que de acordo com o NMR, é rico em alumínio (denominado gel 1, Si/Al = 1). Isto ocorre por que diante de altas concentrações, a dissolução do alumínio é mais fácil do que a da sílica, visto que as ligações Al-O são mais fracas que as ligações Si-O. Conforme as reações progredem, as ligações Si-O dissolvem favorecendo a evolução do gel 1 para uma nova fase, o gel 2 rico em sílica (Si/Al = 2).

Posteriormente, Duxson et al.(2006) incluíram a água no processo de reações. Da mesma maneira, a dissolução dos aluminossilicatos sólidos acontece através da solução alcalina, a qual hidrolisa a superfície do mineral, ocorrendo nesta etapa o consumo de água. Durante as fases de formação do gel é liberada a água que foi consumida durante a dissolução, mas uma parte encontra-se nos poros. Este tipo de gel é conhecido como bifásico, composto por uma parte aglomerante proveniente do polímero e pela água. O sistema continua a se reorganizar conforme as ligações do gel aumentam, resultando em um aluminossilicato tridimensional, o geopolímero.

A Figura 2.1 descreve os principais processos que ocorrem na transformação de uma fonte sólida de aluminosilicatos em um geopolímero, de forma simplificada e esquemática. DUXSON et al., (2006) salientam que alguns requisitos como tratamento térmico da matéria prima precursora, a reatividade do alumínio presente no sistema e outros fatores não é mostrada por questões de simplicidade para o modelo. A Figura 2.1 conceitua as reações de ativação como duas fases, onde tem-se a nucleação e dissolução da sílica e alumina, com posterior formação de estruturas poliméricas. Após, acontece o crescimento, quando o núcleo atinge o tamanho crítico e inicia-se a formação dos cristais. Esta reorganização estrutural determina a composição final do polímero, bem como a microestrutura que está relacionamento com muitas propriedades mecânicas (DUXSON et al., 2006; PACHECO-TORGAL et al., 2015).

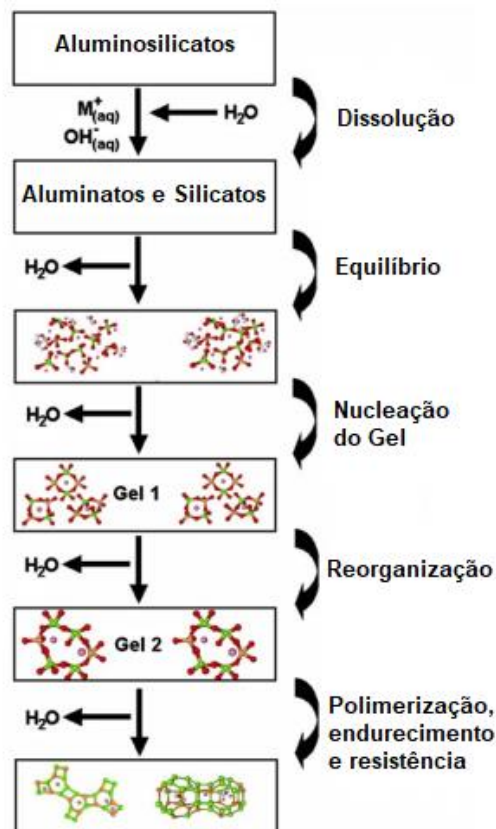


Figura 2.1: Modelo conceitual da geopolimerização  
(adaptado de DUXSON et al., 2006)

### 2.3.4 Álcali ativação com resíduos cerâmicos

Durante muito tempo, a utilização de materiais precursores para a produção de cimentos álcali ativados esteve baseada nos estudos da cinza volante, escórias de alto forno e matacaulim, por este motivo há um vasto acervo na literatura (Fernández-Jiménez e Palomo, 2005, Pacheco-Torgal, Castro-Gomes e Jalali, 2008, Yao et al., 2009) sobre as propriedades químicas e mecânicas destes materiais. Entretanto, há uma alta demanda no consumo de escórias de alto forno e cinzas volantes para o emprego em misturas com o cimento Portland. Desta forma, apesar de serem subprodutos industriais, a alta demanda está associada a um crescimento nos custos de aquisição (BERNAL et al., 2016).

Visto que a álcali ativação pode ser aplicada a qualquer material precursor, que apresente teores suficientemente elevados e reativos de  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$ , a busca por possíveis precursores vem sendo expandida para diferentes resíduos urbanos, industriais e de mineração. Por não serem utilizados em misturas tradicionais do cimento Portland, estes podem oferecer uma opção de baixo custo na produção de cimentos álcali ativados.

Neste cenário, a utilização de resíduos cerâmicos provenientes tanto de resíduos da construção civil, quanto do próprio processo de produção (peças com avarias) torna-se uma atrativa opção, pois além de solucionarem problemas referente ao descarte em aterros sanitários, podem auxiliar na substituição parcial ou total do cimento Portland. Puertas et al.(2006) estudaram a composição química de seis resíduos cerâmicos, provenientes de diferentes indústrias da fabricação de telhas cerâmicas na Espanha. O objetivo foi avaliar a viabilidade em substituir parcialmente o clínquer do cimento Portland e sintetizar argamassas ativadas com NaOH e silicato de sódio ( $Na_2SiO_3$ ) a concentrações de 6M e 12M. Foi deduzido pelos autores que, do ponto vista químico, os resíduos e apresentaram comportamento pozolânico aos 8 dias de reação em soluções saturadas de  $Ca(OH)_2$  devido aos altos teores de  $SiO_2$  e  $Al_2O_3$ , viabilizando o emprego alternativo na fabricação do clínquer. Entretanto, as argamassas estudadas atingiram baixos valores de resistência a compressão simples, entre 7 MPa e 13 MPa, após 8 dias de cura a uma temperatura constante de 60°C. A princípio, a quantidade de fase vítrea e a natureza do ativador não tiveram forte influência nas propriedades mecânicas. Na análise mineralógica através de DRX, não foi evidenciado diferenças que indiquem a formação da fase cristalina

como resultado da ativação alcalina. Desta forma, novas pesquisas foram necessárias para entender as propriedades finais dos ligantes desenvolvidos.

Neste sentido, Sun et al. (2013) sintetizou geopolímeros com resíduos cerâmicos diretamente da coleta seletiva, passando por posterior beneficiamento, ativados com soluções mescladas de NaOH e KOH. A resistência à compressão simples das amostras atingiu valores de até 71,1 MPa aos 28 dias de cura, este alto valor é devido ao fato da presença do álcali  $K^+$  da solução ativadora, o qual aumenta a dissolução dos silicatos. Esta amostra de 71,1 MPa foi submetida a tratamentos térmicos de até 1.000°C, e na análise microestrutural os autores confirmaram a presença da formação de geopolímero após os 28 dias de cura, apresentando superfície mais regular e compacta, indicando boa resistência à compressão simples. Diante da análise DRX, após o tratamento térmico, a presença de quartzo e albita permanecem quase sem alterações porém, houve a formação de uma fase cristalina de zeólita e de silicatos de sódio e cálcio. Sendo assim, diante destas características os autores demonstraram que os resíduos cerâmicos servem como material alternativo para a síntese de geopolímeros.

Em estudos apresentados por Reig et al. (2013a, 2013b, 2014, 2016), foi descrito uma sequência de influências na produção de pastas com resíduos cerâmicos e soluções alcalinas. Em Reig et al. (2013a), o material precursor utilizado foram tijolos, proveniente dos resíduos de demolição da construção civil, e produzidas amostras ativadas com soluções de NaOH e  $Na_2SiO_3$ . A máxima resistência à compressão obtida foi de 50 MPa, após 7 dias de cura a temperatura de 65°C. Foi identificado a formação de estruturas tipo zeólitas nos cimentos produzidos em baixas concentrações alcalinas. Posteriormente, Reig et al. (2013b) utilizaram dois tipos de resíduos cerâmicos, os tijolos de demolição e os porcelanatos de revestimento, visto que estes materiais são sinterizados em temperaturas diferentes, de 800 °C à 1.000 °C e de 1.190 °C à 1.220 °C, respectivamente, e apresentam composição química diferente. Foi estabelecido o efeito da dosagem da solução alcalina, composta de NaOH e  $Na_2SiO_3$ , na resistência à compressão e na microestrutura dos diferentes produtos produzidos em função da relação água/ligante e solução/ligante. Os valores de resistência encontrados foram entre 29 MPa e 41 MPa. Na ativação dos resíduos de porcelanatos, foi necessária a inclusão de  $Ca(OH)_2$  em teores de 2% e

5% em relação ao peso do resíduo, para produzir argamassas com resistência de 30 MPa após 7 dias de cura a 65°C.

A partir destas informações, Reig et al. (2014) estudaram o efeito do teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  (2, 3, 4 e 5%) nas propriedades mecânicas e microestruturais dos resíduos de porcelanato, concluindo que há uma forte relação na inclusão de cálcio nas misturas e o endurecimento inicial (*setting*) dos cimentos produzidos. Houve também uma tendência de incremento nos valores de resistência, máxima de 36 MPa aos 7 dias de cura a 65 °C, conforme a concentração de álcali adicionada.

Apesar destes estudos comprovando a utilização de resíduos cerâmicos como material precursor para a álcali ativação, o que eles têm em comum é a necessidade de altas temperaturas de cura para que o processo de ativação ocorra, e para obter valores significativos de resistência à compressão. Sendo assim, Reig et al. (2016) adicionaram o cimento de aluminato de cálcio (CAC) como fonte de cálcio e alumina reativa. As propriedades mecânicas foram afetadas pelo tempo de cura, temperatura e o teor de cimento adicionado. Quando adicionado 40% de CAC a resistência à compressão atingiu o valor de 50 MPa para 3 dias de cura em temperatura ambiente, podendo ser comparado a amostra com 20% de CAC curada por 7 dias a 65°C.

Robayo et al. (2016) também estudaram a utilização da solução ativadora de NaOH, em diversos teores de  $\text{Na}_2\text{O}$  em relação a massa de resíduo cerâmico. Para atingir a melhor resistência à compressão, este teor ótimo foi de 10% proporcionando um valor de 7,49 MPa e 15,57 MPa, curadas a 25 °C e 70 °C, respectivamente, por 48 h primeiramente e após 28 dias de cura. A incorporação de sílica solúvel ao ativador alcalino, mostrou um efeito positivo possibilitando atingir 54,38 MPa de resistência à compressão quando curado a 25 °C por 28 dias. A combinação de 10% e 20% de cimento Portland, do silicato de sódio e do NaOH resultou em uma resistência de 41,1 MPa e de 102,6 MPa, refletindo o efeito da adição de CaO na mistura.

## 2.4 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS

A técnica de estabilização de solos é, sem dúvidas, amplamente difundida na literatura de engenharia geotécnica há anos. Dada a circunstância em que o solo disponível não apresenta

desempenho satisfatório frente as solicitações de projeto, esta alternativa torna-se necessária, visto que a remoção de camadas é inviável do ponto de vista econômico e ambiental. Desta forma, a estabilização atua como um recurso capaz de alterar as propriedades do solo através de tratamentos mecânicos, físicos, químicos, térmicos entre outros.

A estabilização química é abordada nesta dissertação. Dentre os agentes químicos utilizados para a melhoria das propriedades dos solos, os dois mais utilizados são o cimento Portland e a cal hidratada (MOH, 1965).

#### 2.4.1 Reações pozolânicas envolvidas na estabilização de solos

Conceitualmente, a reação pozolânica é a formação de compostos cimentícios conhecidos por silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H), provenientes do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}[\text{OH}]_2$ ) presente na cal que reage com os aluminatos e silicatos solubilizados (LITTLE, 1999). Esta fonte de sílica e/ou alumina, muitas vezes encontram-se nos próprios argilominerais presentes no solo, mas quando trata-se de solos granulares, somente a incorporação de cal no sistema não é capaz de produzir um material cimentante, então a adição de pozolana externa é necessária para que as reações sejam desencadeadas (HERRIN; MITCHELL, 1961).

Pode-se encontrar duas disposições de pozolanas, as naturais e as artificiais. As naturais correspondem aos materiais que não necessitam de beneficiamento que vise modificações químicas e/ou estruturais. Já as artificiais, pelo contrário, passam por algum processo de modificação, pode-se citar a submissão em elevadas temperaturas, moagem e/ou peneiramento. Dentre as mais utilizadas na engenharia geotécnica encontram-se as cinzas volantes, escórias de alto forno, cinzas de casca de arroz e, recentemente vem sendo estudado a viabilidade de pozolanas artificiais alternativas, como o pó de vidro e o pó de resíduo cerâmico (CONSOLI et al., 2018; WINTER, 2018; SCHEUERMANN FILHO, 2019; DAASSI-GLI, 2020; TEBECHRANI NETO, 2020). Cabe destacar que as pozolanas sozinhas não apresentam propriedades cimentantes, desta forma necessitam de um ativador para reagir quimicamente.



Herrin e Mitchell (1961) descrevem que as reações que governam o sistema cal-pozolana-solo são similares as misturas solo-cal. Estas reações são descritas, de forma simplificada, conforme as Equações (2.2), (2.3) e (2.4).



Onde: C = CaO, S = SiO<sub>2</sub>, A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e H = H<sub>2</sub>O

A Equação (2.2) representa a dissolução do hidróxido de cálcio na presença de água, liberando para o sistema cátions de Ca<sup>2+</sup> e a hidroxila (OH)<sup>-</sup>, a qual promove o aumento do pH para valores de 12,3 a 12,4 (TRB, 1987). Quando em ambientes fortemente alcalinos, há uma progressiva dissolução dos aluminatos e silicatos que em combinação com os cátions livres Ca<sup>2+</sup>, têm-se a precipitação de compostos cimentantes hidratados, conforme as Equações (2.3) e (2.4), que são responsáveis pela melhoria das características mecânicas de solos. Visto que, a maioria das pozolanas são formadas por diversos minerais vítreos amorfos além de sílica e alumina, outros compostos sem ser os aluminatos e silicatos de cálcio hidratados provavelmente serão formados (MATEOS, 1961). Além disto, as condições de reações também afetam o material precipitado, tal como o tipo de cal, as características do solo, os minerais em fase amorfa nas pozolanas, tempo e temperatura de cura (TRB, 1987).

Nos instantes iniciais, as reações pozolanicas possuem maior dependência da área de superfície específica dos componentes envolvidos (SCHEUERMANN FILHO, 2019), entretanto, estas reações podem continuar por longos períodos de tempo, enquanto houver a disponibilidade de sílica e alumina aliadas ao elevado pH imposto pelo hidróxido de cálcio (LITTLE, 1999).

Além do desenvolvimento das reações pozolanicas, quando a cal é adicionada ao solo, esta pode combinar-se com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente nos vazios do solo (MATEOS, 1961). Este é o processo de carbonatação, o qual resulta no carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) que vem a

ser deletério para as reações pozolánicas, já que o  $\text{Ca}[\text{OH}]_2$  disponível é consumido nesta reação de carbonatação. De certa forma, este é um mecanismo inverso ao verificado na produção da cal.

#### 2.4.2 Comportamento de solos estabilizados

A aplicabilidade do cimento em diversos tipos de solos é satisfatória, porém, segundo Ingles; Metcalf (1972), observa-se maior eficiência em solos tipicamente arenosos, em função dos baixos teores de aditivo requeridos e pelas maiores resistências obtidas. Os solos bem graduados e com plasticidade de média a baixa propiciam uma cimentação mais eficiente, visto o melhor entrosamento dos grãos em relação aos pontos de contato. Sendo assim, a introdução de um agente cimentante na areia produz um material com duas componentes de resistência: uma parcela devido à coesão criada pela adição do cimento, que tem um papel predominante na resistência (Akinmusuru, 1987 apud Marques, 2016), e outro devido ao atrito entre as partículas, que apresenta valores similares entre areias cimentadas e não cimentadas (CLOUGH, SITAR; BACHUS, 1981).

Conforme o grau de cimentação, Chang; Woods (1992) classificaram o comportamento de areias cimentadas em três estágios: Para as fracamente cimentadas, a superfícies de alguns grãos é coberta parcialmente pelo cimento. No estágio intermediário, o cimento preenche parcialmente os vazios do solo e há uma cimentação entre as partículas. Para as areias altamente cimentadas, o cimento preenche grande parte dos vazios e o remanescente atua como *filler*, sendo difícil distinguir os grãos do solo e o produto cimentante. Park (2011) demonstra esse comportamento para uma areia mal graduada com poucos finos, cimentada em diferentes teores de cimento, através da microscopia eletrônica de varredura conforme a Figura 2.2.

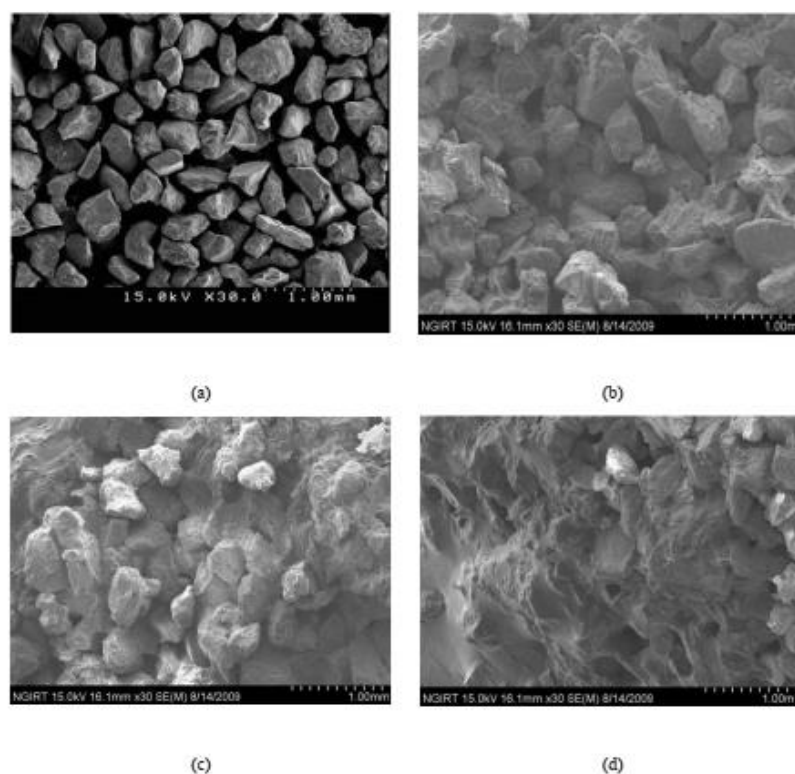


Figura 2.2: Microestrutura da Baekma River Sand (a) não cimentada, (b) fracamente cimentada – 4% de cimento, (c) medianamente cimentada – 8% de cimento e (d) fortemente cimentada – 16% de cimento.

(PARK, 2011)

Clough, Sitar; Bachus (1981), através de ensaios em areias naturalmente e artificialmente cimentadas, concluíram que o comportamento de uma areia cimentada é diretamente relacionado com o teor de de agente cimentante, com a densidade dos grãos, com a tensão de confinamento e a distribuição granulométrica. Desta forma, se a mesma quantidade de cimento for adicionada em solos de mesma natureza, porém com densidades diferentes, a resistência obtida será distinta, devido ao fato que quanto mais denso há maior número de pontos de contato entre as partículas (CHANG; WOODS, 1992).

Este comportamento foi verificado por Consoli et al. (2010), demonstrado na Figura 2.3 para a areia de Osório artificialmente cimentada em vários teores de cimento. Tanto a resistência à compressão simples, quanto a resistência à tração por compressão diametral, estão intimamente relacionadas com o índice de vazios e o teor de agente cimentante. Ainda neste estudo, os autores descreveram que os resultados de compressão simples ( $q_u$ ) e compressão diametral ( $q_t$ ) apresentam tendências similares, permitindo relacionar a razão  $q_t/q_u$  (Figura 2.4). Em média, o

valor da resistência à compressão diametral ( $q_t$ ), para um mesmo valor de  $\eta/C_{iv}$ , é de 15% do valor da resistência à compressão ( $q_u$ ).

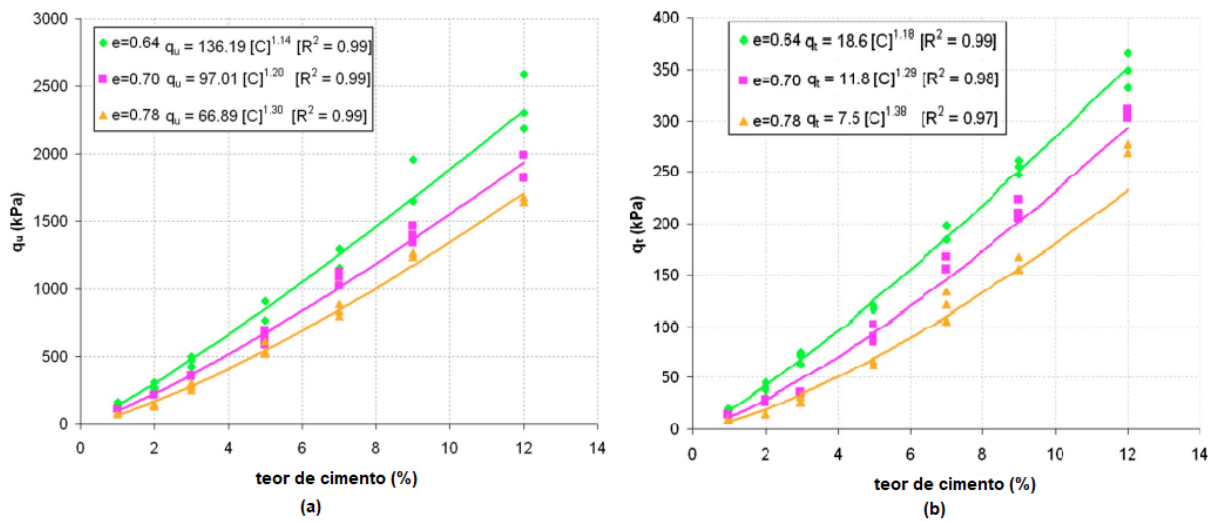


Figura 2.3: Variação de resistência em função do teor de cimento, (a) compressão simples ( $q_u$ ), (b) tração por compressão diametral ( $q_t$ ) (adaptado de CONSOLI et al., 2010)

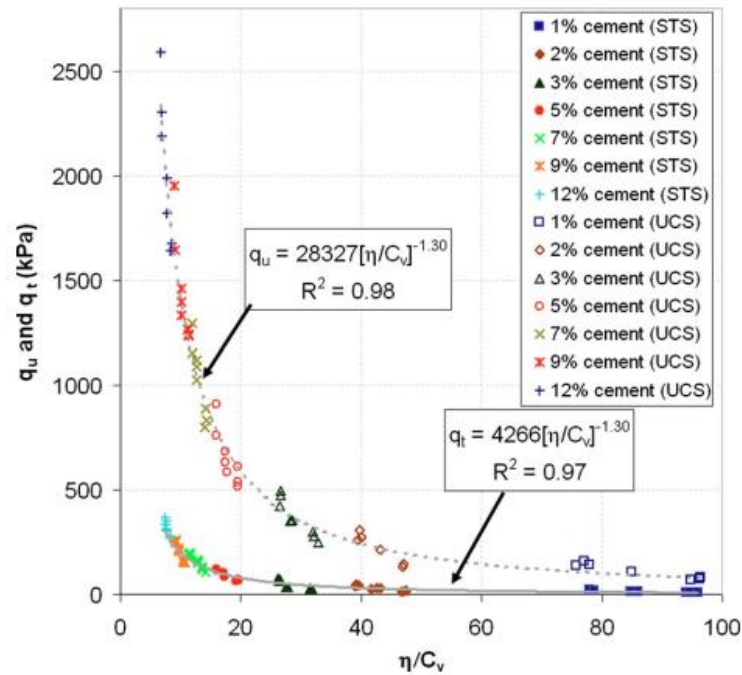


Figura 2.4: Variação da resistência compressão simples ( $q_u$ ) e resistência diametral ( $q_t$ ) em função da razão vazios/cimento ( $\eta/C_{iv}$ )

(CONSOLI et al., 2010)

### 2.4.3 Relações entre porosidade e o teor volumétrico de agente cimentante

A metodologia racional de dosagem para as misturas de solos cimentados foi estabelecida por Consoli et al. (2007), analogamente ao fator água/cimento para concreto, que relaciona o volume de vazios e o volume de agente cimentante. Esta metodologia baseou-se nos estudos de Lanarch (1960 apud FOPPA, 2005), em que o autor utilizou uma areia fina misturada com argila pulverizada e teores de cimento de 5,3%, 11,1% e 17,7%, submetendo as amostras aos ensaios de compressão simples e de flexão em vigotas, moldadas em diferentes teores de umidade e massas específicas aparente secas. A relação entre o índice de vazios e teor volumétrico de cimento proposto por Lanarch (1960 apud FOPPA, 2005) é equivalente ao índice porosidade/teor volumétrico de agente cimentante estabelecido por Consoli et al. (2007), conforme a Equação (2.5).

$$\frac{V_v(\text{volume de vazios})}{V_{ci}(\text{volume absoluto de cimento})} = \frac{\frac{V_v}{V_{total}}}{\frac{V_{ci}}{V_{total}}} = \frac{\eta}{C_{iv}} \quad (2.5)$$

A relação entre os resultados de resistência à compressão simples e o volume de vazios/cimento ( $V_v/V_{ci}$ ) proposta por Lanarch (1960 apud FOPPA, 2005) é apresentada na Figura 2.5.

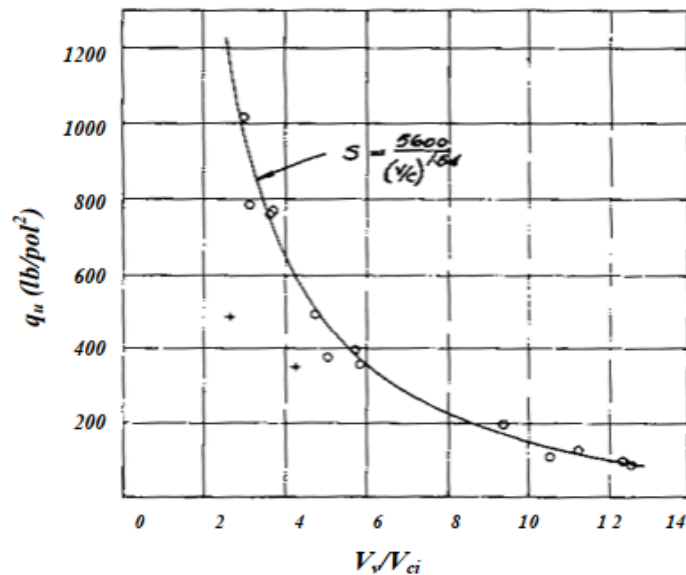


Figura 2.5: Relação entre a resistência à compressão simples e o volume de vazios/cimento. (LANARCH apud FOPPA, 2005)

O método de dosagem proposto por Consoli et al. (2007) baseou-se em ensaios de resistência à compressão simples para o solo de formação residual arenito Botucatu, estabilizado com teores de 1% até 12% de cimento Portland, conforme ilustra a

Figura 2.6. Esta metodologia consiste na obtenção da curva porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/C_{iv}$ ) em relação a resistência à compressão simples, denominada curva de dosagem. A partir desta curva, é possível definir qual a resistência pretendida conforme solicitações de projeto, e então pode-se obter qual o teor volumétrico de cimento e porosidade necessárias para atingir a resistência alvo.

Além disto, Foppa (2005) e Consoli et al. (2007) demonstraram a existência de uma relação do tipo potência entre a resistência à compressão simples e a relação ajustada entre a porosidade/teor volumétrico de cimento ( $(\eta/C_{iv})^k$ ), de acordo com a Equação (2.6) e a Figura 2.6. neste contexto, o expoente  $k$  é o ajuste feito para compatibilizar os efeitos da porosidade e do teor de

cimento sobre a variável resposta, sendo que, se o efeito da porosidade for maior que o do teor de cimento, o valor de  $k$  será inferior a 1, caso contrário,  $k$  será superior a 1. Caso o efeito entre os dois parâmetros for igual, consequentemente  $k$  será igual a 1. Na Equação (2.6) proposta,  $A$  é um escalar e  $B$  é o expoente de ajuste polinomial.

$$q_u = A \left[ \frac{\eta}{(C_{iv})^k} \right]^{-B} \quad (2.6)$$

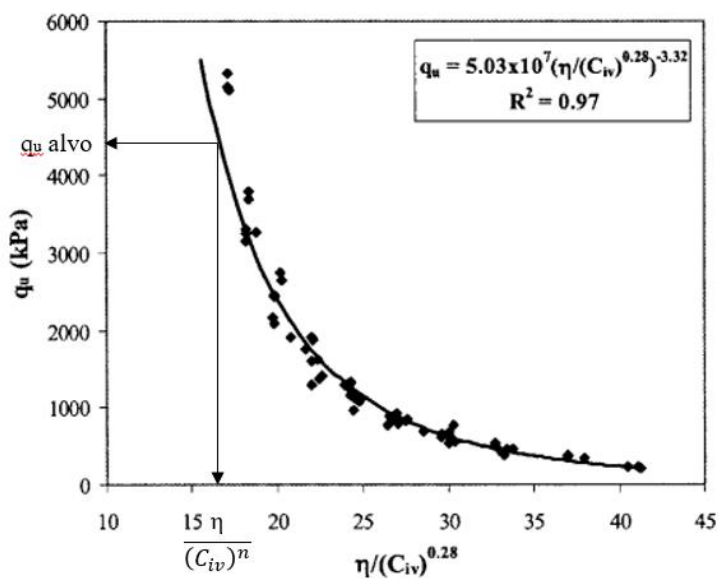


Figura 2.6: Curva de dosagem  $\eta/C_{iv}$  estabelecida para o solo residual Arenito Botucatu  
(adaptado de CONSOLI et al., 2007)

Com o objetivo de complementar a metodologia, posteriormente Consoli et al. (2017) estabeleceram uma normalização dos resultados resistência para solos granulares. Os autores utilizaram quatro distintos solos granulares para validar o modelo, totalizando 714 amostras, com informações de compressão e tração da areia de Osório (mesmo material utilizado nesta pesquisa) estabilizadas com cimento CP V para 3, 7 e 28 dias de cura (CONSOLI et al., 2013; MARQUES, 2016), compressão simples da areia de Osório com cimentos CP II e CP IV, com tempos de cura de 2, 7 e 28 dias (CONSOLI et al., 2013), compressão e tração de um solo arenoso basáltico, arenoso granítico e areia fina obtida como resíduo do polimento de ágata, cimentados com cimento CP V e 7 dias de cura (FLOSS, 2012). Na Figura 2.7 encontra-se o resultado desta metodologia de normalização dos resultados. Cabe destacar, ainda no estudo de Consoli et al. (2017), que os autores relacionaram a curva de dosagem  $\eta/C_{iv}$  para trabalhos

clássicos encontrados na literatura, como a mistura de areia carbonatada da Austrália tratada com *Gypsum Cement*, com um tempo de cura de 7 dias (HUANG e AIREY, 1998), e compressão simples de uma areia de Monterey (EUA) misturada com CP III e curada durante 14 dias (CLOUGH, SITAR e BACHUS, 1981).

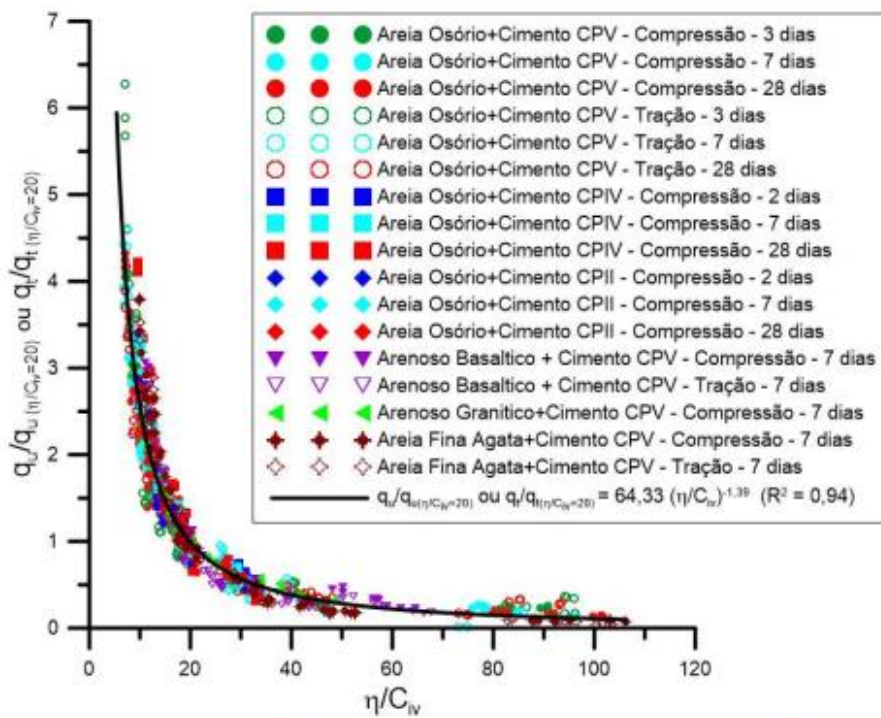


Figura 2.7 – Normalização da resistência à compressão simples e resistência à tração para solos granulares, com cimentos e tempos de cura distintos

(CONSOLI et al., 2017)

A utilização de materiais tradicionais para melhoramento de solos de baixa capacidade é mundialmente difundida, entretanto, sabe-se que o processo produtivo para a obtenção do cimento Portland e da cal hidratada demandam um alto consumo energético, exploração de recursos ambientais e a emissão de gases de efeito estufa. Desta maneira, a busca entre o emprego de resíduos, que apresentam características potenciais, vem sendo estudada no que diz respeito ao melhoramento de solos. Consoli et al. (2018) verificaram a incorporação de pó de vidro como material pozolânico e a cal de carbureto, também em solos granulares. Quando o pó de vidro é adicionado a um meio com  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , esta mistura se torna um material cimentante com bastante eficiência gerando ganhos de resistência, rigidez e durabilidade ao material



(WINTER, 2018). Com o objetivo de relacionar, através de um único índice, os efeitos combinados da porosidade, do teor de cal e do teor de pozolana, no comportamento mecânico de solos, o índice foi ajustado para  $\eta/B_{iv}$ , onde o denominador refere-se a interação entre o pó de vidro e a cal de carbureto, conforme a Equação (2.7). Os resultados obtidos neste estudo encontram-se na Figura 2.8, onde os autores obtiveram o expoente 0,28 sendo compatível com estudos prévios utilizando cimento Portland.

$$B_{iv} = \frac{V_{pv} + V_{cc}}{V} = \frac{\frac{m_{pv}}{\gamma_{pv}} + \frac{m_{cc}}{\gamma_{cc}}}{V} \quad (2.7)$$

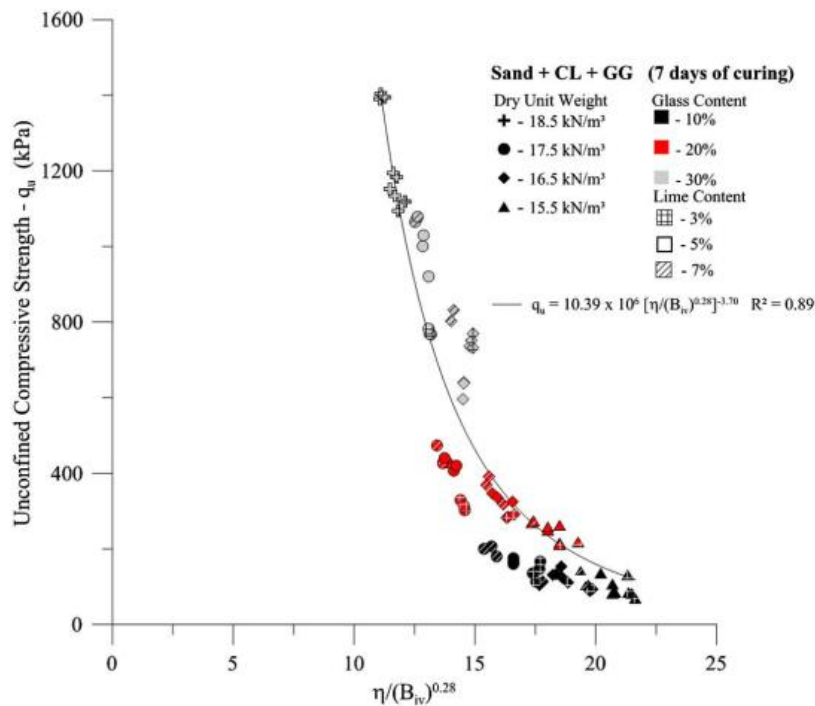


Figura 2.8: Resistência à compressão simples para a mistura de Areia de Osório, pó de vidro e cal de carbureto em função do índice  $\eta/B_{iv}$ .

(CONSOLI et al., 2018)

Demais pesquisas mostraram que, além da resistência à compressão simples, a relação  $\eta/(C_{iv})$  demonstrou eficácia para a rigidez inicial, a durabilidade em termos de perda de massa acumulada (Consoli; Tomasi, 2018) e o parâmetro de estado (Leon, 2018). Entretanto, Scheuermann Filho (2019) salienta que a relação porosidade/teor volumétrico de ligante vem sendo aplicada em solos cuja quantidade da fração argilosa não supera a marca de 5%. O que

pode-se entender é que solos desta natureza são inertes às reações, já que a parcela de argilominerais é inexpressiva, sendo o esperado é de que a cal reaja exclusivamente com a pozolana adicionada. Desta forma, ao estudar um solo dispersivo do Baixo Chaco Paraguai, com teor de argila equivalente a 30%, incorporando como agente estabilizante a cal de carbureto e pó de vidro (pozolana), Scheuermann Filho (2019) concluiu que o índice  $\eta/(B_{iv})^k$  para as amostras submetidas a compressão simples pode ser considerado apenas regular, conforme os coeficientes de determinação obtidos, supondo-se que houve reações entre a cal adicionada e os argilominerais do solo, afetando o índice  $\eta/(B_{iv})^k$ .

