

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**Estabilização de um Solo Granular com Misturas de Pó de Vidro –  
Cal de Carbureto – Hidróxido de Sódio (NaOH)**

COCOU AUXENCE PIERRE DAASSI-GLI

PORTO ALEGRE

2020

COCOU AUXENCE PIERRE DAASSI-GLI

**Estabilização de um Solo Granular com Misturas de Pó de Vidro –  
Cal de Carbureto – Hidróxido de Sódio (NaOH)**

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

2020

**COCOU AUXENCE PIERRE DAASSI-GLI**

**Estabilização de um Solo Granular com Misturas de Pó de Vidro –  
Cal de Carbureto – Hidróxido de Sódio (NaOH)**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, 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, 20 de abril de 2020

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

Prof. Cesar Alberto Ruver  
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Coorientador

Nilo Cesar Consoli  
Ph.D Concórdia University, Canadá  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Antônio Thomé (UPF)**

Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Cezar Augusto Burkert Bastos (FURG)**

Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Lucas Festugato (UFRGS)**

Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Dr. Rodrigo Beck Saldanha (UFRGS)**

Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo que aconteceu e tem acontecidos ao longo da minha vida e especialmente nestes anos de mestrado.

Agradeço a esta Universidade e seu corpo docente por me proporcionar o aprendizado o qual levarei para toda a vida.

Em especial:

Ao Prof. Nilo Cesar Consoli, orientador deste trabalho, pela confiança que depositou em mim, força, persistência, pelo apoio nos momentos difíceis, afeto, e pelos ensinamentos transmitidos durante esta trajetória.

Ao Prof. Cesar Alberto Ruver pela dedicação, atenção dada, sua paciência para as correções apesar da língua francesa, pelas suas contribuições extremas para que este trabalho pudesse existir.

Ao Prof. Samir Maghous, pela contribuição, conselhos e apoios nos momentos difíceis. Agradeço muito professor!!

Ao Prof. Lucas Festugato pelas suas contribuições e suas recomendações.

Aos Professores, Fernando Schnaid, Karla Salvagni Heineck e Sérgio Marques que transmitiram seus conhecimentos, através das aulas e explicações, contribuindo para minha formação.

Aos doutorandos: Andres Mauricio Lotero Caicedo, Hugo Scheuermann Filho, Gonçalo Sonaglio, Tennison, Eclesielter por todo apoio, ajuda, explicações, suas contribuições do início até o final deste trabalho.

Ao Pós Doutorando David para sua paciência e contribuição através das correções deste trabalho.

Ao Naloan Coutinho Sampa, meu grande amigo e irmão pelo seu apoio, auxílio prestado durante minha trajetória nesta Universidade.

A Laís Veríssimo, Marina Seco, Zélia Andrade e Laura Lima, pelas suas ajudas nas correções deste trabalho.

Aos meus colegas da turma Lukas, Gustavo, Ricardo, Aziz, Brenda, Lucas, Laís, Eder, Andressa, Guilherme, Pedro; aos bolsistas João, Paolo, Thales, Guilherme e todos meus queridos amigos de LEGG que me ajudaram durante todos estes anos.

A minha querida amor Juliette por nunca me deixar desistir e por sempre estar do meu lado nas horas boas e ruins, o dia e a noite.

Agradeço a minha família e meus irmãos Anselme, Pierre, Chimene, Natacha, Urbain, Gildas, Sonia, Mahougnon, Keneth, ao meu filho Arianho e sua mãe Prudence pelos seus amores e apoios. Os quais senti saudades e a transformei em força para a conclusão desta jornada.

Ao Rodrigues Tossou por ser meu intérprete, amigo e auxílio em meus primeiros momentos ao desbravar esta cidade.

A Sr Abbassi por ter sido de grande ajuda e contribuição para a chegada ao Brasil.

Ao meu padrinho Leonardo e minha madrinha Andressa pelo que apoio, ajuda e conselho.

As minhas queridas Mariette, Benedicte, Nadege, Priscilia pelo apoio e acompanhamento.

Agradeço enormemente a CAPES pela bolsa de auxílio financeiro que sem a qual não seria possível minha entrada e permanência nesta universidade.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEC/UFRGS) pela grande oportunidade de realizar este curso de Mestrado

Agradeço e dedico este trabalho a minha falecida mãe Christine DEDO heroína que me apoiou, incentivou sem descanso ou cansaço, que criou a mim e meus irmãos com sua inabalável força e dedicação para que sejamos o que somos hoje.

E a todos que de alguma forma contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho meu muito obrigado.

Muito Obrigado!!!

*Dedico este trabalho ao meu pai, minha  
mãe e meu tio Barnabe DASSIGLI por todo  
apoio, incentivo, acompanhamento e o  
amor durante todo o mestrado.*

## RESUMO

DAASSI-GLI, C. A. P. **Estabilização de um Solo Granular com Misturas de Pó de Vidro – Cal de Carbureto – Hidróxido de Sódio (NaOH)**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A resistência e a durabilidade de estruturas, tais como estradas, barragens, pistas de aeroporto, aterros e outros dependem do comportamento do solo da fundação e dos materiais utilizados. Em muitos dos casos, solos dessas fundações não apresentam comportamento adequado, exigindo emprego de diferentes técnicas de estabilização ou melhoramento como uma das soluções para satisfazer os requisitos pré-estabelecidos no projeto. Como alternativas ao cimento Portland e por questões ambientais, a utilização de resíduos tais como: pó de vidro, cinza volante, cinza de casca de arroz, e outras pozolanas com ou sem adição de cal de carbureto como agente cimentante no processo de melhoramento do comportamento de solos cresce cada vez. Em função de vários fatores que influenciam na formação do agente cimentante da mistura solo-cal, é de grande importância a utilização de um produto químico capaz de aumentar pH para valores superiores ou igual de 12,4 de modo a acelerar as reações pozolânicas. Nessa perspectiva, o presente trabalho avalia a eficiência do hidróxido de sódio (NaOH) como ativador-alcálico, caracterizado como uma base forte, no comportamento da mistura areia fina, pó de vidro e cal de carbureto. Foram utilizadas como variáveis: (a) três teores de cal (3, 5 e 7%); (b) três teores de vidro moído (10, 20 e 30%); (c) três pesos específicos (15,5; 16,5 e 17,5 kN/m<sup>3</sup>); (d) uma solução de NaOH de concentração 3 mols/litro; (e) e tempos de cura de 7 e 28 dias. As amostras foram curadas sob temperatura controlada de 23°C e foram imersas durante 24 horas antes da realização dos ensaios de rigidez (Go) e resistência à compressão simples (qu). Em adição, foram realizados ensaios de durabilidade por ciclos de molhagem e secagem, ensaios de difração de raio-x (DRX), fluorescência por raio-x (FRX), granulometria a laser e determinação da área superficial específica (BET). Os resultados de resistência a compressão simples e de durabilidade encontrados para sete dias de cura mostram um ganho de resistência quase três vezes maior que os resultados das amostras sem ativador alcálico.

**Palavras – chaves:** *Ativador-alcálico; Reações pozolânicas; Estabilização de solos;*



## ABSTRACT

DAASSI-GLI, C. A. P. **Estabilização de um Solo Granular com Misturas de Pó de Vidro – Cal de Carbureto – Hidróxido de Sódio (NaOH)**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The strength and durability of structures such as roads, dams, airport runways, embankments and others depend on the behavior of the foundation soil and the materials used. In many cases, soils of these foundations do not exhibit adequate behavior, thus requiring the use of chemical stabilization or improvement techniques as solutions to meet the requirements pre-established in the project. As alternatives to Portland cement and also for environmental reasons, the use of waste glass powder, fly ash, rice husk ash, and other pozzolans with the addition of carbide lime as cementing agents in the process of soil behavior improvement is growing. Due to several factors that influences the formation of the cementing agent of the soil-lime mixture, it is of great importance to use a chemical product capable of increasing pH to values above 12.4 in order to accelerate the pozzolanic reactions. In this perspective, the present study evaluates the efficiency of the use of NaOH as an alkaline activator, a strong basis in the behavior of the sand - glass-lime carbide powder mixture. Three lime contents (3, 5 and 7%), three glass contents (10, 20 and 30%), three dry unit weights (15,5; 16,5 e 17,5 kN/m<sup>3</sup>), molarity of 3M/liter for NaOH, and curing times of 7 and 28 days were used as variables. The specimens were cured under controlled temperature and were immersed for 24 hours before performing the stiffness and compressive strength tests. In addition, durability tests were performed by wetting and drying, DRX, FRX, BET and laser granulometry tests. The results of unconfined compressive strength ( $q_u$ ) and durability found for seven days of curing showed a gain of resistance almost three times higher than the results of the specimens without alkaline activator.