#### 2.4.4 Estabilização de solos com cimentos álcali ativados

Os estudos sobre cimentos álcali ativados, conforme descrito no item 2.3, estiveram focados na fonte de materiais precursores amplamente caracterizados, como a cinza volante e o metacaulim, bem como as propriedades em termos de desempenho mecânico e a potencial substituto para o cimento Portland. Desta forma, a estabilização química de solos através de cimentos álcali ativados é considerado uma técnica muito recente. Apesar do emprego da cal, como fonte ativadora alcalina em materiais com potencial atividade pozolanica, ser uma técnica amplamente difundida na estabilização de solos, a cal não é um agente fortemente alcalino quando comparado aos hidróxidos, silicatos e aluminatos alcalinos, usualmente empregados na produção de cimentos álcali ativados.

Recentemente, alguns autores (Cristelo, Glendinning; Pinto, 2011; Cristelo et al., 2012; Zhang et al., 2013; Phummiphan et al., 2016b; Rios et al., 2017; Alsafi et al., 2017; Rios et al., 2018; Arulrajah et al., 2018; Miranda et al., 2020) publicaram suas pesquisas sobre o assunto, relatando a estabilização de diversos tipos de solos com diferentes materiais precursores ativados alcalinamente, resultando na formação de géis cimentantes geopoliméricos. Entretanto, estes estudos utilizam a cinza volante, escórias de alto forno e metacaulim como materiais precursores e, hidróxidos e silicatos alcalinos como ativadores alcalinos.

Cristelo, Glendinning; Pinto (2011), a partir de cinzas volantes classe F estabilizou um solo areno-argiloso de baixa plasticidade, através de soluções alcalinas de NaOH e Na<sub>2</sub>OSiO<sub>3</sub>.

Através do ensaio de compressão simples, os autores obtiveram resistências de quase 45 MPa aos 365 dias de cura, para a mistura de 40% de cinza volante. Posteriormente, esta dosagem foi aplicada em campo com a técnica de *Jet Grouting*. Com as amostras das colunas executadas, o ensaio de resistência aos 3 meses foi maior para a coluna com cimento álcali ativado do que as colunas com cimento.

Zhang et al. (2013) utilizaram o metacaulim e a solução alcalina de NaOH e Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> para estabilizar um solo mole de baixa capacidade de suporte, em que a incorporação do geopolímero apresentou melhor desempenho mecânico ao teor de 15%, do que o solo não estabilizado e estabilizado com cimento Portland CP II. Rios et al. (2017) demonstraram a estabilização de um silte arenoso para aplicação como camada de sub-base para a pavimentação. As misturas analisadas no estudo abrangeram a utilização de cal, cal e cloreto de sódio, cinza volante e cal (com e sem cloreto de sódio), cinza volante ativada alcalinamente com NaOH e Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> e cal (com e sem cloreto de sódio) e também com cimento Portland tipo CEM I-42.5R juntamente com o RoadCem, um aditivo comercial para estabilização de solos destinados para pavimentos. Os autores avaliaram o comportamento quanto a resistência à compressão simples, compressão triaxial e pulso ultrassônico para diferentes tempos de cura. Ao compararem com as especificações Portuguesa e Francesa para pavimentos (JAE, 1995 e GTS, 2000), fica claro que a mistura de somente solo e cal não atingem os valores de resistência à compressão estabelecidos, enquanto a de solo – cinza volante – cal encontra-se ligeiramente acima do limite inferior da norma, de 3MPa. A melhor performance foi utilizando a cinza volante álcali ativada e a cal, correspondendo a aproximadamente 5 MPa aos 7 dias de cura e 9 MPa aos 28 dias, em contrapartida ao 1 MPa obtido com o cimento Portland e o RoadCem.

Dentre as referências bibliográficas consultadas, cabe destacar a execução de uma camada de sub-base, em escala real, através da aplicação de álcali ativação na estabilização do solo. O estudo dirigido por Miranda et al. (2020) descreve a construção de 80 metros de camada estabilizada com 5 diferentes materiais, 3 deles sendo por cimento álcali ativado, e os outros 2, baseados no cimento Portland e cal. A combinação de cinza volante, NaOH e Na<sub>2</sub>SiO<sub>2</sub> foi utilizada em 2 dos 3 cimentos álcali ativados, enquanto o terceiro foi preparado com uma solução alcalina reciclada, originalmente utilizada para extrusão de alumínio. O desempenho foi monitorado pelos ensaios de campo com o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e carregamento de placa, bem como em laboratório pela compressão não confinada com as

amostras coletadas do campo. Aos 36 e 90 dias de cura, as melhores performances em relação à deformabilidade, foram os segmentos executados com cinza volante, NaOH e Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, com valores de duas a três vezes maiores que o segmento executado com cimento Portland. O ensaio de compressão simples em laboratório demonstrou que aos 36 dias, a mistura com cimento Portland resultou no melhor desempenho mecânico, em seguida das misturas com cinza volante álcali ativadas. Entretanto, aos 90 dias, o ganho de resistência para a mistura com cimento manteve-se praticamente constante, o que certamente ocorreu porque a hidratação do cimento ocorre durante os primeiros 28 dias. Já para as misturas com cinza volante, o ganho de resistência foi de até 123%, corroborando o dobro de resistência em relação à mistura com cimento. Ainda neste estudo, os autores relataram as dificuldades em manter as variáveis, como o teor de umidade, na execução dos segmentos, bem como uma comparação dos materiais em termos de emissão de CO<sub>2</sub> e custo de construção por metro cúbico.

#### 2.4.5 Comportamento de camadas cimentadas em pavimentos

O pavimento pode ser definido como uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, composto por materiais de naturezas diversas, os quais apresentam propriedades e comportamento diferentes. Estas camadas, conferem ao pavimento a função estrutural de suportar as cargas referentes a ação do tráfego e as condições climáticas (BERNUCCI et al., 2006).

Neste cenário, visto que as bases de pavimentos têm como função principal a distribuição dos esforços verticais e horizontais que são aplicados na superfície, a capacidade do material em melhor distribuir estes esforços está fortemente associado com as propriedades mecânicas. Usualmente, estas camadas são constituídas com materiais granulares ditos “nobres”, ou seja, conforme suas propriedades *in situ* são considerados apropriados para o emprego. Entretanto, é muito comum que os materiais disponíveis nas proximidades das rodovias não apresentem capacidade de suporte para tal aplicabilidade, necessitando algum tipo de estabilização, como por exemplo aditivos químicos para melhorar as propriedades mecânicas

A primeira execução brasileira em estradas com camadas cimentadas, é datada em 1942 através de trechos experimentais na pista do aeroporto de Petrolina e na estrada e Caxambu, sendo impostas ao tráfego por quinze anos e apresentando comportamento satisfatório (MACHADO, 1978 apud SPECHT, 2000). No Rio Grande do Sul, Núñez (1991) relata que a construção de pavimentos com camadas estabilizadas deu-se nos anos 50, através de 29 km na BR 116 entre Porto Alegre e São Leopoldo.

No que diz respeito ao dimensionamento de pavimentos, Huang (2004) relata que os métodos vigentes ainda tem forte influência do empirismo, os quais baseiam-se em experiência e observações relatadas nas pistas experimentais da *American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO* durante a década de 50, construídas a partir de certos tipos de materiais e para condições específicas de clima. Estas condições, de fato, não serão as mesmas das regiões a qual os demais projetos serão executados, desta forma, não representam uma confiabilidade de emprego se não para aquelas condições em que foram desenvolvidos (LEKARP; ISACSSON; DAWSON, 2000). A busca por métodos que considerem um entendimento racional, é o alvo dentre os engenheiros voltados para a área de mecânica dos pavimentos, já que o comportamento mecânico de um pavimento deve ser analisado em função da aplicação das cargas do tráfego e a resposta, em termos de tensões e deformações das camadas constituintes.

Ao analisar uma seção típica de pavimento, Elliott; Thornton (1988) descrevem que há aumento da tensão acompanhado do desenvolvimento de deformações durante a passagem de um veículo, e ao diminuir o carregamento, há uma redução da tensão e, conseqüentemente da deformação. Entretanto, nem toda a deformação imposta é recuperável, sendo então esta parcela denominada de deformação permanente, ou plástica, e a parcela recuperável de resiliente. Este comportamento pode ser observado na Figura 2.9.

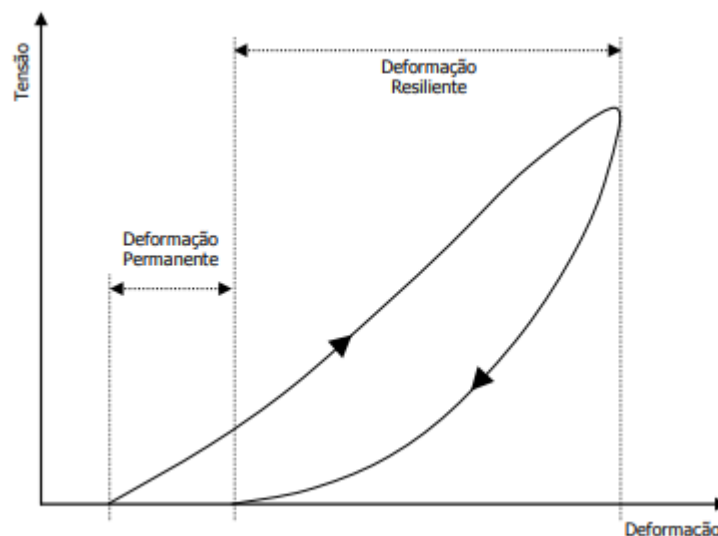


Figura 2.9: Comportamento de materiais sujeitos a um ciclo de carregamento.  
(LEKARP; ISACSSON; DAWSON, 2000)

O termo resiliência foi utilizado para referir-se às características dos pavimentos pela primeira vez por Hveem (1955, apud MEDINA; MOTTA, 2005), ao relacionar as deformações resilientes com o trincamento por fadiga dos revestimentos asfálticos. Devido a grande magnitude destas deformações, quando comparadas com as desenvolvidas em outros materiais, foi designado como deformação resiliente ao invés de elástica. Como as cargas atuantes no pavimento atuam de maneira repetida, em ciclos de carga e descarga, o módulo de resiliência trata-se de um parâmetro que determina a capacidade de resistir às deformações permanentes.

Desde a incorporação deste novo conceito, a partir de 1986 a AASHTO utiliza o módulo de resiliência como uma propriedade fundamental no dimensionamento de pavimentos, sendo uma forma de avaliação da qualidade dos materiais destinados a pavimentação.

Em pavimentos com bases cimentadas, além do módulo de resiliência, os métodos de dimensionamentos baseados em relação mecanísticas-empíricas abordam outros critérios para entender o comportamento de materiais cimentados. Desta forma, outros ensaios também se tornam relevantes. Theyse; De Beer; Rust (1996) abordam que os materiais cimentados apresentam dois modos distintos de falhas: por fadiga e por esmagamento da camada. A

degradação por fadiga está associada aos valores da tensão de tração máxima nas fibras inferiores da camada cimentada. Já o esmagamento está associado com a tensão vertical no topo da camada, onde a resistência à compressão é adotada como um limitante. De acordo com De Beer; Maina; Netterberg (2012), o esmagamento da camada cimentada ocorre quando a resistência à compressão é inferior ao carregamento imposto pelo tráfego, porém este estágio de degradação pelo esmagamento só acontecerá após o carregamento exceder a vida efetiva de fadiga. Desta forma, a deterioração por fadiga ocorrerá antes do processo final de esmagamento.

Neste sentido, o Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos da República Sul Africana (*South African Pavement Engineering Method -SAPEM*), utiliza o critério de fadiga como limitante e crítico para o pavimento, mas concomitantemente faz uso do critério de esmagamento, o que leva a necessidade de limitar a magnitude das tensões verticais na camada a um percentual da resistência à compressão. Ou ainda, caso seja evidenciado como potencial problema a camada, o material utilizado deverá ser de maior qualidade (THEYSE; DE BEER; RUST, 1996).

O ensaio de resistência à compressão simples também está sugerido no guia da AASHTO, em que a qualidade dos materiais é indicada por seus coeficientes da camada estrutural ( $a_i$ ), onde a resistência à compressão simples de camadas cimentadas aos 7 dias de cura, está relacionada a este coeficiente, com valores que variam de 200 psi (1,38 MPa) a 1000 psi (6,89 MPa). Este guia também apresenta um procedimento para avaliar o módulo de resiliência com as variações sazonais e a quantia de água presente no pavimento, durante as estações do ano.

A partir disto, pode-se entender que o módulo de resiliência não é um valor fixo, mas sim afetado por fatores como duração e frequência do carregamento, teor de umidade e compactação da moldagem, teor de finos e tipo de agregado (ELLIOTT; THORNTON, 1988). Além destes, o estado de tensões também influencia no comportamento resiliente, sendo então o comportamento mecânico das camadas de pavimentos considerados como não linear elástico (LITTLE, 1999).

Como já descrito, a adição de agentes químicos na estabilização de solos proporciona significantes melhorias nas propriedades mecânicas e físicas. Ao passo que o ganho de resistência é crescente, em função das reações pozolânicas do sistema, a rigidez do material

também é afetada. Desta forma, Little (1999) salienta que a estabilização química influencia no módulo de resiliência, pois com o aumento da resistência, misturas de solo-cal tornam-se mais resistentes às deformações permanentes, assim a rigidez é de 10 a 25 vezes maior, do que o solo natural.

Solanki; Zaman; Dean (2010) estabilizaram quatro solos argilosos através da incorporação de aditivo tradicional, a cal hidratada, e de subprodutos industriais, a cinza volante classe C e um pó oriundo da produção do cimento. Conforme o solo utilizado, a incorporação de cal apresentou ganhos máximos para teores entre 3% e 6%, porém a tendência de aumento do módulo de resiliência com o teor de aditivo não se manteve, mostrando que há um teor ótimo de dosagem. A incorporação de cinza volante também mostrou-se muito eficaz, elevando o módulo de resiliência de 80 MPa, quando natural para até 1,1 GPa com a adição de 15% da cinza. Já ao utilizarem o pó da produção de cimento, este foi o que proporcionou maiores ganhos, elevando o módulo para até 2,5 GPa.

O efeito do teor de umidade no comportamento resiliente foi estudado por Puppala; Mohammad; Allen (1996), onde os autores estabilizaram uma argila siltosa visando o emprego em camadas de sub-base, através da adição de 4% cal em diversos teores de umidade de moldagem. Quando compactados em teores de umidade que compreendem o ramo seco e próximo ao teor ótimo, os valores de módulo resiliente são relativamente maiores, a uma certa tensão confinante, relatando o ganho no MR de 20% a 50%. Quando utilizado o ramo úmido, os valores encontrados não superaram aos demais. Indo de encontro a este resultado, Shafee Yusuf; Little; Sarkar (2001) também observaram este comportamento, sendo que para o solo estudado sem a adição de cal houve uma redução de 373MPa para 55MPa. Desta forma, entende-se a importância de relacionar este parâmetro com o grau de saturação, pois utilizar somente o módulo referente à compactação no ramo no seco não seria aconselhável, visto que a umidade de compactação em campo é difícil de assegurar.



### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo encontra-se o planejamento experimental adotado nesta pesquisa, abordando os aspectos relevantes para atingir os objetivos propostos. Ainda, é feita a descrição das variáveis investigadas, dos materiais utilizados, bem como especificações sobre os ensaios que serão realizados e as normas vigentes de cada.

#### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados nesta pesquisa se categorizam no solo a ser estabilizado, nos materiais precursores e no ativador alcalino, os quais darão origem a um sistema álcali ativado.

##### 3.1.1 Areia de Osório

O solo utilizado nesta pesquisa é um material granular, proveniente do município de Osório/RS, caracterizada como uma areia fina quartzosa, de granulometria uniforme e ausente de matéria orgânica. Este solo é encontrado ao longo da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, desde o município de Torres ao do Chuí, sendo característico dos depósitos eólicos do sistema lagunar Barreira III, sendo possível correlacionar com os depósitos arenosos marinhos localizados em outras partes do litoral brasileiro e em muitas regiões costeiras (TOMAZELLI e VILLWOCK, 2000).

Este solo vem sendo amplamente investigado dentre o grupo de pesquisadores do Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental – LEGG, sendo artificialmente cimentada com diversos materiais e avaliada em diferentes ensaios (CRUZ, 2008; FESTUGATO, 2008; SILVANI, 2013, 2017; MARQUES, 2016; LEON, 2018; WINTER, 2018).

A análise granulométrica foi realizada por peneiramento e sedimentação, conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016) e a curva de distribuição granulométrica encontra-se na Figura 3.1.

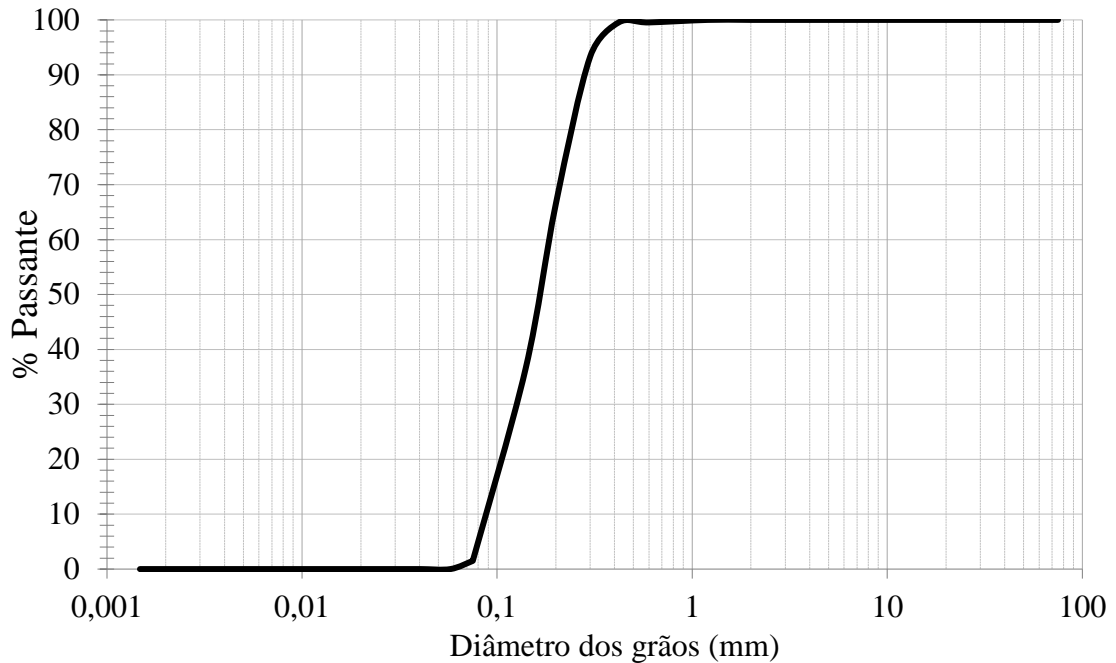


Figura 3.1: Curva granulométrica da Areia de Osório

Na Figura 3.2 é apresentada a microscopia eletrônica de varredura, identificando os grãos pouco arredondados e de tamanho uniforme. Os índices físicos, a classificação de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS e o Sistema Rodoviário de Classificação – HRB, e as respectivas normas de referência estão apresentados na Tabela 3.1.

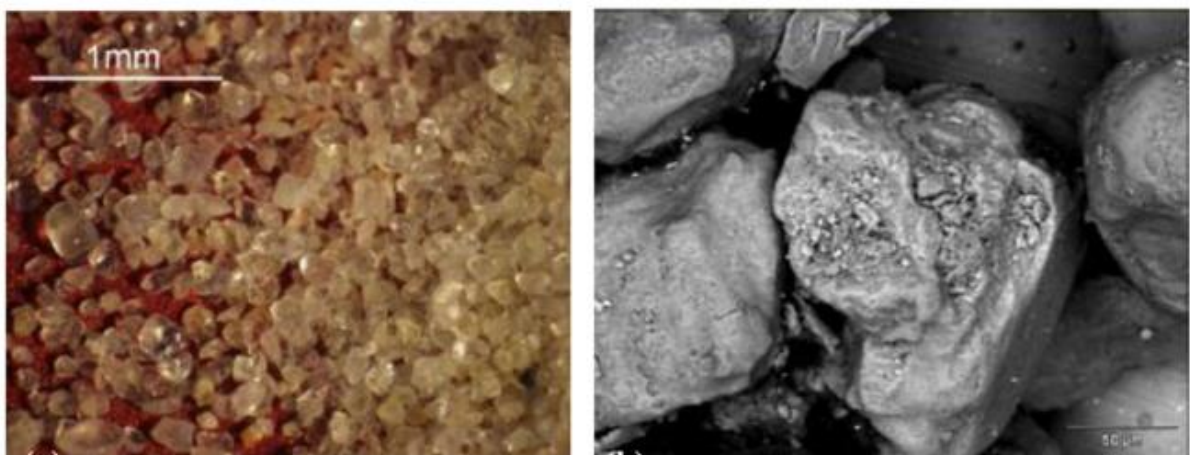


Figura 3.2: Microscopia eletrônica de varredura da Areia de Osório, ampliada 40 vezes (esquerda) e ampliada 500 vezes (direita)

(DALLA ROSA, 2009)

Tabela 3.1 – Características físicas da Areia de Osório

Característica	Resultado	Norma
Índice de Plasticidade	NP	NBR 7180/2016
Peso Específico rela dos grãos (Gs)	2,63	NBR 6458/2016
% Pedregulho ( $d > 2$ mm)	0%	
% de Areia Grossa ( $0,6 < d < 2$ mm)	0%	
% de Areia Média ( $0,2 < d < 0,6$ mm)	33,40%	NBR 7181/2016
% de Areia Fina ( $0,06 < d < 0,2$ mm)	65,50%	
% de Silte ( $0,002 < d < 0,06$ mm)	1,10%	
% de Argila ( $d < 0,002$ )	0,00%	
Coefficiente de Uniformidade (Cu)	2,1	
Coefficiente de Curvatura (Cc)	0,99	NBR 6502/1995
Diâmetro efetivo (D10)	0,09 mm	
Diâmetro médio (D50)	0,17 mm	
SUCS	SP	ASTM D2487/1983
HRB	A3	AASHTO, 1973

### 3.1.2 Resíduo Cerâmico

O resíduo cerâmico utilizado é proveniente de uma empresa localizada na zona norte de Porto Alegre, a mesma comercializa o resíduo cerâmico de telhas de barro e tijolos, na forma de pó, com a finalidade de emprego em quadras de tênis. A empresa beneficia o material com a passagem por um moinho de martelos, e comercializa os sacos com 40 kg (Figura 3.3). Na sequência, nas dependências do LEGG, o material foi seco e posto no moinho de bolas afim de obter-se maior quantidade de material fino, passante na peneira de abertura de 0,075mm (mesh #200) para homogeneizar o tamanho máximo das partículas deste resíduo.



Figura 3.3: Processamento no moinho de martelos (esquerda), estocagem no material na empresa Graniplast (direita).

Para a caracterização do material realizou-se o ensaio de massa específica real dos grãos. As demais características foram fornecidas por Caicedo (2020) que fez uso do mesmo resíduo. Na Figura 3.4 encontra-se a distribuição granulométrica e na Tabela 3.2 é apresentado o resumo dos índices físicos do resíduo cerâmico.

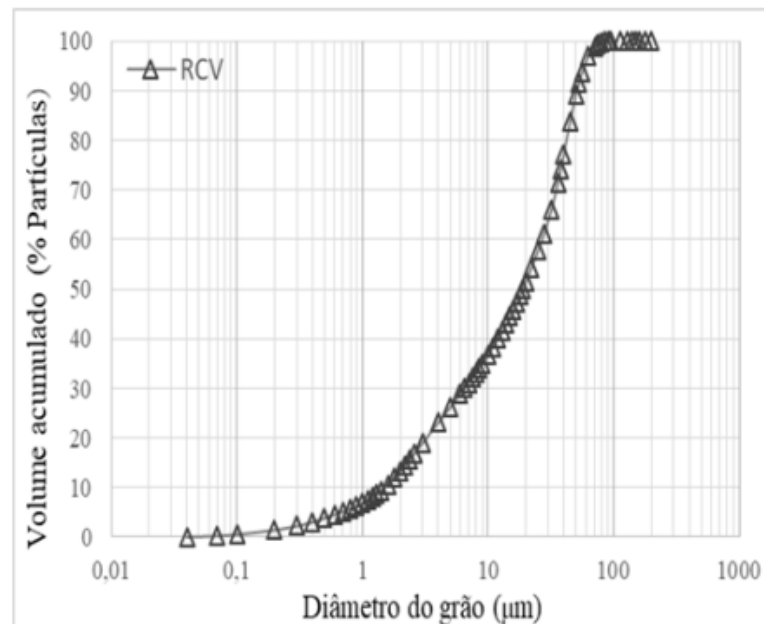


Figura 3.4: Curva granulométrica do resíduo cerâmico (CAICEDO, 2020)

Tabela 3.2 – Propriedades físicas do resíduo cerâmico

Característica	Resultado	Norma
Peso Específico real dos grãos (Gs)	2,55 g/cm <sup>3</sup>	NBR 6508/2016
Diâmetro efetivo (D10) <sup>1</sup>	1,5 mm	granulometria a laser/
Diâmetro médio (D50) <sup>1</sup>	23,15 mm	NBR 6502/1995
Área de Superfície Específica <sup>1</sup>	19,33 m <sup>2</sup> /g	BET

<sup>1</sup> Fonte: Caicedo (2020)

A composição química elementar foi obtida através do ensaio de fluorescência de raio X (FRX), apresentado na Tabela 3.3. Pode-se perceber a presença de elementos predominantes de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Tabela 3.3 – Composição química elementar do resíduo de cerâmica determinado por FRX

Elemento	Presente Pesquisa	Caicedo (2020)
SiO <sub>2</sub>	65,00	73,91
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,50	15,85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,62	5,15
SO <sub>3</sub>	0,37	-
MgO	0,50	1,03
K <sub>2</sub> O	0,81	2,02
CaO	0,43	0,02
Na <sub>2</sub> O	0,24	0,42
TiO <sub>2</sub>	1,42	1,27
MnO	0,06	0,05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,11	0,08
LOI <sup>1</sup>	2,75	0,64

<sup>1</sup> LOI: *Loss on Ignition* (Perda ao fogo – 1000°C)

Quanto ao ensaio de difratometria de raio -X (DRX) (Figura 3.5), pode-se observar os picos de refração de maior intensidade na posição angular entre 2θ 20° a 35°, identificado como o mineral de Quartzo (SiO<sub>2</sub>) que corresponde a principal fase cristalina do resíduo cerâmico. Além deste mineral, foi identificado a presença de Hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e de pequenas fases de Cristobalita (SiO<sub>2</sub>), uma das fases da sílica e composto pelos mesmos elementos do Quartzo, entretanto tem uma estrutura cristalina diferente, o que o torna um mineral separado.

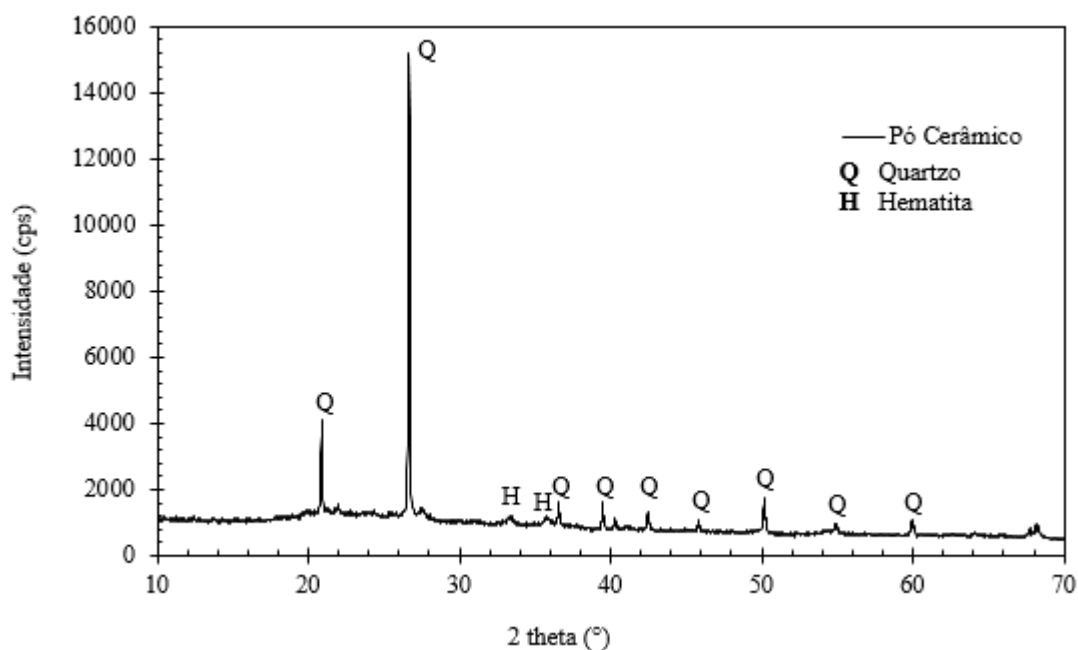


Figura 3.5: Difratoograma de raio-X do resíduo cerâmico

### 3.1.3 Cal de Carbureto

A cal de carbureto utilizada é um resíduo da produção de gás acetileno, proveniente da White Martins Gases Industriais S.A., localizada no município de Sapucaia do Sul, região metropolitana de Porto Alegre – RS. Após seco, o material é destorroado e passado na peneira de malha de abertura 0,075mm (mesh #200), para controlar o diâmetro máximo dos grãos deste resíduo. Deve-se tomar o cuidado de acondicionar o material em embalagens de modo a evitar a reação do óxido de cálcio com o dióxido de carbono presente no ar, que levaria a carbonatação do material (formação de  $\text{CaCO}_3$ ).

A distribuição granulométrica da cal de carbureto é apresentada na Figura 3.6, bem como as propriedades físicas encontra-se na

Tabela 3.4, cabe o destaque para o valor encontrado por Saldanha et al. (2018) para a o ensaio de área de superfície específica, o que pode ser um indicativo de grande reatividade do material.

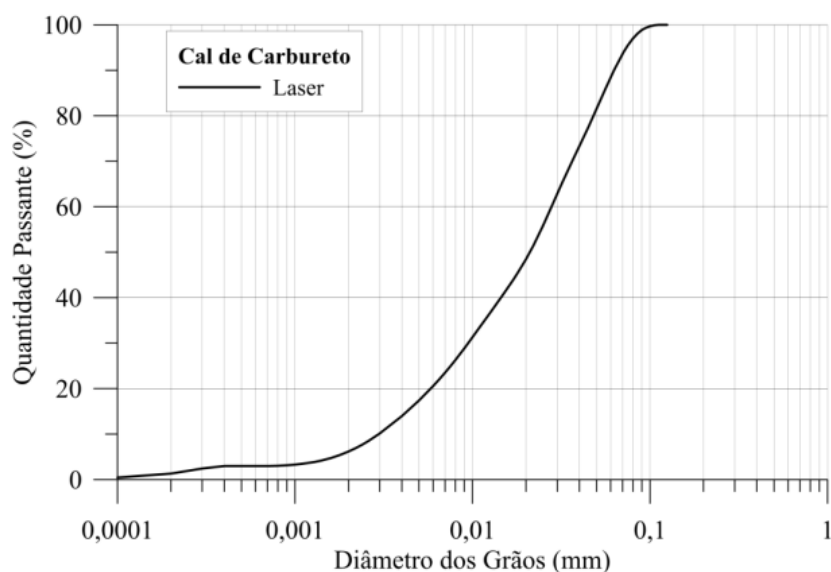


Figura 3.6: Distribuição granulométrica da cal de carbureto  
(SALDANHA et al., 2018)

Tabela 3.4 – Características físicas de cal de carbureto

Característica	Resultado	Norma
Peso Específico real dos grãos (Gs)	2,16 g/cm <sup>3</sup>	NBR NM23/2001
Área de Superfície Específica <sup>1</sup>	22,60 m <sup>2</sup> /g	BET
pH <sup>1</sup>	12,4	ASTM D4972/2013

<sup>1</sup>Fonte: Saldanha et al.(2018)

A composição química elementar foi obtida através do ensaio de fluorescência de raio X (FRX), apresentado na Tabela 3.5. Pode-se perceber a presença de elementos predominantes de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Através da análise de DRX, conforme a Figura 3.7, é possível identificar a presença do mineral portlandita [Ca(OH)<sub>2</sub>], correspondente à fase cristalina do hidróxido de cálcio. Também é identificado a presença de calcita (CaCO<sub>3</sub>), a qual é oriunda da carbonatação do material. Na Figura 3.8 encontra-se a MEV, sendo possível identificar que a cal é constituída por partículas aglomeradas, de formato medianamente esférico e levemente angular.

Tabela 3.5 – Composição química da cal de carbureto

Elemento	Presente Pesquisa	Caicedo (2020)	Saldanha et al (2018)
SiO <sub>2</sub>	1,47	3,18	3,10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,35	1,99	0,46
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,13	0,98	0,26
SO <sub>3</sub>	0,40	-	-
MgO	0,20	0,56	0,72
K <sub>2</sub> O	nd <sup>2</sup>	nd <sup>2</sup>	nd <sup>2</sup>
CaO	72,00	69,62	74,00
Na <sub>2</sub> O	0,01	nd <sup>2</sup>	nd <sup>2</sup>
TiO <sub>2</sub>	0,04	0,08	nd <sup>2</sup>
MnO	nd <sup>2</sup>	0,01	nd <sup>2</sup>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0,01	0,01	nd <sup>2</sup>
LOI <sup>1</sup>	25,20	23,58	-

<sup>1</sup> LOI: *Loss on Ignition* (Perda ao fogo – 1000°C)

<sup>2</sup> nd: Não detectado

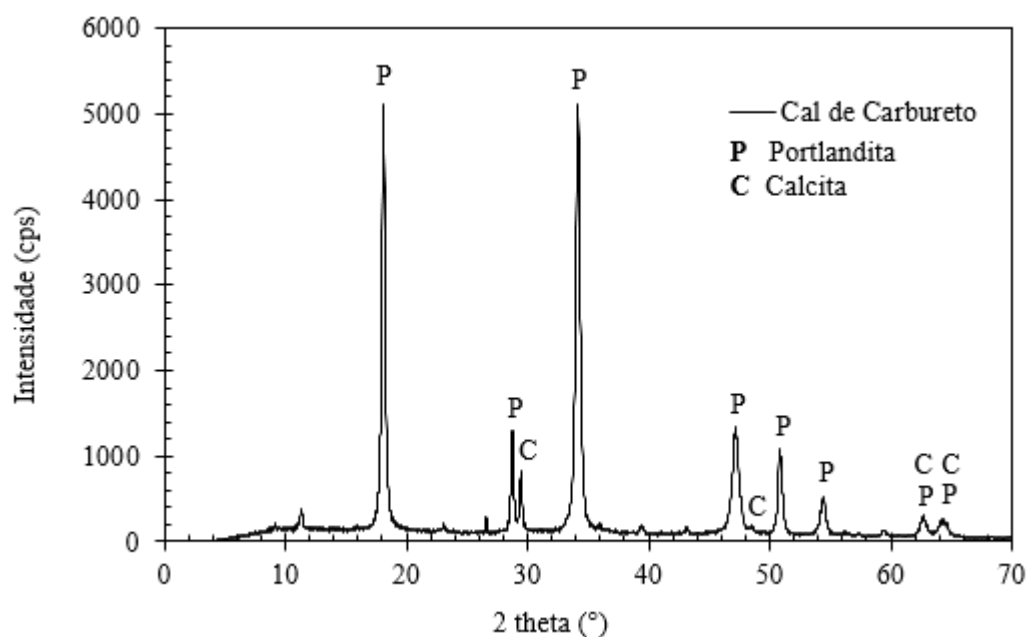


Figura 3.7: Difratograma de raio X da cal de carbureto



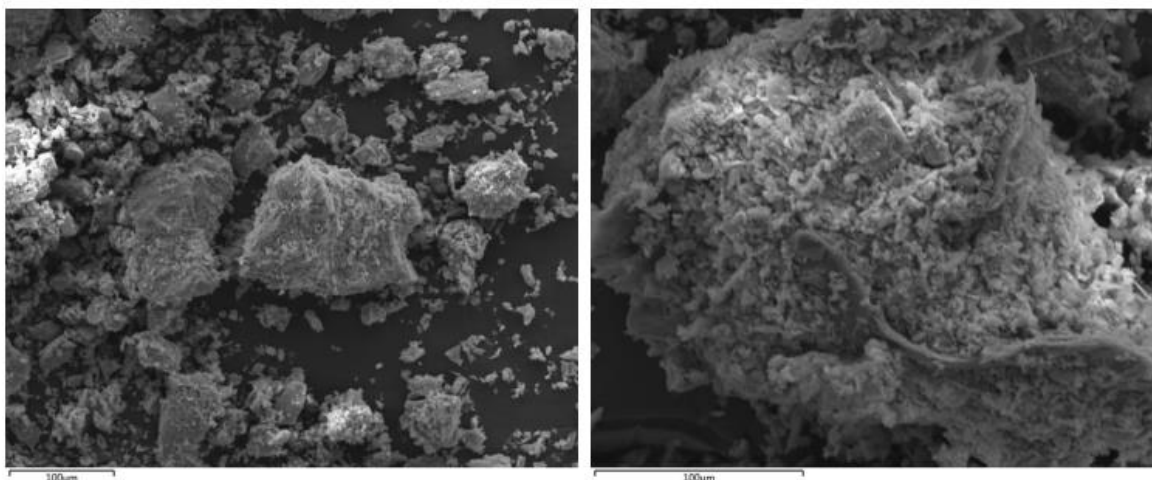


Figura 3.8: Microscopia eletrônica de varredura da cal de carbureto, ampliada 400x (esquerda) e ampliada 800x (direita).