**Key words:** *Alkali-activator; pozzolanic reactions, soil stabilization.*

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1. JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	23
1.2. OBJETIVOS.....	24
1.2.1. Objetivo geral.....	24
1.2.2. Objetivos específicos.....	24
1.3. PRESSUPOSTO.....	25
1.4. DELIMITAÇÃO DO TRABALHO.....	25
1.5. FLUXOGRAMA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	26
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>28</b>
2.1. SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO.....	28
2.2. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS .....	28
2.3. ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA .....	33
2.3.1. Solo-Cimento.....	33
2.3.2. Solo-Cal.....	36
2.3.3. Solo - Vidro .....	50
2.3.4. Hidróxido de Sódio (NaOH).....	61
2.4. ESTABILIZAÇÃO POR ATIVAÇÃO ALCALINA.....	65
2.4.1. A Geopolimerização.....	69
2.4.2. Mecanismo de Formação do Geopolímero.....	72
2.4.3. O Tempo e a Temperatura de Cura.....	88
<b>3. MÉTODO E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DA PESQUISA .....</b>	<b>93</b>
3.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	93
3.2. MATERIAIS USADOS .....	94
3.2.1. Solo Granular .....	94
3.2.2. Pó de Vidro .....	97

3.2.3. Cal de Carbureto .....	101
3.2.4. Água .....	102
3.2.5. Hidróxido de Sódio (NaOH).....	102
3.3. MÉTODOS E ENSAIOS REALIZADOS .....	103
3.3.1. Métodos .....	103
3.3.2. Ensaio realizados .....	109
3.4. DEFINIÇÃO DAS DOSAGENS .....	113
<b>4. RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>115</b>
4.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DA MISTURA DE AREIA DE OSÓRIO, VIDRO, CAL DE CARBURETO E A SOLUÇÃO NAOH.....	115
4.1.1. Resistência à compressão simples aos sete (07) dias de curas. ....	115
4.1.2. Resistência à compressão simples aos vinte e oito (28) dias de curas. ....	123
4.2. ENSAIO DE RIGIDEZ DA MISTURA DE AREIA DE OSÓRIO, VIDRO, CAL DE CARBURETO E A SOLUÇÃO DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO (NAOH) .....	127
4.2.1. Rigidez aos 7 dias de cura .....	127
4.2.2. Rigidez aos vinte e oito (28) dias de curas .....	132
4.3. ENSAIOS DE DURABILIDADE.....	136
4.3.1. Durabilidade em função de teor de cal de carbureto.....	136
4.3.2. Durabilidade em função de teor de vidro .....	140
4.3.3. Durabilidade em função do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ).....	144
4.3.4. Durabilidade em função da razão entre porosidade e teor volumétrico dos agentes cimentantes (índice $\eta/B_{iv}$ ).....	148
4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E DE RIGIDEZ.....	149
4.4.1. Resistência à compressão simples.....	149
4.4.2. Módulo cisalhante a pequenas deformações ( $G_o$ ).....	156
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>163</b>

5.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	165
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>166</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>184</b>
APÊNDICE 1: DETERMINAÇÃO E A PREPARAÇÃO DA SOLUÇÃO NaOH .....	184
APÊNDICE 2: RESULTADO DE TODOS OS DE CORPOS DE PROVA PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E MÓDULO CISALHANTE A PEQUENAS DEFORMAÇÕES PARA 7 DIAS DE CURA .....	186
APÊNDICE 3: RESULTADO DE TODOS OS CORPOS DE PROVA PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E MÓDULO CISALHANTE A PEQUENAS DEFORMAÇÕES PARA 28 DIAS DE CURA .....	190

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Fluxograma da metodologia.....	26
Figura 2.1: Relação entre a resistência ao cisalhamento não-drenada $S_u$ e o teor de umidade (GLENDINNING <i>et al.</i> , 2005). .....	31
Figura 2.2: Aumento de resistência em função de tempo de cura de alguns solos (INGLES e METCALF, 1972). .....	32
Figura 2.3: (a) silicato de cálcio hidratado (CSH) e Portlandita (CH), (b) Portlandita (CH) e Etringita (SAUSSAYE, 2012) .....	34
Figura 2.4: Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento (Fonte: SACHETTI <i>et al.</i> , 2009).....	36
Figura 2.5: O efeito de cal sobre a argila logo após sua adição (CABANE, 2004 <i>apud</i> TRAN, 2014).....	42
Figura 2.6: Mecanismo de troca catiônica na argila (PRUSINSKI e BHATTACAHARJA, 1999 <i>apud</i> TRAN, 2013).....	43
Figura 2.7: Efeito da cal na resistência do solo: a) montmorilonita, b) caulinita, c) quartzo (BELL, 1996).....	45
Figura 2.8: Evolução teórica de desenvolvimento da resistência à compressão simples de um solo estabilizado com cal (CRISTELO, 2001). .....	46
Figura 2.9: Variação de resistência à compressão simples em função de teor de cal (Fonte: CONSOLI <i>et al.</i> , 2011).....	48
Figura 2.10: Variação de resistência à compressão simples em função da porosidade (Fonte: CONSOLI <i>et al.</i> , 2011).....	48
Figura 2.11: Variação de resistência à compressão simples em função da relação entre a ..... 49	49
Figura 2.12: Variação da resistência à compressão simples em função da relação entre a porosidade, teor de cal e da cinza volante: (a) apenas a cal, (b) cal e 12,5% cinza volante, (c) cal e 25% cinza volante (CONSOLI <i>et al.</i> , 2011).....	50
Figura 2.13: Resíduos de vidro para reciclagem (TORRES-CARRASCO, 2015).....	51
Figura 2.14: Estrutura de a) de quartzo, b) de vidro silício (PARTYKA <i>et al.</i> , 2014) .....	53
Figura 2.15: Representação esquemática do vidro silicato Na-Ca-K-Mg (PARTYKA <i>et al.</i> , 2014) .....	53
Figura 2.16: Espectro DRX de PV (material tipicamente amorfo) (FROHARD, 2014).....	55
Figura 2.17: MEV de PV e espectro EDS associado (IDIR, 2009). .....	55

Figura 2.18: DRX de vidro A) branco, B) verde, C) topázio, D) misturado (TORRES-CARASCO, 2015).....	56
Figura 2.19: Concreto à base de agregados de vidro.....	57
Figura 2.20: Efeito de tamanho das partículas de vidro sobre a expansão e a resistência a compressão simples (IDIR <i>et al.</i> , 2010 <i>apud</i> FROHARD, 2014 ).....	58
Figura 2.21: O aumento da resistência à compressão simples em função de teor de vidro (G) com o um teor de cal de carbureto (C) constante (7%) (BILONDI <i>et al.</i> , 2018) .....	60
Figura 2.22: O efeito de teor de vidro (G) com um teor constante de cal de carbureto (C) (7%) sobre a deformação volumétrica ao 7 dias e 28 dias (BILONDI <i>et al.</i> , 2018).....	60
Figura 2.23: A evolução da deformação volumétrica em função do tempo (BILONDI <i>et al.</i> , 2018). .....	61
Figura 2.24: Diagrama de emissões de CO <sub>2</sub> na produção de hidróxido de sódio para o setor de saúde (TORRES-CARRASCO, 2013) .....	62
Figura 2.25: Diagrama de fases de NaOH na água (KURT e BITTNER, 2006).....	63
Figura 2.26: Evolução da temperatura de diluição em função da percentagem de NaOH (DCC, 1993 <i>apud</i> SHI <i>et al.</i> , 2006).....	63
Figura 2.27: Resumo de CO <sub>2</sub> total emitido pela produção de cimento e geopolímero (TURNER e COLLINS, 2013).....	69
Figura 2.28: Esquema das estruturas moleculares de polissialatos (DAVIDOVITS, 1994) .....	70
Figura 2.29: Representação das reações dos polissialatos (DAVIDOVITS, 2002).....	71
Figura 2.30: Reorganização estrutura do Na-polissialato e Zeólita (DAVIDOVITS, 1991) .....	72
Figura 2.31: Representação esquemática do mecanismo de geopolimerização (DUXSON <i>et al.</i> , 2007).....	74
Figura 2.32: Estrutura tridimensional do gel N-A-S-H (GARCIA-LODEIRO <i>et al.</i> , 2014) .....	75
Figura 2.33: Resistência à compressão simples de geopolímeros à base de escória de alto-forno com função de concentração de hidróxidos alcalinos (KOMNITSAS e ZAHARAKI, 2009). ....	78
Figura 2.34: Resistência à compressão simples de geopolímeros à base de escória de alto-forno com função da percentagem de Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> com soluções de NaOH e KOH (KOMNITSAS e ZAHARAKI, 2009).....	79
Figura 2.35: Resistência à compressão simples em função da concentração molar (AL BAKRI <i>et al.</i> , 2011).....	80
Figura 2.36: Efeito da concentração de NaOH sobre a resistência à compressão simples da mistura de pó de vidro e 5% de metacaulim (PASCUAL <i>et al.</i> , 2014). .....	81
Figura 2.37: SEM de Cinza volante (AL BAKRI <i>et al.</i> , 2011).....	81

Figura 2.38: MEV de geopolimerose de cinza volante com: a) 6 mols; b) 8 mols; c) 10 mols; d) 12 mols; e) 14 mols; f) 16 mols (AL BAKRI <i>et al.</i> , 2011).....	82
Figura 2.39: Efeito de teor de Ca(OH) <sub>2</sub> (C) sobre a resistência à compressão simples com teor de vidro (G) constante (BILONDI <i>et al.</i> , 2018). .....	83
Figura 2.40: Diagrama de Kiel (HOUZE, 2013).....	84
Figura 2.41: Resistência em função de teor alcalino (THAKUR e GHOSH, 2014). .....	85
Figura 2.42: Resistência em função de teor de sílica (THAKUR e GHOSH, 2014) .....	85
Figura 2.43: Efeito do Si/Al na resistência compressiva única e no módulo de Young do geopolímero baseado em metacaulim (DUXSON <i>et al.</i> , 2005).....	86
Figura 2.44: Difração de raio-X (DRX) da (a) cinza volante original, e os geopolímeros com NaO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> a (b) 0,54; (c) 0,58; e (d) 0,62 (THAKUR e GHOSH, 2014).....	87
Figura 2.45: Imagem MEV de (a) Metacaulim com 8 mols de NaOH, (b) Cinza volante com 8 mols de NaOH (DUXSON <i>et al.</i> , 2007).....	88
Figura 2.46: Efeito de temperatura sobre a resistência à compressão simples (THAKUR e GHOSH, 2009).....	89
Figura 2.47: MEV de: (a) cinza volante não ativado; (b) cinza volante ativado à temperatura ambiente, depois 7dias de cura, (c) cinza volante ativado à 40°C, depois 7dias de cura (PHETCHUAY <i>et al.</i> , 2014).....	90
Figura 2.48: Resistência à compressão simples em função do tempo de cura (HARDJITO e RANGAN, 2005).....	92
Figura 2.49: Variação da taxa de resistência em função do tempo (WALLAH e RANGAN, 2006) .....	92
Figura 3.1: Localização da cidade de Osório/ RS – Brasil (Imagens Google Maps) (MARQUES, 2016).....	95
Figura 3.2: Curva granulométrica da Areia de Osório –Laser (MARQUES, 2016).....	96
Figura 3.3: Aspecto da areia fina de Osório ampliada em (a) 40 vezes e (b) 500 vezes por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (DALLA ROSA, 2009 <i>apud</i> MARQUES, 2016). .	96
Figura 3.4: Distribuição granulométrica do pó de vidro obtida por laser da fração passante na peneira #200.....	98
Figura 3.5: Curva da distribuição granulométrica de cal da carbureto.....	101
Figura 3.6: Embalagem e aspecto do hidróxido de sódio (NaOH) utilizado na presente pesquisa. ....	103
Figura 3.7: Fluxo da dosagem de solo e álcali-ativador.....	104

Figura 3.8: Curvas de compactação para diferentes misturas de areia fina, pó de vidro, cal de carbureto e álcali-ativador (sem e com 2 e 4 mols).....	105
Figura 3.9: Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) pela molaridade.....	106
Figura 3.10: Corpos de prova (a) antes os 12 ciclos de molhagem e secagem, (b) depois os 12 ciclos de molhagem e secagem com ativação alcalina (fonte: Elaborado pelo autor); (c) depois os 12 ciclos de molhagem e secagem sem ativação alcalina (WINTER, 2018).....	112
Figura 4.1: Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função de teor de cal de carbureto com aumento de teor de vidro, aos 7 dias de cura.....	116
Figura 4.2: Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função de teor de vidro com aumento de teor cal de carbureto, aos 7 dias de cura. ....	117
Figura 4.3: Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função em função do peso específico aparente seco com aumento de teor de vidro e de cal de carbureto, aos 7 dias de cura. ....	118
Figura 4.4: Relação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função do índice $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ com ativação alcalina a 3 mols de todos os corpos de prova, aos 7 dias de cura. ....	120
Figura 4.5: Relação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função do índice $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ sem ativação alcalina de todos os corpos de prova, aos 7 dias de cura (Adaptado de WINTER, 2018) ....	120
Figura 4.6: Efeito da adição do hidróxido de sódio (NaOH), com 3 mols, na resistência à compressão simples para o peso específico ( $\gamma_d$ ) de 15,5 kN/m <sup>3</sup> em função do teor de cal de carbureto, aos 7 dias de cura.....	121
Figura 4.7: Efeito da adição do hidróxido de sódio (NaOH), com 3 mols, na resistência à compressão simples para o peso específico ( $\gamma_d$ ) de 16,5 kN/m <sup>3</sup> em função do teor de cal de carbureto, aos 7 dias de cura.....	122
Figura 4.8: Efeito da adição do hidróxido de sódio (NaOH), com 3 mols, na resistência à compressão simples para o peso específico ( $\gamma_d$ ) de 17,5 kN/m <sup>3</sup> em função do teor de cal de carbureto, aos 7 dias de cura.....	122
Figura 4.9: Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função de teor de cal de carbureto com aumento de teor de vidro, aos 28 dias de cura.....	124
Figura 4.10: Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função de teor de vidro com aumento de teor cal de carbureto, aos 28 dias de cura. ....	125



Figura 4.11: Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função do peso específico aparente seco com aumento de teor de vidro e de cal de carbureto, aos 28 dias de cura. ....	126
Figura 4.12: Relação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função do índice $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ com ativação alcalina a 3 mols de todos os corpos de prova, aos 28 dias de cura. ....	127
Figura 4.13: Variação da rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações – $G_o$ ) em função de teor de cal de carbureto com aumento de teor de vidro, aos 7 dias de cura.....	128
Figura 4.14: Variação da rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações – $G_o$ ) em função de teor de vidro com aumento de teor cal de carbureto, aos 7 dias de cura. ....	129
Figura 4.15: Variação da rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações – $G_o$ ) em função em função do peso específico aparente seco com aumento de teor de vidro e de cal de carbureto, aos 7 dias de cura.....	130
Figura 4.16: Relação da rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações – $G_o$ ) em função do índice $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ com ativação alcalina a 3 mols de todos os corpos de prova, aos 7 dias de cura. ....	131
Figura 4.17: Relação da rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações – $G_o$ ) em função do índice $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ sem ativação alcalina de todos os corpos de prova, aos 7 dias de cura (Adaptado de WINTER, 2018) .....	132
Figura 4.18: Variação da rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações – $G_o$ ) em função de teor de cal de carbureto com aumento de teor de vidro, aos 28 dias de cura.....	133
Figura 4.19: Variação da rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações – $G_o$ ) em função de teor de vidro com aumento de teor cal de carbureto, aos 28 dias de cura. ....	134
Figura 4.20: Variação da rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações – $G_o$ ) em função em função do peso específico aparente seco com aumento de teor de vidro e de cal de carbureto, aos 28 dias de cura.....	135
Figura 4.21: Relação da rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações – $G_o$ ) em função do índice $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ com ativação alcalina a 3 mols de todos os corpos de prova, aos 28 dias de cura. ....	136
Figura 4.22: Resultados os ensaios de durabilidade: (a) perda de massa por ciclo e (b) perda de massa acumulada ao longo dos ciclos, para 3% de cal de carbureto.....	137
Figura 4.23: Resultados os ensaios de durabilidade: (a) perda de massa por ciclo e (b) perda de massa acumulada ao longo dos ciclos, para 5% de cal de carbureto.....	138

Figura 4.24: Resultados os ensaios de durabilidade: (a) perda de massa por ciclo e (b) perda de massa acumulada ao longo dos ciclos, para 7% de cal de carbureto.....	139
Figura 4.25: Resultados os ensaios de durabilidade: (a) perda de massa por ciclo e (b) perda de massa acumulada ao longo dos ciclos, para o teor de 10% de pó de vidro. ....	141
Figura 4.26: Resultados os ensaios de durabilidade: (a) perda de massa por ciclo e (b) perda de massa acumulada ao longo dos ciclos, para o teor de 20% de pó de vidro. ....	142
Figura 4.27: Resultados os ensaios de durabilidade: (a) perda de massa por ciclo e (b) perda de massa acumulada ao longo dos ciclos, para o teor de 30% de pó de vidro. ....	143
Figura 4.28: Resultados os ensaios de durabilidade: (a) perda de massa por ciclo e (b) perda de massa acumulada ao longo dos ciclos, para um peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de 15,5kN/m <sup>3</sup> . .....	145
Figura 4.29: Resultados os ensaios de durabilidade: (a) perda de massa por ciclo e (b) perda de massa acumulada ao longo dos ciclos, para um peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de 16,5kN/m <sup>3</sup> . .....	146
Figura 4.30: Resultados os ensaios de durabilidade: (a) perda de massa por ciclo e (b) perda de massa acumulada ao longo dos ciclos, para um peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de 15,5kN/m <sup>3</sup> . .....	147
Figura 4.31: Resultado dos ensaios de durabilidade pela perda de massa acumulada (PMA) em função do fator $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ para as dosagens com ativação alcalina, a 3 mols. ....	148
Figura 4.32: Resultado dos ensaios de durabilidade pela perda de massa acumulada (PMA) em função do fator $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ para as dosagens sem ativação alcalina (WINTER, 2018) .....	149
Figura 4.33: Efeitos principais das variáveis independentes na resistência à compressão simples média ( $q_u$ ) aos 7 dias de cura com NaOH a 3 molar. ....	151
Figura 4.34: Efeitos principais das variáveis independentes na resistência a compressão simples média ( $q_u$ ) aos 28 dias de cura com NaOH a 3 molar.....	151
Figura 4.35: Efeitos principais de todas as variáveis independentes na resistência a compressão simples média ( $q_u$ ) com NaOH a 3 molar. ....	152
Figura 4.36: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados na resistência à compressão simples para 7 dias de cura.....	153
Figura 4.37: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados na resistência a compressão simples para 28 dias de cura.....	155
Figura 4.38: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados na resistência a compressão simples considerando todos os fatores. ....	156