(SCHEUERMANN FILHO, 2019)

#### 3.1.4 Hidróxido de Sódio

O hidróxido de sódio (NaOH) utilizado como ativador alcalino nesta pesquisa é fornecido em micropérolas de pureza analítica (P.A.) 98%, densidade de 2,13 g/cm<sup>3</sup>, e sua composição é formada por 77,5% de Na<sub>2</sub>O e 22,5% de H<sub>2</sub>O, conforme as especificações do fabricante. As soluções foram preparadas mediante a solubilização de uma massa pré-definida de NaOH em água destilada.

### 3.2 MÉTODOS

Conforme a Tabela 3.6, o programa experimental adotado para esta pesquisa foi dividido em cinco fases. Na primeira fase realizou-se a coleta, beneficiamento e a preparação das amostras para os ensaios de caracterização, onde é possível determinar as características físicas e químicas do resíduo cerâmico, da cal de carbureto e da Areia de Osório.

Na segunda fase, determinou-se as curvas de compactação e a definição dos níveis das variáveis controláveis, baseado em projetos de experimentos 2<sup>k</sup>, o qual inclui dois níveis (alto e baixo) para a análise da porosidade das misturas, teor de agente cimentante, umidade de moldagem e tempo de cura.

A terceira fase constitui a execução dos ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral, através da moldagem de corpos de prova, em triplicata, para as misturas estabelecidas. Nesta etapa, coletou-se amostras para a avaliação microestrutural de forma que seja possível compreender as modificações decorrentes da álcali ativação, e ainda caracterizar o possível gel formado. Também foi realizado o ensaio de pulso ultrassônico, para a avaliação do módulo cisalhante inicial.

Na quarta etapa foi realizado o ensaio de durabilidade por ciclos de molhagem, secagem e escovação, de forma que seja possível avaliar a perda de massa e variação volumétrica das amostras. A quinta etapa foi constituída dos ensaios de módulo de resiliência, para que seja possível caracterizar as misturas complementando o objetivo de aplicabilidade em pavimentação.

Tabela 3.6 – Fases e ensaios do programa experimental

Primeira Etapa	Preparação e caracterização dos materiais	Massa específica real dos grãos
		Análise Granulométrica
		Mineralogia (DRX)
		Composição Química (FRX)
Segunda Etapa	Definição dos teores de moldagem - Misturas de Areia de Osório, RC e CC	Compactação
		Resistência à compressão simples
Terceira Etapa	Ensaio de Resistência, rigidez e mineralógicos	Resistência à compressão simples
		Resistência à tração por compressão diametral
		Rigidez Inicial por pulso ultrassônico
		Análise mineralógica (DRX)
Quarta Etapa	Ensaio de durabilidade	Ciclos de molhagem e secagem
Quinta Etapa	Ensaio de Módulo de Resiliência	

A metodologia abordada nesta pesquisa, em primeiro momento, baseou-se no estudo preliminar de Caicedo (2020), onde o autor desenvolveu um cimento álcali ativado através de pastas de resíduo cerâmico, cal de carbureto e do hidróxido de sódio. Foram dosificados teores de 0,10 a 0,50, em peso, para a relação CC/(CC+RC) e a ativação alcalina das pastas em teores de álcalis de Na<sub>2</sub>O de 2,5% (2 mol), 4% (3 mol) e 5,5% (4 mol) em relação ao peso do PC + CC. As baixas concentrações da solução alcalina, foram definidas levando-se em consideração a quantidade de altos teores de cálcio presente na CC.

Quanto a execução das misturas, apresentaram um endurecimento inicial (*setting*) adequados nas primeiras 36 horas de cura, e logo após foram desmoldadas e acondicionadas até o sétimo dia de cura para a execução do ensaio de resistência à compressão simples. Os resultados obtidos por Caicedo (2020) encontram-se na Figura 3.9. Estes resultados evidenciam que as misturas preparadas com soluções alcalinas apresentam maior resistência em comparação as de controle (0 mol). Os maiores valores de resistência, em torno de 9,4 MPa, foram obtidos para as misturas com teor de CC de 30%, isto é, 30% corresponde a CC e 70 % corresponde ao RC, juntamente com o teor de álcalis de Na<sub>2</sub>O de 4% (3 mol), para 7 dias de cura em temperatura ambiente.

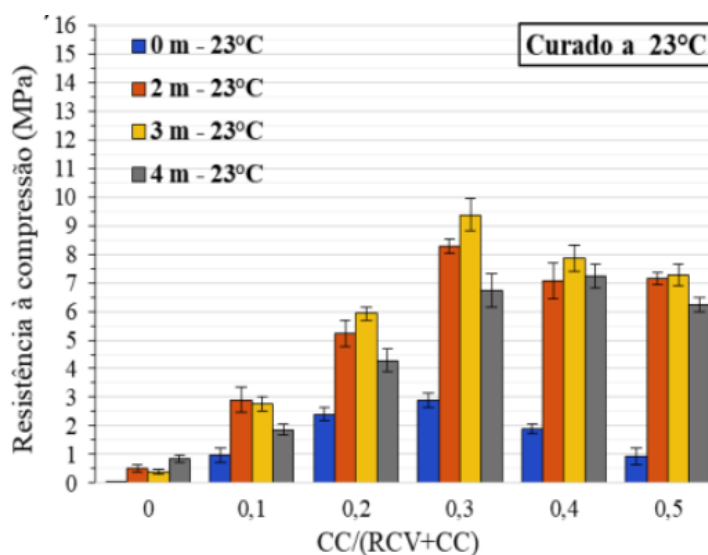


Figura 3.9: Resultado do ensaio de compressão simples para as misturas (CAICEDO, 2020)

Através do sistema álcali ativado com a dosagem ótima, foram determinados os estudos mineralógicos e microestrutural dos produtos de reação que se formaram. Desta forma, conforme a Figura 3.10, pode-se observar que as regiões mais escuras, identificadas pelo ponto A, correspondem às partículas de RC de maior tamanho e que não apresentaram reações iniciais com a dissolução dos aluminosilicatos, conforme as condições de cura. Já a região que corresponde ao ponto B, indica a formação dos principais produtos de reação formados no sistema álcali ativado, o gel C-S-H/C-A-S-H. Quando confrontadas as imagens, pode-se perceber a diferença na microestrutura em relação a utilização da solução alcalina, sendo que a Figura 3.10 (b), caracteriza-se por uma microestrutura mais homogênea e maior crescimento dos produtos de reação das misturas, o gel cimentante (ponto B), o qual tem grande influência na porosidade do material formado. Enquanto a Figura 3.10 (a) apresenta maiores partículas de RC sem reacionar e, conseqüentemente uma estrutura mais porosa.

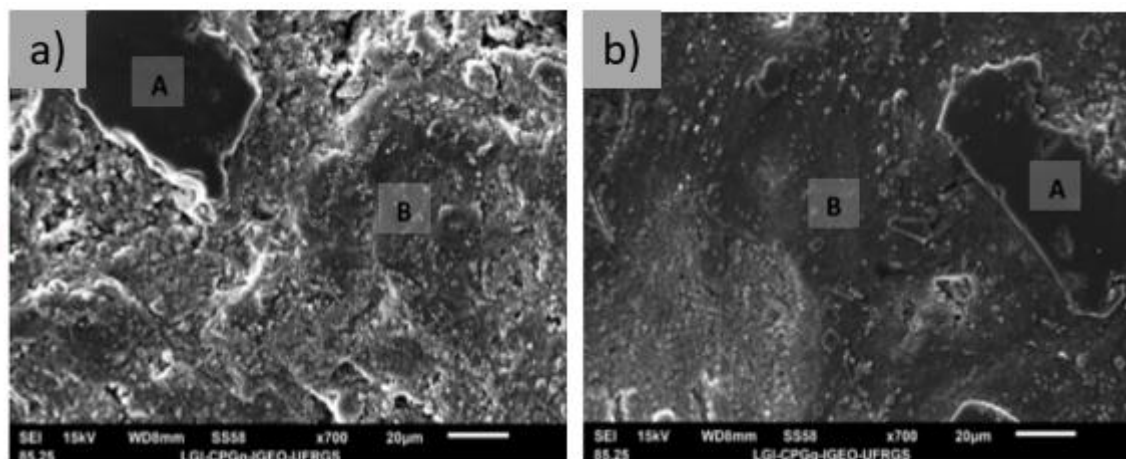


Figura 3.10: Microscopia eletrônica das amostras no teor ótimo, com: a) sem solução ativadora e b) com solução de teor de álcalis de  $\text{Na}_2\text{O}$  de 4% (3mol).

(CAICEDO, 2020)

### 3.2.1 Ensaios preliminares para a definição dos teores das misturas

Conforme evidenciado anteriormente, há uma forte influência dos teores estabelecidos entre a CC, RC e o teor de álcalis de  $\text{Na}_2\text{O}$  da solução ativadora. De forma a otimizar este novo material formado, a dosagem encontrada como ótima corresponde à 30% de CC, 70% de PC e 4% de

álcalis de  $\text{Na}_2\text{O}$ , em relação ao peso de CC + RC. Para tanto, a metodologia de dosificação deste material aplicado ao melhoramento de solos granulares, deve ser investigada.

Neste sentido, adotou-se o teor ótimo de material precursor como descrito acima (30% CC + 70% PC) e foram realizados dois ensaios de compactação Proctor modificado. As dosagens do agente cimentante foram definidas em 20% e 30% e, seguindo a proporção de 80% e 70% de Areia de Osório (AO). Optou-se pela não realização de ensaio com a proporção de 10% de agente cimentante, por se considerar irrisória essa quantidade para estabilizar um material como a Areia de Osório. Uma vez identificado em estudos anteriores, para a curva de compactação, a adição de solução alcalina não exerce grande influência nos resultados de peso específico aparente seco máximo e teor de umidade ótimo, para este tipo de solo granular, logo optou-se por utilizar apenas água destilada para prosseguir o ensaio. O ensaio de compactação Proctor na energia modificada seguiu as diretrizes estabelecidas pela NBR 7182/2016.

A Figura 3.11 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de compactação. O peso específico aparente máximo e a umidade ótima foram de  $18 \text{ kN/m}^3$  e 11% para a curva de 20% de agente cimentante. Para a curva de 30%, encontrou-se os valores de  $17,5 \text{ kN/m}^3$  e 14%.

Com o objetivo de verificar se o teor de álcalis de  $\text{Na}_2\text{O}$ , em relação ao material precursor, se manteria igual (4%) ao encontrado por Caicedo (2020), foi estabelecido a moldagem de corpos de prova preliminares, conforme o peso específico aparente seco máximo e teor de umidade ótimo de cada curva de compactação. Desta forma, ao utilizar os pontos ótimos de cada curva, pode-se avaliar qual a influência que a variação do teor de álcalis de  $\text{Na}_2\text{O}$  exerce, sem que os efeitos mecânicos de compactação (peso específico aparente seco e teor de umidade) se cruzem. Por limitações no equipamento utilizado na moldagem, o peso específico aparente seco máximo teve que ser reduzido em  $1 \text{ kN/m}^3$ , em ambas curvas, para que a moldagem pudesse ser executada. A Figura 3.11 demonstra os pontos preliminares de moldagem.

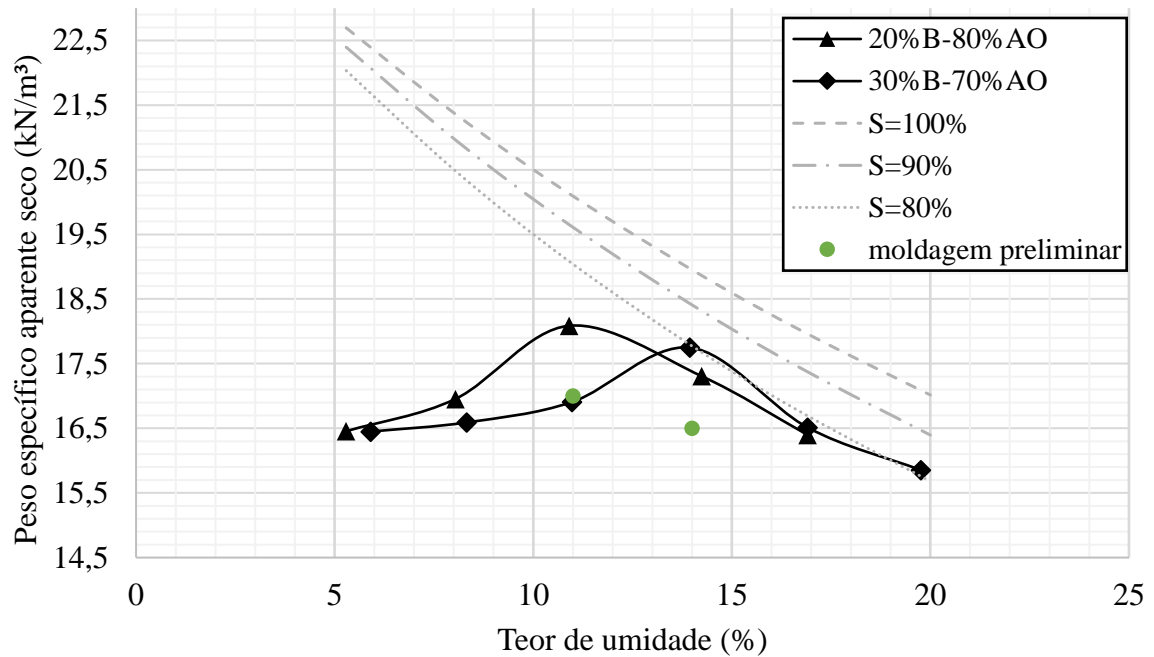


Figura 3.11: Ensaio de compactação proctor modificado, com adição de 20% e 30% de *binder* (70% RC + 30% CC) e escolha dos pontos de moldagem preliminar.

Na Figura 3.12 apresenta-se os resultados para o ensaio de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura. Pode-se perceber que, para ambas dosagens, o comportamento da resistência à compressão simples apresentou a mesma tendência, evidenciando que a máxima resistência se encontra em 2,5% de álcalis de  $\text{Na}_2\text{O}$  indo em discrepância aos 4% anteriormente apresentados. Acredita-se que esta variação se deve ao fato de que os materiais precursores são resíduos, e apresentem características química elementar que variam, principalmente quanto a CC, que pode apresentar teor de óxido de cálcio diferente ao que foi apresentado na caracterização, visto que o teor de cálcio no sistema tem forte influência sobre a concentração da solução alcalina utilizada. Esta diferença, pode estar associada à própria produção do gás acetileno, o período de coleta do material e o armazenamento deste resíduo que pode ocasionar em carbonatação.

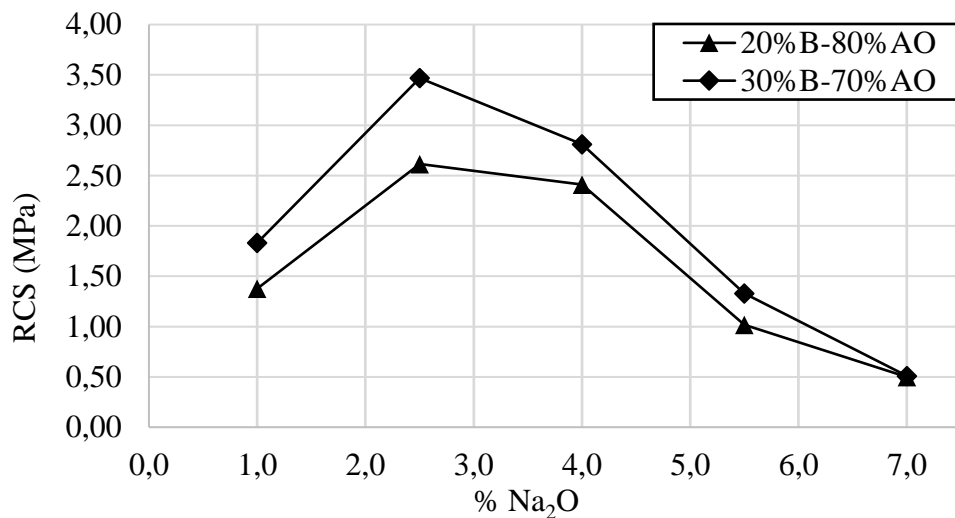


Figura 3.12: Resistência à compressão simples dos ensaios preliminares em função do teor de álcalis Na<sub>2</sub>O

A abordagem de projeto de experimento fatorial  $2^k$  foi adotada para a definição dos teores das misturas estudadas, de forma que a avaliação dos efeitos de  $k$  fatores sobre a variável resposta, o qual é definido em dois níveis distintos, não apresente conflito entre os efeitos principais e interações de ordens superiores. Com base nos resultados descritos anteriormente, a definição do teor de álcalis de Na<sub>2</sub>O foi estabelecida em **2,5%** e, portanto, têm-se como variáveis controláveis a porosidade da mistura, o teor de agente cimentante, a umidade de moldagem e o tempo de cura.

Para o peso específico aparente seco, com o objetivo de determinar os níveis de compactação, realizou-se a moldagem de um corpo de prova com 15 kN/m<sup>3</sup>, o qual após a desmoldagem veio a desmanchar devido a alta porosidade. Desta forma, optou-se por descartar a moldagem com 15 kN/m<sup>3</sup> e prosseguir com valores superiores, 16 kN/m<sup>3</sup> e 17 kN/m<sup>3</sup>. A variação do teor de umidade foi definida de modo a atingir um dos principais objetivos desta pesquisa: o efeito do teor de umidade de compactação. Os níveis foram escolhidos para abranger o ramo seco e o ramo úmido de ambas curvas de compactação, correspondendo a -1% do teor de umidade ótimo da curva de compactação com 20% de agente cimentante e, +1% do teor de umidade ótimo da curva de compactação com 30%. Para avaliar a evolução do produto das reações álcali ativadas, o tempo de cura foi estabelecido entre 7 dias e 28 dias. Na Figura 3.13 encontra-se os níveis estabelecidos para as variáveis controláveis de acordo com a curva de compactação e na Tabela 3.7 apresenta-se um resumo destes.

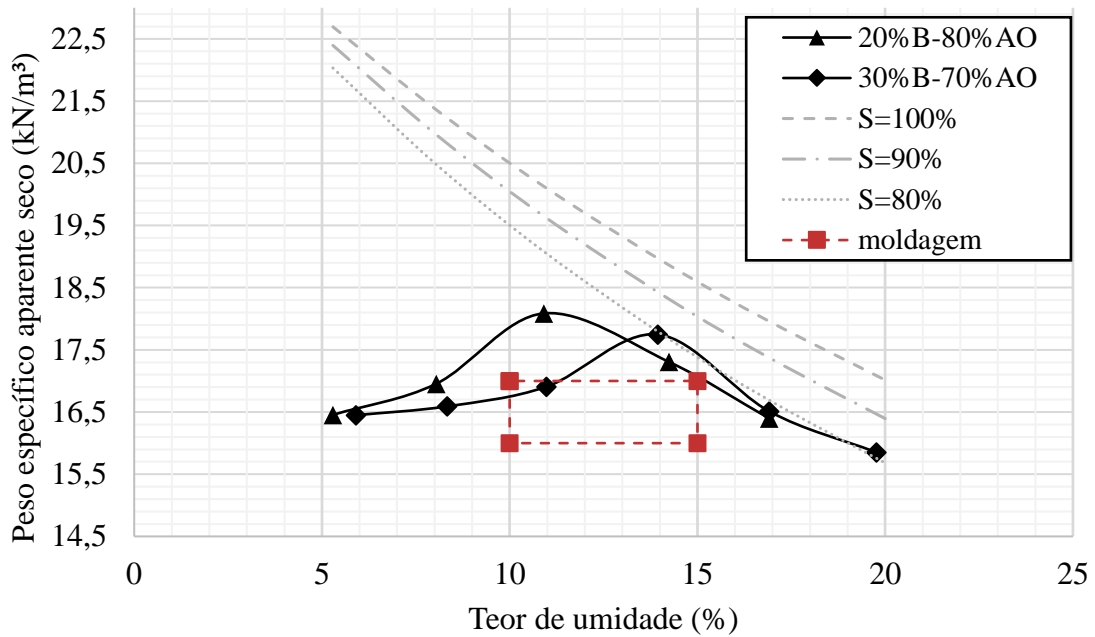


Figura 3.13: Distribuição dos níveis selecionados para as misturas

Tabela 3.7 – Definição dos teores das variáveis controláveis adotadas no programa experimental

Tratamento	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	teor de umidade (%)	teor de agente cimentante (%)	Tempo de cura (dias)
1	17	10	20	7
				28
2	17	10	30	7
				28
3	17	15	20	7
				28
4	17	15	30	7
				28
5	16	10	20	7
				28
6	16	10	30	7
				28
7	16	15	20	7
				28
8	16	15	30	7
				28



Desta forma, têm-se as seguintes categorias para as variáveis: controláveis, fixas e respostas.

Variáveis controláveis:

- a) Porosidade da mistura: expressa através do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de 16 e 17 kN/m<sup>3</sup>;
- b) Teor de agente cimentante: 20% e 30%;
- c) Umidade de moldagem (w): 10% e 15%;
- d) Tempo de cura (TC): 7 e 28 dias

Variáveis fixas:

- a) Tipo de solo: Areia de Osório;
- b) Composição do agente cimentante: 70% Resíduo Cerâmico (RC) e 30% de Cal de Carbureto (CC);
- c) Concentração de álcalis: 2,5% de álcalis de Na<sub>2</sub>O presentes na solução ativadora, em relação ao peso do agente cimentante.
- d) Ativador alcalino: Hidróxido de Sódio de pureza analítica 98%;
- e) Temperatura de cura:  $\pm 23^\circ\text{C}$

Variáveis respostas:

- a) Resistência à compressão simples;
- b) Resistência à tração por compressão diametral;
- c) Rigidez inicial ( $G_0$ );
- d) Durabilidade por molhagem e secagem;
- e) Módulo de Resiliência (MR)

### 3.3 PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS

Este capítulo tem como objetivo descrever os procedimentos adotados nos ensaios, desde a preparação das amostras até as características dos equipamentos. As normas vigentes utilizadas encontram-se em cada seção de ensaio. Os ensaios foram executados no Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental – LEGG, pertencente à Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Os ensaios da quinta etapa foram realizados no Laboratório de Pavimentação Asfáltica, na Universidade Federal de Santa Maria – UFSM.

#### 3.3.1 Preparação das amostras

Para a moldagem dos corpos de prova será utilizado dois moldes de metal cilíndrico tripartido, conforme o ensaio a ser realizado. Os ensaios de RCS e RTCD serão confeccionados corpos de prova de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, compactados em 3 camadas. Para o ensaio de durabilidade, será utilizado o molde cilíndrico tripartido de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, obtendo-se corpos de prova de 10 cm de diâmetro por 12,75 cm de altura e, moldados em 3 camadas. No ensaio de MR, os corpos de prova terão as dimensões 10 cm por 6,30 cm. Na Tabela 3.8 encontra-se o resumo da preparação das amostras conforme os ensaios adotados nesta pesquisa.

Tabela 3.8 – Características dos corpos de prova de acordo com os ensaios

Ensaio Realizado	Quantidade de CP's por mistura	Total	Dimensões do CP (cm)
RCS	3	48	5 x 10
RTCD	3	48	5 x 10
Durabilidade	1	16	10 x 12,75
MR	4	32	10 x 6,30

Após a definição da quantidade em peso de cada material utilizado, através da dosagem definida na Tabela 3.7, esses foram aferidos em balança com precisão de 0,01g, um dia antes da data de

moldagem, e acondicionados individualmente em sacos herméticos, para que não haja contato com o ar, exposição a umidade ambiente e evitar qualquer reação precipitada.

Na data de moldagem, a solução ativadora é preparada horas antes para que atinja a temperatura ambiente ( $\sim 23^{\circ}\text{C}$ ), visto que o processo é exotérmico. Os três materiais são misturados até atingir a homogeneização, então adiciona-se uma parcela de solução ativadora para que se atinja 2,5% de álcalis de  $\text{Na}_2\text{O}$ , e uma parcela complementar de água destilada para atingir a umidade de moldagem. O melhor ajuste de molaridade para a solução ativadora é de 3 mol/litro, desta forma, cada mistura apresenta variações de peso de solução ativadora e de água destilada, de forma que o teor de álcalis de  $\text{Na}_2\text{O}$  se mantenha constante. As parcelas líquidas, após a devida pesagem, devem ser misturadas e adicionadas ao material seco, realizando-se a homogeneização da mistura. Rapidamente, a mistura é dividida em partes iguais e armazenadas em recipientes fechados para evitar a perda de umidade durante o processo. Nesta fase também deve-se coletar amostras em cápsulas (três por corpo de prova) para a determinação da umidade de moldagem. Cada recipiente representa uma camada, a qual é transferida para o molde metálico tripartido e compactado estaticamente por meio de macaco hidráulico, escarificando-se o topo para garantir a aderência à próxima camada. Por fim, os corpos de prova são retirados do molde, acondicionados e armazenados conforme o período de cura de cada ensaio. Dada a fragilidade dos corpos de prova logo após a compactação, a aferição de dimensões é realizada no dia anterior da ruptura, antes da imersão em água.

### 3.3.2 Resistência à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão simples, ou compressão não confinada, vem sendo amplamente difundido em programas experimentais que abrangem a técnica de melhoramento de solos através de cimentação. Isto acontece devido ao fato de ser um ensaio simples, de fácil execução e com custo baixo. Desta forma, pode-se verificar o efeito da cimentação e avaliar diversos aspectos importantes sobre a resistência à compressão simples.

Quando o tempo de cura estabelecido se aproxima, no dia anterior os corpos de provas são imersos em água por um período de 24 horas, de forma que se minimize os efeitos de sucção. Após a imersão, a massa é novamente aferida e as amostras submetidas ao ensaio não destrutivo de módulo cisalhante inicial através de pulso ultrassônico.

A ruptura do corpo de prova ocorre devido à aplicação da tensão axial no corpo de prova. O ensaio seguiu as diretrizes propostas pela NBR 12025/2012, utilizando-se uma prensa automática com velocidade de deslocamento de 1,14mm/min e uma célula de carga, devidamente calibrada, com capacidade de 20 kN (Figura 3.14).

Para a determinação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) é verificada qual a leitura no momento da ruptura registrada durante o ensaio, a qual é convertida conforme a equação da célula de carga e dividida pela área do corpo de prova, conforme a Equação (3.1).

$$q_u = \frac{F}{\left(\frac{\pi \cdot D_m^2}{4}\right)} \quad (3.1)$$

Onde:

F: Carregamento axial aplicado ao corpo de prova no momento da ruptura (N);

D<sub>m</sub>: Diâmetro médio do corpo de prova, aferido no topo, centro e base (cm).



Figura 3.14: Ensaio de resistência à compressão simples

### 3.3.3 Resistência à tração por compressão diametral

Ao ser considerada a passagem de veículos sobre o pavimento, os materiais que compõem este sistema de múltiplas camadas sofrem diversos tipos de carregamento, em diferentes posições da estrutura, sendo um deles o de tração por flexão nas fibras inferiores em camadas cimentadas.

Devido à dificuldade de se obter a resistência à tração diretamente, utiliza-se métodos que determinam este parâmetro indiretamente. Este ensaio é padronizado pelas normas DNIT ME 136/2010, o qual consiste na aplicação de esforços de compressão por cargas distribuídas pelos frisos metálicos, em sentidos opostos, ao longo do plano diametral do corpo de prova, até o momento da ruptura. Os esforços de compressão resultam em tensões de tração uniformes, perpendiculares ao diâmetro do corpo de prova.

Segundo o DNIT ME 136/2010, a resistência à tração ( $q_t$ ) é determinada através da Equação (3.2).

$$q_t = \frac{2 \cdot F}{100 \cdot \pi \cdot D_m \cdot H_m} \quad (3.2)$$

Onde:

- F: Carregamento aplicado ao corpo de prova no momento da ruptura (N);
- $D_m$ : Diâmetro médio do corpo de prova, aferido no topo, centro e base (cm);
- $H_m$ : Altura média do corpo de prova (cm).

### 3.3.4 Módulo Cisalhante Inicial

Para a obtenção do módulo cisalhante inicial, é realizado o ensaio não destrutivo através do pulso de ondas ultrassônicas, momentos antes da ruptura dos corpos de prova no ensaio de compressão simples.

O equipamento utilizado é o PunditLab (+) e através de transdutores piezoelétricos, é possível realizar a medição do tempo de propagação das ondas de compressão e de cisalhamento no interior do corpo de prova. Quando associado este tempo de propagação com a densidade

relativa das amostras, pode-se estimar o módulo cisalhante a pequeníssimas deformações, conforme a Equação (3.3).

$$G_0 = \rho \cdot V_{(p,s)}^2 \quad (3.3)$$

Onde:

$\rho$ : Massa específica do corpo de prova ( $\text{kg/m}^3$ );

$V_{p,s}$ : Velocidade da onda de compressão (p) ou de cisalhamento (s) (m/s);

Para cada tipo de onda que se deseja emitir existe um transdutor específico. Primeiramente, realizou-se a medição do tempo de onda de compressão ( $t_p$ ) através de transdutores longitudinais, os quais devem ser ajustados a uma frequência de 54 kHz e calibrados através da barra de referência que acompanha o aparelho, fazendo uso de material acoplante (gel) para eliminar as bolhas de ar, auxiliar na transmissão e leitura do sinal entre os transdutores e a barra de referência. Esta aplicação de gel é repetida em todos os corpos de prova. Para a medição do tempo de onda de cisalhamento ( $t_s$ ), utilizou-se os transdutores de cisalhamento ajustados a uma frequência de 250 kHz e outro gel, este de alta viscosidade em comparação ao utilizado para transmitir as ondas longitudinais. A leitura de tempo desta onda ( $t_s$ ) foi realizada através do Pundit Link, um software desenvolvido pelo fabricante, no qual é possível visualizar a forma de onda e interpretar o tempo de onda. O tempo de onda ( $t_p$ ) pode ser retirado diretamente do instrumento. Desta forma, é possível determinar as velocidades ( $V_p$  e  $V_s$ ) a partir da relação entre a altura média de cada corpo de prova e o tempo aferido. A Figura 3.15 ilustra as etapas de execução do ensaio, onde pode-se notar a diferença entre os transdutores utilizados para cada aferição de tempo de onda.

Ainda não há normativas direcionadas para a aplicação deste ensaio em geotecnia, visto que a maior aplicação é em concreto e rochas. A ASTM D2845/2008, direcionada para rochas, é a que mais se aproxima do assunto.

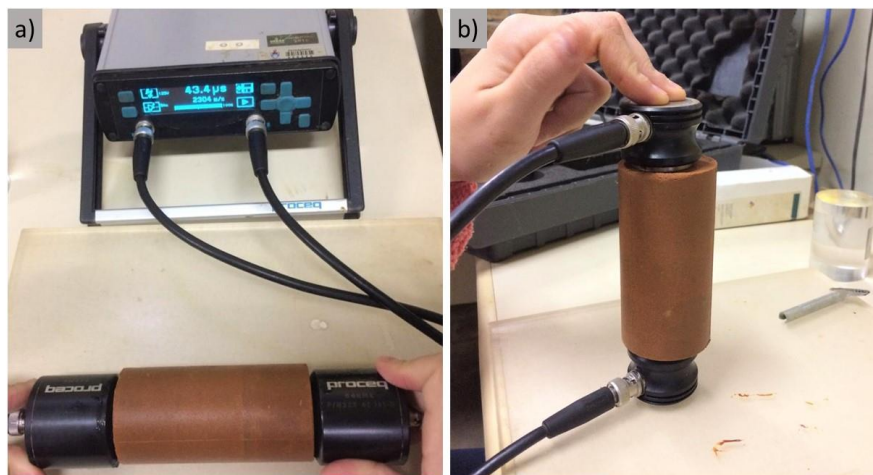


Figura 3.15: Ensaio de pulso ultrassônico: (a) onda de compressão e (b) onda de cisalhamento.

### 3.3.5 Durabilidade

Os materiais empregados em base e sub-base de pavimentos estão sujeitos aos efeitos de mudanças climáticas ao longo da vida útil, onde o ensaio de durabilidade tornou-se um parâmetro fundamental para avaliar o comportamento do material frente as intempéries. As variações de umidade e de temperatura associadas a ação de cargas repetidas oriundas do tráfego, comprometem a integridade estrutural de materiais estabilizados com pozolanas, pois a presença de umidade induzida contribui para o aparecimento de fissuras (MARCON, 1977).

Os procedimentos recomendados para realizar o ensaio de durabilidade é o preconizado pela ASTM D559-03/2015, a partir de doze ciclos de molhagem, secagem e escovação. Ao final do tempo de cura estabelecido, os corpos de prova devem ser imersos em água durante 5 horas, e logo após secos em estufa com temperatura de  $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$  durante 42 horas. Posteriormente realiza-se a escovação, através de uma escova com fios de aço, por 18 a 20 vezes ao longo da circunferência do corpo de prova e 4 escovações no topo e na base, aplicando-se uma força de 15 N. A perda de massa é registrada conforme o peso de cada corpo de prova antes e após a escovação. O processo é repetido por 12 vezes, completando-se assim os 12 ciclos estabelecidos pela ASTM D559-03/2015.

No Brasil, a norma utilizada para realizar o ensaio de durabilidade é a NBR 13554/2012, que se encontra praticamente em desuso, pois leva-se em consideração apenas seis ciclos de molhagem e secagem.

### 3.3.6 Módulo de Resiliência

O ensaio de Módulo de Resiliência (MR) tornou-se um parâmetro rotineiro, pois caracteriza o comportamento dos materiais sob carregamento repetido, com o objetivo de reproduzir as ações das cargas de tráfego na estrutura do pavimento. Estes carregamentos atuam em ciclos dinâmicos de carga e descarga, o que diferencia o MR do módulo de elasticidade, determinado de maneira estática. Huang (2004) demonstra as deformações impostas no ensaio de carga repetidas, em que nos primeiros estágios há uma parcela considerável de deformação permanente, e ao passo que o número de ciclos é elevado, essas deformações são praticamente recuperáveis ( $\epsilon_r$ ), conforme a Figura 3.16.

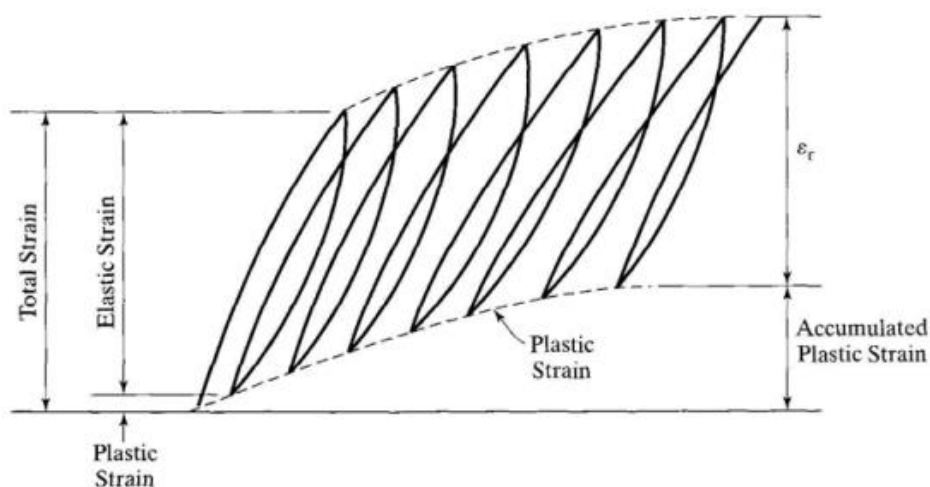


Figura 3.16: Deformações resilientes e permanentes sob carregamento cíclico  
HUANG (2004)

Desta maneira, por definição, o MR é a relação entre a tensão desvio durante o ensaio, pela parcela de deformação resiliente ou recuperável, como indica a Equação (3.4).



$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (3.4)$$

Onde:

$\sigma_d$ : Tensão desvio aplicada repetidamente no eixo axial (MPa);

$\varepsilon_r$ : Deformação específica axial resiliente (mm/mm).

Sendo  $\varepsilon_r = dr/L$ , ou seja, a relação entre o deslocamento recuperável e a altura ou espessura do corpo de prova.

A obtenção deste parâmetro é realizada a partir de ensaios triaxiais cíclicos, seguindo-se as preconizações das normas DNIT – ME 134/2018 e DNIT – ME 135/2018 para solos e para misturas asfálticas, respectivamente. O MR tende a ser um parâmetro constante, ou seja, independente da tensão desvio e da tensão de confinamento para solos estabilizados com cimento ou cal, devido à cimentação das partículas (BERNUCCI et al., 2006). Sendo assim, determinação de forma experimental do MR das misturas cimentadas é feita no Brasil, principalmente, pelo ensaio de compressão diametral ou tração indireta.

O ensaio segue os procedimentos para a determinação do MR de misturas asfálticas, conforme a normativa do DNIT-ME 135/2018. A aplicação de carga é direcionada ao plano diametral vertical, sob uma frequência de tensão vertical de 1 Hz (60 ciclos por minuto), em que cada ciclo corresponde a duração do pulso de carga de 0,1 segundo e 0,9 segundos de repouso. O registro do deslocamento horizontal é feito para cada aplicação de carga através de dois LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*). Para que não ocorra a ruptura do corpo de prova, a aplicação de carga vertical limita-se a uma tensão entre 10% e 30% da resistência à tração, obtida no ensaio estático. A Figura 3.17 (a) apresenta uma vista geral da prensa utilizada para a execução dos ensaios e a (b) o detalhe do posicionamento do corpo de prova.