Figura 4.39: Efeitos principais dos fatores para a rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações - $G_0$ ) aos 7 dias de cura com NaOH a 3 molar.....	157
Figura 4.40: Efeitos principais dos fatores para a rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações - $G_0$ ) aos 28 dias de cura com NaOH a 3 molar.....	158
Figura 4.41: Efeitos principais dos fatores para a rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações - $G_0$ ) considerando todos as variáveis independentes com NaOH a 3 molar.....	159
Figura 4.42: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados na rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações - $G_0$ ) aos 7 dias de cura.....	161
Figura 4.43: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados na rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações - $G_0$ ) aos 28 dias de cura.....	161
Figura 4.44: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados na rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações - $G_0$ ) considerando todos os efeitos.....	162

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Diferentes tipos de cales (SILVANI, 2013) .....	37
Tabela 2.2: Exigências químicas da cal hidratada (NBR 7175 (ABNT, 2003)).....	38
Tabela 2.3: Cálculo de teor de óxido de cálcio ou de magnésio (NBR 7175 (ABNT, 2003)).....	38
Tabela 2.4: Cálculo de teor de óxidos não hidratados-cal (e) (NBR 7175 (ABNT,2003)). .....	39
Tabela 2.5: Exigências Físicas da cal hidratada (NBR 7175 ABNT (2003)) .....	39
Tabela 2.6: Composição química vidros determinados por FRX (SHAO <i>et al.</i> , 2000 ;SHAYAN e XU, 2004, 2006). .....	54
Tabela 2.7: Composição química de alguns tipos de vidros determinada por FRX (TORRES-CARRASCO, 2015). .....	54
Tabela 2.8: Viscosidade de água neutra e solução NaOH a 20°C (SHI <i>et al.</i> , 2006).....	64
Tabela 2.9: Quantidade mundial de CO <sub>2</sub> liberado de acordo com a quantidade de cimento produzido (Fonte: ALI <i>e al.</i> , 2011). .....	67
Tabela 3.1: Descrição das etapas.....	94
Tabela 3.2: Índices físicos da areia de Osório (LEON, 2018) .....	97
Tabela 3.3: Composição química do vidro obtida por fluorescência de raio-X (FRX) .....	99
Tabela 3.4: Composição química da atual pesquisa e de outros autores .....	100
Tabela 3.5: Composição química da cal de carbureto, obtida por fluorescência de raio-X (FRX) .....	102
Tabela 3.6: Dosagens para determinação da resistência à compressão simples e rigidez para 7 e 28 dias de cura.....	113
Tabela 3.7: Dosagens para determinação da durabilidade para 7 dias de cura. ....	114

## LISTA DE SIMBOLOS

$\%C$	Teor de cal de carbureto (%)
$\%V$	Teor de pó de vidro (%)
$\eta$	Porosidade
$\gamma_d$	Peso específico aparente seco ( $\text{kN/m}^3$ )
$B_{iv}$	Teor volumétrico de agentes cimentantes
$C$	Molaridade
$D_m$	Diâmetro médio do corpo de prova obtido a partir das medições de topo, centro e base (m)
$G_o$	Módulo Cisalhante a pequenas deformações (GPa)
$m$	Massa de soluto (g)
$M$	Massa molar (g/mol)
$Q$	Carga máxima aplicada ao corpo de prova, pela leitura da célula de carga (kN)
$V$	Volume (l)
$w$	Teor de umidade (%)

## LISTA DE SIGLAS

AA	Ativador alcalino
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
DRX	Ensaio de difração de raio-x
EE	Escola de Engenharia
FRX	Ensaio de fluorescência por raio-x
LAMEF	Laboratório de Materiais Cerâmicos
LEGG	Laboratório de Ensaio Geotécnicos e Geotecnologia Ambiental
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. JUSTIFICATIVA DO TEMA

O crescente desenvolvimento de grandes centros urbanos reduziu a disponibilidade de solos com características geotécnicas adequadas para construções civis, tais como estradas, barragens, túneis, aeródromos, ferrovias, aterros, etc. Como consequência cada vez mais é requerida não só a construção em solos com menor capacidade de suporte, mas também o uso de materiais com características não adequadas. Para tanto, diversas técnicas e métodos têm sido estudados e adotados por pesquisadores geotécnicos, tais como: estabilização, melhoramento e reforços de solos.

Muitas pesquisas têm sido feitas por vários pesquisadores usando cal e/ou resíduos para melhorar as diferentes características geotécnicas do solo; tais como: AIPCR (1991); Timimi *et al.* (1995); Mallmann (1996); Bell (1996); LCPC (2000); Consoli *et al.* (2001); Lovato (2004); Behak (2007); Cordeiro (2009); Consoli *et al.* (2011a); Consoli *et al.* (2011b); Lopes (2011); Pomakhina *et al.* (2012); Horpibulsuk *et al.* (2013); Vichan e Rachan (2013); Olufowobi *et al.* (2014); Rahim *et al.* (2014); Consoli *et al.* (2016b); Benny *et al.* (2017); Winter (2018); Scheuermann Filho (2019) e outros.

As técnicas de melhoramento e estabilização são aquelas em que a estrutura do solo é melhorada principalmente ao nível do contato entre os grãos, seja através de um aditivo, argamassa, ligante; ou seja, pela redução dos vazios entre os grãos. Os agentes cimentantes vêm sendo utilizados neste processo para melhorar e estabilizar solos através da adição de cimento Portland (Ingles e Metcalf, 1972). A estabilização pode ser realizada apenas com cimento Portland, cal ou a combinação dos dois ligantes em função do tipo e estrutura do solo a estabilizar, de modo a conferir-lhe as características geotécnicas necessárias para cumprir os requisitos do projeto e suportar as tensões e intempéries.

No entanto, por razões econômicas e ambientais, outros produtos químicos estão sendo considerados por pesquisadores geotécnicos com vistas a substituir ou reduzir a quantidade necessária dos cimentos Portland no processo de estabilização do solo. Além disso, a redução do consumo de cimento Portland leva a uma redução em sua produção, reduzindo a quantidade de

CO<sub>2</sub> liberado na atmosfera pela poluição e, com isso, a destruição da camada de ozônio. Assim, começou a ideia de uso dos resíduos, como a cal de carbureto (resíduo), na técnica de estabilização do solo com baixa capacidade de carga. Como vantagem, isso possibilita a reutilização dos resíduos como cal de carbureto e vidros planos e/ou de embalagens, cinza de casca de arroz, cinza volante e outros depositados por indústrias em aterros urbanos e arredores.

Em termos de comportamento mecânico, esses resíduos com características pozolânicas associados a cal na presença de água levam à modificação ou melhoria das características geotécnicas do solo a curto e/ou longo prazo em relação aos fenômenos com os quais são confrontados. Além disso, a eficácia desses produtos é influenciada pela composição química e mineralógica do solo, bem como pela temperatura. Quando a cal é adicionada ao solo com ou sem materiais pozolânicos, apenas uma parte dela é absorvida para a modificação e reação pozolânica (Tran, 2013). A adição de cal possibilita o aumento do pH, sendo que as reações pozolânicas somente ocorrer em um ambiente alcalino com pH de ordem 12,4. Portanto, é necessário um produto capaz de proporcionar o aumento e agir sobre a manutenção do pH em seu valor máximo, para que as reações pozolânicas ocorram continuamente.

Neste sentido, o presente trabalho enquadra-se na mesma linha de pesquisa desenvolvida por Winter (2018), visando determinar influência das reações da solução química de hidróxido de sódio (NaOH) sobre a mistura (areia fina - pó de vidro - cal de carbureto). Com o desenvolvimento desse trabalho, busca-se comparar as características mecânicas, estruturais e físico-químicas dos resultados obtidos com os resultados do estudo de Winter (2018), o qual foi desenvolvido sem a utilização da ativação alcalina ativadora (NaOH).

## 1.2.OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a influência da edição de hidróxido de sódio no comportamento da resistência a compressão simples, rigidez e durabilidade de um solo estabilizado com cal e pó vidro.

### 1.2.2. Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, os seguintes pontos foram estabelecidos:



- Analisar as caracterizações químicas, físicas e mecânicas dos materiais utilizados;
- Verificar a compatibilidade da pozolana com o ativador alcalino e definir a melhor concentração molar de NaOH capaz de afetar o comportamento mecânico da mistura;
- Estudar o comportamento mecânico em termos da resistência à compressão simples, rigidez e durabilidade de misturas areia fina, pó de vidro e cal de carbureto com adição de NaOH;
- Verificar a influência do teor de cal, pó de vidro e a adição de NaOH no comportamento mecânico do solo estabilizado;
- Aplicar o parâmetro  $n/B_{iv}$  na previsão do comportamento mecânico das misturas;
- Realizar análise estatística para avaliar a significância e influência das variáveis investigadas.

### 1.3.PRESSUPOSTO

A presente pesquisa tem por pressuposto que a utilização do NaOH (solução) como ativador alcalino ou álcali-ativador pode catalisar as reações pozolânicas e acelerar o ganho na resistência a compressão simples, na rigidez e na durabilidade da mistura de uma areia fina (de origem sedimentar eólica, proveniente de Osório/RS), pó de vidro (obtido por moagem e passante na peneira #200) e cal de carbureto (subproduto da produção do gás acetileno). Também se pressupõe que o ativador alcalino tenha efeito sobre o parâmetro  $\eta/B_{iv}$ .