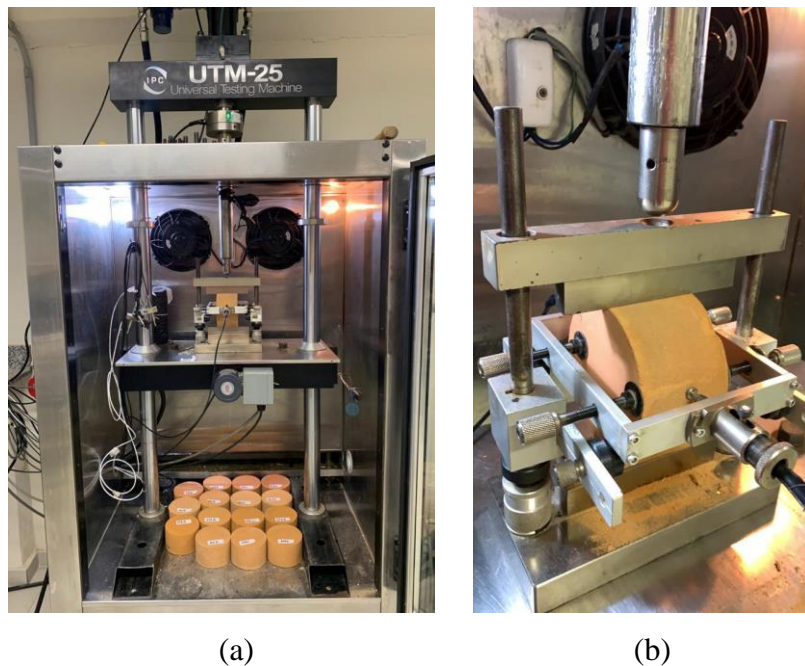


Figura 3.17: Ensaio de Módulo de Resiliência (a) vista geral da prensa e (b) posicionamento do corpo de prova

De posse dos valores obtidos, o MR pode ser calculado através da Equação (3.5).

$$MR = \frac{F}{\Delta H} \cdot (0,9976\mu + 0,2692) \quad (3.5)$$

Onde:

- F: Carga vertical repetida aplicada diametralmente ao corpo de prova (N);
- $\Delta$ : Deformação resiliente para aplicações da carga F (mm);
- H: Altura do corpo de prova (mm);
- $\mu$ : Coeficiente de Poisson (0,17 valor comumente utilizado para misturas de solo-cimento)

O MR é de muita valia para caracterizar o comportamento do material, sendo muito importante sua utilização nos métodos de dimensionamento mecânico-empíricos de pavimentos asfálticos. A partir das características do comportamento tensão-deformação dos materiais que compõem as camadas, associado com informações sobre a frequência e intensidade de tráfego, bem como as condições ambientais regionais, é que se pode realmente ter uma estimativa do desempenho de um pavimento.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos, conforme o planejamento experimental proposto na Tabela 3.6. Primeiramente serão expostas as informações gerais obtidas em cada ensaio, sendo que o critério de aceitação adotado está baseado em  $\pm 10\%$  da média, onde realizou-se triplicata dos corpos de prova, para os ensaios de resistência mecânica e então, no mínimo 2 devem estar dentro da faixa de variação. Para o ensaio de durabilidade foi realizado 1 corpo de prova por tratamento, devido ao fato do volume expressivo da amostra a ser ensaiada e, conseqüentemente na quantidade de material que exige. Já o ensaio de módulo de resiliência, é recomendando que seja ensaiado de 3 a 5 corpos de prova por tratamento, desta forma optou-se pela execução de 4 corpos de prova sendo o critério de aceitação o mesmo exposto,  $\pm 10\%$  da média.

Para a análise dos resultados, com o objetivo de avaliar a influência de cada um dos fatores controláveis (porosidade, teor de agente cimentante, teor de umidade de moldagem e tempo de cura) sobre as variáveis respostas, abordou-se uma análise estatística através do gráfico de paretos e dos efeitos principais, através do software de estatística *Minitab* 17. O nível de significância adotado foi de 0,05, ou seja, ao validar o modelo como representativo para o experimento, há uma probabilidade que 5% desta hipótese não seja verdadeira. Entretanto, para o ensaio de durabilidade, visto que não houve réplicas dos tratamentos, o nível de significância adotado foi de 0,15 aumentando a probabilidade de que o modelo encontrado não seja verdadeiro. Por fim, buscou-se uma relação dos resultados obtidos através da curva de dosagem da porosidade ( $\eta$ ) em relação ao teor volumétrico de agente cimentante ( $B_{iv}$ ), conforme descrito no capítulo 2.4.3. Ainda, verificando um dos objetivos desta pesquisa que se concerne em avaliar o efeito do teor de umidade de moldagem nas variáveis respostas, buscou-se uma relação entre o índice  $\eta/B_{iv}$  de maneira individual a este efeito.

#### 4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Conforme os tratamentos definidos, realizou-se o ensaio de resistência à compressão simples para 51 corpos de prova, de forma que seja possível avaliar os fatores mais influentes na resistência à compressão simples, bem como entender a evolução das reações no sistema álcali ativado estudado.

Os resultados obtidos encontram-se na Figura 4.1, onde é possível identificar que quando aumenta-se o teor de umidade de moldagem, para as misturas que contém 20% de agente cimentante, há uma redução na resistência, em ambos tempos de cura. Esse fato, acredita-se que seja devido à quantidade de água presente no sistema, a qual é de + 4% em relação a umidade ótima encontrada, contemplando uma ampla faixa do ramo úmido, conforme a Figura 3.11.

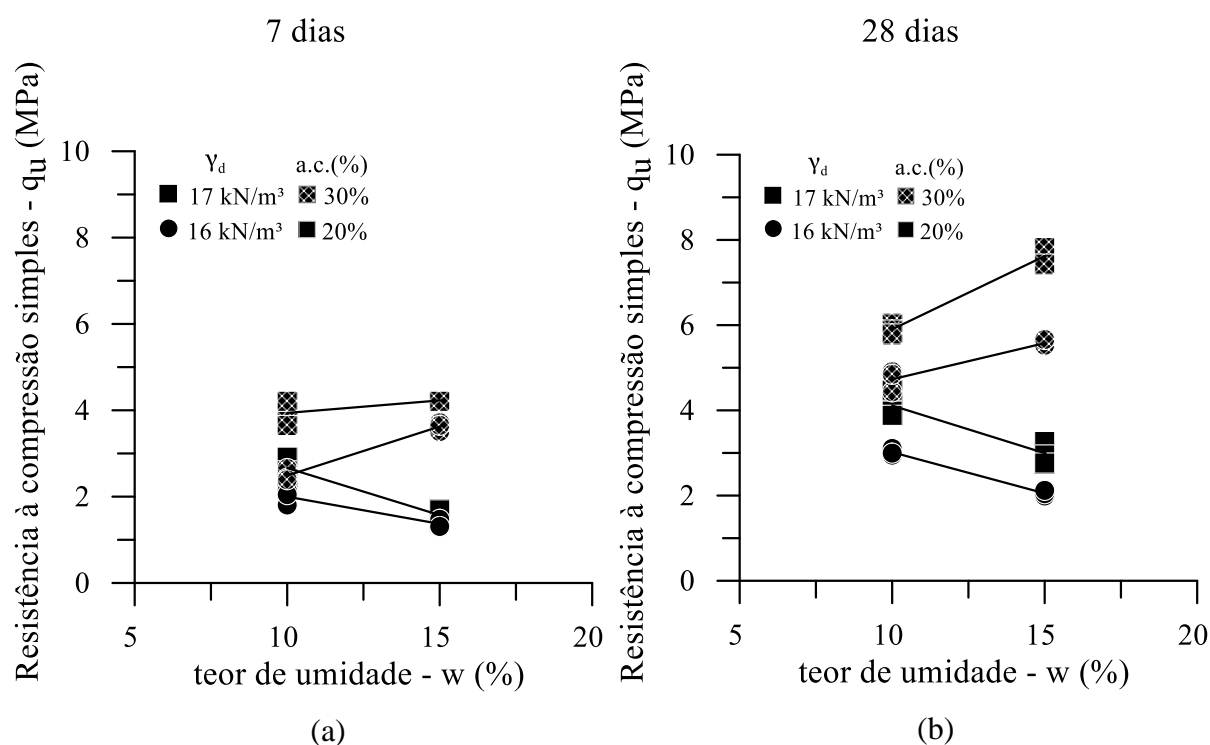


Figura 4.1: Resistência à compressão simples em função do teor de umidade de moldagem.

Quanto aos pontos que compreendem ao teor de 30% de agente cimentante, há ganhos de resistência, já que a umidade de moldagem encontra-se a +1% em relação a umidade ótima

desta, a qual não interfere nas reações de cimentação. Ou seja, ao se utilizar uma ampla faixa de umidade de moldagem no ramo úmido, a água no sistema afetará no desenvolvimento da estrutura. Este mesmo comportamento foi obtido por (CONSOLI et al., 2007), ao avaliar a resistência à compressão simples em função do teor de umidade de moldagem, com amostras de mesma porosidade e teor de cimento, onde foi obtido ganhos de resistência até um máximo valor de umidade e logo após, a resistência tende a diminuir.

Ademais, considerando-se que o solo granular não contribua para o desenvolvimento das reações no sistema álcali ativado, sendo estas originadas pelo material precursor e a solução ativadora, quando há uma variação no teor de umidade de moldagem, pode-se traçar uma relação intrínseca com o teor água/cimento de pastas álcali ativadas. Neste sentido, o estudo de Bernal et al. (2015) demonstrou que mudanças na quantidade de água tem grande efeito no desenvolvimento da cinética das reações e na precipitação dos produtos formados, os quais desencadeiam microestruturas diferentes e, conseqüentemente alteram a performance mecânica do sistema, corroborando um impacto negativo em altos teores de adição de água.

Na Figura 4.2 apresenta-se os resultados em função do teor de agente cimentante.

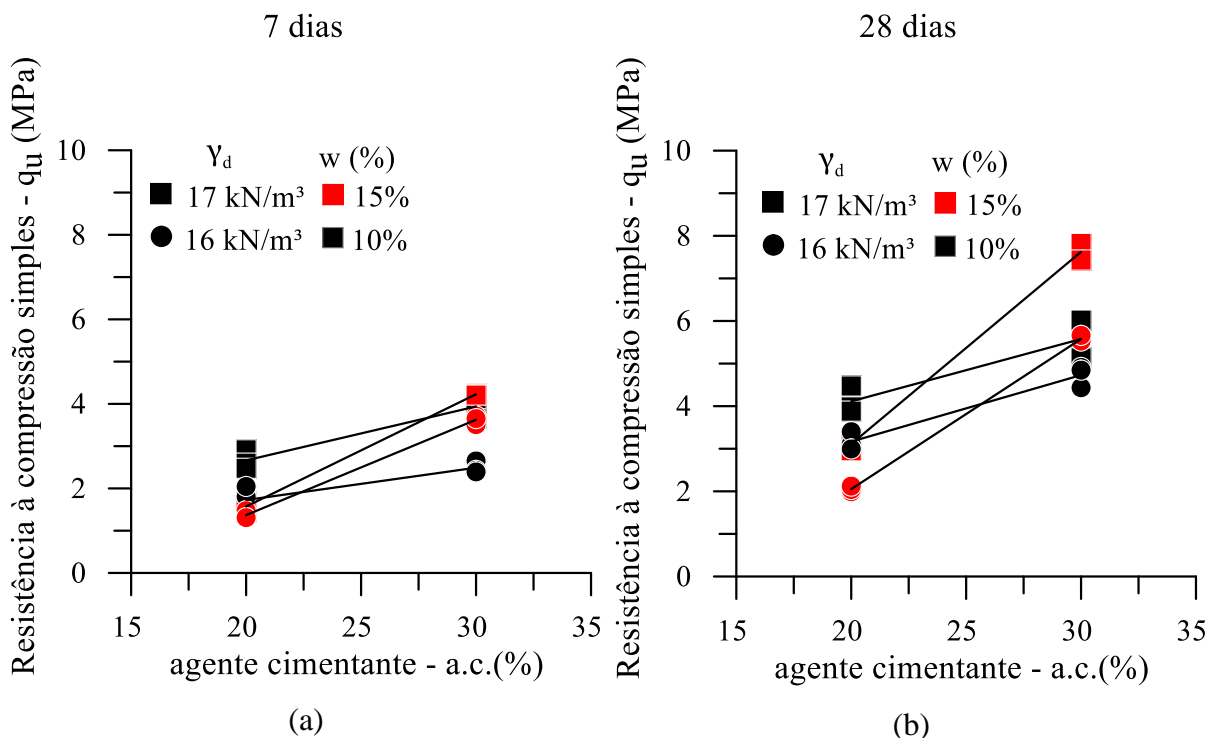


Figura 4.2: Resistência à compressão simples em função do agente cimentante

O aumento no teor de agente cimentante proporciona incrementos no valor de resistência, denotando um comportamento semelhante ao apresentado em pesquisas anteriores utilizando agentes cimentantes convencionais, como o cimento Portland e cal hidratada, agentes cimentantes alternativos, como vidro moído e cal de carbureto (CONSOLI et al., 2018) e agentes cimentantes obtidos através da técnica de álcali ativação (BRUSCHI, 2020; CAICEDO, 2020; SILVANO, 2020).

As resistências máximas obtidas para as misturas estabelecidas são da ordem de 4,23 MPa e 7,62 MPa, para 7 e 28 dias de cura, respectivamente. Estes valores foram obtidos conforme o tratamento número 4 que resultou nos níveis mais altos das variáveis controláveis, ou seja, peso específico aparente seco de 17 kN/m<sup>3</sup>, teor de agente cimentante de 20% e teor de umidade de moldagem de 15%. No que tange às normativas referentes ao emprego de materiais estabilizados visando a pavimentação, a USACE (1994) bem como o guia da AASHTO (2008) sobre o método de dimensionamento mecânico-empírico, determinam que a resistência à compressão simples aos 7 dias de cura para solos estabilizados com cimento Portland e aos 28 dias de cura para estabilizados com cal, cal e cinza volante ou misturas dos 3 agentes cimentantes citados, deverá ser de 5,17 MPa para camadas de base e de, 1,72 MPa para camadas de sub-base considerando pavimentos flexíveis. Já a PCA (1992), afirma que a resistência à compressão simples aos 7 dias de cura para solo estabilizado com cimento, deverá estar entre 2,06 MPa e 5,5 MPa aplicáveis para rodovias de médio a alto volume de tráfego. A AUSTROADS (2019) estabelece o valor mínimo de 2 MPa para materiais estabilizados com teor superior a 3% de agente cimentante, considerando 28 dias de tempo de cura. De acordo com Rios et al. (2018), as especificações portuguesa (JAE, 1995) e francesa (GTS, 2000) para pavimentos sugerem um valor de 2 MPa a 3 MPa aos 28 dias de cura.

Desta forma, percebe-se que há uma ampla faixa de valores de recomendações sugeridos na literatura para diretrizes quando ao ensaio de resistência à compressão simples, o qual é tomado como referência, por ser um ensaio relativamente simples e de fácil execução para selecionar as misturas que atendam a tais valores e posteriormente realizar ensaios específicos, como o ensaio de módulo de resiliência.

O comportamento dos tratamentos executados pode ser evidenciado através da análise estatística entre os efeitos de cada fator e das interações de primeira e segunda ordem, os quais são expostos através do gráfico de Pareto (Figura 4.3) e o gráfico dos efeitos principais (Figura 4.4). O gráfico de Pareto expõe tanto os fatores principais quanto as interações de segunda ordem entre os fatores controláveis, sendo que, os efeitos que se mostram estatisticamente significativos devem cruzar a linha estabelecida para o nível de significância adotado,  $\alpha = 0,05$ . Da mesma forma, os efeitos podem ser verificados através da ANOVA, apresentada no **Apêndice A**.

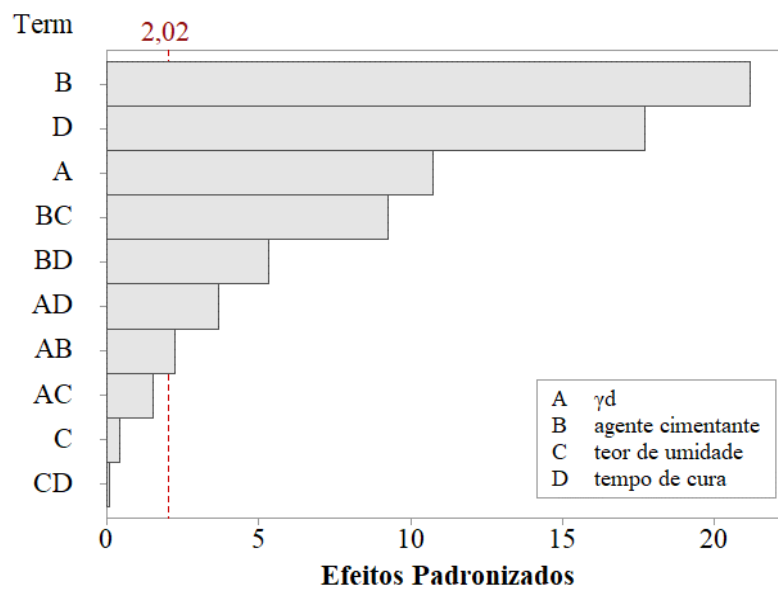


Figura 4.3: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a resistência à compressão simples

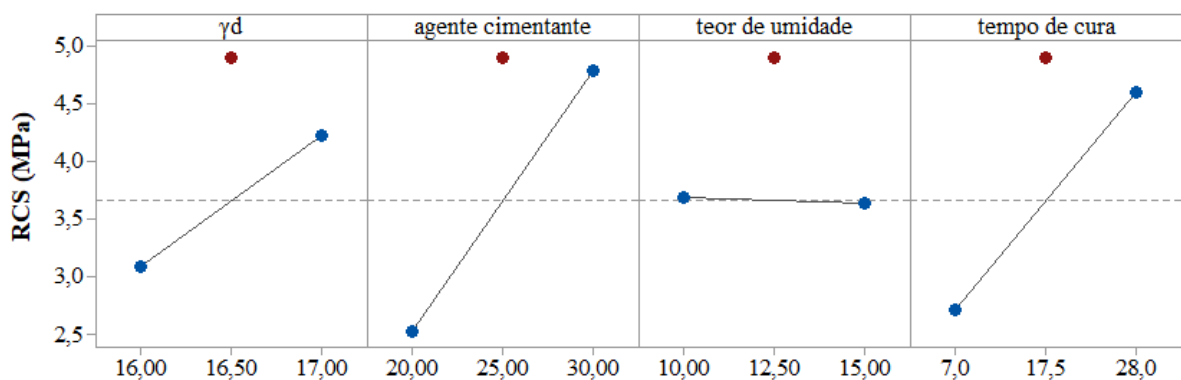


Figura 4.4: Gráfico de efeitos principais para a resistência à compressão simples

Os dados da Figura 4.3 indicam que para o ensaio de resistência a compressão simples, os fatores principais de peso específico aparente seco (A), teor de agente cimentante (B) e tempo de cura (D), bem como as interações de segunda ordem BC, BD, AD e AB influenciam significativamente o resultado da variável resposta (resistência à compressão simples -  $q_u$ ). Por outro lado, o teor de umidade (C) não apresenta significância estatística que influencie na variável resposta. Isto é, a variação no teor de umidade só é significativa quando associada ao efeito do agente cimentante, conforme a interação de segunda ordem (BC). Como já descrito anteriormente, esta associação ocasiona na redução da resistência quando analisamos os tratamentos que possuem 20% de agente cimentante e 15% de teor de umidade.

O teor de agente cimentante (B) se mostrou como o fator de maior influência, conforme a Figura 4.3 e Figura 4.4, visto que há uma relação direta com as reações pozolânicas desenvolvidas com o aumento do teor de agente cimentante (CONSOLI et al., 2007). Entretanto, ao comparar com pesquisas que utilizam agentes cimentantes tradicionais ou alternativos (CONSOLI et al., 2007, 2019c) o peso específico aparente seco apresenta maior magnitude de influência na variável respostas. Essa divergência é justificada pelo fato de que o agente cimentante aqui estudado é oriundo da técnica de álcali ativação, a qual intensifica o processo de desenvolvimento das reações cimentícias devido a presença da solução ativadora. Esta inversão nos fatores de maiores influência vai de acordo com pesquisas recentes utilizando a técnica de álcali ativação (BRUSCHI, 2020; CAICEDO, 2020; SILVANO, 2020), onde a magnitude do teor de agente cimentante utilizado ultrapassa a magnitude do peso específico aparente seco.

Ainda podemos observar que o tempo de cura (D) é o segundo fator de maior magnitude, visto que para todos os tratamentos há um aumento significativo da resistência à compressão simples aos 28 dias de cura. É evidenciado que aos 28 dias de cura, os produtos de reação formados se encontram diferentes daqueles formados aos 7 dias, pois as reações no sistema continuaram a se desenvolver e redefinindo a porosidade das misturas, e conseqüentemente influenciando na resposta mecânica do material (BERNAL et al., 2016; HUANG et al., 2020; HWANG et al., 2019; NAVRÁTILOVÁ; ROVNANÍKOVÁ, 2016).



O gráfico dos efeitos principais, apresentado na Figura 4.4, é composto pela média dos resultados de cada tratamento, de acordo as variáveis controláveis em seus níveis altos (+1) e baixos (-1). Além disto, também é apresentado a média do tratamento referente ao ponto central, o qual tem por objetivo determinar a presença de um comportamento linear ou não linear entre os fatores principais e variável resposta. Como pode-se perceber, um comportamento não linear é evidenciado em todos os fatores principais. Isto indica que há uma superfície resposta tridimensional, que considera os efeitos quadráticos através de regressão quadrática, capaz de modelar uma otimização da resistência à compressão simples. Desta forma, é comum recorrer a modelos de segunda ordem para um melhor ajuste, como é o caso do Projeto Composto de Segunda Ordem (PCSO) o qual é constituído basicamente pela união de um experimento fatorial com tratamentos axialmente distribuídos, conhecidos por pontos estrela (MONTGOMERY, 2001).

O PCSO não foi considerado nesta pesquisa, pois o mesmo ocasiona no aumento do número de tratamentos a serem realizados nos experimentos. Desta forma, fica claro que caso o ponto central não fosse considerado, estaríamos induzidos ao erro ao acreditar em um comportamento linear entre os fatores principais e a variável resposta.

#### 4.1.1 Relação entre a resistência à compressão simples com o índice $\eta/B_{iv}^k$

Conforme apresentado no capítulo 2.4.3, para solos artificialmente cimentados há uma relação entre a porosidade ( $\eta$ ) e o teor volumétrico de agente cimentante ( $B_{iv}$ ), sendo possível obter uma curva que ajuste a resistência à compressão simples em função deste índice, bem como uma única equação que represente o comportamento do material.

Com o objetivo de compatibilizar os efeitos das variáveis no comportamento mecânico, o expoente interno foi ajustado para 0,28 ( $\eta/B_{iv}^{0,28}$ ). Este valor foi definido por ser o expoente que melhor se ajusta aos resultados, bem como é o valor encontrado na literatura para esta metodologia incluindo diferentes tipos de solo artificialmente cimentados (CONSOLI et al., 2007, 2010, 2018, 2021).

Definido o expoente interno, busca-se pelo expoente externo (B) para o termo da potência de forma que seja único para ambas equações, ou seja independente do tempo de cura. Este valor

foi ajustado para -4,3, o qual segue a tendência  $k \approx 1/B$ , para que as equações de tendência do comportamento de resistência sejam igualadas.

Desta forma, as Equações (4.1) e (4.2) representam o comportamento de resistência à compressão simples em função do índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , para os tempos de cura de 7 dias e de 28 dias, respectivamente.

$$q_u(\text{MPa})_{7 \text{ dias}} = 5,49 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,3} \right] \quad (4.1)$$

$$q_u(\text{MPa})_{28 \text{ dias}} = 8,93 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,3} \right] \quad (4.2)$$

De posse aos resultados obtidos, a Figura 4.5 apresenta os dados experimentais empregados para as variáveis controláveis, de forma que fique evidente as considerações sobre o peso específico aparente seco, teor de agente cimentante e teor de umidade de moldagem. Estes resultados encontram-se no **Apêndice B**, destacando-se também as informações sobre a resistência média de cada ponto.

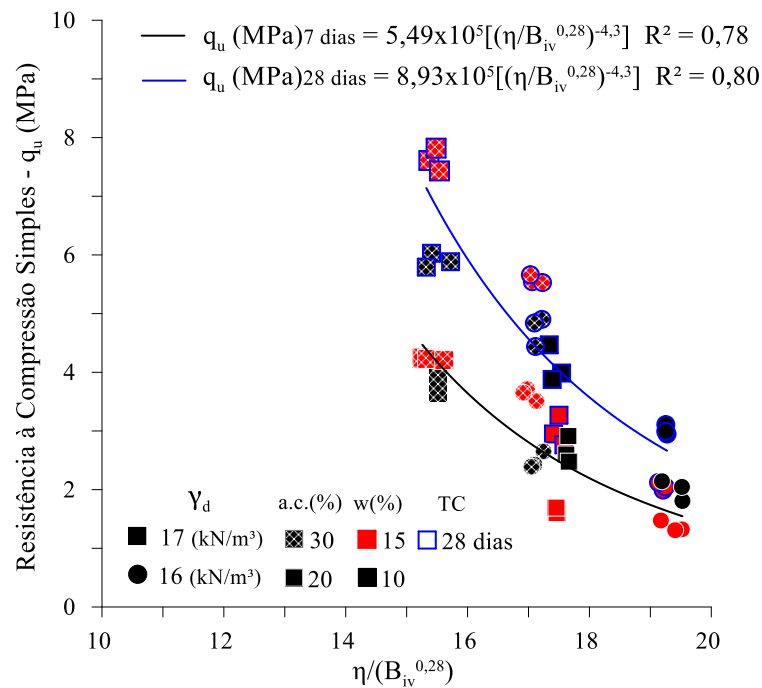


Figura 4.5: Relação entre a resistência à compressão simples e o índice  $\eta/B_{iv}$

Em comparação as duas curvas, fica evidente a influência do tempo de cura na magnitude das resistências, seguindo a tendência de evolução das reações do agente cimentante com o tempo de cura. Pode-se perceber que, estes ganhos estão claramente associados com o teor de agente cimentante em virtude de uma maior precipitação do gel formado no processo de álcali ativação, e também devido ao peso específico aparente seco, o qual proporciona maior área de contato entre as partículas do sistema e, conseqüentemente um aumento na mobilização de atrito.

Outra constatação é de que com o aumento da porosidade, para um mesmo  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  como por exemplo em 17,5, os pontos das curvas de 7 dias e de 28 dias se confundem, ou seja, a resistência desenvolvida no teor de umidade de 15% aos 28 dias é equivalente a resistência desenvolvida com 10% de umidade, porém aos 7 dias de cura. Como a Equação (4.1) e Equação (4.2) encontram-se ajustadas para os mesmos expoentes, apenas o escalar A apresenta valores diferentes, sendo assim, a razão entre os escalares define a magnitude da variação da resistência à compressão simples com o tempo de cura, que é de 1,62.

Quanto ao coeficiente de determinação obtido ( $R^2$  de 0,78 e 0,80), este mostra-se satisfatório considerando a ampla combinação dos efeitos aqui estudados, e de que é possível o ajuste de curvas que descrevem o comportamento de materiais, que até o momento podem ser denominados como inéditos, do ponto de vista da estabilização de solos.

Ainda é possível obter uma relação única, como a exposta por Consoli et al. (2018a), em que o comportamento mecânico de misturas de um solo estabilizado com cimento pode ser normalizado frente a variáveis como o tempo de cura ou temperatura. Desta forma, a busca por uma equação matemática única, que representa o comportamento do material aqui estudado, independente do tempo de cura de 7 dias ou 28 dias, é obtida através da normalização dos resultados. Isto é realizado por meio da razão entre os valores obtidos e o valor estabelecido para a resistência correspondente ao  $\eta/B_{iv}^{0,28} = 17,5$ . Este valor foi adotado de acordo com a Figura 4.5, o qual representa um valor central que satisfaz ambas as curvas.

Com isso, a relação única entre a resistência à compressão simples e o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  que define o comportamento independente do tempo de cura, é representada pela Equação (4.3).

$$\frac{q_u}{q_u \text{ para } \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} = 17,5 \right)} = 2,21 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,3} \right] \quad (4.3)$$

Como pode-se observar, a Figura 4.6 ilustra a normalização descrita sendo que, o coeficiente de determinação encontrado é de 0,80, indicando a representatividade da Equação (4.3) frente a previsão da resistência à compressão simples das misturas analisadas.

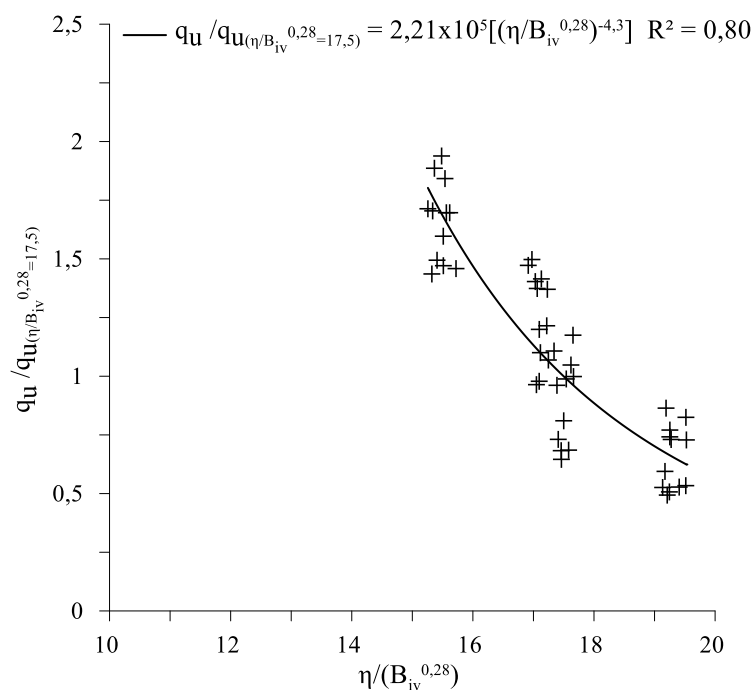


Figura 4.6: Resistência à compressão simples normalizada

Visto que um dos objetivos principais desta pesquisa é avaliar qual a influência do teor de umidade de moldagem diante do comportamento mecânico das misturas, buscou-se expor os resultados de resistência à compressão simples em função do índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  isolando os tratamentos que correspondem a 10% e 15% do teor de umidade. Desta forma, pode-se obter 2 curvas distintas para cada tempo de cura, as quais encontram-se na Figura 4.7 (a) para 7 dias de tempo de cura e (b) para 28 dias de tempo de cura.

Como já mencionado, o teor de umidade de moldagem de 15% causa uma queda na resistência à compressão simples nas misturas que são compostas por 20% do agente cimentante, independente do peso específico aparente seco. Essa conclusão também está de encontro com a análise estatística apresentada anteriormente, onde a interação de segunda ordem BC influencia significativamente o resultado da variável resposta. Além disso, a quantidade de água adicionada faz com que a concentração da solução ativadora de NaOH seja diluída. Ou seja, apesar do teor de álcalis da solução se manter o mesmo  $\text{Na}_2\text{O} = 2,5\%$  em relação ao peso do material precursor, a quantidade de água adicionada para atingir o teor de umidade de moldagem estabelecido, faz com que a concentração enfraqueça. Uma vez que a relação entre a solução ativadora e o material precursor é alterada, a precipitação dos produtos de reação também é afetado (CRISTELO et al., 2012; PHETCHUAY et al., 2016).

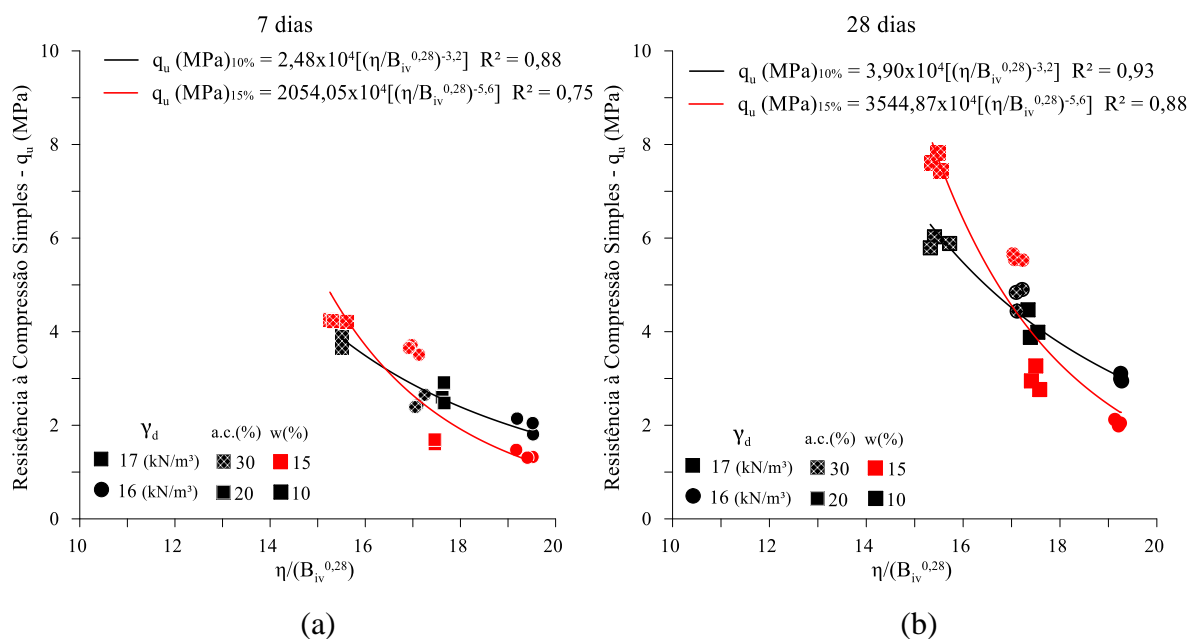


Figura 4.7: Resistência à compressão simples exposta em função do teor de umidade (a) para 7 dias de tempo de cura e (b) para 28 dias de tempo de cura

Neste sentido, o enfraquecimento da solução também acontece para as misturas com 30% de agente cimentante. Entretanto, a resistência a compressão simples não é afetada negativamente pois a quantidade de água adicionada para atingir o teor de umidade de moldagem é de apenas 1% em relação a umidade ótima, enquanto que para 20% de agente cimentante, trabalha-se com a adição de água de 4% em relação a umidade ótima.

Além disso, pode-se perceber que a relação entre os dados experimentais e o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) mais elevados, demonstrando que diante da faixa de teor de umidade investigado, é racional fazer uma análise que considere este efeito individualmente. Considerando a Figura 4.7 (a), os valores de  $R^2$  encontrados foram da ordem de 0,88 e 0,75 enquanto, ao analisar todos os dados experimentais juntos (Figura 4.5) o valor do  $R^2$  é de 0,78. Ainda, considerando a Figura 4.7 (b), os valores de  $R^2$  encontrados foram da ordem de 0,93 e 0,88 enquanto, ao analisar todos os dados experimentais juntos (Figura 4.5) o valor do  $R^2$  é de 0,80.

A Equação (4.4) até a Equação (4.7) representam o comportamento de resistência à compressão simples em função do índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  considerando a análise isolada do teor de umidade, para os tempos de cura de 7 dias e de 28 dias, respectivamente.

$$q_u(\text{MPa})_{10\%} = 2,48 \times 10^4 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,2} \right] \quad (4.4)$$

$$q_u(\text{MPa})_{15\%} = 2054,05 \times 10^4 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-5,6} \right] \quad (4.5)$$

$$q_u(\text{MPa})_{10\%} = 3,90 \times 10^4 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,2} \right] \quad (4.6)$$

$$q_u(\text{MPa})_{15\%} = 3544,87 \times 10^4 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-5,6} \right] \quad (4.7)$$

Nota-se que devido o desmembramento da curva em função do teor de umidade, o expoente externo passa a apresentar valores distintos, de forma que represente um melhor ajuste entre os dados experimentais. Os mesmos foram compatibilizados para ambos tempos de cura, de forma que facilite quaisquer comparações que se dará através do escalar A.

## 4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

De forma análoga ao capítulo apresentado sobre a resistência à compressão simples, o comportamento do ensaio de resistência à tração por compressão diametral é exposto. Os

resultados obtidos encontram-se na Figura 4.8 em função do teor de umidade, onde é possível identificar que quando aumenta-se o teor de umidade de moldagem, para as misturas que contém 20% de agente cimentante, há uma redução na resistência, em ambos tempos de cura. Uma vez que os corpos de prova são executados da mesma maneira que para o ensaio de resistência à compressão simples, porém rompidos sobre o plano de tração diametral, é esperado que a tendência do comportamento se dará igualmente ao ensaio de resistência à compressão simples.

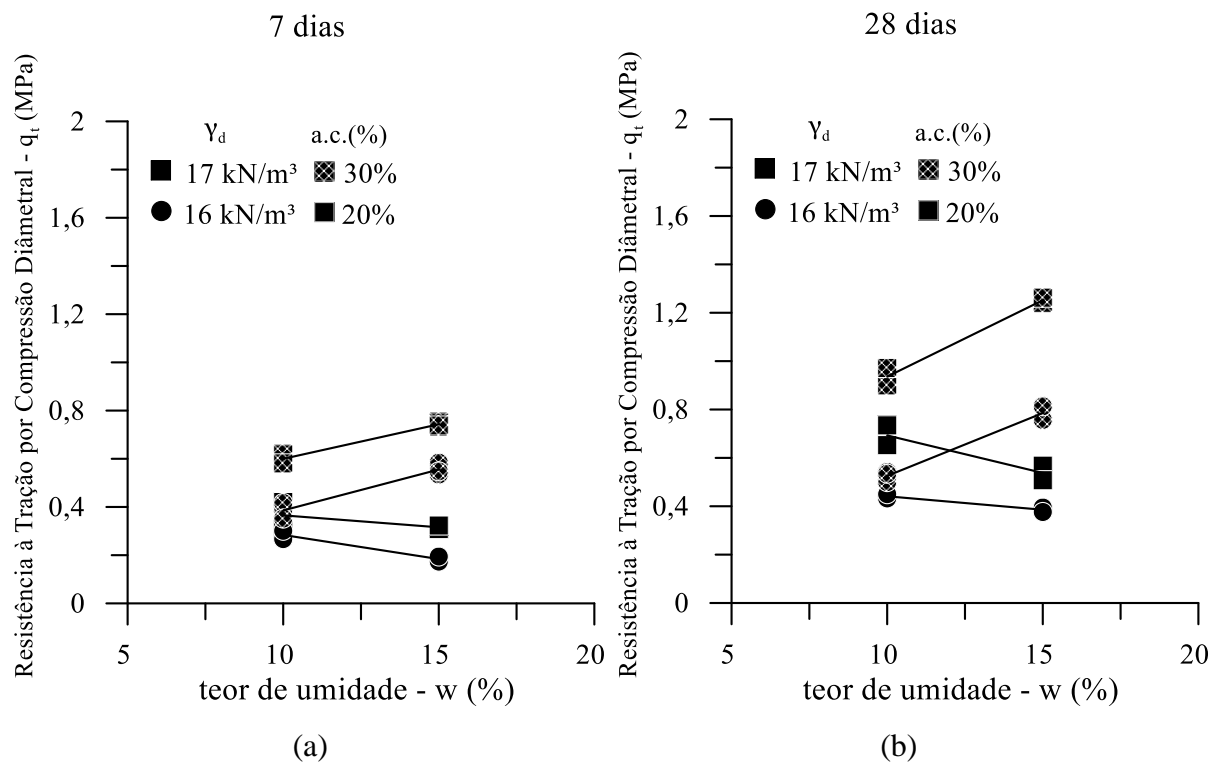


Figura 4.8: Resistência à tração por compressão diâmetral em função do teor de umidade de moldagem (a) para 7 dias de tempo de cura e (b) para 28 dias de tempo de cura

Na Figura 4.9 apresenta-se os resultados em função do teor de agente cimentante (a) para 7 dias de tempo de cura e (b) para 28 dias de tempo de cura. Como mencionado no capítulo anterior, o aumento no teor de agente cimentante proporciona incrementos no valor de resistência.

As resistências máximas obtidas para as misturas estabelecidas são da ordem de 0,74 MPa e 1,25 MPa, para 7 e 28 dias de cura, respectivamente. Estes valores foram obtidos conforme o tratamento número 4 que resultou nos níveis mais altos das variáveis controláveis, ou seja, peso específico aparente seco de 17 kN/m<sup>3</sup>, teor de agente cimentante de 20% e teor de umidade de

moldagem de 15%. Já os valores mínimos obtidos foram da ordem de 0,18 MPa e 0,39 MPa, para 7 e 28 dias de cura, respectivamente

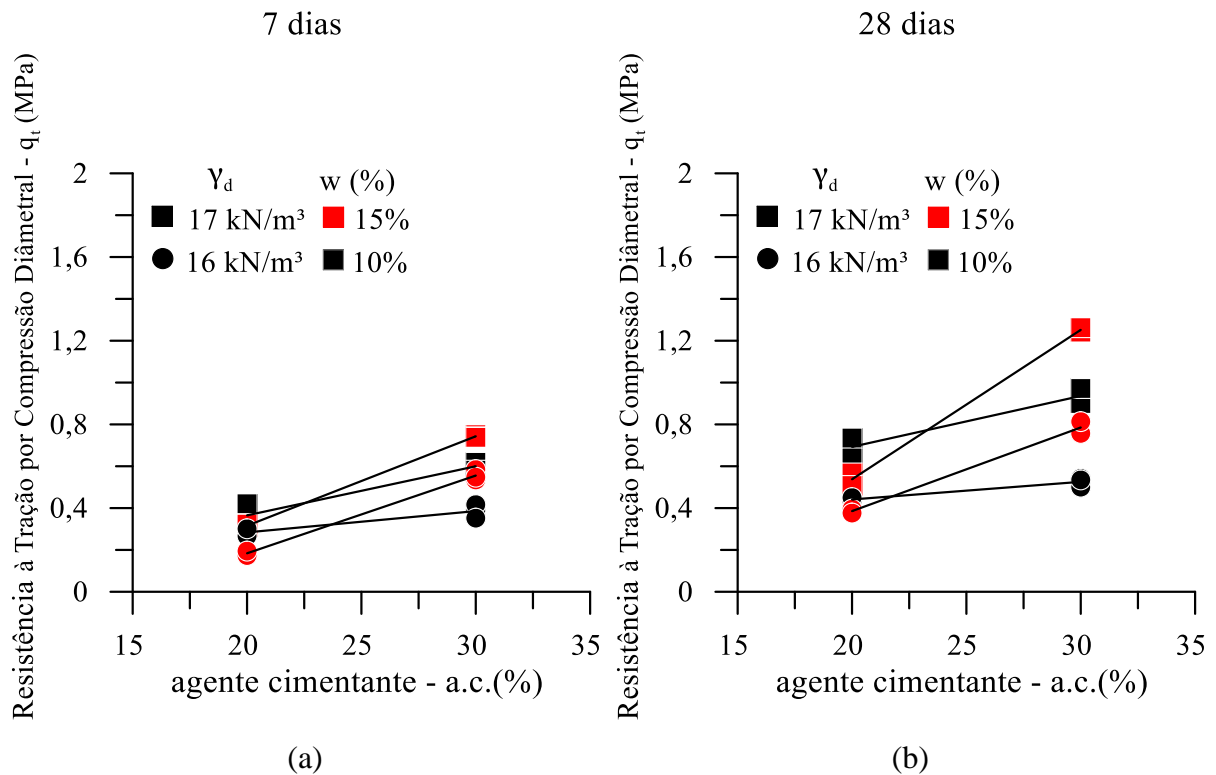


Figura 4.9: Resistência à tração por compressão diametral em função do agente cimentante (a) para 7 dias de tempo de cura e (b) para 28 dias de tempo de cura

#### 4.2.1 Relação entre a resistência à tração por compressão diametral com o índice $\eta/B_{iv}$

O comportamento da resistência à tração por compressão diametral é muito similar ao encontrado para a resistência à compressão simples, onde a redução da relação entre a porosidade e o teor de agente cimentante ocasiona no aumento da resistência, devido ao fato de uma maior mobilização de atrito referente a uma maior área de contato entre as partículas.

As Equações (4.1) e (4.2) representam o comportamento de resistência à tração por compressão diametral em função do índice  $\eta/B_{iv}$ , para os tempos de cura de 7 dias e de 28 dias, respectivamente. Como a Equação (4.8) e (4.9) encontram-se ajustadas para os mesmos expoentes, apenas o escalar A apresenta valores diferentes, sendo assim, a razão entre os



escalares define a magnitude da variação da resistência à tração por compressão diametral com o tempo de cura, que é de 1,50.

$$q_t(\text{MPa})_{7 \text{ dias}} = 9,04 \times 10^4 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,3} \right] \quad (4.8)$$

$$q_t(\text{MPa})_{28 \text{ dias}} = 1,36 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,3} \right] \quad (4.9)$$

De posse aos resultados obtidos, a Figura 4.10 apresenta os dados experimentais empregados para as variáveis controláveis, de forma que fique evidente as considerações sobre o peso específico aparente seco, teor de agente cimentante e teor de umidade de moldagem. Estes resultados encontram-se no **Apêndice B**, destacando-se também as informações sobre a resistência média de cada ponto.

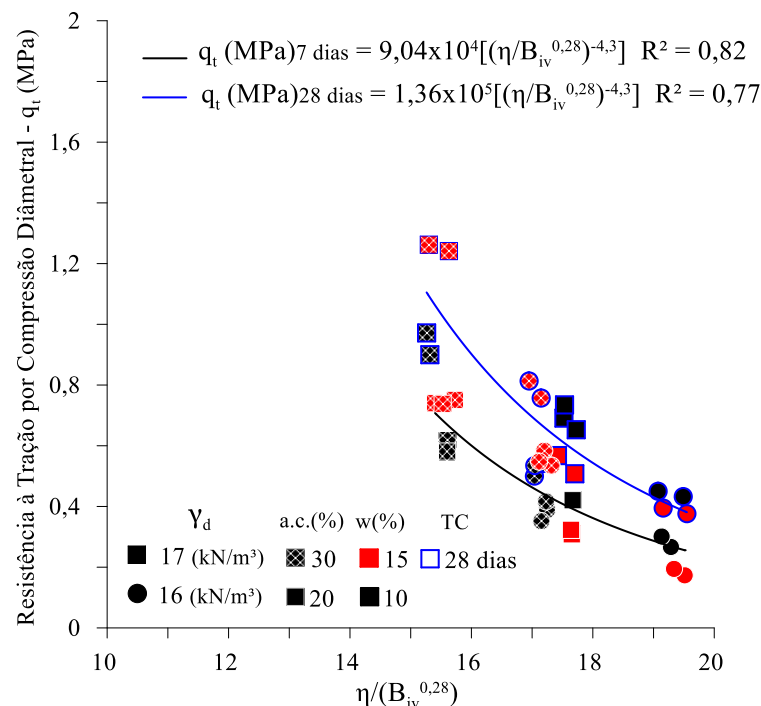


Figura 4.10: Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e o índice  $\eta/B_{iv}$

Outra vez, a partir da comparação das curvas em relação ao tempo de cura fica evidente a influência deste fator na magnitude das resistências, seguindo a tendência de evolução das reações do agente cimentante com o tempo de cura. Percebe-se que os maiores ganhos de resistência são para os tratamentos de menor porosidade e maior teor de agente cimentante, uma

vez que este teor resulta em uma maior precipitação dos produtos de reação da álcali ativação, contribuindo para o aumento da resistência. Quanto ao coeficiente de determinação obtido ( $R^2$  de 0,82 e 0,77), este mostra-se satisfatório considerando a ampla combinação dos efeitos aqui estudados, e de que é possível o ajuste de curvas que descrevem o comportamento de materiais, que até o momento podem ser denominados como inéditos, do ponto de vista da estabilização de solos.

Ainda, a Figura 4.11 apresenta os resultados de resistência à por compressão diametral normalizados frente ao tempo de cura realizado por meio da razão entre os valores obtidos e o valor estabelecido para a resistência correspondente ao  $\eta/B_{iv}^{0,28} = 17,5$ . Este valor foi adotado de acordo com a Figura 4.10, o qual representa um valor central que satisfaz ambas as curvas. Além disso, também foi o valor adotado para a normalização dos resultados do ensaio de resistência à compressão simples. Com isso, a relação única entre a resistência à tração por compressão diametral e o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  é representado pela Equação (4.10).

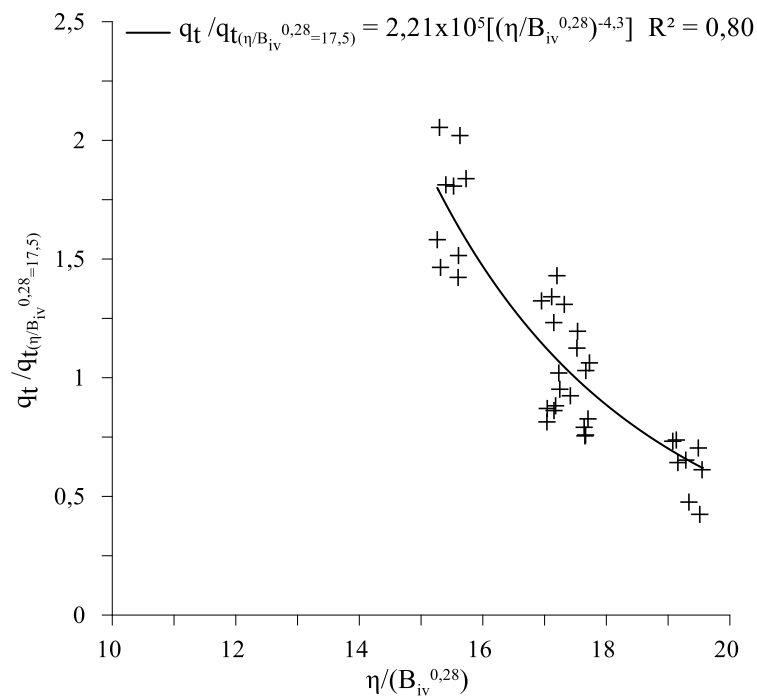


Figura 4.11: Resistência à tração por compressão diametral padronizada

$$\frac{q_t}{q_t \text{ para } \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} = 17,5 \right)} = 2,21 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,3} \right] \quad (4.10)$$

O coeficiente de determinação encontrado a partir da Equação (4.10) foi de 0,80, indicando a possibilidade de normalização dos resultados diante do tempo de cura, indicando uma representatividade da equação para a previsão da resistência à tração por compressão diametral das misturas analisadas.

Ainda, buscou-se a relação do índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para a resistência à tração por compressão diametral, em função dos tratamentos que correspondem a 10% e 15% do teor de umidade de moldagem. Desta forma, a Figura 4.12 (a) expõe as curvas para os 7 dias de tempo de cura e, Figura 4.12 (b) para os 28 dias de tempo de cura.

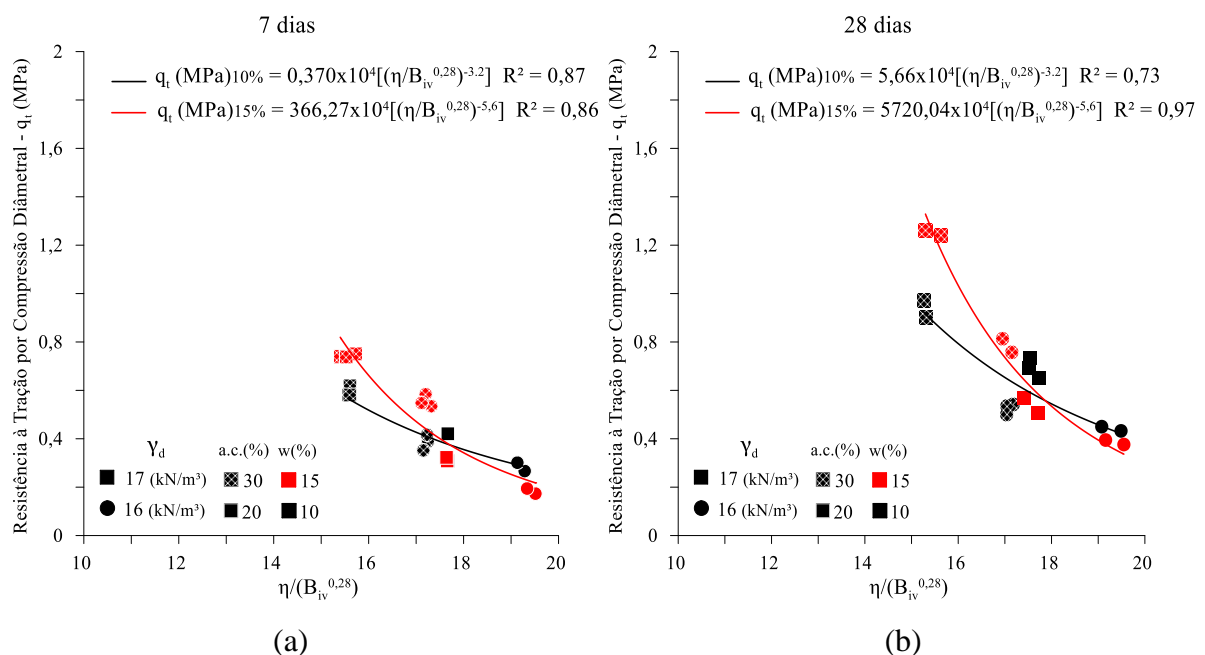


Figura 4.12: Resistência à tração por compressão diametral exposta em função do teor de umidade (a) para 7 dias de tempo de cura e (b) para 28 dias de tempo de cura

Como o teor de umidade de moldagem de 15% causa uma queda na resistência à tração por compressão diametral nas misturas que são compostas por 20% de agente cimentante, é perceptível que as curvas apresentem um comportamento não paralelo, ou seja, em um certo ponto a curva correspondente a 15% de teor de umidade intercepta a curva de 10% de teor de umidade. Ou seja, neste ponto referente a um certo índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  o teor de umidade de

moldagem, dentro da faixa estudada, não interfere na magnitude do valor de resistência que, matematicamente, será encontrado.

Além disso, pode-se perceber que a relação entre os dados experimentais e o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) mais elevados, sendo racional estabelecer uma análise que considere este efeito individualmente. Considerando a Figura 4.12 (a), os valores de  $R^2$  encontrados foram da ordem de 0,87 e 0,86 enquanto, ao analisar todos os dados experimentais juntos (Figura 4.10) o valor do  $R^2$  é de 0,82. Ainda, considerando a Figura 4.12 (b), os valores de  $R^2$  encontrados foram da ordem de 0,73 e 0,97 enquanto, ao analisar todos os dados experimentais juntos (Figura 4.10) o valor do  $R^2$  é de 0,77.

A Equação (4.4) até a Equação (4.14) representam o comportamento de resistência à tração por compressão diametral em função do índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  considerando a análise isolada do teor de umidade, para os tempos de cura de 7 dias e de 28 dias, respectivamente. Nota-se que devido o desmembramento da curva em função do teor de umidade, o expoente externo passa a apresentar valores distintos, de forma que represente um melhor ajuste entre os dados experimentais. Os mesmos foram compatibilizados para ambos tempos de cura e conforme o ensaio de resistência à compressão simples, de forma que facilite quaisquer comparações que se dará através do escalar A.

$$q_t(\text{MPa})_{10\%} = 0,37 \times 10^4 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,2} \right] \quad (4.11)$$

$$q_t(\text{MPa})_{15\%} = 366,27 \times 10^4 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-5,6} \right] \quad (4.12)$$

$$q_t(\text{MPa})_{10\%} = 5,66 \times 10^4 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,2} \right] \quad (4.13)$$

$$q_t(\text{MPa})_{15\%} = 5720,04 \times 10^4 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-5,6} \right] \quad (4.14)$$

### 4.3 RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Figura 4.13 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de resistência à compressão simples e de tração por compressão diametral, de forma que seja possível demonstrar a diferença entre a magnitude dos valores para cada ensaio, de acordo com o tempo de cura de 7 dias e de 28 dias.

A correlação estabelecida entre estes ensaios foi demonstrada por Consoli et al. (2010) e Consoli (2014) como sendo a razão entre a resistência à tração e a resistência à compressão simples ( $\xi = q_t/q_u$ ), em que o valor encontrado foi de 0,15 para misturas de solo arenoso com cimento Portland. Uma faixa de valores similares foi encontrado para diferentes materiais, como em Tebechrani Neto (2020) ao estudar misturas de material asfáltico fresado (RAP) estabilizado com pó de vidro e cal de carbureto, obtendo a razão de 0,15. Já Miguel (2020), estudou o comportamento de um solo dispersivo e sulfatado estabilizado com cal de carbureto e reforçado com fibras de vidro, e encontrou a razão  $\xi = q_t/q_u$  de 0,18. No que diz a respeito a recente utilização de ligantes álcali-ativados para a estabilização de solos, Bruschi (2020) obteve a razão de 0,20.

Desta forma, a razão  $\xi = q_t/q_u$  do presente estudo, pode ser obtida através da relação entre a Equação (4.8) e Equação (4.1) para os 7 dias de cura e, Equação (4.7) e Equação (4.2) para os 28 dias de cura. A Figura 4.13 apresenta a relação entre os ensaios conforme o tempo de cura.

$$\xi = \frac{q_t}{q_u} = \frac{0,90 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,3} \right]}{5,49 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,3} \right]} = 0,16 \quad (4.15)$$

$$\xi = \frac{q_t}{q_u} = \frac{1,35 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,3} \right]}{8,93 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,3} \right]} = 0,15 \quad (4.16)$$

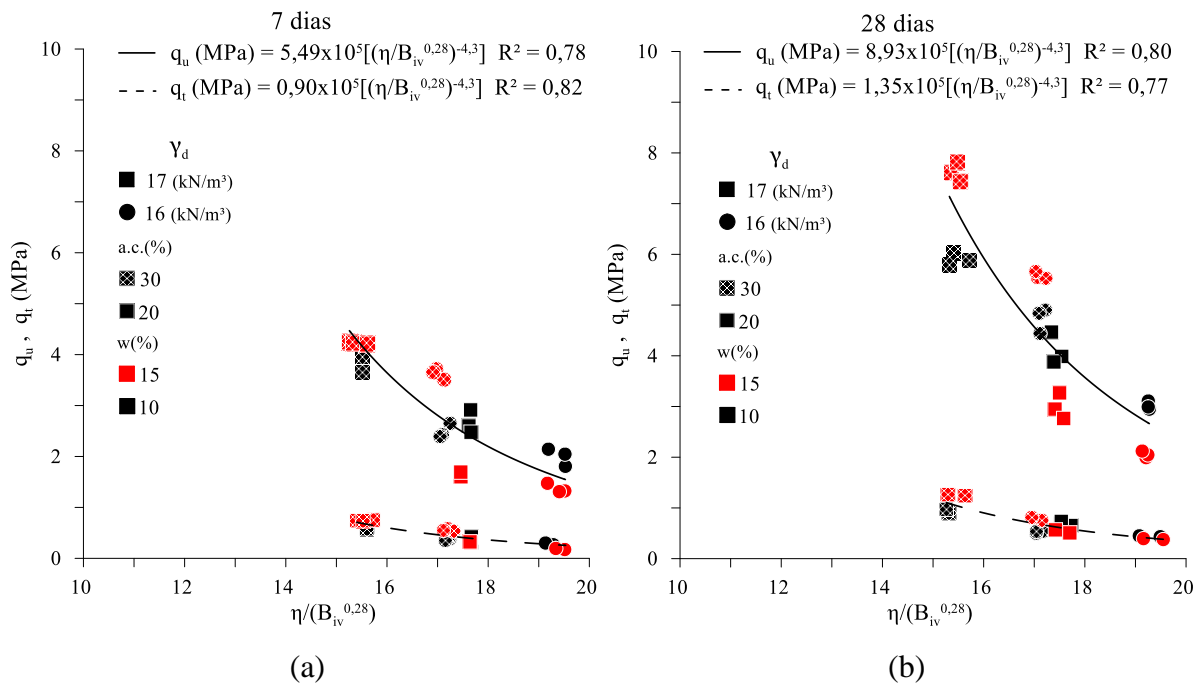


Figura 4.13: Relação entre a resistência à compressão simples e à compressão diametral em função do índice  $\eta/B_{iv}$  (a) para 7 dias de tempo de cura e (b) para 28 dias de tempo de cura

Uma vez que tanto o expoente externo quanto o expoente interno (-4,3 e 0,28) são compatibilizados, a razão demonstrada pela Equação (4.15) e Equação (4.18) se dá em função do escalar A, verificando-se que há uma proporcionalidade entre estes ensaios, a qual é independente da porosidade, do teor volumétrico de agente cimentante, logo, independente do índice  $\eta/B_{iv}$  para as variáveis aqui estudadas. Ou seja, a razão  $\xi = q_t/q_u$  encontrada significa que o valor da resistência à tração por compressão diametral é equivalente a 15% ou 16% da resistência à compressão simples, o qual é evidenciado através das curvas da Figura 4.13 e corroborado pelos resultados encontrados previamente na literatura.

Comprovando a proporcionalidade entre os ensaios, a Figura 4.14 aborda a relação direta entre os resultados de todos os 8 tratamentos executados para cada tempo de cura. Nota-se, que há um comportamento linear entre os pontos, onde é possível determinar uma equação que representa o comportamento abrangendo ambos tempos de cura, conforme a Equação (4.17)

$$q_t(\text{MPa}) = 0,153 \cdot q_u \quad (4.17)$$

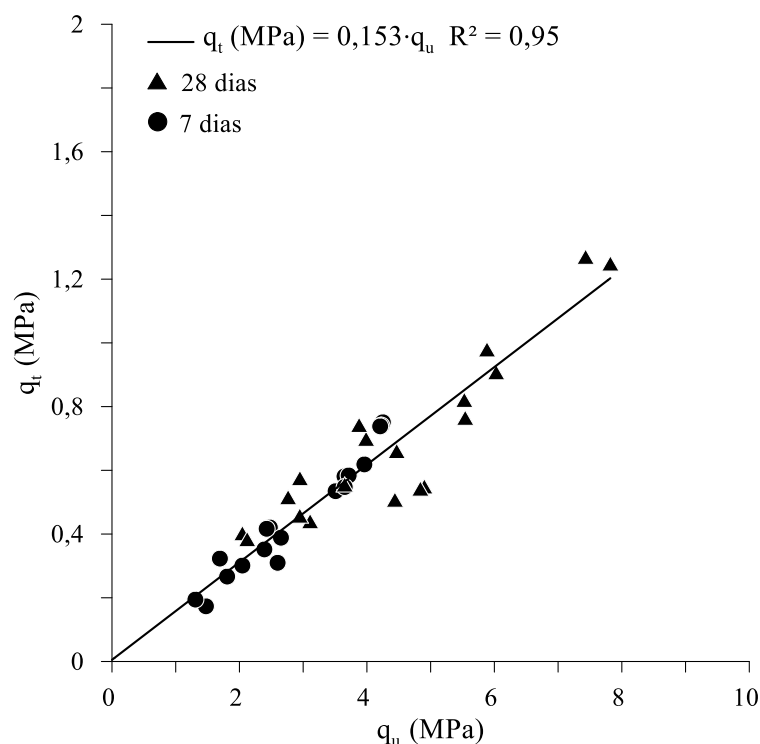


Figura 4.14: Relação entre a resistência à compressão simples e à compressão diametral

O coeficiente de correlação obtido foi de  $R^2 = 0,95$ , o que indica uma ótima correlação entre os resultados aqui exposto através de uma tendência linear. Sendo assim, é possível validar a metodologia de dosagem racional através do índice  $\eta/B_{iv}$  através de ensaios de resistência a compressão simples ou de tração por compressão diametral, uma vez que estes ensaios estão intimamente relacionados através da Equação (4.17).

#### 4.4 MÓDULO CISALHANTE INICIAL

O módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ) para pequenas deformações foi obtido previamente ao ensaio de resistência à compressão simples. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 4.15 e Figura 4.16, em função do teor de umidade de moldagem e do agente cimentante, respectivamente. Ao contrário do comportamento apresentado anteriormente para os ensaios de resistência, o módulo cisalhante inicial não sofre redução de sua magnitude ao variar-se o teor de umidade de moldagem referente aos tratamentos de 20% de agente cimentante, o que pode-se perceber é que ele se mantém praticamente constante perante esta variação. Já para 30% de agente cimentante, há ganhos significativos na rigidez. Da mesma forma, quando comparado

em relação ao teor de agente cimentante, os tratamentos que apresentam teor de umidade de 10% apresentam-se praticamente constantes.

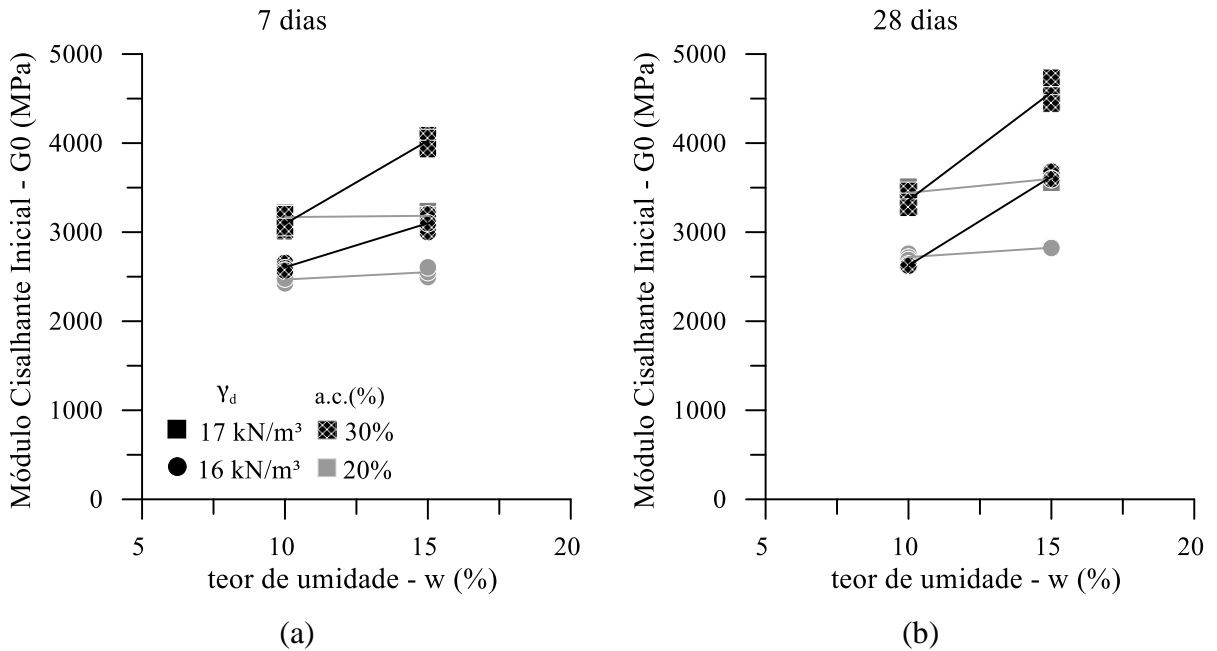


Figura 4.15: Rigidez inicial em função do teor de umidade (a) para 7 dias de tempo de cura e (b) para 28 dias de tempo de cura

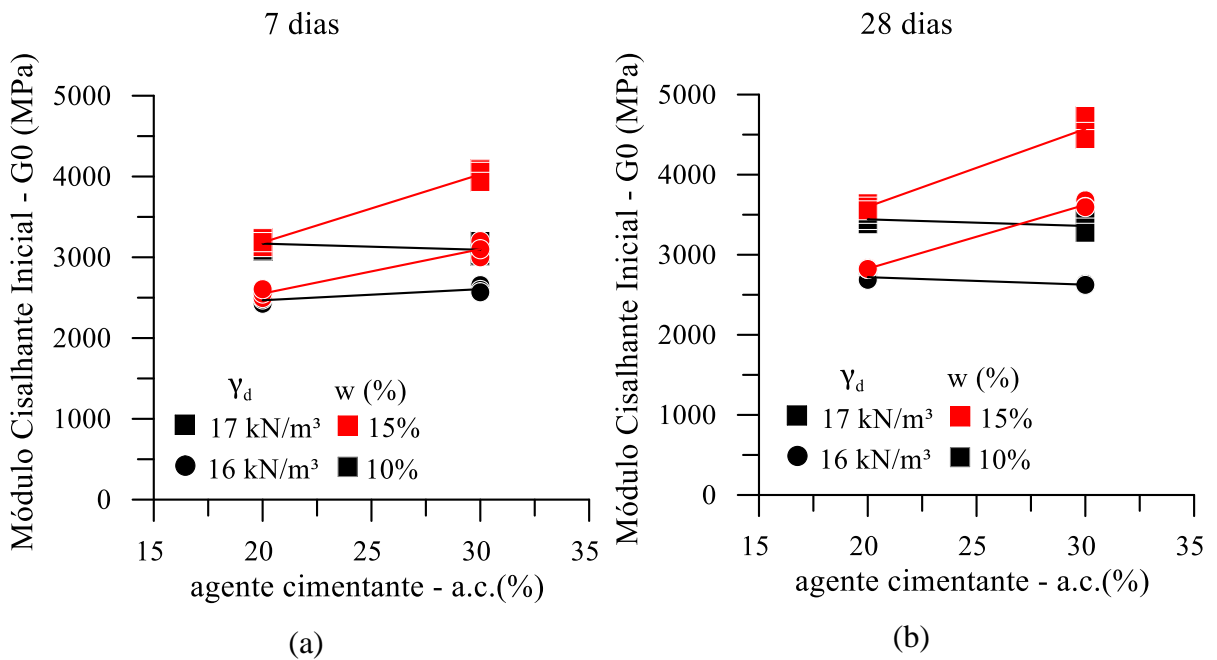


Figura 4.16: Rigidez inicial em função do agente - cimentante (a) para 7 dias de tempo de cura e (b) para 28 dias de tempo de cura



A partir dos gráficos expostos, pode-se entender em primeiro momento é que o módulo cisalhante inicial não se comporta da mesma maneira conforme a resistência à compressão simples diminui, sendo que naturalmente, espera-se uma proporção direta entre resistência e rigidez (BRUSCHI, 2020; CAICEDO, 2020; CONSOLI et al., 2018, 2020; MIGUEL, 2020; SCHEUERMANN FILHO, 2019) . Ou seja, é presumível que os tratamentos que apresentam maiores resistências apresentem maiores rigidezes, o que de fato foi encontrado, mas quando observamos os tratamentos que sofrem redução de resistência devido ao teor de umidade de moldagem, a rigidez se mantém constante. Cabe destacar que nenhuma das pesquisas supracitadas obtiveram este comportamento de redução da resistência, logo uma também esperada redução na rigidez, diante da variação do teor de umidade de moldagem ou de outras variáveis controláveis.

Desta maneira, busca-se através da análise estatística a identificação de quais os fatores controláveis estão influenciando significativamente neste comportamento. A Figura 4.17 apresenta do gráfico de pareto dos efeitos padronizados e a Figura 4.18, os efeitos principais, os quais indicam que os fatores mais significantes foi o peso específico aparente seco (A), seguido pelo teor de umidade (C) e tempo de cura (D). Os efeitos podem ser verificados através da ANOVA, apresentada no **Apêndice A**. De fato, pode-se perceber a discrepância nos fatores estatisticamente significantes quando verificamos os resultados para a resistência à compressão simples, onde o fator mais significativo foi o teor de agente cimentante (B) e somente o teor de umidade (C) não conferiu significância para os tratamentos estabelecidos.

O fato do peso específico aparente seco (A) ser o fator mais influente estatisticamente vai de acordo com os resultados apresentados na Figura 4.15 e na Figura 4.16, onde é possível perceber uma grande quantidade de pontos em que os valores para o módulo cisalhante inicial são muito similares, e que estes pontos se agrupam em função deste fator. Ou seja, além dos tratamentos que possuem 20% de agente cimentante, como já mencionado, a rigidez se mantém constante diante do teor de umidade de moldagem, há o tratamento em que o emprego de 30% de agente cimentante e 10% de teor de umidade de moldagem remete a um valor muito similar de módulo cisalhante inicial destes mencionados, para cada peso específico aparente seco. Desta forma, há 3 valores de rigidez para o mesmo peso específico aparente seco que são extremamente similares.

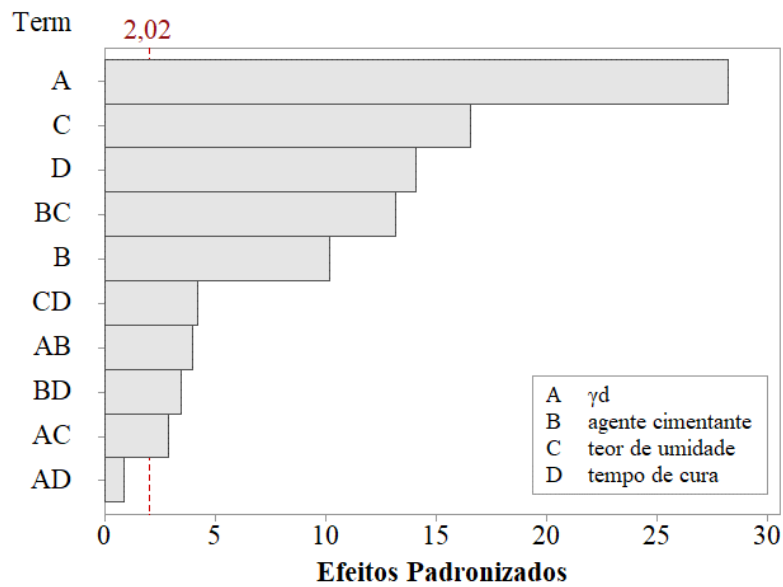


Figura 4.17: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a rigidez inicial

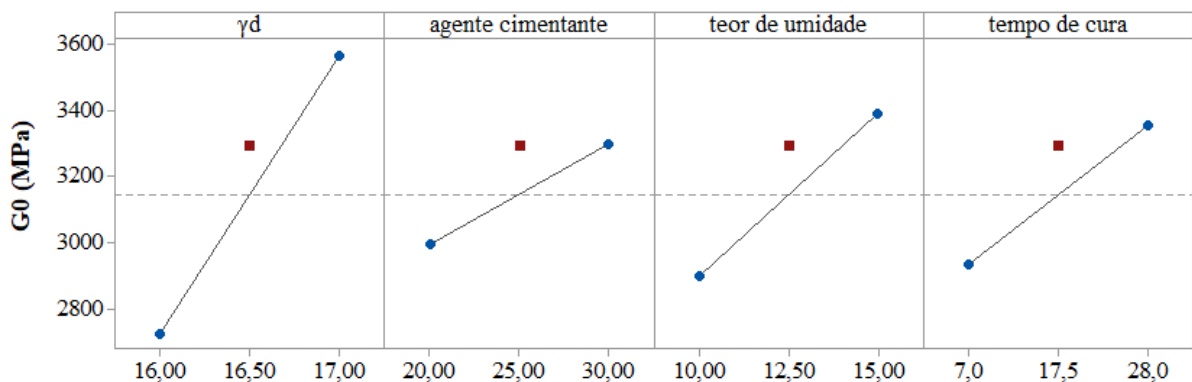


Figura 4.18: Gráfico de efeitos principais para a rigidez inicial

Outra discrepância é evidenciada através da média do tratamento referente ao ponto central, conforme a Figura 4.18, o qual tem por objetivo determinar a presença de um comportamento linear ou não linear entre os fatores principais e variável resposta. Como pode-se perceber, um comportamento relativamente linear é evidenciado em todos os fatores principais sobre o ensaio de módulo cisalhante inicial, enquanto que para o ensaio de resistência à compressão simples é evidente o comportamento não-linear.