### 1.4.DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

A pesquisa delimita-se a avaliar ativação alcalina de solo granular, areia fina, proveniente da região de Osório e comparar os resultados da mistura proposta para estabilização com aqueles utilizando os mesmos materiais sem álcali-ativador numa temperatura ambiente de 23°C.

## 1.5.FLUXOGRAMA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

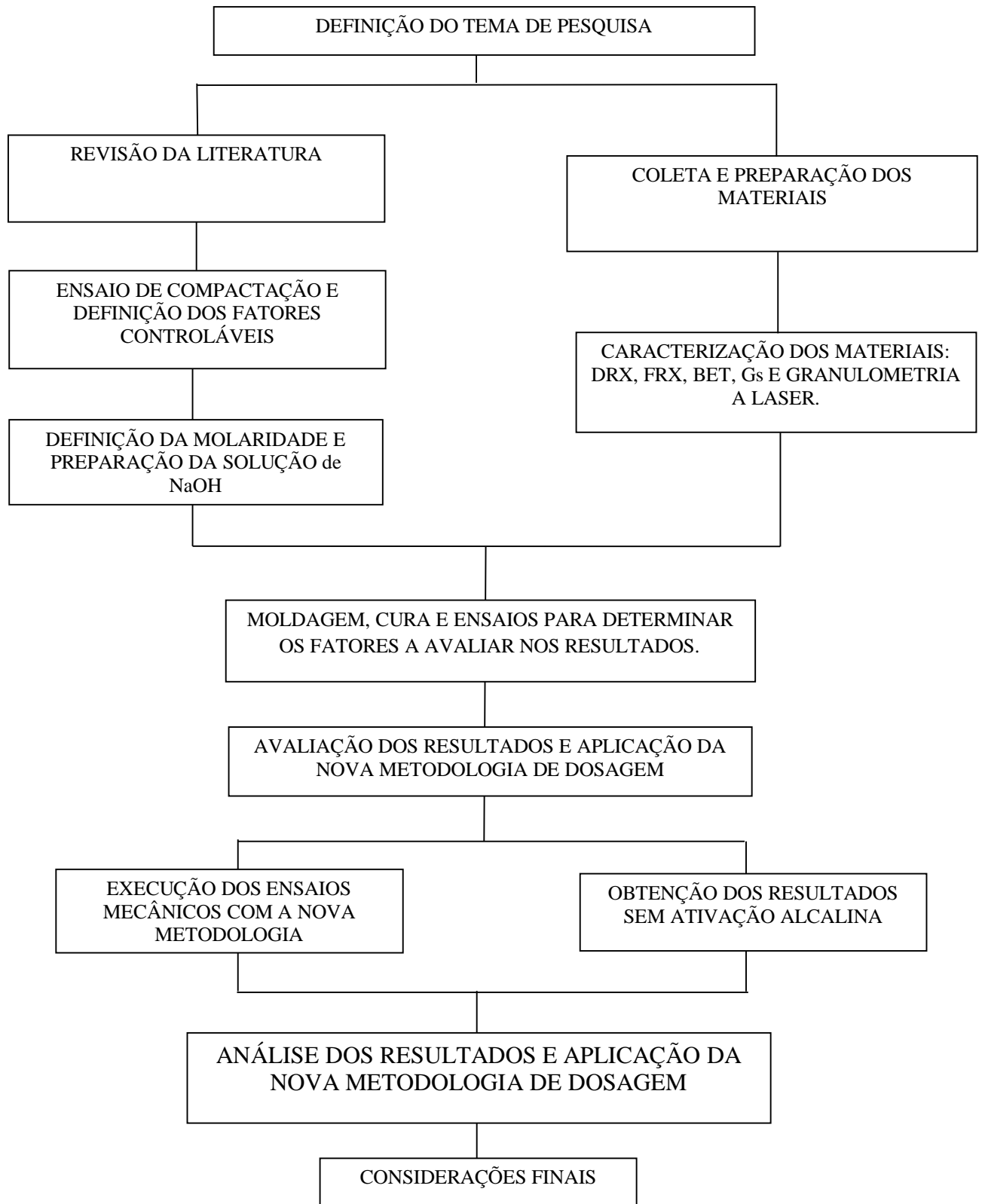


Figura 1.1: Fluxograma da metodologia.

Esta dissertação é dividida em **cinco (5)** capítulos, incluindo o atual, que tem como finalidade enquadrar a pesquisa efetuada, definir os principais objetivos e descrever o conteúdo da dissertação.

O **Capítulo 2** apresenta o enquadramento teórico subjacente a este tema. Inicialmente é feita uma visão geral sobre os solos, as técnicas e diferentes tipos de estabilização empregada nas construções civis. É ainda abordada a utilização de resíduos como pozolana e suas reações em função de solo a ser estabilizado. Para concluir esta seção, é revista a teoria sobre a ativação alcalina.

No **Capítulo 3**, são apresentados os Materiais e Metodologias, sendo usado para dar embasamento sobre os materiais e as técnicas usadas na prática deste estudo em três partes. Na primeira parte, é feita uma abordagem de planejamento experimental para mostrar os procedimentos que foram feitos ao longo da pesquisa em quatro etapas. A segunda parte estabelece os materiais utilizados os diferentes ensaios de caracterizações que foram realizados e a terceira parte, a descrição dos procedimentos dos ensaios que foram realizados.

O **Capítulo 4** é reservado para os resultados obtidos em todos os ensaios efetuados, as análises, comparações e as discussões. As comparações dos resultados encontrados com outros resultados dos trabalhos anteriores sem o uso de NaOH.

No **Capítulo 5**, são indicadas todas as conclusões obtidas da análise e comparação dos resultados e também as sugestões para trabalhos futuros que permitam colmatar lacunas e aperfeiçoar os processos que foram identificados neste estudo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

O solo pode ser definido como produto da alteração de rochas pela ação do intemperismo. Ele é geralmente disposto em várias camadas (natureza e estrutura diferentes), compostos de elementos orgânicos e/ou minerais, com fases sólida, líquida e gasosa. Existem vários tipos de solos, tais como: solos arenosos, sedimentares, cimentados e areias estruturadas e outros.

Os solos arenosos são os solos conhecidos pela sua propriedade friccional. Também, os solos arenosos são aqueles em que predomina fração areia, logo podem conter finos que conferem coesão e sua elevada permeabilidade, exemplo da areia fofa. O tamanho dos grãos é compreendido entre 2,0mm e 0,06 mm (o limite inferior da fração areia pela NBR 6502 (ABNT, 1995)).

Enquanto aos solos sedimentares são os depósitos minerais formados a partir das partículas transportadas de outros locais pela ação da água, do vento e/ou da gravidade.

Os solos cimentados podem ser definidos como aqueles que apresentam uma coesão, ou cimentação, entre suas partículas, as ligações físico-químicas e um arranjo especial dos grãos. São os materiais que tem seu comportamento geotécnico influenciado por características como a história de tensões e a densidade inicial (BURLAND, 1990; LEROUEIL e VAUGHAN, 1990). Segundo Winter (2018), a percentagem e a qualidade de agente cimentante, a quantidade de material amorfo que controla as reações e o índice de vazios são os parâmetros que afetam os comportamentos mecânicos (resistência, rigidez e a durabilidade) de um solo cimentado. Portanto, a estrutura nas areias também é um parâmetro muito importante.

### 2.2. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Estabilização é uma sucessão de procedimentos utilizada para fornecer algumas modificações nos parâmetros geotécnicos de solos como: solos sensíveis à água ou em condição muito úmida; solos granulares ou solos finos muito moles; para serem solos reutilizados nas condições técnicas e econômicas aceitáveis. Assim, tornam-se desnecessárias as operações de substituição do solo e aterro de materiais no local. Como explicou Saussaye (2012), um tratamento de solo do local da obra permite minimizar os efeitos causados pelo tráfego e outros durante a construção e manutenção. Também, reduzi a quantidade do cimento Potland necessario para o projeto. Isto, não

somente do ponto de vista econômico, para evitar gasto com transporte, mas também sustentável em termos de redução significativa das emissões de CO<sub>2</sub> liberadas no momento da produção de cimento. Segundo Tran (2013), a estabilização do solo é o processo de desenvolver ou melhorar certas propriedades desejadas, de modo a torná-lo estável e útil para um fim específico.

De fato, a estabilização físico-química do solo começa pela mistura do solo em estado relativamente seco com água (numa percentagem apropriada) e cimento Portland ou outro ligante hidráulico capaz de dar ao solo uma maior resistência após a compactação. Os objetivos procurados com a estabilização de solo são:

- Obter a cimentação entre as partículas;
- Reduzir a porosidade, e assim, reduzir a permeabilidade, especialmente no ramo úmido da umidade ótima (e também reduzir o movimento capilar);
- Obter uma boa resistência ao cisalhamento, à tração, à compressão simples no estado úmido e seco;
- Melhorar a resistência à erosão;
- Aumentar a rigidez do solo;

Melhorar a estabilidade dimensional (reduzir a contração e expansão).

É uma técnica baseada sobre os princípios anteriores ao início da história das construções projetadas. De fato, as técnicas de estabilização dos solos permanecem sempre as mesmas e somente as práticas mudam com o tempo em relação à evolução e desenvolvimento de novos materiais, equipamentos, as novas tecnologias computacionais. Cristelo (2001) destacou que nas construções civis, existem vários tipos de estabilização tais como: estabilização mecânica, física, físico-química e térmica; mas, os mais utilizados são estabilização mecânica e físico-química. Para a estabilização físico-química, por exemplo, a resistência do material é adquirida após a cura e depende do tempo de cura, da temperatura e do tipo de ligante utilizado.