#### 4.4.1 Relação entre a rigidez inicial e o índice $\eta/B_{iv}$

Analogamente aos resultados obtidos para os ensaios mecânicos de resistência, a rigidez inicial foi relacionada com o índice  $\eta/B_{iv}$ , adotando-se o mesmo expoente interno (k) de 0,28, visto que se busca uma singularidade para descrever o comportamento dos tratamentos. O expoente externo (B) foi ajustado para -1,6, de forma que as equações de tendência do comportamento de rigidez inicial sejam igualadas. Desta forma, o escalar A foi recalculado para ajustar-se a este expoente.

As Equações (4.18) e (4.19) representam o comportamento da rigidez inicial em função do índice  $\eta/(B_{iv}^k)$ , para os tempos de cura de 7 dias e de 28 dias, respectivamente.

$$G_0(\text{MPa})_{7 \text{ dias}} = 2,86 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-1,6} \right] \quad (4.18)$$

$$G_0(\text{MPa})_{28 \text{ dias}} = 3,17 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-1,6} \right] \quad (4.19)$$

A Figura 4.19 apresenta os dados experimentais empregados para as variáveis controláveis, de forma que fique evidente as considerações sobre o peso específico, teor de agente cimentante, teor de umidade de moldagem e o tempo de cura. Estes resultados encontram-se no **Apêndice B**, destacando-se também as informações sobre a rigidez média de cada ponto.

Estas equações são muito similares, em que o quociente entre elas é de apenas 1,10. Isto é, para uma amostra de  $G_0$  submetida ao tempo de cura de 28 dias, os ganhos de rigidez quando comparada à mesma amostra aos 7 dias, será de apenas 13%. Como mencionado anteriormente, há uma gama de valores de rigidezes que se mostram muito similares e, aliado ao pequeno incremento em função do tempo de cura, percebe-se uma nuvem pontos diante da maior porosidade e conforme esta vai diminuindo, os pontos ficam mais evidentes. Desta forma, também é perceptível que os maiores valores de módulo cisalhante inicial foram obtidos para os tratamentos com menor porosidade, maior teor de agente cimentante e maior teor de umidade de moldagem, como naturalmente era esperado visto que estes tratamentos foram os que apresentaram maiores valores de resistência à compressão simples.

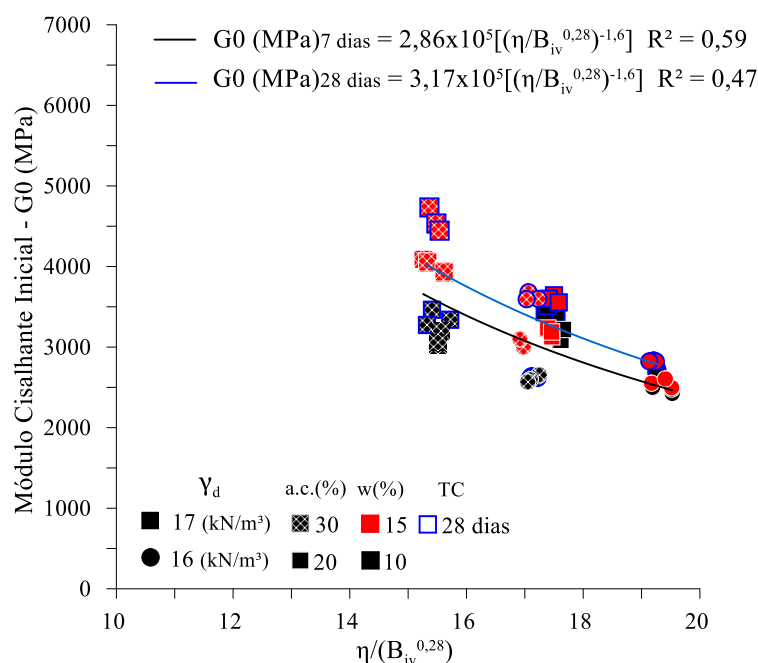


Figura 4.19: Relação entre a rigidez inicial e o índice  $\eta/B_{iv}$

A partir da relação obtida, o coeficiente de determinação ( $R^2$  0,59 e 0,47) encontrado para o ajuste matemático não se mostra como um valor certamente adequado para prever o comportamento da rigidez inicial. O que naturalmente é perceptível, pois nota-se uma grande dispersão entre os dados experimentais de rigidez obtidos. Este baixo  $R^2$  não quer dizer que tenha ocorrido erro nos resultados, visto que é o mesmo corpo de prova do ensaio de resistência à compressão simples, apenas que para a relação  $\eta/B_{iv}$  aliada a equação que descreve o comportamento do material, a estimativa deste parâmetro deve ser avaliada com cautela.

Como já realizado anteriormente, é possível obter uma relação única entre a rigidez inicial e o índice  $\eta/B_{iv}$ , a qual mostra-se independente do tempo de cura, através da razão entre os resultados de rigidez por um valor de rigidez estabelecido para um  $\eta/(B_{iv}^{0,28}) = 17,5$ , conforme a Equação (4.22) e a Figura 4.20. Obviamente, a dispersão entre os dados é mantida e então o coeficiente de determinação tende a ser baixo.

$$\frac{G_0}{G_0 \text{ para } \left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}}\right) = 17,5} = 97,49 \cdot \left[ \left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}}\right)^{-1,6} \right] \quad (4.20)$$

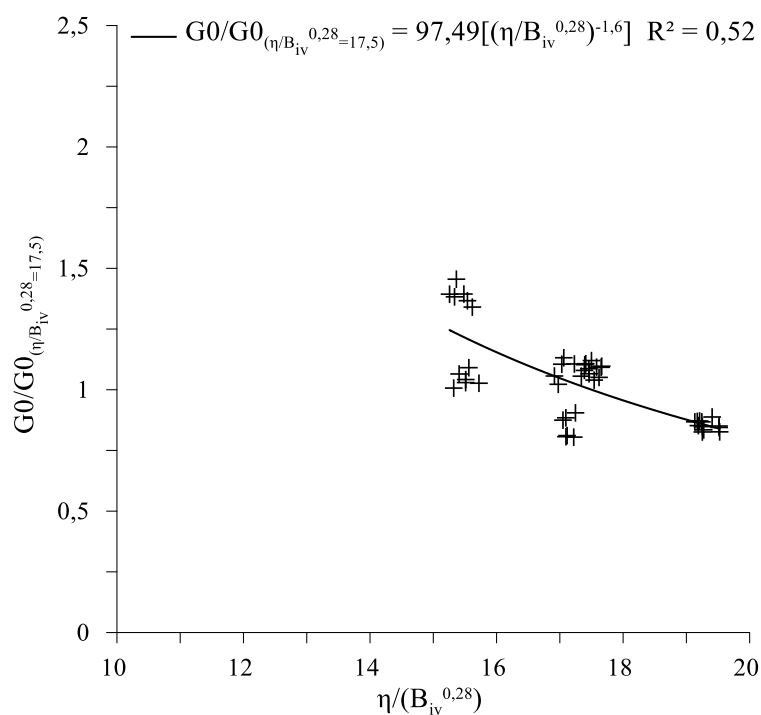


Figura 4.20: Rigidez inicial normalizada

Em busca de uma melhor adequabilidade dos resultados, assim como nos ensaios de resistência, determinou-se a relação entre o módulo cisalhante inicial com o índice  $\eta/B_{iv}$  exposto em função do teor de umidade de moldagem, conforme a Figura 4.21 (a) para os 7 dias de tempo de cura e, (b) para os 28 dias de tempo de cura. É possível perceber que as curvas determinadas para 15% de teor de umidade de moldagem apresentam coeficientes de determinação ( $R^2$ ) extremamente mais elevados, da ordem de 0,95 e de 0,98 enquanto ao analisarmos todos os dados experimentais juntos (Figura 4.19) o valor do  $R^2$  é de 0,59 e 0,47. Já para as curvas de 10% de teor de umidade de moldagem, observa-se um baixo valor no coeficiente de determinação, uma vez que os valores de rigidez são constantes para um mesmo índice  $\eta/B_{iv}$ .

A Equação (4.21) até a Equação (4.24) representam o comportamento de resistência à compressão simples em função do índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  considerando a análise isolada do teor de umidade, para os tempos de cura de 7 dias e de 28 dias, respectivamente.

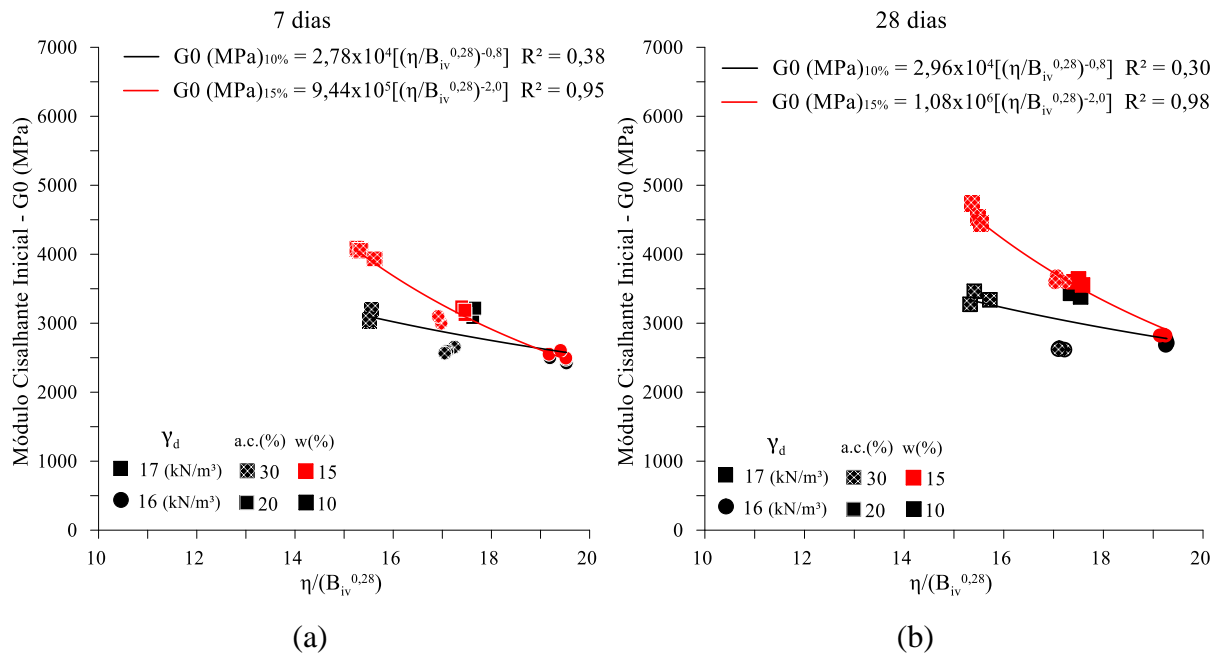


Figura 4.21: Módulo Cisalhante Inicial exposto em função do teor de umidade

$$G0 \text{ (MPa)}_{10\%} = 2,78 \times 10^4 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-0,8} \right] \quad (4.21)$$

$$G0 \text{ (MPa)}_{15\%} = 9,44 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-2,0} \right] \quad (4.22)$$

$$G0 \text{ (MPa)}_{10\%} = 2,96 \times 10^4 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-0,8} \right] \quad (4.23)$$

$$G0 \text{ (MPa)}_{15\%} = 1,08 \times 10^6 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-2,0} \right] \quad (4.24)$$

## 4.5 DURABILIDADE

Os resultados relativos ao ensaio de durabilidade, executados para os 8 tratamentos e o ponto central encontram-se apresentados em termos da perda de massa individual por ciclo e perda de massa acumulada (PMA), conforme a Figura 4.22 e Figura 4.23, respectivamente.

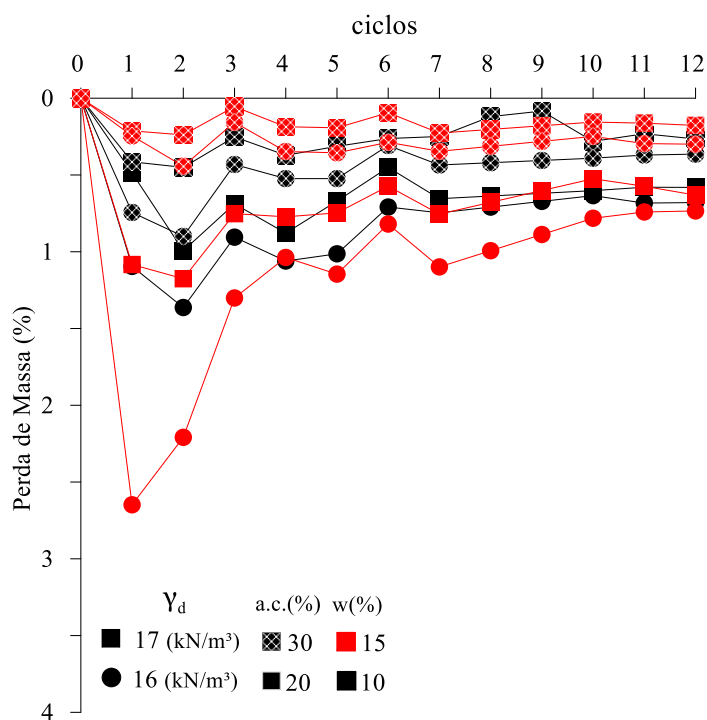


Figura 4.22: Perda de massa individual ao longo dos ciclos

Percebe-se através da Figura 4.22, que o ciclo 1 e 2 apresentaram uma taxa de perda de massa individual maior, quando comparada aos demais ciclos. Já para os ciclos subsequentes, evidencia-se certa regularidade na porcentagem de perda de massa individual, ou seja, tornaram-se praticamente constante. Ainda, a mistura composta por peso específico aparente seco de 16 kN/m<sup>3</sup>, teor de agente cimentante de 20% e teor de umidade de moldagem de 15% é a que apresenta maior variabilidade de perda de massa individual nos primeiros ciclos, destoando-se dos demais tratamentos. Analogamente ao comportamento apresentado para os ensaios de resistência, este tratamento é que fornece a menor magnitude de desempenho para a resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral, devido as circunstâncias de maior porosidade e da interação entre o teor de agente cimentante e o teor de umidade de moldagem.

De acordo com os requisitos mínimos de durabilidade apresentados pela PCA (1992), a PMA após 12 ciclos de molhagem, secagem e escovação deve estar no limite de até 14% para solos do grupo A3, areias finas não plásticas, de acordo com a classificação HRB (AASHTO, 1973), como é o caso da Areia de Osório. No que diz respeito a materiais estabilizados para o emprego como camada de base ou sub-base de pavimentos, a USACE (1994) estabelece que o critério

de perda de massa acumulada, após os 12 ciclos de molhagem, secagem e escovação para solos tratados com agentes químicos como o cimento, cal e/ou cinza volante não deve ser superior a 11%, para solos granulares com índice de plasticidade menor que 10%. O comportamento de perda de massa individual reflete-se na perda de massa acumulada, como pode-se observar na Figura 4.23, onde é exposto a limitação da PCA (1992) e da USACE (1994).

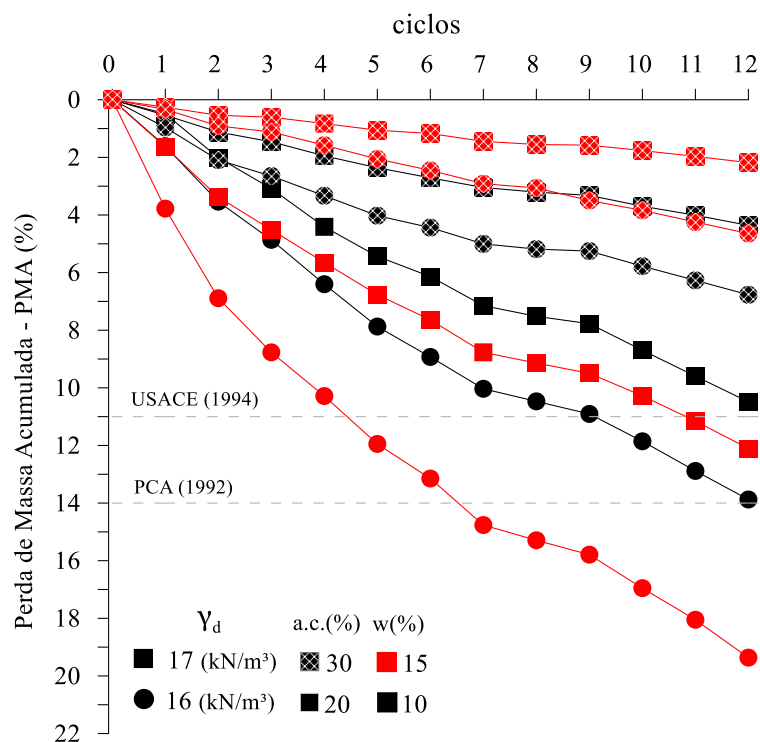


Figura 4.23: Perda de massa acumulada ao longo dos ciclos

Apenas um tratamento ultrapassa o limite da PCA (1992) de perda de massa acumulada de até 14%, o qual foi descrito anteriormente como o que apresenta uma elevada perda de massa individual no ciclo 1, devido às características da mistura, por consequência a PMA atingiu o valor de 19,37%. Já para a limitação da USACE (1994), três tratamentos (2, 5 e 6, conforme a Tabela 4.1) superaram o valor de 11% de perda de massa acumulada, os quais todos são compostos por 20% de agente cimentante. Neste sentido, é possível perceber que a Figura 4.23 pode ser subdividida conforme o teor de agente cimentante empregado, isto é, todos tratamentos com 30% de agente cimentante encontram-se abaixo dos 7% de PMA enquanto todos os tratamentos com 20% de agente cimentante encontram-se acima dos 10% de PMA.



A Tabela 4.1 apresenta os resultados de PMA ao final do 12º ciclo e a Figura 4.24 apresenta o estado físico dos corpos de prova utilizados no ensaio de durabilidade, correspondente ao tratamento de maior PMA e de menor PMA, respectivamente. É possível visualizar a influência do peso específico aparente seco, e da interação entre o agente cimentante e o teor de umidade que provocam nas amostras. Este aspecto corrobora os resultados de PMA, onde amostras que sofrem maiores perdas de massa são aquelas que apresentam alterações volumétricas expressivas, ao comparar-se com o estado inicial da amostra. Analogamente, com o aumento do peso específico e do teor de agente cimentante, a menor PMA é de 2,18% correspondente ao tratamento 4, o qual apresenta o maior desempenho no ensaio de resistência à compressão simples, 4,23 MPa aos 7 dias de cura.

Tabela 4.1: Resultados de Perda de Massa Acumulada (PMA) para os 8 tratamentos

Tratamento	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	agente cimentante (%)	teor de umidade (%)	PMA (%)
1	17	20	10	10,48
2	17	20	15	12,11
3	17	30	10	4,36
4	17	30	15	2,18
5	16	20	10	13,88
6	16	20	15	19,37
7	16	30	10	6,77
8	16	30	15	4,64



Figura 4.24: Corpos de prova de maior perda de massa (PMA = 19,37%) e menor perda de massa (PMA = 2,18%) ao final do 12º ciclo, respectivamente

A Figura 4.25 apresenta o gráfico de pareto de efeitos padronizados relativo aos resultados do ensaio de durabilidade, bem como a Figura 4.26 expõe os efeitos principais. Uma vez que o

ensaio de durabilidade foi realizado com um número menor de amostras por tratamento, o nível de significância adotado foi de 0,15 e não mais 0,05, ou seja, ao validar o modelo como representativo para o experimento, há uma probabilidade que 15% desta hipótese não seja verdadeira. Não alterar o nível de significância para este ensaio, implicaria na desconsideração da significância estatística de alguns efeitos importantes que já se mostraram influentes através dos ensaios de resistência. Os efeitos apresentados na podem ser verificados através da ANOVA, apresentada no **Apêndice A**.

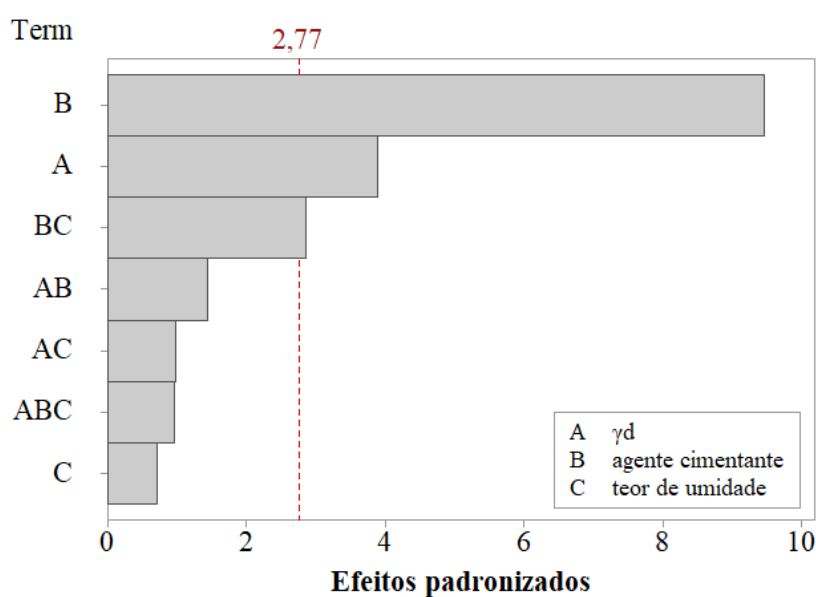


Figura 4.25: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para durabilidade

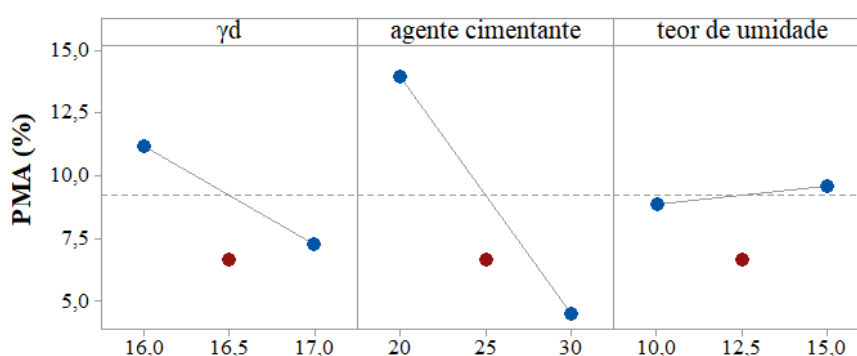


Figura 4.26: Gráfico de efeitos principais para a durabilidade

A partir da análise dos resultados apresentados, considerando-se os limites experimentais aqui existentes, nota-se a grande influência do teor de agente cimentante (B) sobre a perda de massa

acumulada, o qual já havia se mostrado extremamente influente em alterar a resposta das misturas, no que diz respeito ao ensaio de resistência à compressão simples. Ainda, uma vez que a execução do ensaio de durabilidade consiste em 12 ciclos alternados de molhagem (5h), exposição a temperaturas elevadas (71°C) ao longo de 42 h, espera-se que ocorra certa catálise no desenvolvimento dos produtos de reação do sistema álcali-ativado, devido à ação prolongada da temperatura sobre as amostras. O que corrobora o fato da perda de massa acumulada ser inferior a 7% para os tratamentos que possuem 30% de agente cimentante, logo é perceptível que este efeito seja mais influente estatisticamente.

Novamente, a grande importância da porosidade, refletida através do efeito do peso específico aparente seco (A) com relação à durabilidade, se explica pelas mesmas razões já apontadas, em que uma maior proximidade entre as partículas devido a menor porosidade implica na maior mobilização de atrito e portanto, potencializa o desempenho de resistência mecânica contra a abrasão da escova.

No que diz respeito ao teor de umidade de moldagem (C), embora não haja evidências estatísticas suficientes que comprove o seu efeito decisivo no desempenho das misturas, visto que este é o efeito de menor magnitude, a variação no teor de umidade torna-se significativa quando associada ao efeito do agente cimentante, conforme a interação de segunda ordem (BC). Como já descrito anteriormente, esta associação ocasiona na redução da resistência e no aumento de perda de massa acumulada, quando analisamos os tratamentos que possuem 20% de agente cimentante e 15% de teor de umidade.

#### 4.5.1 Relação entre a durabilidade com o índice $\eta/B_{iv}$

Os resultados de durabilidade, em termos de perda de massa acumulada (PMA), foram relacionados ao índice  $\eta/B_{iv}$  para os ciclos 1, 3, 6, 9 e 12. Dessa forma, cinco relações distintas foram obtidas (uma para cada ciclo) conforme a Equação (4.25) até a Equação (4.31).

$$PMA_{\text{ciclo } 1}(\%) = 9,36 \times 10^{-11} \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{8,2} \right] \quad (4.25)$$

$$PMA_{\text{ciclo } 3}(\%) = 2,47 \times 10^{-10} \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{8,2} \right] \quad (4.26)$$

$$PMA_{\text{ciclo } 6}(\%) = 4,07 \times 10^{-10} \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{8,2} \right] \quad (4.27)$$

$$PMA_{\text{ciclo } 9}(\%) = 4,97 \times 10^{-10} \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{8,2} \right] \quad (4.28)$$

$$PMA_{\text{ciclo } 12}(\%) = 6,27 \times 10^{-10} \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{8,2} \right] \quad (4.29)$$

Pode-se destacar que as equações apresentadas apresentam tanto o expoente interno (0,28) quanto o expoente externo (8,2) iguais, de forma que apenas o escalar A difere entre elas. Visto esta comparação, quanto maior o número de ciclos há um aumento no escalar e, consequentemente há um aumento na PMA. O expoente externo apresentado vai de encontro com pesquisas de CONSOLI et al. (2019c, 2021), onde os autores estabilizaram o mesmo solo, a areia de Osório, mas empregando como material pozolânico a cinza de casca de arroz juntamente com a cal de carbureto, submetidos a temperaturas de cura de 23°C e de 40°C.

Este comportamento pode ser observado na Figura 4.27, bem como a relação com o índice  $\eta/B_{iv}$ . De maneira geral, é possível notar que a redução entre a porosidade e o teor de agente cimentante ocasiona em um melhor comportamento mecânico das misturas, dada a redução da PMA.

Assim como apresentou-se os resultados em função do teor de umidade para os ensaios de resistência e rigidez, a Figura 4.28 expõe esta relação bem como as Equação (4.30) até a Equação (4.39) descrevem este comportamento.

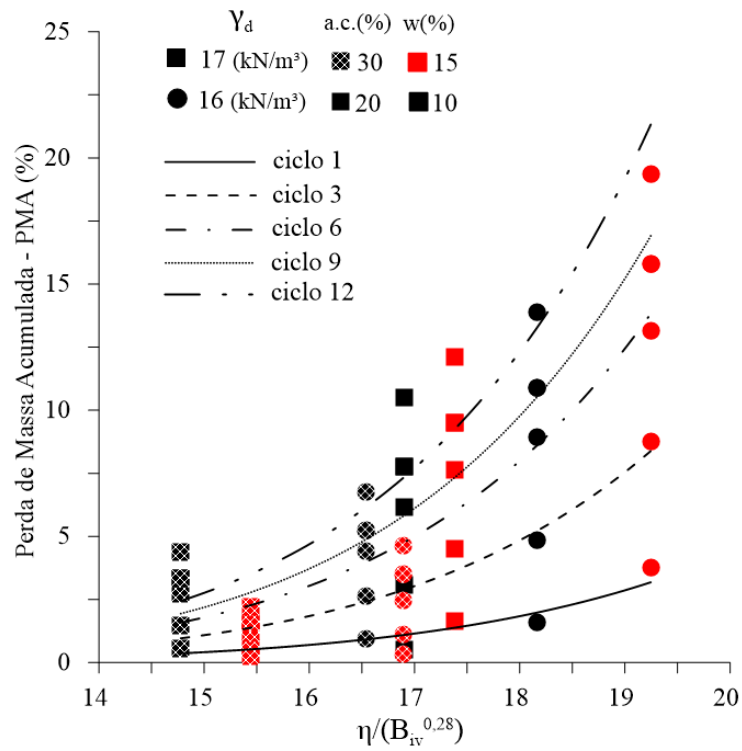


Figura 4.27: Relação entre a perda de massa acumulada ao longo dos ciclos e o índice  $\eta/B_{iv}$

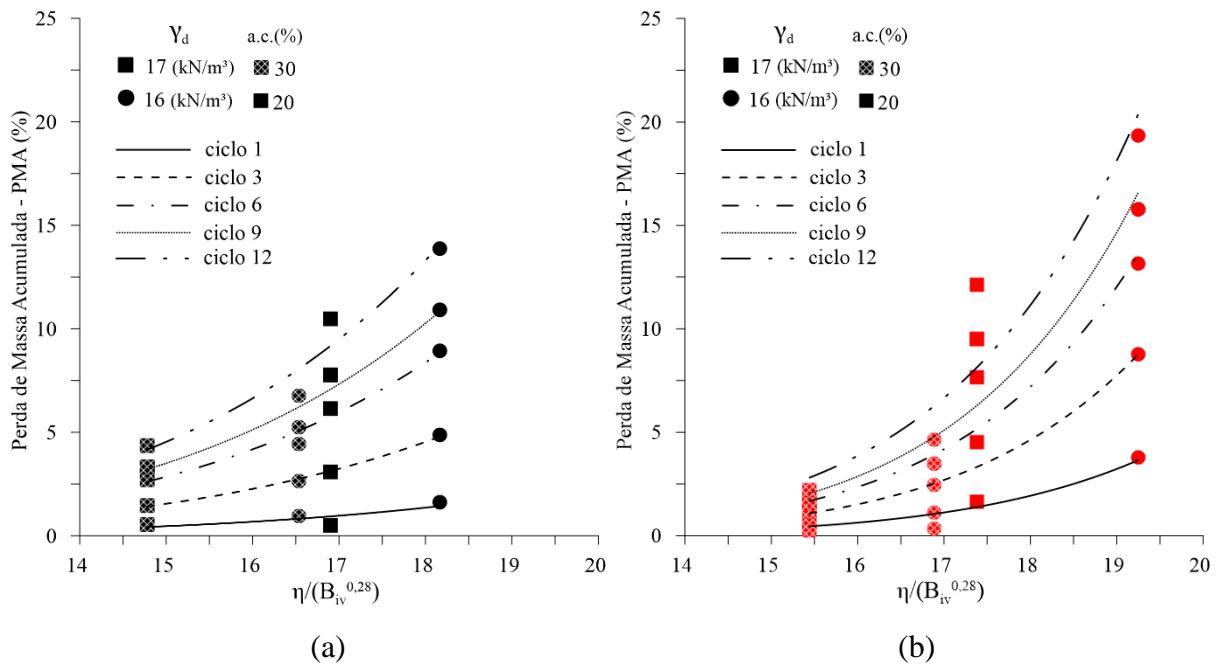


Figura 4.28: Perda de massa acumulada ao longo dos ciclos exposta em função do teor de umidade (a) para 10% (b) para 15%

$$PMA_{\text{ciclo 1 } 10\%}(\%) = 5,33 \times 10^{-9} \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{5,9} \right] \quad (4.30)$$

$$PMA_{\text{ciclo 3 } 10\%}(\%) = 1,78 \times 10^{-7} \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{5,9} \right] \quad (4.31)$$

$$PMA_{\text{ciclo 6 } 10\%}(\%) = 3,2 \times 10^{-7} \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{5,9} \right] \quad (4.32)$$

$$PMA_{\text{ciclo 9 } 10\%}(\%) = 4,03 \times 10^{-7} \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{5,9} \right] \quad (4.33)$$

$$PMA_{\text{ciclo 12 } 10\%}(\%) = 5,22 \times 10^{-7} \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{5,9} \right] \quad (4.34)$$

$$PMA_{\text{ciclo 1 } 15\%}(\%) = 2,29 \times 10^{-12} \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{9,5} \right] \quad (4.35)$$

$$PMA_{\text{ciclo 3 } 15\%}(\%) = 5,51 \times 10^{-12} \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{9,5} \right] \quad (4.36)$$

$$PMA_{\text{ciclo 6 } 15\%}(\%) = 8,56 \times 10^{-12} \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{9,5} \right] \quad (4.37)$$

$$PMA_{\text{ciclo 9 } 15\%}(\%) = 1,04 \times 10^{-11} \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{9,5} \right] \quad (4.38)$$

$$PMA_{\text{ciclo 12 } 15\%}(\%) = 1,29 \times 10^{-11} \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{9,5} \right] \quad (4.39)$$

A Tabela 4.2 apresenta um comparativo entre os Coeficientes de Determinação ( $R^2$ ) obtidos para todas equações matemáticas apresentadas anteriormente. De maneira geral, percebe-se que foi possível atingir valores elevados do coeficiente de determinação para todas as equações, o que indica a viabilidade do índice  $\eta/B_{iv}$  para a previsão da PMA. Ainda, ao expor os resultados em função do teor de umidade ( $PMA_{10\%}$  e  $PMA_{15\%}$ ) encontra-se um ajuste mais satisfatório entre os resultados, o qual atingiu valor máximo ( $R^2 = 1$ ) para o ciclo 3 com 10% de teor de umidade de moldagem.

Tabela 4.2: Comparativo entre os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos

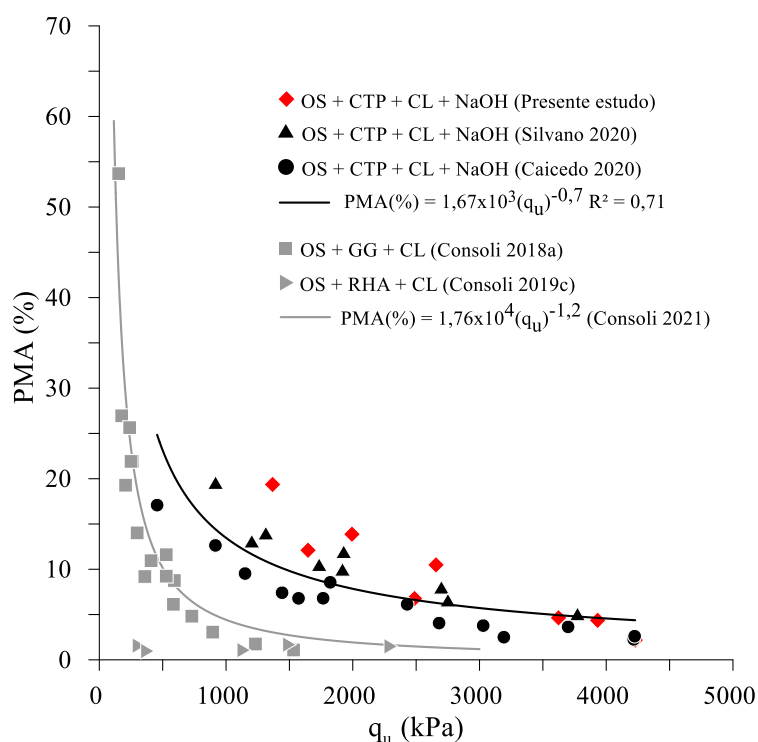
CICLO	PMA	PMA <sub>10%</sub>	PMA <sub>15%</sub>
1	0,83	0,67	0,92
3	0,90	1,00	0,91
6	0,88	0,97	0,90
9	0,88	0,95	0,90
12	0,85	0,93	0,88

#### 4.5.2 Relação entre a perda de massa acumulada e a resistência à compressão simples

Consoli et al. (2021) trouxeram uma validação para a relação entre a perda de massa acumulada e a resistência à compressão simples através de resultados experimentais baseados em diversos solos, como material asfáltico fresado (RAP), rejeito de mineração, solo siltoso e solo arenoso estabilizados com diferentes materiais pozolanicos e cimentantes, onde foi observado que o comportamento desta relação pode ser descrito conforme a equação matemática ilustrada na Figura 4.29. Neste sentido, com a finalidade de verificar a adequabilidade de mais pontos de referência considerando o solo aqui estudado, a areia de Osório, foi adicionado os resultados de Consoli et al. (2018) em que a areia de Osório foi estabilizada com pó de vidro e cal de carbureto, e em Consoli et al. (2019c) estabilizada com cal de carbureto e cinza de casca de arroz. Pode-se perceber que estes estudos adequam-se perfeitamente na curva proposta por Consoli et al. (2021), entretanto, diante destes resultados não há quaisquer pontos referentes à técnica de ativação de alcalina para a estabilização de solos.

Desta forma, buscou-se agrupar os resultados obtidos por Caicedo (2020) ao estabilizar a areia de Osório através de um ligante álcali-ativado proveniente de resíduo de cerâmico, cal de carbureto e solução ativadora de hidróxido de sódio, em que uma das variáveis controláveis investigadas foi a variação no teor de álcalis de  $\text{Na}_2\text{O}$ . Já os dados de Silvano (2020), referem-se aos mesmos materiais, mas utilizando uma concentração de hidróxido de sódio fixa.

Por fim, foi inserido na Figura 4.29 a relação obtida entre os ensaios de resistência à compressão simples e a perda de massa acumulada ao 12º ciclo no presente estudo.