A estabilização mecânica é o mecanismo de densificação pela compactação, através do qual a energia mecânica é aplicada ao solo para melhorar suas características geotécnicas. Segundo Santos *et al.* (1995), a compactação de um solo é um processo de tratamento pelo qual a porosidade do solo é reduzida através de carregamento repetitivo. Portanto, a ideia é aumentar sua resistência mecânica em função da redução de seu índice de vazios. Assim, ela permite uma melhora na resistência à tração, à compressão simples e ao cisalhamento ainda a diminuição da

deformabilidade do solo. Segundo McNally (1998), a compactação consiste em expulsar o ar contido nos vazios do solo, a fim de permitir um contato mais próximo entre suas partículas, mantendo o volume de água constante. No entanto, o solo compactado permanece muito sensível à água, capaz de se tornar plástico em contato com ela e não resiste mais à compressão. Por esse motivo, é frequentemente associado à estabilização química. Todavia, ela é influenciada por fatores como: energia de compactação, teor de umidade e tipo de solo.

A estabilização física é a técnica de estabilização pela qual as propriedades dos solos são modificadas adicionando materiais de melhor granulometria ou adicionando fibras para melhorar suas características. Permite modificar a curva granulométrica das partículas, a plasticidade e aumentar a resistência à tração do material. Os estudos realizados por Izemmouren e Guettala (2014) para determinar a influência da concentração/quantidade de areia fina na durabilidade dos tijolos de solo compactados mostraram que, os comportamentos mecânicos de solo misturado com areia é melhor que aos de solo no estado normal.

A estabilização térmica é um processo de desidratação por calor ou consolidação temporária (congelamento) de solos *in situ* (sem escavação). Segundo Marques (2006), é uma técnica pela qual uma energia térmica é aplicada ao solo por meio de congelamento, aquecimento ou termo osmose. O congelamento torna o solo impermeável e facilita os trabalhos de terraplenagem ou de construção abaixo do nível do lençol, enquanto a desidratação por calor consiste na queima de um combustível em furos vizinhos que comunicam entre si. A estabilização térmica é uma técnica de melhoria temporária, muito eficaz e geralmente utilizada para a escavação de poços e galerias, mas cujo uso permanece limitado devido ao seu alto custo (SERTIER *et al.*, 2006).

A estabilização elétrica é uma técnica dispendiosa e raramente utilizada, aplicada em solos argilosos para os quais nenhuma técnica de estabilização é favorável ou aplicável. Consiste a submeter o solo fino saturado a um campo elétrico através da interação de uma linha anódica (+) e uma linha catódica drenante (-). Assim, a água contida no solo migra do ânodo para o cátodo, o que provoca a recolha de um caudal no cátodo, seja por ejetores seja por bombas eletropneumáticas ou filtros de ponta (GRESS e BOMONT, 2010). Ela causa o aumento da resistência ao cisalhamento não drenado ( $S_u$ ) do solo, reduzindo seu teor de umidade. A Figura 2.1 mostra a variação de  $S_u$  em função do teor de água (GLENDINNING *et al.*, 2005).

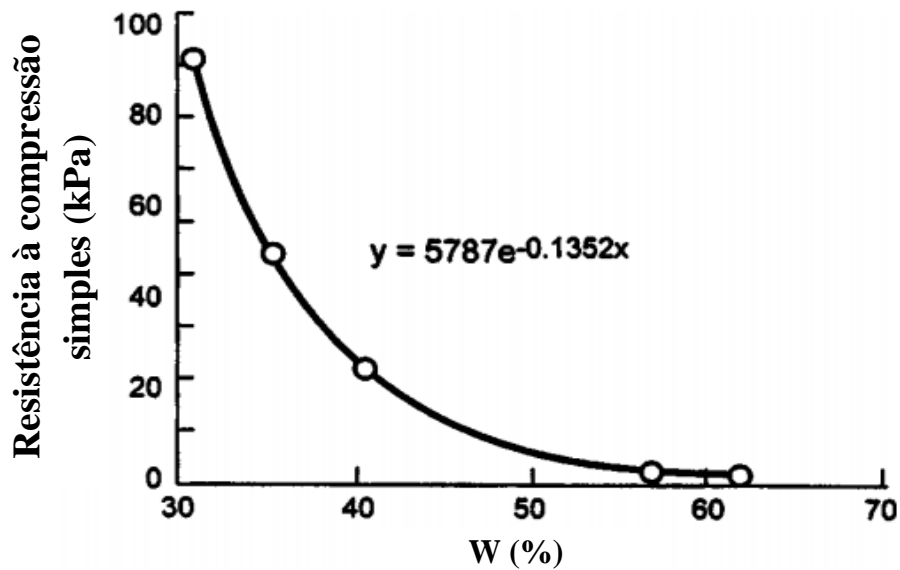


Figura 2.1: Relação entre a resistência ao cisalhamento não-drenada  $S_u$  e o teor de umidade (GLENDINNING *et al*, 2005).

No entanto, a estabilização físico-química do solo é influenciada por vários fatores, especialmente a temperatura e o tempo. Por um lado, quando a temperatura é muito alta, pode levar a uma perda imediata de umidade, o que pode causar a quebra dos grãos durante o processo de compactação. Por outro lado, a temperatura base mantém o teor de umidade constante ou invariável. No entanto, para a estabilização química, a temperatura é um dos fatores que influencia as reações pozolânicas, que são os princípios básicos das alterações dos parâmetros do solo estabilizado. Silvani (2013), para entender melhor os efeitos da temperatura de cura, realizou uma pesquisa com diferentes temperaturas (20°C, 27°C, 35°C e 50°C). Os resultados mostraram que a resistência à tração por compressão diametral da mistura solo-cal-cinza volante aumenta em 1,6 e 1,4 vezes quando a temperatura aumenta de 20°C para 27°C e 27°C para 35°C, respectivamente. Porém, acima de 35°C, ou seja, na faixa de 35 a 50°C, a resistência não aumenta mais. Para a resistência à compressão não confinada, há apenas um aumento de cerca de 2 vezes quando a temperatura é de 20°C para 27°C e de 27°C para 50°C, não há variação significativa no aumento da resistência. O autor explica que o aumento da resistência das amostras estudadas está provavelmente relacionado com o desenvolvimento de reações pozolânicas entre a cal e a pozolana (cinza de casca de arroz) utilizada sob o efeito da temperatura. Pode-se deduzir desta análise que a temperatura desempenha um papel catalisador no caso de estabilizações químicas em que as reações do desenvolvimento da resistência se baseiam fundamentalmente nas reações químicas. No entanto, é necessário um determinado limite de temperatura para uma melhor resistência. Além disso, o efeito da

temperatura sobre a resistência do solo é imediato (temporário). Com a evolução de tempo de cura, este fator perde a sua influência. Seria importante aplicá-lo quando da necessidade de dar ao solo um aumento de resistência a curto prazo.

Entretanto, o efeito do tempo de cura é muito significativos para as reações químicas que se desenvolvem entre a cal e os materiais aluminossilicatos do solo ou outros materiais (resíduos) ricos em aluminossilicatos utilizados na mistura de uma técnica de estabilização química como a cal. Assim, Inglês e Metcalf (1972), explicaram que o desenvolvimento da resistência de um solo estabilizado é uma função das reações pozolânicas que ocorre com o tempo de cura e que se desenvolvem entre suas partículas e as da cal ou ligante utilizado (Figura 2.2). Este ganho de resistência também depende do tipo de solo e do teor de ligante (por exemplo, cal, cimento etc.), bem como do pozolana utilizada.

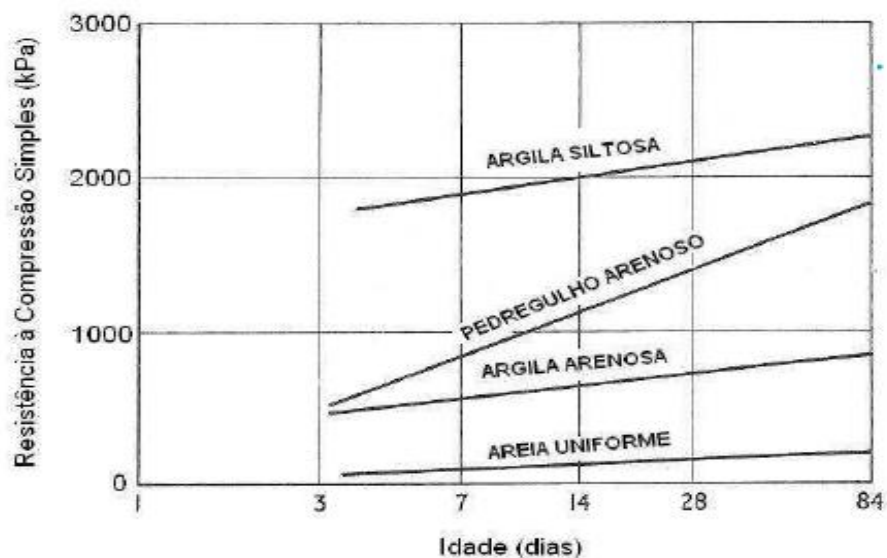


Figura 2.2: Aumento de resistência em função de tempo de cura de alguns solos (INGLES e METCALF, 1972).