OS: Osório Sand; CTP: Ceramic Tile Powder; CL: Carbide Lime; GG: Ground Glass; RHA: Rice Husk Ash

Figura 4.29: Perda de Massa Acumulada em função da resistência à compressão simples

Através de todos os dados expostos na Figura 4.29, pode-se observar que a utilização de ligantes álcali-ativados compostos por resíduo cerâmico, cal de carbureto e solução de hidróxido de sódio não se adequa à curva proposta por Consoli et al. (2021), dando origem a uma nova proposta para a relação entre a perda de massa acumulada e a resistência à compressão simples, conforme a Equação (4.40), onde o coeficiente de determinação  $R^2 = 0,71$  se mostra aceitável diante da ampla faixa de variáveis estudadas.

$$\text{PMA} (\%) = 1,67 \times 10^3 \cdot (q_u)^{-0,7} \quad (4.40)$$

Outra observação que podemos fazer ao confrontar os resultados expostos, é que a curva de ligantes álcali-ativados encontra-se deslocada para a direita em relação à curva proposta por Consoli et al. (2021). Isto significa que para uma mesma perda de massa acumulada, a resistência à compressão simples obtida ao utilizar o ligante álcali-ativado será maior do que ao utilizar-se materiais como, pó de vidro, cinza volante, cinza de casca de arroz, bem como



cimento Portland para a estabilização de solos. Cabe destacar também que, diante das inúmeras pesquisas realizadas com a areia de Osório estabilizada com diversos materiais (CONSOLI et al., 2010, 2012, 2018, 2019c, 2019d), aos 7 dias de tempo de cura, a resistência à compressão simples encontra-se na faixa entre 1 MPa e 2,5 MPa. Ou seja, sem a técnica de álcali-ativação não é possível atingir valores que superem aos obtidos no presente estudo, onde foi possível obter 4,23 MPa.

Como já mencionado anteriormente, a perda de massa acumulada obtida no ensaio de durabilidade, conforme as diretrizes da PCA (1992), deve estar no limite de até 14%. A mesma referência também destaca que a resistência à compressão simples aos 7 dias de cura, para solo estabilizado com cimento, deverá ser no mínimo de 2,06 MPa visando o emprego em camadas de base para rodovias. Logo, ao delinear esses requisitos mínimos diante da Figura 4.29, percebe-se que há uma grande quantidade de pontos referentes à técnica de álcali-ativação, que satisfazem estas condições. Por outro lado, os dados obtidos por Consoli et al. (2018, 2019c, 2021), isto é, estabilizados sem a técnica de álcali-ativação, não atingem os requisitos mínimos para tal finalidade.

#### 4.6 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Para o ensaio de módulo de resiliência foram ensaiados 4 corpos de prova aos 28 dias de tempo de cura para cada mistura, totalizando em 32 corpos de prova, os quais foram submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral posteriormente. Isto é devido ao fato do ensaio de MR não ser destrutivo, assim, entende-se que o mesmo não compromete o corpo e prova devido às baixas tensões aplicadas em relação à tensão de ruptura. O MR obtido para cada corpo de prova representa a média de duas leituras feitas a 0° e a 90°. Os dados completos obtidos neste ensaio encontram-se no **Apêndice B**.

A Figura 4.30 apresenta os resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência, onde na Figura 4.30 (a) são expostos em função do teor de umidade de moldagem e, na Figura 4.30 (b) em função do teor de agente cimentante empregado. É possível perceber que assim como nos ensaios de resistência, os tratamentos compostos por 20% de teor de agente cimentante e 15% de teor de umidade para ambos pesos específicos de 16 kN/m<sup>3</sup> e de 17 kNm<sup>3</sup>, sofrem uma redução no módulo de resiliência. Por outro lado, ao utilizar 30% de agente cimentante e 15%

de teor de umidade de moldagem, percebe-se que há um aumento significativo de incremento do módulo resiliente, o qual chega a ser de 45% se comprado com o tratamento referente a 10% de teor de umidade. Quando se compara a influência do teor de agente cimentante, este ganho passa a ser de 60%.

Evidentemente, estes ganhos significativos referem-se ao máximo valor de módulo de resiliência obtido, conforme o tratamento resultante dos níveis mais altos das variáveis controláveis, ou seja, peso específico aparente seco de 17 kN/m<sup>3</sup>, teor de agente cimentante de 20% e teor de umidade de moldagem de 15%. O valor médio é relativamente elevado, 24190,33 MPa, sendo que a resistência à compressão simples é de 7,62 MPa, a resistência à tração por compressão diametral é de 1,25 MPa e a perda de massa acumulada é de 2,18%. Já o menor valor obtido é de 13583,67 MPa, referente ao emprego de peso específico aparente seco de 16 kN/m<sup>3</sup>, teor de agente cimentante de 20% e teor de umidade de moldagem de 15%.

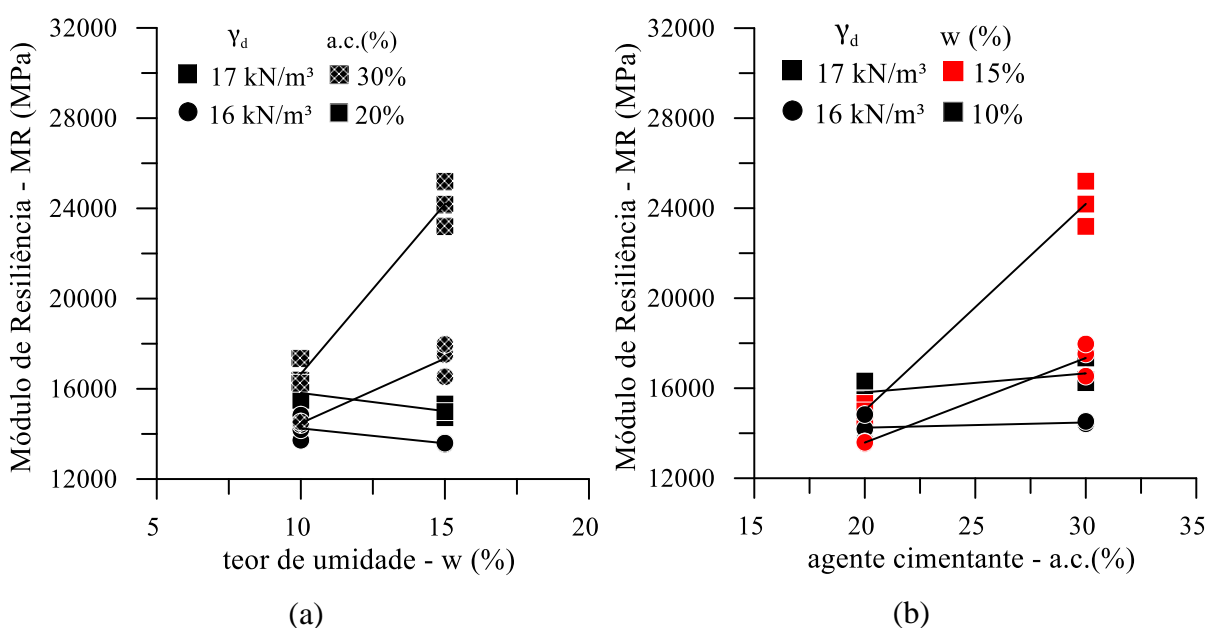


Figura 4.30: Módulo de Resiliência (a) em função do teor de umidade e (b) em função do teor de agente cimentante

Alguns valores reportados na literatura sobre o módulo de resiliência diametral para misturas cimentadas, se aproximam dos resultados encontrados. Specht (2000), obteve valores de

módulo resiliente entre 6042 MPa e 17281 MPa para um solo de formação arenito Botucatu estabilizado com cimento Portland e inclusão de fibras. Valores similares foram encontrados por Fedrigo et al. (2018), os quais variaram de 10390 MPa a 25719 MPa para misturas de brita graduada simples, material asfáltico fresado e cimento Portland, considerando o tempo de cura de 14 dias. Tebechrani Neto (2020) encontrou um valor máximo de 8528 MPa, aos 28 dias de cura, para misturas de material asfáltico fresado, pó de vidro e cal de carbureto.

Uma importante consideração é feita no estudo de Fedrigo et al. (2018), onde além da determinação do módulo resiliente diametral, os autores submeteram as amostras para a determinação diante do ensaio triaxial de tensões. Apesar destes ensaios quantificarem o módulo resiliente, as condições de contorno e o estado de tensões atuantes são bastante diferentes. Por consequência, o valor do módulo resiliente obtido também é diferente. Para uma mesma mistura, o valor estimado no ensaio triaxial foi de 2716 MPa, enquanto que para o diametral foi de 27517 MPa, aproximadamente dez vezes superior. Desta forma, os valores obtidos podem ser considerados elevados, mas de certa forma, é uma consequência das condições do ensaio executado.

A Figura 4.31 apresenta o gráfico de pareto de efeitos padronizados relativo aos resultados do ensaio de módulo resiliente, bem como a Figura 4.32 expõe os efeitos principais. É possível perceber que todos os fatores se mostram estatisticamente significantes, ou seja, exercem influência na variável resposta. Os efeitos apresentados na podem ser verificados através da ANOVA, apresentada no **Apêndice A**.

O teor de agente cimentante (B) se mostrou como o fator de maior influência, assim como demonstrado para os ensaios de resistência e durabilidade, uma vez que o aumento de 20% para 30% ocasiona em incrementos no valor do módulo resiliente, diante de uma maior precipitação dos produtos de reação do sistema álcali ativado. A influência de um agente cimentante, como o cimento Portland, também foi verificada por Fedrigo et al. (2018) e Specht (2000) como sendo a variável controlável que exerce maior influência sobre o módulo resiliente.

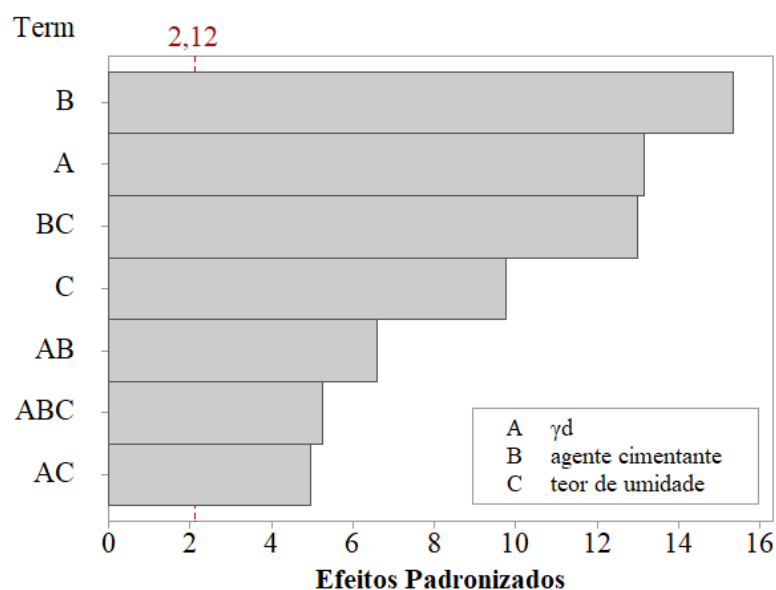


Figura 4.31: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o módulo de resiliência

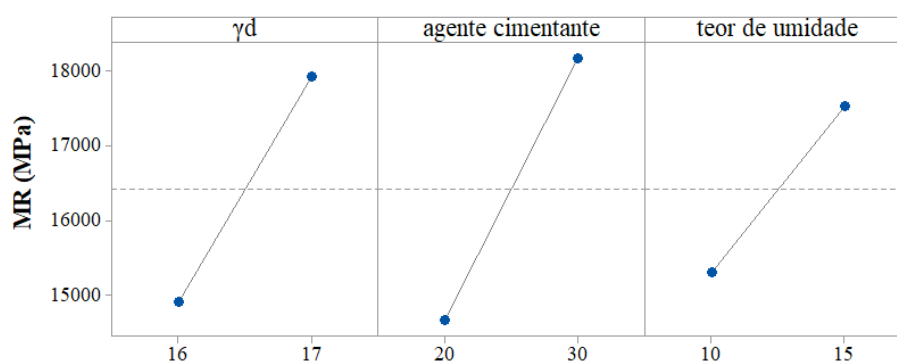


Figura 4.32: Gráfico de efeitos principais para o módulo de resiliência

Seguindo a tendência dos ensaios já apresentados, em seguida percebe-se o peso específico aparente seco (A) e a interação de segunda ordem entre o agente cimentante e o teor de umidade (BC), os quais se mostram muito similares em relação a magnitude de influência dos fatores considerados significativos. Nota-se que a influência do teor de umidade (C), é considerada significativa, indo de encontro aos ensaios de resistência e durabilidade. Isto se justifica pelo grande incremento no valor do módulo de resiliência, como indicado na Figura 4.30 (a), variando de 16659,17 MPa para 24190,33, diante da variação do teor de umidade de 10% para 15%, para um peso específico aparente seco de 17 kN/m<sup>3</sup> e teor de agente cimentante de 30%, ocasionando assim em um incremento de 45%. Ainda na Figura 4.30 (a), como já mencionado,

há uma redução no valor de módulo de resiliência, de 14246,33 MPa para 13583,67 MPa diante da variação do teor de umidade de 10% para 15%, para um peso específico aparente seco de 16 kN/m<sup>3</sup> e teor de agente cimentante de 20%, ocasionando na redução de aproximadamente 5% na magnitude do valor. Uma vez que essa redução torna-se relativamente baixa diante da porcentagem de ganho, o efeito do teor de umidade se mostra estatisticamente significativo.

#### 4.6.1 Relação entre o módulo de resiliência com o índice $\eta/B_{iv}$

Os resultados obtidos para o ensaio de módulo de resiliência foram relacionados com o índice  $\eta/B_{iv}$ , adotando-se o mesmo expoente interno (k) de 0,28 do que os demais ensaios já apresentados, visto que se busca uma singularidade para descrever o comportamento dos tratamentos. O expoente externo (B) foi ajustado para -1,3. A Equação (4.41) representa o comportamento do módulo resiliente em função do índice  $\eta/(B_{iv}^{0,28})$  referente aos dados expostos na Figura 4.33, de forma que fique evidente as considerações sobre o peso específico, teor de agente cimentante e teor de umidade de moldagem. Estes resultados encontram-se no **Apêndice B**, destacando-se também as informações sobre o valor médio de cada ponto.

$$MR \text{ (MPa)} = 5,95 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-1,3} \right] \quad (4.41)$$

A partir da relação obtida, o coeficiente de determinação  $R^2$  0,43 encontrado para o ajuste matemático não se mostra como um valor certamente adequado. Entretanto, esta baixa correlação entre os pontos é devido ao fato do grande incremento no valor do módulo resiliente, que atinge 24190,33 MPa e destoa-se dos demais pontos da curva, conforme pode-se observar na Figura 4.33.

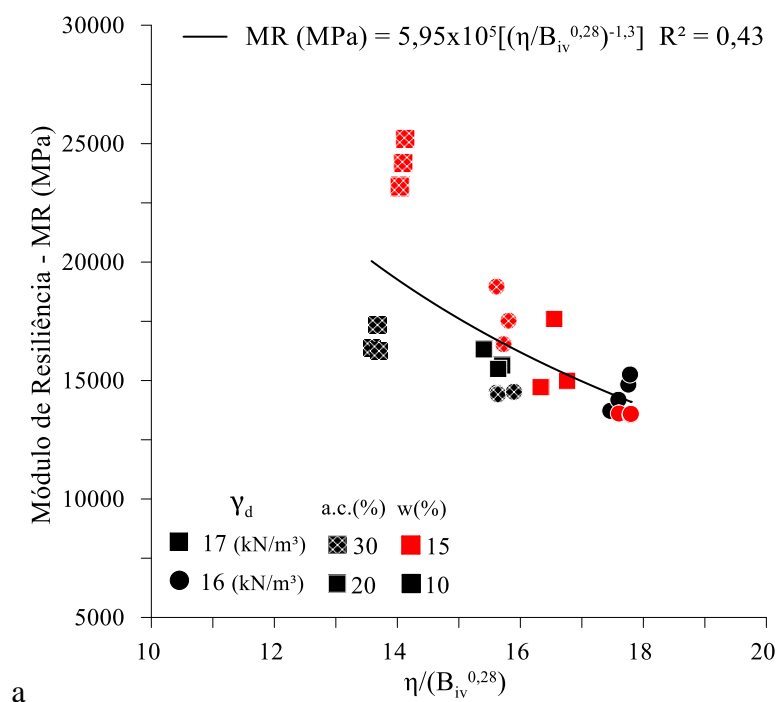


Figura 4.33: Relação entre o módulo de resiliência com o índice  $\eta/B_{iv}$

Em busca de uma melhor adequabilidade dos resultados, assim como nos ensaios já apresentados, determinou-se a relação entre o módulo resiliente com o índice  $\eta/B_{iv}$  exposto em função do teor de umidade de moldagem, conforme a Figura 4.34 (a) para 10% e, (b) para 15%. É possível perceber que as curvas determinadas apresentam coeficientes de determinação ( $R^2$ ) mais elevados, chegando a ser da ordem de 0,94 para 15% de teor de umidade de moldagem e de 0,60 para 10%, enquanto ao analisarmos todos os dados experimentais juntos (Figura 4.33) o valor do  $R^2$  é de 0,43. A Equação (4.42) e a Equação (4.43) representam este comportamento em função do índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  considerando a análise isolada do teor de umidade.

$$MR \text{ (MPa)}_{10\%} = 0,67 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-0,54} \right] \quad (4.42)$$

$$MR \text{ (MPa)}_{15\%} = 177 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-2,50} \right] \quad (4.43)$$

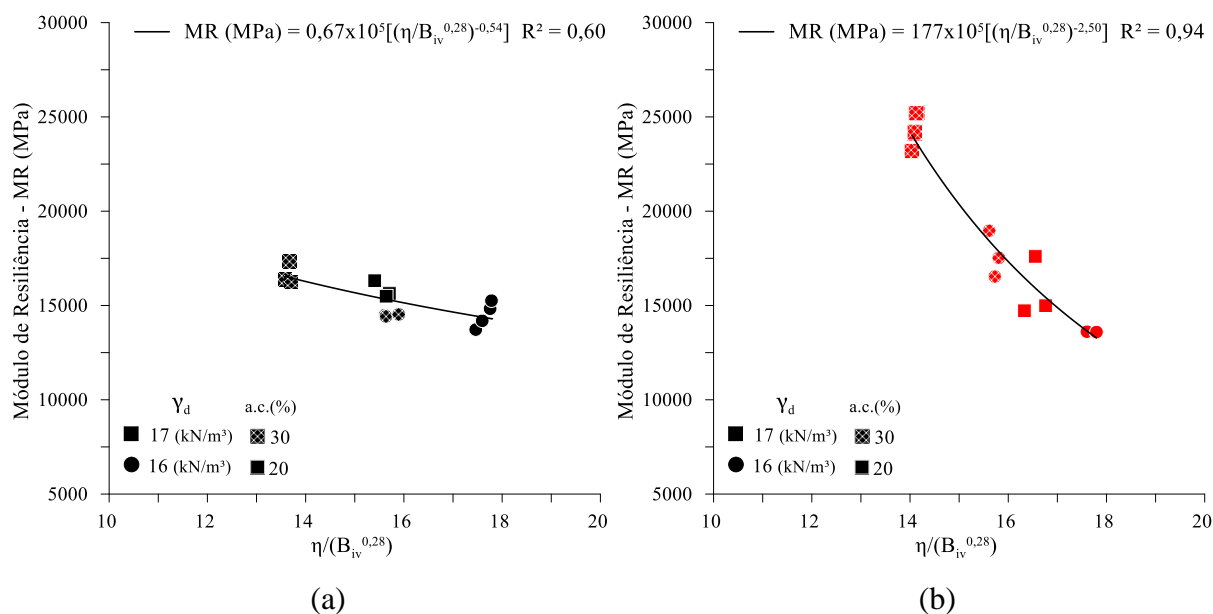


Figura 4.34: Módulo de resiliência exposto em função do teor de umidade (a) para 10% e (b) para 15%.

#### 4.7 ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

A análise por difração de raios-X foi conduzida com o intuito de identificar a formação mineralógica da interação entre o solo e o agente cimentante, bem como verificar a formação de novos minerais resultantes processo de ativação alcalina.

As análises foram realizadas usando radiação Cu K $\alpha$ , voltagem de 30 kVA em um ângulo de varredura na faixa de  $5^\circ \leq 2\theta \leq 99^\circ$ , através de amostras em pó, ou seja, fragmentos dos corpos de prova foram destorroados e peneirados. Os resultados obtidos na análise de difratometria de raios-X foram tratados no *software X'Pert HighScore Plus*. Utilizou-se a base de dados *Crystallography Open Database (COD)* para a identificação das fases cristalinas individuais, uma vez que cada composto cristalino apresenta um padrão de difração característico, permitindo a identificação através das posições angulares  $2\theta$  e distância interplanar ( $d$ ). Desta forma, o software testa simulações de diferentes materiais até obter um padrão de difração coincidente com o da amostra difratada. Ainda, a análise foi conduzida de forma qualitativa para a identificação das fases cristalinas, não sendo empregado métodos de refinamento, como

o método de Rietveld, para a obtenção de informações quantitativas. A Figura 4.35 apresenta os difratogramas obtidos para as amostras selecionadas.

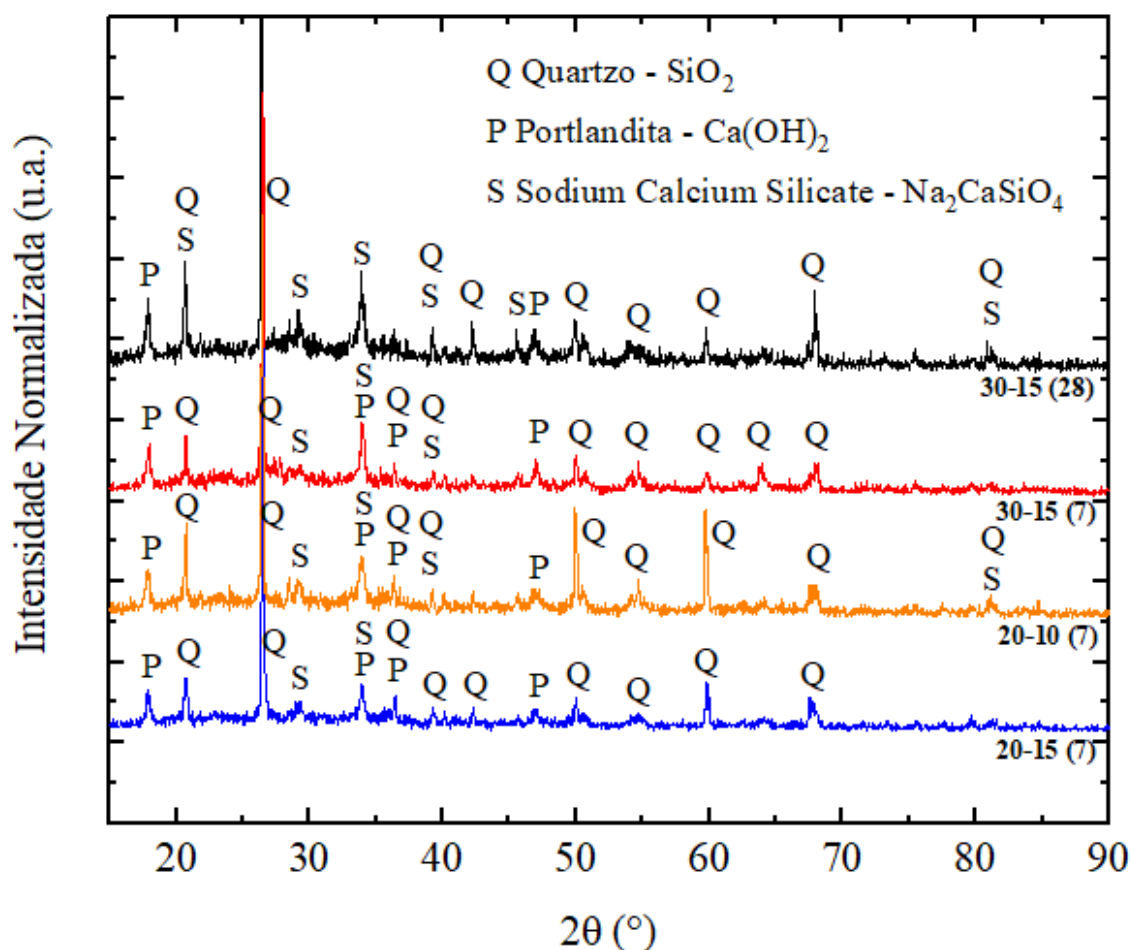


Figura 4.35: Difratograma de raios-X para as amostras selecionadas

Nas quatro amostras selecionadas utilizou-se o peso específico aparente seco de 17 kN/m<sup>3</sup>, desta forma, a diferença entre elas refere-se ao teor de agente cimentante, teor de umidade de moldagem e tempo de cura. Por exemplo, a identificação 30-15 (28) diz respeito a amostra elaborada com 30% de agente cimentante, 15% de teor de umidade de moldagem e 28 dias de tempo de cura. O mesmo raciocínio é atribuído para os demais padrões de difração presentes na Figura 4.35, sendo que os difratogramas estão ordenados em ordem decrescente no que diz respeito ao valor de resistência à compressão simples obtido no item 4.2, isto é, 7,62 MPa, 4,23 MPa, 2,66 MPa e 1,65 MPa. A escolha destas amostras deve-se ao fato de verificar a influência



do tempo de cura, do teor de agente cimentante e, principalmente, a influência do teor de umidade de moldagem que confere uma redução de desempenho.

De forma geral, em todas as amostras é perceptível o pico de quartzo (COD 9005020) na posição angular aproximadamente de  $2\theta = 26,4^\circ$  e  $d = 3,36 \text{ \AA}$ , a qual corresponde a fase cristalina mais evidente, como identificado nos materiais de origem, assim persistindo após o processo ativação alcalina e indicando que houve uma reação parcial deste mineral. Este comportamento da fase cristalina de quartzo é evidenciado em diversas pesquisas, como em Gaibor et al. (2020) e Reig et al. (2013b, 2014), onde os autores estudaram o comportamento microestrutural de pastas álcali ativadas formadas a partir de resíduos de cerâmica.

Foi identificado também a presença de portlandita (COD 1001787), que corresponde a fase cristalina do hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  encontrada na cal de carbureto, bem como a formação de uma nova fase cristalina, identificada como silicato de sódio e cálcio (COD 1010111),  $\text{Na}_2\text{CaSiO}_4$ , o qual pode ser um indício do produto de reação formado pelo processo de álcali ativação.

Ao comparar os difratogramas apresentados na Figura 4.35, percebe-se que a formação do silicato de sódio e cálcio é intensificada na amostra de 28 dias de cura, principalmente na posição angular de  $2\theta = 29,2^\circ, 33,8^\circ$  e  $45,5^\circ$  e distância interplanar  $d = 3,05 \text{ \AA}$ ,  $2,64 \text{ \AA}$  e  $1,98 \text{ \AA}$ . Aliado a isto, há uma redução da presença de portlandita através da diminuição dos picos cristalinos, indicando o consumo do hidróxido de cálcio para formação do composto silicato de sódio e cálcio. Por outro lado, nos difratogramas referentes ao tempo de cura de 7 dias é encontrados picos mais acentuados de portlandita, o que indica que as reações do sistema ainda não aconteceram em sua totalidade. Este fato é associado com a resposta mecânica da mistura, onde houve um ganho de resistência no ensaio de compressão simples em função do tempo de cura, que foi de 4,23 MPa para 7,62 MPa, corroborando também a significância estatística desta variável controlável diante da variável fixa.

Quando compara-se os difratogramas para a influência do teor de umidade de moldagem, percebe-se que os picos de silicato de sódio e cálcio são mais acentuados na posição angular de  $2\theta = 29,2^\circ$  e  $33,8^\circ$ . Isto vai de encontro ao estudo de Bernal et al. (2015), onde foi demonstrado que mudanças na quantidade de água tem grande efeito no desenvolvimento da cinética das

reações e na precipitação dos produtos formados, os quais desencadeiam microestruturas diferentes e, conseqüentemente alteram a performance mecânica do sistema, corroborando um impacto negativo em altos teores de adição de água.

O mineral referente ao silicato de sódio e cálcio foi identificada por Barth e Posnjak (1932), como sendo pertencente ao grupo da cristobalita, uma fase polimórfica da sílica que se desenvolve em temperaturas acima de 1000 °C e que devido a suas características estáveis vem sendo empregado na confecção de materiais cerâmicos (HARIMA, 1997). A presença deste mineral foi identificada em pequenas fases no material precursor de resíduo cerâmico. Neste sentido, o estudo de Li et al. (2019), ao desenvolver compostos geopoliméricos a partir do metacaulim e de argila tratada termicamente, identificou que os produtos de reação formados a partir destes materiais precursores são diferentes, principalmente devido a presença da cristobalita encontrada na argila tratada termicamente. Desta forma, a fase cristalina referente ao mineral de silicato de sódio e cálcio foi evidenciado por Sun et al. (2013), ao comprovar a utilização de resíduo cerâmico provenientes de telhas e tijolos como material precursor para a ativação alcalina.

Como já mencionado, o silicato de sódio e cálcio foi identificado na posição angular de  $2\theta = 29,2^\circ$  e  $33,8^\circ$  e distância interplanar  $d = 3,05 \text{ \AA}$  e  $2,64 \text{ \AA}$ . Há um consenso na literatura de que alguns tipos de silicato de cálcio hidratado, o gel C-S-H, podem apresentar estrutura similar aos do grupo da tobermorita identificáveis por picos na posição angular de  $2\theta = 27,5^\circ$  a  $30^\circ$  e distância interplanar  $d = 3,03 \text{ \AA}$  (DIAMOND; WHITE; DOLCH, 1964; LITTLE, 1999; PUERTAS et al., 2011). Porém, a detecção de fases minerais relativas ao C-S-H poder ser dificultada pelo fato de apresentarem estruturas complexas e variadas, e desenvolvendo uma série de produtos intermediários, dificultando a identificação através dos picos de difração. Ou seja, a identificação da fase cristalina do C-S-H é muito semelhante com a do silicato de sódio e cálcio, levando a entender que a detecção da fase cristalina do C-S-H pode estar sendo dificultada, uma vez que esta mesma posição angular e distância interplanar vem sendo reportada na literatura de álcali ativação como um dos principais produtos de reação formados (GARCIA-LODEIRO et al., 2011; HUANG et al., 2020; PUERTAS et al., 2011).

Conforme apresentado Garcia-Lodeiro et al. (2011), é possível que a precipitação dos géis formados em um sistema com alto teor de cálcio no processo de álcali ativação sejam do tipo (N,C)-A-S-H do que C-A-S-H/C-S-H, onde o  $\text{Na}_2\text{O}$  vem sendo negligenciado. Este tipo de gel cimentante é resultante de uma formação híbrida, diante da possibilidade de uso de uma grande variedade de materiais precursores e soluções ativadoras. Neste contexto, o estudo de Caicedo (2020), o qual vem sendo supracitado nesta pesquisa, evidencia através de EDS (Espectroscopia por energia dispersiva) uma análise sobre a quantidade dos elementos químicos formados e conclui que há uma grande variedade na composição dos produtos de reação, justificando a coexistência de diferentes tipos de géis alcalinos cimentantes de natureza híbrida, como o (N,C)-A-S-H, o qual também é esperado nesta pesquisa, contudo a identificação microestrutural deve ser realizada por ensaios que complementem o DRX, tal como MEV/EDS, de forma a validar ao certo os minerais formados.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A primeira conclusão que se pode apresentar é a eficiência do desenvolvimento de um novo material cimentante, a partir da técnica de ativação alcalina entre o resíduo cerâmico e a cal de carbureto. O mesmo se mostra aplicável para a estabilização de solos, aqui utilizado um solo granular que sem o efeito da cimentação não desenvolveria propriedades mecânicas para a utilização em obras de engenharia. Ainda devemos destacar que este material cimentante, oriundo de resíduos, pode se tornar um substituto potencial para os materiais convencionais utilizados até então, como o cimento Portland e a cal hidratada.

A partir da análise dos resultados verificados na resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo cisalhante inicial, durabilidade por ciclos de molhagem – secagem – escovação, módulo de resiliência e ensaio de microestrutura através de DRX, estabeleceram-se, os seguintes comentários:

### a) RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os valores de resistência à compressão simples se mostraram extremamente significativos, em que foi possível atingir até 4,23 MPa aos 7 dias de cura e de 7,62MPa aos 28 dias de cura, resultando em um ganho de 80% ao longo do período de cura. A análise estatística conduzida demonstrou que os fatores principais de peso específico aparente seco (A), teor de agente cimentante (C), tempo de cura (D), bem como as interações de segunda ordem BC, BD, AD e AB influenciam significativamente o resultado da variável resposta. Por outro lado, o teor de umidade (C) não apresenta significância estatística que influencie na variável resposta. Isto é, a variação no teor de umidade só é significativa quando associada ao efeito do agente cimentante, conforme a interação de segunda ordem (BC).

No que diz respeito a magnitude da influência dos fatores significativos, o teor de agente cimentante (B) se apresentou como o mais influente, seguido pelo peso específico aparente seco (A), tempo de cura (D), interação entre o teor de agente cimentante e o teor de umidade de

moldagem (BC). A influência do teor de agente cimentante é justificada através de que a maior quantidade de reações pozolânicas, entre os materiais precursores e a solução ativadora, é concebida resultando em um aumento de precipitação dos compostos formados, contribuindo diretamente para o incremento de resistência reportados. Aliado a isto, a influência do peso específico aparente seco é associada com uma maior área de contato entre as partículas, devido a menor porosidade que o sistema se encontra, resultando na potencialização do intertravamento e conseqüentemente, no aumento da resistência. Desta forma, o tratamento que foi executado com os maiores níveis das variáveis controláveis, isto é, peso específico aparente seco de 17 kN/m<sup>3</sup>, teor de agente cimentante de 30%, teor de umidade de 15% e tempo de cura de 28 dias representa a máxima resistência obtida, 7,62 MPa.

Quanto a influência do tempo de cura, foi evidenciado ganhos de resistência para todas as misturas analisadas, evidenciando que as reações no sistema se estendem entre o período de 7 dias e 28 dias. Este fato é corroborado pela análise de DRX, em que é possível identificar a formação de picos mais acentuados de silicato de cálcio e sódio aliado a diminuição de picos de portlandita para o difratograma de 28 dias, concluindo que houve uma evolução das reações em função do tempo de cura.

Uma vez que as amostras preparadas para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral são as mesmas que do ensaio de resistência à compressão simples, é notório que a análise estatística apresente a mesma significância dos efeitos principais. Além disso, foi possível obter uma correlação direta entre estes ensaios, a qual foi demonstrada como sendo a razão entre a resistência à tração e a resistência à compressão simples ( $\xi = q_t/q_u$ ). O valor obtido foi de 0,15 e 0,16. Ou seja, a razão  $\xi = q_t/q_u$  encontrada significa que o valor da resistência à tração por compressão diametral é equivalente a 15% ou 16% da resistência à compressão simples.

Quanto ao índice  $\eta/B_{iv}$ , onde o denominador engloba os novos materiais cimentantes aqui pesquisados, se mostrou compatível com a proposta desenvolvida por Winter (2018). O autor validou uma ampla faixa de cimentação artificial para este índice, utilizando principalmente a areia de Osório estabilizada com pozolanas como o pó de vidro e cinza de casca de arroz, combinadas com a cal de carbureto e também, misturas com o cimento Portland CP II, CP IV e CP V, em períodos de cura de 7 dias até 180 dias. O expoente interno (k) adotado sobre a

parcela  $B_{iv}$  é o mesmo, 0,28. Já o expoente externo obtido é muito similar ao desta validação, bem como o  $\eta/B_{iv}$  adotado para a normalização da curva. Isto é, a correlação encontrada entre os ensaios de resistência e o índice  $\eta/(B_{iv})$  para o composto álcali ativado, desenvolve um comportamento compatível com outras fontes de pozolanas, bem como a comparação com o cimento Portland.

Há uma relação nos resultados dos ensaios com o índice  $\eta/B_{iv}^k$ , em que a redução da porosidade e o aumento do teor de agente cimentante promove um aumento nas propriedades mecânicas de resistência. De maneira geral, obteve-se um coeficiente de determinação  $R^2$  moderado para estas relações. Visto que um dos objetivos principais desta pesquisa é avaliar qual a influência do teor de umidade de moldagem diante do comportamento mecânico das misturas, buscou-se expor os resultados isolando os tratamentos que correspondem a 10% e 15% do teor de umidade. Desta forma, notou-se que há um melhor ajuste dos dados experimentais através de incrementos nos coeficientes de determinação obtidos.

#### b) MÓDULO CISALHANTE INICIAL

O ensaio de Módulo Cisalhante Inicial ( $G_0$ ) apresentou um comportamento inesperado, onde a rigidez não acompanha a tendência do ensaio de resistência à compressão simples. Ao contrário do comportamento, o módulo cisalhante inicial não sofre redução de sua magnitude ao variar-se o teor de umidade de moldagem referente aos tratamentos de 20% de agente cimentante, o que pode-se perceber é que ele se mantém praticamente constante perante esta variação.

A análise estatística demonstrou que a magnitude dos fatores significativos foi o peso específico aparente seco (A), seguido pelo teor de umidade (C), tempo de cura (D), interação entre o teor de agente cimentante e o teor de umidade (BC) e teor de agente cimentante (B). Desta forma, pode-se perceber a discrepância nos fatores estatisticamente significantes quando verificamos a análise encontrada para a resistência à compressão simples, onde o fator mais significativo foi o teor de agente cimentante (B) e que, somente o teor de umidade (C) não confere significância para os tratamentos estabelecidos.

O fato do peso específico aparente seco (A) ser o fator mais influente estatisticamente é perceptível através dos resultados médios para cada tratamento, onde é identificado valores para o módulo cisalhante inicial muito similares, e que estes pontos se agrupam em função deste fator. Ou seja, além dos tratamentos que possuem 20% de teor de agente cimentante e a rigidez se mantém constante diante do teor de umidade de moldagem, há o tratamento em que o emprego de 30% de agente cimentante e 10% de teor de umidade de moldagem remete a um valor muito similar de módulo cisalhante inicial destes mencionados, para cada peso específico aparente seco. Desta forma, há 3 valores de rigidez para o mesmo peso específico aparente seco que são extremamente similares.