O desenvolvimento deste trabalho de pesquisa é baseado principalmente na técnica de estabilização química.



## 2.3. ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA

É uma técnica de estabilização que consiste em incorporar aos solos argilos ou fricionais não coesivos, que contêm águas agressivas ou produtos químicos naturais ou de transformações industriais, capazes de alterar suas propriedades mecânicas. Esses podem ser, por exemplo: cal, cimento Portland, betume, asfalto e outros. Existem alguns tipos de estabilização química tais como: estabilização solo-cimento, solo-cal e estabilização solo-ativação alcalina.

### 2.3.1. Solo-Cimento

O cimento Portland é um produto químico composto principalmente de clínquer, obtido a partir da calcinação a 1450°C da mistura (cru) de calcário (80%) e argila (20%). A calcinação é feita em três (3) fases: a primeira é aquela em que a matéria-prima é desidratada (a 550°C), a segunda é a fase de decarbonatação (de 500°C a 900°C) e, finalmente, a fase de clinquerização (de 900°C até 1450°C) (LCPC, 2000). Então, o clínquer é resfriado, triturado e reduzido a um pó muito fino abaixo de 80µm (SAUSSAYE, 2012). Ele reúne quatro compostos anidros, tais como: silicatos tricálcicos (C<sub>3</sub>S), silicatos dicálcicos (C<sub>2</sub>S), aluminatos tricálcicos (C<sub>3</sub>A) e aluminoferrites tetracálcicos (C<sub>4</sub>AF). Em contato com a água, forma uma pasta composta de:

#### a) Silicato de Cálcio Hidratado (CSH)

Os (CSH) representam 60 a 70% do volume total da massa e são derivados da hidratação de C<sub>2</sub>S e C<sub>3</sub>S. com base nas seguintes reações:



#### b) Portlandita (Ca(OH))<sub>2</sub> ou CH

É o composto da pasta de cimento necessária para as reações pozolânicas e curas. Ela representa 20 a 30% do volume total da polpa, resultante da hidratação das reações de silicatos (1) e (2).

#### c) Aluminatos de Cálcio Hidratado (CAH)

Este é o composto que diminui a flexibilidade da pasta de cimento e facilita seu ajuste rápido. É derivado da hidratação de Aluminatos Tricálcicos, reação (3):



#### d) Etringita Primária

É o regulador de pega da pasta de cimento derivado da reação de  $C_3A$  e  $C_4AF$  com gesso, reação (4):



#### e) Etringita Secundária

Esse é o resultado da reação entre  $C_3A$  e a etringita primária, reação (5):



As CAH, etringita primária e a etringita secundária representam 5 a 15% do volume total da pasta de cimento hidratado (SAUSSAYE, 2012). A Figura 2.3 ilustra os componentes de uma pasta de cimento.

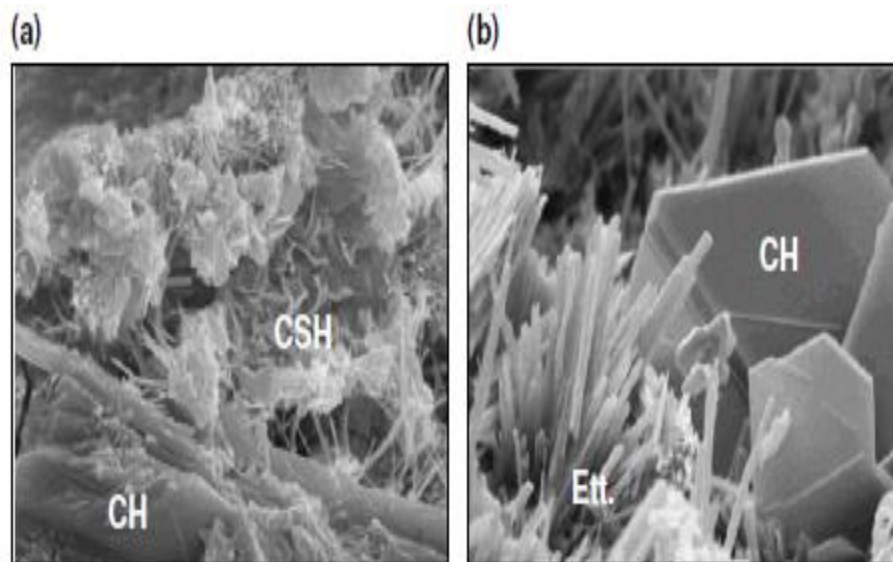


Figura 2.3: (a) silicato de cálcio hidratado (CSH) e Portlandita (CH), (b) Portlandita (CH) e Etringita (SAUSSAYE, 2012).

De fato, a técnica de estabilização com cimento Portland consiste em incorporá-lo em um solo existente para melhorar suas propriedades geotécnicas inadequadas para a construção de uma estrutura. Esta tem o efeito de tornar o solo mais estável, aumentando sua coesão depois de endurecido, que apresentará uma melhor capacidade de carga, resistência à tração e compressão, resistência ao cisalhamento e redução da sensibilidade à água. Nas técnicas de estabilização, o cimento Portland é utilizado tanto para camadas superficiais, como para a parte superior da base

ou sub-base de estradas, ferrovias e pistas de aeroportos. A mistura também pode ser usada para pisos de hall, lajes de fundação, locais industriais, estradas rurais, ciclovias ou calçadas para pedestres, habitações, barragens e outros. De acordo com Kurt e Van (1994), estabilizar um solo com cimento Portland é aumentar de forma durável sua resistência às solicitações devidas ao tráfego, clima e condições hidrológicas. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1958 *apud* SANTOS, 2009), o solo cimento é o material resultante da mistura homogênea de solo, cimento e água em uma determinada proporção, compactado e endurecido. Após a cura, torna-se um material com um índice de vazios baixo, bastante impermeável e muito resistente à compressão, ao cisalhamento e com alta durabilidade. Marques (2004) definiu estabilização do solo com cimento Portland como o processo pelo qual se desenvolvem reações químicas na presença de água. Duas reações ocorrem durante este processo, nomeadamente as reações de hidratação do cimento Portland e a reação entre argila e cal livre durante a hidratação do cimento Portland ( $C_3S$ ,  $\beta$ - $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF + H_2O$ ) (MARQUES, 2004 e 2005). Cristelo (2001), explicou que os objetivos fundamentais buscados na utilização do cimento Portland nas estabilizações de solos são: melhorar as características mecânicas e fornecer boa estabilidade em relação à presença de água refletida na insensibilidade diante as variações do teor de umidade.

É uma técnica muito antiga que foi praticada pela primeira vez em *Salisbury Plain*, nos Estados Unidos, em 1916, no intuito de facilitar a circulação de veículos que não são pneumáticos no inverno. Segundo ABCP (1958), o cimento Portland foi utilizado pela primeira vez na estabilização de solos no Brasil na década de 1940 para a construção da antiga pista de pouso do Aeroporto Santos Dumont, no Rio de Janeiro.

Entretanto, a quantidade de cimento Portland deve ser bem estudada antes da aplicação na camada solo-cimento para evitar retração em caso de excesso (INGLÊS e METCALF, 1972). Geralmente, o teor de cimento Portland deve variar entre 2 e 15% da massa total de solo seco e depende do tipo de solo, das características geotécnicas a serem melhoradas, do tipo de projeto e do tráfego para as estradas. De acordo com Enamorado (1990), os principais fatores que influenciam na resistência solo-cimento são: o tipo de solo; o teor de cimento; a densidade seca máxima e o teor ótimo de umidade; a demora na compactação; e a temperatura e tempo de cura. A dosagem do solo-cimento seguindo a NBR 12253 (ABNT, 2012) consiste na determinação do teor mínimo de cimento da mistura, o que poderia dar uma resistência maior que 2,1 Mpa a 7 (sete) dias. Assim, as prescrições determinam que o aumento do teor de cimento dependa da classificação da ASTM D 3282 (A1, A2, A3 e A4) e varia de 5% a 10%. Segundo Cristelo (2001), a faixa da percentagem de cimento para o silte é entre 5% a 7%; 7% a 15% nas areias e, aproximadamente, 4% para os cascalhos.

Além disso, vários estudos têm sido feitos sobre o uso do cimento Portland para corrigir várias características do solo e têm provado a sua eficácia. Sachetti *et al.* (2009) após estudar a resistência à compressão simples de um solo artificialmente cimentado com diferentes proporções (1, 3 e 5%) e reforçado com fibras de vidro, mostraram que a adição de cimento, mesmo em pequenas quantidades, causou ganhos significativos de resistência ao material. Eles concluíram que nesta faixa de teores de cimento, a resistência à compressão simples cresceu linearmente com o aumento do teor de cimento, como é possível observar na Figura 2.4.