A partir da relação entre o módulo cisalhante inicial e o índice  $\eta/B_{iv}$ , pode-se perceber esta gama de valores de rigidezes que se mostram muito similares, isto corrobora com o coeficiente de determinação encontrado ser moderado. Além disto, há um pequeno incremento do valor do módulo cisalhante inicial em função do tempo de cura, sendo de apenas 13%. De maneira geral, também é perceptível que os maiores valores de módulo cisalhante inicial foram obtidos para os tratamentos com menor porosidade, maior teor de agente cimentante e maior teor de umidade de moldagem, como naturalmente era esperado visto que estes tratamentos foram os que apresentaram maiores valores de resistência à compressão simples.

Em busca de uma melhor adequabilidade dos resultados, assim como nos ensaios de resistência, determinou-se a relação entre o módulo cisalhante inicial com o índice  $\eta/B_{iv}$  exposto em função do teor de umidade de moldagem, sendo possível perceber que as curvas determinadas para 15% de teor de umidade de moldagem apresentam coeficientes de determinação ( $R^2$ ) extremamente mais elevados, da ordem de 0,95 e de 0,98.

### c) DURABILIDADE

Após os 12 ciclos de molhagem, secagem e escovação, foi identificado que apenas um tratamento ultrapassa o limite da PCA (1992) de perda de massa acumulada de até 14%, o qual atingiu o valor de 19,37%. Já para a limitação da USACE (1994), três tratamentos superaram o valor de 11% de perda de massa acumulada, os quais todos são compostos por 20% de agente cimentante.

A análise estatística demonstrou a influência do teor de agente cimentante (B) sobre a perda de massa acumulada, e que devido às condições de ensaios espera-se que ocorra certa catálise no desenvolvimento dos produtos de reação do sistema álcali-ativado, devido à ação prolongada da temperatura sobre as amostras. Na sequência, foi evidenciado a influência do peso específico aparente seco (A), o qual se explica pelas mesmas razões já apontadas, em que uma maior proximidade entre as partículas devido a menor porosidade implica na maior mobilização de atrito e portanto, potencializa o desempenho de resistência mecânica contra a abrasão da escova.

A variação no teor de umidade torna-se significativa quando associada ao efeito do agente cimentante, conforme a interação de segunda ordem (BC). Como já descrito anteriormente, esta associação ocasiona na redução da resistência e no aumento de perda de massa acumulada.

Através do índice  $\eta/B_{iv}$  é possível avaliar a perda de massa acumulada para os ciclos 1, 3, 6, 9 e 12, destacando-se que os expoentes internos e externos foram compatibilizados e portanto, apenas o escalar A difere entre as curvas. Desta maneira, quanto maior o número de ciclos há um aumento neste escalar, e conseqüentemente um aumento na PMA.

Buscou-se uma relação entre os valores obtidos para o ensaio de durabilidade, através da perda de massa acumulada ao 12°, e o ensaio de resistência à compressão simples, assim como a curva proposta por Consoli et al. (2021). Foi identificado que para a utilização de ligantes álcali-ativados os dados não se adequam à curva proposta por Consoli et al. (2021), dando origem a uma nova proposta para a relação entre a perda de massa acumulada e a resistência à compressão simples.

Seguindo as diretrizes da PCA (1992), em que a PMA deve estar no limite de até 14% e que a resistência à compressão simples aos 7 dias de cura, para solo estabilizado com cimento, deverá ser no mínimo de 2,06 MPa visando o emprego em camadas de base para rodovias, é possível constatar que os dados expostos na curva proposta por Consoli et al. (2021) concentrando-se no solo empregado, a areia de Osório, não atingem os requisitos mínimos. Desta forma, a técnica de ativação álcali se faz necessária para atingir as diretrizes.



#### d) MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Quanto ao ensaio de módulo resiliente, os valores obtidos se mostram condizentes com demais materiais estabilizados quimicamente, onde o valor mínimo foi de 13583,67 MPa e o máximo de 24190,33 MPa.

A análise estatística evidencio que o teor de agente cimentante (B) se mostrou como o fator de maior influência, em seguida percebe-se o peso específico aparente seco (A) e a interação de segunda ordem entre o agente cimentante e o teor de umidade (BC). Foi constatado também a influência do teor de umidade (C) como significativa, indo de encontro aos ensaios de resistência e durabilidade. Isto se justifica pelo grande incremento no valor do módulo de resiliência, para um peso específico aparente seco de 17 kN/m<sup>3</sup>, teor de agente cimentante de 30% e teor de umidade de 15%, ocasionando assim em um incremento de 45%. Por outro lado, foi evidenciado que há redução no valor do módulo resiliente, entretanto, esta redução é de aproximadamente 5% na magnitude do valor, tornando-se relativamente baixa diante da porcentagem de ganho, logo o efeito do teor de umidade se mostra estatisticamente significativa.

Os resultados obtidos para o ensaio de módulo de resiliência foram relacionados com o índice  $\eta/B_{iv}$  em que é possível identificar que a redução da porosidade e o aumento do teor de agente cimentante promove um aumento nas propriedades mecânicas do módulo resiliente. Analogamente aos demais ensaios, os resultados foram expostos em função do teor de umidade de moldagem, sendo possível perceber que as curvas determinadas apresentam coeficientes de determinação ( $R^2$ ) mais elevados, chegando a ser da ordem de 0,94 para 15% de teor de umidade de moldagem e de 0,60 para 10%, enquanto ao analisarmos todos os dados experimentais juntos o valor do  $R^2$  é de 0,43.

#### e) ANÁLISE POR DRX

Através dos resultados obtidos pelo ensaio de DRX é possível confirmar a eficiência da estabilização do solo diante da técnica de ativação alcalina, obtendo-se como produto de reação a formação de um gel com propriedades cimentantes através das reações entre o resíduo cerâmico, a cal de carbureto e a solução de hidróxido de sódio.

Foi identificado que ocorre uma diminuição na intensidade de picos referente a portlandita para o difratograma de 28 dias de cura, principalmente na posição angular  $2\theta = 33,8^\circ$ , o qual dá origem ao produto de reação silicato de sódio e cálcio, sendo intensificado na posição angular de  $2\theta = 29,2^\circ$ . A diminuição dos picos de portlandita estão associadas com o consumo de hidróxido de cálcio para a formação do silicato de sódio e cálcio. Desta forma, é corroborado a influência do tempo de cura no desenvolvimento das reações por álcali ativação, os quais desencadeiam microestruturas diferentes e, conseqüentemente alteram o desempenho relatado nos ensaios anteriores.

Quanto a influência do teor de umidade de moldagem, percebe-se que os picos de silicato de sódio e cálcio são mais acentuados na posição angular de  $2\theta = 29,2^\circ$  e  $33,8^\circ$  para as amostras que apresentam 20% de teor de agente cimentante e 10% de teor de umidade, do que para as compostas por 15% de teor de umidade. Justificando o comportamento de redução no desempenho quando estes dois fatores controláveis são associados, uma vez que a quantidade de água adicionada faz com que a concentração da solução ativadora de NaOH seja diluída.

O produto de reação formado foi identificado como silicato de sódio e cálcio, entretanto na mesma posição angular e distância interplanar é relatado na literatura a identificação do silicato de cálcio hidratado, o gel C-S-H. Desta forma, acredita-se que a identificação deste pico de refração vem sendo dificultada. Ainda, é esperado que exista a coexistência de diferentes tipos de géis de natureza híbrida, como o (N,C)-A-S-H.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De maneira a complementar e dar um prosseguimento ao trabalho realizado nesta pesquisa, ampliando o conhecimento sobre durabilidade, rigidez e previsão de parâmetros de resistência, sugere-se os seguintes tópicos de pesquisa:

- a) Execução de um projeto fatorial composto de segunda ordem, incluindo, assim, mais níveis em cada um dos fatores controláveis, para obter-se uma superfície resposta ótima;

- b) Verificar o comportamento das misturas diante do ensaio de vida de fadiga, dando continuidade aos estudos dirigidos à pavimentação;
- c) Avaliar o impacto ambiental, social e econômico do ligante álcali-ativado por meio de uma Análise de Ciclo de Vida (ACV);
- d) Utilizar outros materiais precursores e soluções ativadoras;
- e) Estudo da microestrutura das misturas com uma variedade maior de ensaios, como TGA/DTG, MEV com EDS, dentre outros.

## 6 REFERÊNCIAS

AASHTO. **Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide**. [s.l: s.n.].

ALSAFI, S. et al. Collapsibility potential of gypseous soil stabilized with fly ash geopolymer; characterization and assessment. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 390–409, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D 2845**: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock. 2008

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D 3282**: Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. 2015

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D559/D559M**: Standard Test Method for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures. 2015

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D2487**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). 2017

ARULRAJAH, A. et al. Evaluation of fly ash- and slag-based geopolymers for the improvement of a soft marine clay by deep soil mixing. **Soils and Foundations**, v. 58, n. 6, p. 1358–1370, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6508**: grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6502**: Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12025**: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180**: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181**: análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182** Solo - Ensaio de Compactação. 2016.

AUSTROADS. **Guide to Pavemente Technology Part 4D Stabilied Materials**. [s.l: s.n.].

BARTH, T.; POSNJAK, E. Silicate structures of the cristobalite type II. p. 370–375, 1932.

BERGAYA, F.; LAGALY, G. General Introduction: Clays , clay minerals and clay science. In: BERGAYA, F.; THENG, B. K. G.; LAGALY, G. (Eds.). . **Handbook of clay science**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2006. v. 1.

BERNAL, S. A. et al. Water content modifies the structural development of sodium metasilicate-activated slag binders. **Journal of the Latin-American Association of Quality Control, Pathology and Recovery of Construction**, v. 44, n. 1, p. 1–12, 2015.

BERNAL, S. A. et al. Management and valorisation of wastes through use in producing alkali-activated cement materials. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 91, n. 9, p. 2365–2388, 2016.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica - Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.

BRUSCHI, G. J. **Estabilização de rejeitos de mineração de bauxita por meio de um sistema ligante álcali-ativado de cinza do bagaço de cana-de- açúcar e cal de carbureto**. 2020. 185p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CABRAL JUNIOR, M. et al. Argila para cerâmica vermelha. In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. (Eds.). . **Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações**. 2ª edição ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. p. 774–770.

CAICEDO, A. M. L. **Melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de cerâmica vermelha e cal de carbureto**. 270p. 2020 Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CERAMIC WORLD REVIEW. Ceramic World Review. 2019.

CHANG, T.; WOODS, R. D. Effect of particle contact bond on shear modulus. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 118, p. 1216–1233, 1992.

CLOUGH, G. W.; SITAR, N.; BACHUS, R. C. Cemented Sands Under Static Loading. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 107, n. 6, p. 799–817, 1981.

CONSOLI, N. C. et al. Behavior of compacted soil-fly ash-carbide lime mixtures. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, n. september, p. 774–782, 2001.

CONSOLI, N. C. et al. Key parameters for strength control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 133, n. 2, p. 197–205, 2007.

CONSOLI, N. C. et al. Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 136, n. 5, p. 759–763, 2010.

CONSOLI, N. C. et al. Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. **Geotechnique**, v. 62, n. 2, p. 177–183, 2012.

CONSOLI, N. C. et al. Key parameters for strength control of rammed sand-cement mixtures: Influence of types of portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 591–597, 2013.

CONSOLI, N. C. A method proposed for the assessment of failure envelopes of cemented sandy soils. **Engineering Geology**, v. 169, p. 61–68, 2014.

CONSOLI, N. C. et al. Broad-spectrum empirical correlation determining tensile and compressive strength of cement-bonded clean granular soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 6, p. 1–7, 2017.

CONSOLI, N. C. et al. Durability, strength, and stiffness of green stabilized sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 144, n. 9, p. 1–10, 2018.

CONSOLI, N. C. et al. Strength and Stiffness of Ground Waste Glass-Carbide Lime Blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 10, p. 2–7, 2019a.

CONSOLI, N. C. et al. Use of sustainable binders in soil stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 2, p. 1–7, 2019b.

CONSOLI, N. C. et al. The effects of curing time and temperature on stiffness, strength and durability of sand-environment friendly binder blends. **Soils and Foundations**, v. 59, n. 5, p. 1428–1439, 2019c.

CONSOLI, N. C. et al. Durability Assessment of Soil-Pozzolan-Lime Blends through Ultrasonic-Pulse Velocity Test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 8, p. 04020223, 2020.

CONSOLI, N. C. et al. General relationships controlling loss of mass, stiffness and strength of sustainable binders amended sand. **Transportation Geotechnics**, v. 27, n. November 2020, p. 100473, 2021.

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**, v. 171, n. 2, p. 96–102, 2018.

CRISTELO, N. et al. Soil stabilisation using alkaline activation of fly ash for self compacting rammed earth construction. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 727–735, 2012.

CRISTELO, N.; GLENDINNING, S.; PINTO, A. T. Deep soft soil improvement by alkaline activation. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement**, v. 164,

n. 2, p. 73–82, 2011.

CRUZ, R. C. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatação de uma areia artificialmente cimentada.** p. 216, Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DAASSI-GLI. **Estabilização de um Solo Granular com Misturas de Pó de Vidro – Cal de Carbureto – NaOH Estabilização de um Solo Granular com Misturas de Pó de Vidro – Cal de Carbureto – NaOH.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

DALLA ROSA, F. **Estudo dos parâmetros chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal.** 2009. p. 200. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DAVIDOVITS, J. Synthesis of new high-temperature geo-polymers for reinforced plastics composites. n. November, 1979.

DE BEER, M.; MAINA, J. W.; NETTERBERG, F. Weak interlayers in flexible and semi-flexible road pavements: Part 1. **Journal of the South African Institution of Civil Engineering**, v. 54, n. 1, p. 43–54, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (DNIT) **ME 136:** Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas –Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (DNIT) **ME 135:** Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas -Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DIAMOND, S.; WHITE, J.; DOLCH, W. Transformation of Clay Minerals by Calcium Hydroxide Attack. p. 29, 1964.

DUXSON, P. et al. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 269, n. 1–3, p. 47–58, 2005.

DUXSON, P. et al. Geopolymer technology: The current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 2006.

ELLIOTT, R. P.; THORNTON, S. I. Resilient modulus and AASHTO pavement design. **Transportation Research Record**, n. 1196, p. 116–124, 1988.

FEDRIGO, W. et al. A study on the resilient modulus of cement-treated mixtures of RAP and aggregates using indirect tensile, triaxial and flexural tests. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 161–169, 2018.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Engineering Properties of Compacted Fly Ash. n. October, 2005.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, J. G.; PUERTAS, F. Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, p. 1313–1321, 1999.

FESTUGATO, L. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro - reforçado com fibras de distintos índices de aspecto**. p. 145. Dissertação (Mestrado em Engenharia), p. 146 . Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FOPPA, D. **Análise de Variáveis-chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), p. 146 . Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005

GAIBOR, N. et al. Alkali activation of recycled ceramic aggregates from construction and demolition wastes. **Materiales de Construcción**, v. 70, n. 339, p. 1–12, 2020.

GARCIA-LODEIRO, I. et al. Cement and Concrete Research Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels . Study in the ternary. v. 41, p. 923–931, 2011.

HARIMA, E. **Estabilização da fase beta e obtenção da fase alfa da cristobalita a partir do residuo da casca de arroz queimada**. [s.l.: s.n.].

HERRIN, M.; MITCHELL, H. Lime-soil mixtures. **40th Annual Meeting of the Highway Research Board**, v. 304, p. 99–138, 1961.

HORPIBULSUK, S. et al. Strength development in silty clay stabilized with calcium carbide residue and fly ash. **Soils and Foundations**, v. 53, n. 4, p. 477–486, 2013.

HUANG, G. et al. Influence of NaOH content on the alkali conversion mechanism in MSWI bottom ash alkali-activated mortars. **Construction and Building Materials**, v. 248, p. 118582, 2020.

HUANG, T.; AIREY, D. W. Properties of artificially cemented carbonate sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 124, n. 6, p. 492–499, 1998.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. 2<sup>a</sup> ed. Upper Saddle River: Pearson Education, Inc., 775 p., 2004.

HWANG, C. L. et al. Development of high-strength alkali-activated pastes containing high volumes of waste brick and ceramic powders. **Construction and Building Materials**, v. 218, p. 519–529, 2019.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. [s.l.: s.n.].



KRIVENKO, P. Why alkaline activation - 60 years of the theory and practice of alkali-activated materials. **Journal of Ceramic Science and Technology**, v. 8, n. 3, p. 323–333, 2017.

LEKARP, F.; ISACSSON, U.; DAWSON, A. State of the art I: Resiliety response of unbound aggregates. **Journal of transportation engineering**, v. 3, n. 1, p. 66–75, 2000.

LEON, H. B. **O índice porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/Civ$ ) como um parâmetro de estado para areias cimentadas** 2018, p. 135. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

LI, X. et al. Effect of cristobalite on the mechanical behaviour of metakaolin-based geopolymer in artificial seawater. **Advances in Applied Ceramics**, v. 0, n. 0, p. 1–8, 2019.

LINARES, J.; HUERTAS, F.; CAPEL, J. LA ARCILLA COMO MATERIAL CERAMICO . CARACTERISTICAS Y COMPORTAMIENTO. **Revista de La Universidad de Granada**, p. 479–490, 1983.

LITTLE, D. N. **Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates** **National lime association**. [s.l: s.n.].

MARCON, A. F. Durabilidade e módulo de elasticidade de misturas areia-cal- cinza volante. p. 119, 1977.

MARQUES, S. F. V. **Comportamento de uma Areia Artificialmente Cimentada até Altas Tensões de Confinamento**. p.239. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MATEOS, M. Physical and mineralogical factors in stabilization of Iowa soils with lime and fly ash. p. 1–247, 1961.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. [s.l: s.n.].

MIGUEL, G. D. **Desempenho e Comportamento Mecânico de Um Solo Dispersivo e Sulfatado Tratado com uma Pozzolana Artificial, Cal de Carbureto e Reforçado com Fibras de Vidro**. [s.l: s.n.].

MIRANDA, T. et al. Application of alkali-activated industrial wastes for the stabilisation of a full-scale (sub)base layer. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, 2020.

MOH, Z. Reactions of soil minerals with cement and chemicals. **Highway Research Record**, n. 86, p. 39–61, 1965.

NAVRÁTILOVÁ, E.; ROVNANÍKOVÁ, P. Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 530–539, 2016.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de Arenito Botucatu visando seu emprego na pavimentação**. p. 150, Dissertação (Mestrado em Engenharia) –

Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

PACHECO-TORGAL, F. et al. **Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes**. [s.l: s.n.]. v. 3

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 7, p. 1315–1322, 2008.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Reusing ceramic wastes in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 5, p. 832–838, 2009.

PARK, S. S. Effect of wetting on strength of cemented sands. **14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**, n. December, p. 1713–1720, 2011.

PCA. **Soil-Cement Laboratory Handbook**. [s.l.] Portland Cement Association, 1992.

PHETCHUAY, C. et al. Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer. **Applied Clay Science**, v. 127–128, p. 134–142, 2016.

PHUMMIPHAN, I. et al. Laboratory Evaluation of Abrasion Resistance of Portland Cement Pervious Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. august, p. 1239–1247, 2016a.

PHUMMIPHAN, I. et al. Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer. **Road Materials and Pavement Design**, v. 17, n. 4, p. 877–891, 2016b.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Alkali Activated materials: state of the art**. Springer ed. [s.l: s.n.]. v. 13

PUERTAS, F. et al. Residuos cerámicos para su posible uso como materia prima en la fabricación de clínker de cemento portland: Caracterización y activación alcalina. **Materiales de Construcción**, v. 56, n. 281, p. 73–84, 2006.

PUERTAS, F. et al. Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 9, p. 798–805, 2008.

PUERTAS, F. et al. A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 31, n. 12, p. 2043–2056, 2011.

PUPPALA, A. J.; MOHAMMAD, L. N.; ALLEN, A. Engineering behavior of lime-treated Louisiana subgrade soil. **Transportation Research Record**, n. 1546, p. 24–31, 1996.

REIG, L. et al. Alkaline activation of ceramic waste materials. **Waste and Biomass Valorization**, v. 4, n. 4, p. 729–736, 2013a.

REIG, L. et al. Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 98–106, 2013b.

REIG, L. et al. Influence of the activator concentration and calcium hydroxide addition on the properties of alkali-activated porcelain stoneware. **Construction and Building Materials**, v. 63, p. 214–222, 2014.

REIG, L. et al. Influence of calcium aluminate cement (CAC) on alkaline activation of red clay brick waste (RCBW). **Cement and Concrete Composites**, v. 65, p. 177–185, 2016.

RIOS, S. et al. Stiffness behavior of soil stabilized with alkali-activated fly ash from small to large strains. **International Journal of Geomechanics**, v. 17, n. 3, p. 1–12, 2017.

RIOS, S. et al. Increasing the reaction kinetics of alkali-activated fly ash binders for stabilisation of a silty sand pavement sub-base. **Road Materials and Pavement Design**, v. 19, n. 1, p. 201–222, 2018.

ROBAYO, R. A. et al. Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 163–169, 2016.

SALDANHA, R. B. et al. Physical – Mineralogical – Chemical Characterization of Carbide Lime : An Environment-Friendly Chemical Additive for Soil Stabilization. v. 30, n. 6, p. 1–7, 2018.

SCHEUERMANN FILHO, H. C. **Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal**. p. 172. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

SHAFEE YUSUF, F. A. M.; LITTLE, D. N.; SARKAR, S. L. Evaluation of structural contribution of lime stabilization of subgrade soils in Mississippi. **Transportation Research Record**, n. 1757, p. 22–31, 2001.

SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 750–763, 2011.

SHI, C.; KRIVENKO, P.; ROY, D. **Álcali-activated cements and concretes**. [s.l.: s.n.].

SILVANI, C. **Influência da Temperatura de Cura no Comportamento Mecânico de Misturas Areia-Cinza Volante-Cal**. p. 127. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SILVANI, C. **Solos Artificialmente Cimentados em Célula Cúbica: Isotropia a Pequenas Deformações e na Ruptura**. p. 194. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SILVANO, L. W. **Estabilização alcalina de misturas de areia, pó de telha cerâmica e cal de carbureto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

SOFI, M. et al. Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 2, p. 251–257, 2007.

SOLANKI, P.; ZAMAN, M. M.; DEAN, J. Resilient modulus of clay subgrades stabilized with lime, class C fly ash, and cement kiln dust for pavement design. **Transportation Research Record**, n. 2186, p. 101–110, 2010.

SPECHT, L. P. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018, 2000.

SUN, Z. et al. Synthesis and thermal behavior of geopolymer-type material from waste ceramic. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 281–287, 2013.

TEBECHRANI NETO, A. **Estudo da resistência e da rigidez de uma mistura de material asfáltico fresado e vidro moído com a adição de cal de carbureto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

THEYSE, H. .; DE BEER, M.; RUST, F. C. Overview of South African Mechanistic. **Transportation Research Record**, n. 1, p. 6–17, 1996.

TOMAZELLI, L. J.; WILLWOCK, J. A. O Cenozóico Costeiro do Rio Grande do Sul. In: HOLZ, M.; HOS, L. F. de. **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS/CIGO, 2000. p. 375-406.

TRB. Lime stabilization – reactions properties, design and construction. **State of the Art Report 5**, n. 5, p. 1–64, 1987.

USACE. Soil Stabilization for Pavements TM 5-822-14. n. October, p. 1–57, 1994.

WINTER, D. **Resistência, rigidez e durabilidade de solos arenosos estabilizados com materiais mais sustentáveis**. 2018. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

YAO, X. et al. Geopolymerization process of alkali-metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. **Thermochimica Acta**, v. 493, n. 1–2, p. 49–54, 2009.

ZHANG, M. et al. Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1468–1478, 2013.

## 7 APÊNDICES

**APÊNDICE A:** Análise de variância ANOVA para os ensaios de resistência à compressão simples, rigidez inicial, durabilidade e módulo de resiliência

ANOVA para os dados de resistência à compressão simples

Fonte de variação	GL	Soma dos quadrados ajustadas	Médias dos quadrados ajustada	F-valor	P-valor
Modelo	11	134,327	12,2115	91,27	0
Fatores	4	110,849	27,7123	207,13	0
Peso Específico - A	1	15,43	15,4302	115,33	0
Agente cimentante - B	1	60,127	60,127	449,4	0
Teor de umidade - C	1	0,025	0,025	0,19	0,668
Tempo de Cura - D	1	42,162	42,1618	315,12	0
Interações do 2ª ordem	6	18,385	3,0642	22,9	0
A*B	1	0,677	0,6774	5,06	0,03
A*C	1	0,313	0,3131	2,34	0,134
A*D	1	1,816	1,8157	13,57	0,001
B*C	1	11,493	11,4932	85,9	0
B*D	1	3,775	3,7751	28,22	0
C*D	1	0,001	0,0013	0,01	0,921
Erro	39	5,218	0,1338	-	-
Falta de ajuste	5	1,712	0,3425	3,32	0,015
Erro puro	34	3,506	0,1031	-	-
Total	50	139,545	-	-	-
Resumo do Modelo					
Desvio Padrão		0,36578	R <sup>2</sup>		96,26%
R <sup>2</sup> ajustado		95,21%	R <sup>2</sup> de previsão		93,86%

## ANOVA para os dados de rigidez inicial

Fonte de variação	GL	Soma dos quadrados ajustadas	Médias dos quadrados ajustada	F-valor	P-valor
Modelo	11	16861586	1532871	146,59	0
Fatores	4	14407025	3601756	344,43	0
Peso Específico - A	1	8365917	8365917	800,03	0
Agente cimentante - B	1	1085900	1085900	103,84	0
Teor de umidade - C	1	2878972	2878972	275,31	0
Tempo de Cura - D	1	2076236	2076236	198,55	0
Interações de 2ª ordem	6	2392355	398726	38,13	0
A*B	1	166608	166608	15,93	0
A*C	1	85919	85919	8,22	0,007
A*D	1	7530	7530	0,72	0,401
B*C	1	1823495	1823495	174,38	0
B*D	1	125805	125805	12,03	0,001
C*D	1	182998	182998	17,5	0
Erro	39	407824	10457	-	-
Falta de ajuste	5	276327	55265	14,29	0
Erro puro	34	131497	3868	-	-
Total	50	17269410	-	-	-
Resumo do Modelo					
Desvio Padrão		102,26	R <sup>2</sup>		97,64%
R <sup>2</sup> ajustado		9697,00%	R <sup>2</sup> de previsão		96,02%

## ANOVA para os dados de durabilidade

Fonte de variação	GL	Soma dos quadrados ajustadas	Médias dos quadrados ajustada
Modelo	8	240,491	30,061
Fatores	3	210,433	70,144
Peso Específico - A	1	30,112	30,112
Agente cimentante - B	1	179,336	179,336
Teor de umidade - C	1	0,985	0,985
Interações de 2ª ordem	3	22,379	7,46
A*B	1	4,175	4,175
A*C	1	1,922	1,922
B*C	1	16,283	16,283
Interações de 3ª ordem	1	1,819	1,819
A*B*C	1	1,819	1,819
Erro	0	-	-
Total	8	240,491	-

## ANOVA para os dados de módulo de resiliência

Fonte de variação	GL	Soma dos quadrados ajustadas	Médias dos quadrados ajustada	F-valor	P-valor
Modelo	7	240532752	34361822	109,92	0
Fatores	3	157775897	52591966	168,24	0
Peso Específico - A	1	54243273	54243273	173,53	0
Agente cimentante - B	1	73626054	73626054	235,53	0
Teor de umidade - C	1	29906570	29906570	95,67	0
Interações de 2ª ordem	3	74092838	24697613	79,01	0
A*B	1	13648908	13648908	43,66	0
A*C	1	7681754	7681754	24,57	0
B*C	1	52762176	52762176	168,79	0
Interações de 3ª ordem	1	8664017	8664017	27,72	0
A*B*C	1	8664017	8664017	27,72	0
Erro	16	5001537	312596	-	-
Total	23	245534288	-	-	-
Resumo do Modelo					
Desvio Padrão		559,103	R <sup>2</sup>		97,96%
R <sup>2</sup> ajustado		97,07%	R <sup>2</sup> de previsão		95,42%



**APÊNDICE B:** Tratamentos para os ensaios de resistência à compressão simples, rigidez inicial, resistência à tração por compressão diametral, durabilidade e módulo de resiliência

Resultados para a resistência à compressão simples e rigidez inicial aos 28 dias de cura

$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	agente cimentante (%)	teor de umidade (%)	Trat.	qu (MPa)	qu médio (MPa)	G0 (MPa)	G0 médio (MPa)	$\eta/(Biv^{0,28})$	qu N.	G0 N.
17	20	10	1	3,99	4,10	3381,10	3441,53	17,54	0,99	1,04
				4,47		3433,78		17,34	1,11	1,06
				3,88		3510,94		17,39	0,96	1,08
		15	2	3,27	2,99	3643,22	3599,49	17,50	0,81	1,12
				2,95		3600,66		17,41	0,73	1,11
				2,76		3555,13		17,58	0,69	1,09
	30	10	3	6,03	5,90	3463,31	3358,12	15,41	1,49	1,06
				5,88		3339,37		15,72	1,46	1,03
				5,79		3274,40		15,32	1,44	1,01
		15	4	7,61	7,62	4733,11	4569,18	15,36	1,89	1,46
				7,82		4534,25		15,48	1,94	1,39
				7,43		4444,92		15,54	1,84	1,37
16	20	10	5	3,11	3,02	2758,61	2719,72	19,25	0,77	0,85
				2,95		2714,55		19,27	0,73	0,83
				2,99		2686,48		19,25	0,74	0,83
		15	6	1,99	2,05	2833,50	2825,97	19,21	0,49	0,87
				2,05		2821,94		19,24	0,51	0,87
				2,12		2822,50		19,13	0,53	0,87
	30	10	7	4,90	4,72	2617,41	2626,38	17,22	1,21	0,80
				4,44		2638,03		17,11	1,10	0,81
				4,84		2623,74		17,10	1,20	0,81
		15	8	5,54	5,58	3680,55	3623,86	17,06	1,37	1,13
				5,53		3597,55		17,23	1,37	1,11
				5,66		3594,14		17,03	1,40	1,11
16,5	25	12,5	9 (PC)	5,07	4,91	3328,48	3294,49	15,93	-	-
				4,90		3281,22		15,94	-	-
				4,75		3273,77		15,95	-	-

## Resultados para a resistência à compressão simples e rigidez inicial aos 7 dias de cura

$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	agente cimentante (%)	teor de umidade (%)	Trat.	qu (MPa)	qu médio (MPa)	G0 (MPa)	G0 médio (MPa)	$\eta/(Bi_v^{0,28})$	qu N.	G0 N.
17	20	10	<b>1</b>	2,91		3205,13		17,65	1,17	1,09
				2,60	2,66	3083,72	3168,50	17,62	1,05	1,05
				2,48		3218,40		17,66	1,00	1,10
		15	<b>2</b>	1,60		3127,24		17,46	0,65	1,07
				0,00	1,65	3236,54	3183,59	17,39	0,00	1,10
				1,69		3187,92		17,46	0,68	1,09
	30	10	<b>3</b>	3,96		3020,54		15,51	1,60	1,03
				4,21	3,93	3200,86	3091,98	15,56	1,70	1,09
				3,65		3057,43		15,51	1,47	1,04
		15	<b>4</b>	4,25		4088,94		15,26	1,71	1,39
				4,23	4,23	4057,07	4025,85	15,34	1,70	1,38
				4,21		3933,24		15,62	1,70	1,34
16	20	10	<b>5</b>	2,14		2500,78		19,19	0,86	0,85
				1,81	1,99	2425,19	2467,87	19,53	0,73	0,83
				2,05		2478,25		19,52	0,82	0,84
		15	<b>6</b>	1,32		2495,76		19,52	0,53	0,85
				1,47	1,37	2551,66	2550,38	19,17	0,59	0,87
				1,31		2604,89		19,41	0,53	0,89
	30	10	<b>7</b>	2,65		2655,00		17,25	1,07	0,90
				2,43	2,49	2595,00	2605,41	17,10	0,98	0,88
				2,39		2567,00		17,05	0,96	0,87
		15	<b>8</b>	3,71		3000,00		16,98	1,50	1,02
				3,51	3,62	0,00	3049,59	17,13	1,41	0,00
				3,65		3100,00		16,91	1,47	1,06
16,5	25	12,5	<b>9 (PC)</b>	5,07		3328,48		15,93	-	-
				4,90	4,91	3281,22	3294,49	15,94	-	-
				4,75		3273,77		15,95	-	-

## Resultados para a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de cura

$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	agente cimentante (%)	teor de umidade (%)	Trat.	qt (MPa)	qt médio (MPa)	$\eta/(Biv^{0,28})$	qt N	qt/qu
17	20	10	<b>1</b>	0,69	0,69	17,52	1,12	0,17
				0,65		17,73	1,06	0,15
				0,73		17,53	1,20	0,19
		15	<b>2</b>	0,00	0,54	0,00	0,00	0,00
				0,57		17,42	0,92	0,19
				0,51		17,70	0,83	0,18
	30	10	<b>3</b>	0,90	0,94	15,32	1,46	0,15
				0,97		15,26	1,58	0,17
				0,00		0,00	0,00	0,00
		15	<b>4</b>	0,00	1,25	0,00	0,00	0,00
				1,24		15,63	2,02	0,16
				1,26		15,30	2,05	0,17
16	20	10	<b>5</b>	0,43	0,44	19,49	0,70	0,14
				0,45		19,08	0,73	0,15
				0,00		0,00	0,00	0,00
		15	<b>6</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
				0,39		19,16	0,64	0,19
				0,38		19,55	0,61	0,18
	30	10	<b>7</b>	0,54	0,53	17,18	0,88	0,11
				0,50		17,04	0,81	0,11
				0,53		17,04	0,87	0,11
		15	<b>8</b>	0,76	0,78	17,15	1,23	0,14
				0,81		16,95	1,32	0,15
				0,00		0,00	0,00	0,00
16,5	25	12,5	<b>9 (PC)</b>	0,68	0,69	15,52	-	0,13
				0,64		15,93	-	0,13
				0,76		16,21	-	0,16

## Resultados para a resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias de cura

$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	agente cimentante (%)	teor de umidade (%)	Trat.	qt (MPa)	qt médio (MPa)	$\eta/(Biv^{0,28})$	qt N	qt/qu
17	20	10	<b>1</b>	0,00	0,36	0,00	0,00	0,00
				0,31		17,66	0,76	0,12
				0,42		17,67	1,03	0,17
		15	<b>2</b>	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00
				0,31		17,65	0,75	0,00
				0,32		17,64	0,79	0,19
	30	10	<b>3</b>	0,62	0,60	15,61	1,51	0,16
				0,00		0,00	0,00	0,00
				0,58		15,60	1,42	0,16
		15	<b>4</b>	0,75	0,74	15,73	1,84	0,18
				0,74		15,40	1,81	0,18
				0,74		15,53	1,81	0,18
16	20	10	<b>5</b>	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00
				0,27		19,29	0,65	0,15
				0,30		19,13	0,74	0,15
		15	<b>6</b>	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00
				0,17		19,51	0,42	0,12
				0,19		19,34	0,48	0,15
	30	10	<b>7</b>	0,39	0,38	17,25	0,95	0,15
				0,42		17,23	1,02	0,17
				0,35		17,15	0,86	0,15
		15	<b>8</b>	0,58	0,56	17,20	1,43	0,16
				0,53		17,32	1,31	0,15
				0,55		17,12	1,34	0,15
16,5	25	12,5	<b>9 (PC)</b>	0,68	0,69	15,52	-	0,13
				0,64		15,93	-	0,13
				0,76		16,21	-	0,16

## Resultados para o ensaio de durabilidade por molhagem e secagem

$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	agente cimentante (%)	teor de umidade (%)	<b>Trat.</b>	PMA (%)	$\eta/(Biv^{0,28})$
17	20	10	<b>1</b>	10,48	16,90
17	20	15	<b>2</b>	12,11	17,38
17	30	10	<b>3</b>	4,36	14,78
17	30	15	<b>4</b>	2,18	15,44
16	20	10	<b>5</b>	13,88	18,17
16	20	15	<b>6</b>	19,37	19,25
16	30	10	<b>7</b>	6,77	16,54
16	30	15	<b>8</b>	4,64	16,89
16,5	25	12,5	<b>9 (PC)</b>	6,66	16,25

## Resultados para o ensaio de Módulo de Resiliência

$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	agente cimentante (%)	teor de umidade (%)	Trat.	MR(MPa)	MR médio (MPa)	$\eta/(Biv^{0,28})$	RT (MPa)	MR/RT
17	20	10	1	15637,00	15815,00	15,70	0,69	22707,60
				15491,50		15,64	0,73	21355,59
				0,00		0,00	0,00	0,00
		16316,50	15,41	0,68	23935,30			
		14722,00	16,33	0,68	21560,24			
		15324,00	16,55	0,82	18709,79			
	30	15	2	14990,00	15012,00	16,76	0,66	22717,26
				0,00		0,00	0,00	0,00
				16386,50		13,58	0,98	16722,49
		rompeu	16659,1667	0,00	rompeu	-		
		17344,00	13,68	1,10	15756,42			
		16247,00	13,70	0,86	18809,76			
16	20	10	5	24182,50	24190,33	14,10	1,32	18317,77
				25198,50		14,13	1,42	17693,35
				23190,00		14,04	1,48	15715,02
		0,00	0,00	0,00	0,00			
		13721,00	17,46	0,85	16078,00			
		14188,00	17,59	0,49	29006,19			
	30	15	6	14830,00	14498,88	17,76	0,75	19685,14
				15256,50		17,78	0,76	20183,47
				13610,00		17,60	0,47	29024,33
		13548,50	17,79	0,54	25311,91			
		13592,50	17,80	0,59	23180,41			
		0,00	0,00	0,45	0,00			
16	10	7	14420,00	15160,00	15,62	0,77	18760,99	
			14524,50		15,64	0,73	19762,87	
			16535,50		15,89	0,69	24063,06	
	rompeu	0,00	rompeu	-				
	16535,50	15,73	1,01	16362,88				
	0,00	0,00	1,22	0,00				
16	15	8	17524,50	17342,17	15,81	1,14	15312,01	
			17966,50		15,61	1,17	15299,35	