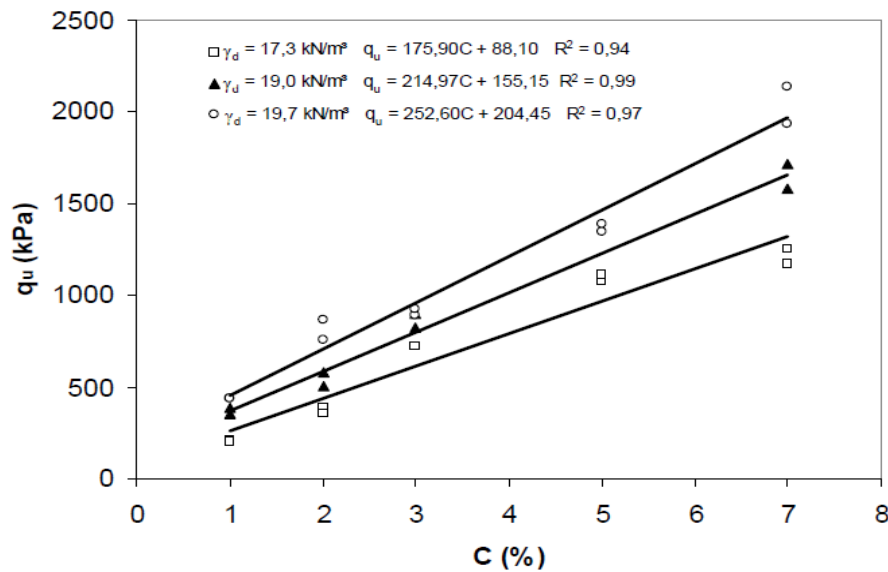


Figura 2.4: Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento (Fonte: SACHETTI *et al.*, 2009).

### 2.3.2. Solo-Cal

A cal é o produto obtido a partir da calcinação de carbonato de cálcio ou carbonato de cálcio-magnésio. Esse processo de calcinação é baseado numa reação reversível que gera óxido de cálcio (CaO) ou mistura de magnésio e óxido de cálcio (CaO.MgO) obtida a partir das reações (6 e 7) (GUIMARÃES, 1998). A cal CaO ou CaO.MgO formada, depende da origem das rochas mãe e diferente uma das outras pelo tamanho, número, forma, área e a distribuição granulométrica de seus hidróxidos (Tabela 2.1). No momento da calcinação, a temperatura é cuidadosamente controlada para evitar os defeitos da cal. Com a temperatura baixa, o produto obtido é predominantemente carbonato de cálcio que pode prejudicar os processos de estabilização. No estado das reações (6 e 7), ela é chamada cal virgem.

No entanto, a hidratação da cal virgem permite a obtenção de outro composto químico chamado cal hidratada. Essa reação entre água e a cal virgem é uma reação puramente exotérmica e irreversível. As reações (8, 9 e 10), mostrando os compostos químicos formados e o calor gerado pela água perdida.

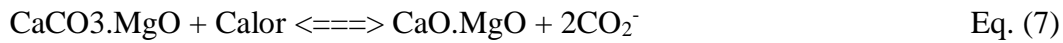


Tabela 2.1: Diferentes tipos de cales (SILVANI, 2013)

Composição química	Nomenclatura
CaO	Cal cálcica virgem
CaO.MgO	Cal dolomítica virgem
Ca(OH) <sub>2</sub>	Cal cálcica hidratada
Ca(OH) <sub>2</sub> .MgO	Cal dolomítica mono-hidratada
Ca(OH) <sub>2</sub> .Mg(OH) <sub>2</sub>	Cal dolomítica bi-hidratada

Segundo a norma NBR 7175 (ABNT, 2003), a classificação de cal hidratada deve ser feita, seguindo as exigências químicas e físicas, como mostrando nas **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, Tabela 2.3, Tabela 2.4 e Tabela 2.5.

Tabela 2.2: Exigências químicas da cal hidratada (NBR 7175 (ABNT, 2003))

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

(1) O teor de óxido de cálcio (CaO) ou óxido do magnésio (MgO) não hidratada, calculada das formas seguintes:

Tabela 2.3: Cálculo de teor de óxido de cálcio ou de magnésio (NBR 7175 (ABNT, 2003))

a) CaO combinado com CaSO <sub>4</sub>	% SO <sub>3</sub> x 0,70
b) CaO combinado com CaCO <sub>3</sub>	% CO <sub>2</sub> x 1,27
c) Água combinada	% PF – %CO <sub>2</sub>
d) CaO hidratado	% água combinada x 3,11
e) CaO não-hidratado	% CaO – (a + b + d)
f) CaO hidratado	e  x 0,72

Tabela 2.4: Cálculo de teor de óxidos não hidratados-cal (e) (NBR 7175 (ABNT,2003)).

Hipóteses	óxido de cálcio não hidratado calculado	óxido de cálcio e magnésio não hidratado calculado
	CaO	CaO <sub>t</sub> + MgO <sub>t</sub>
e > 0	e	e + MgO
e < 0	0	MgO - f
e = 0	0	MgO

<sup>(2)</sup> O teor de óxidos totais na base de não voláteis (CaO<sub>total</sub> + MgO<sub>total</sub>) é calculada pela equação 11:

$$\% (\text{CaO}_{\text{total}} + \text{MgO}_{\text{total}}) = \frac{(\% \text{CaO}_{\text{total}} + \% \text{MgO}_{\text{total}}) \times 100}{100 - \% \text{perda de fogo}} \quad \text{Eq. (11)}$$

Tabela 2.5: Exigências Físicas da cal hidratada (NBR 7175 ABNT (2003))

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Finura (% retirada acumulada)	Peneira 0,600mm (n°30)	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 0,075 (n°200)	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retenção de água %		≥ 75%	≥ 75%	≥ 70%
Plasticidade %		≥ 110	≥ 110	≥ 110
Incorporação de areia %		≥ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2
Elasticidade %		Ausência de cavidade ou protuberâncias		

Todavia, a cal hidratada pode ser obtida de outra forma, podendo-se destacar, os resíduos industriais, obtidos a partir da fabricação de outros produtos industriais para consumo humano. De fato, a cal de carbureto é um subproduto industrial do derivado de carbeto de cálcio ( $\text{CaC}_2$ ), obtido durante o processo de fabricação do gás acetileno e composto principalmente de  $\text{Ca(OH)}_2$  (HORPIBULSUK *et al.*, 2012, 2013; KAMPALA *et al.*, 2013; PHUMMIPHAN *et al.*, 2016). Na década de 1990, sua produção era de 21.500 toneladas por ano para 18.500 toneladas de  $\text{CaC}_2$  (KAMPALA *et al.*, 2013; AMNADNUA *et al.*, 2013). Segundo os autores, 64g de carbeto de cálcio ( $\text{CaC}_2$ ) gera 26g de gás acetileno ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) e 74g de cal de carbureto ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) a partir da reação (12). Em 2009, o *U.S. Geological Survey* fez uma classificação dos países produtores de calcário do mundo. Desta classificação, a China é a primeira (175.000 toneladas) seguida pelos Estados Unidos da América e o Brasil na quinta posição com 7.300 toneladas.



Cada dia, a produção de cal de carbureto aumenta proporcionalmente em função da quantidade de gás acetileno produzida para satisfazer a procura dos consumidores. Phummiphan *et al.* (2016), explicam que na Tailândia, a cal de carbureto representa o principal resíduo que ocupa aterros sanitários e causa vários problemas ambientais devido ao seu alto nível alcalino. Por razões econômicas, técnicas, e sobretudo, ambientais, este resíduo, que contém 76,7% ou mais de  $\text{Ca(OH)}_2$  é utilizado com materiais pozolânicos para formar materiais com características cimentícias (HORPIBULSUK *et al.*, 2012).

Diversas pesquisas, há décadas, têm sido baseadas na utilização desse resíduo para estabilização, modificação de características ou reforço de solos com baixas características geotécnicas, devido a sua alta basicidade,  $\text{pH}=12,4$  (NONTANANANDH e KAMON, 1996; JALALI *et al.*, 1997; CONSOLI *et al.*, 1997, 1998, 2001, 2007, 2009, 2011, 2014, 2016, 2018a, 2018b; JATURAPITAKKUL e ROONGREEUNG, 2003; HORPIBULSUK *et al.*, 2013; PHETCHUAY *et al.*, 2014 ; KAMPALA *et al.*, 2013, 2014 ; PHUMMIPHAN *et al.*, 2016; BILONDI *et al.*, 2018). Para ser utilizado nas técnicas de estabilização de solo com bom desempenho, sua quantidade dever ser avaliada em função de tipo de solo exatamente como o caso do cimento Portland. O volume de cal de carbureto desempenha um papel muito importante no aumento da resistência do solo (CONSOLI *et al.*, 2011, 2018).



A estabilização do solo através da adição de cal para modificar suas propriedades é uma técnica antiga, defendida por vários pesquisadores e amplamente utilizada em todo lugar no mundo para a construção civil. A sua primeira utilização data de 4.000 anos A.C., quando os egípcios a utilizaram para rebocar pirâmides (IZEMMOUREN, 2016). Ela foi utilizada pelos romanos e outras civilizações para a estabilização das camadas de estrada. A cal só com água não reage, ela precisa estar em contato com outros materiais ou partículas de solo para criar as reações. De acordo com McNally (1998), cal e água não são cimentícios entre si mesmos, mas reagem com partículas do solo para formar silicato de cálcio ou aluminossilicato de cálcio. De fato, sílica da reação é extraída dos minerais de argila presentes, eventualmente produzindo os mesmos agentes cimentantes que o cimento Portland. Isso facilita a mistura bem-sucedida de cal com uma argila altamente plástica, enquanto o cimento Portland não é tão eficaz.

#### 2.3.2.1. Reações e Efeito Solo-Cal

Quando a cal é misturada ao solo, uma argila, por exemplo, ela provoca um aumento de seu pH, que aumenta a capacidade de troca iônica do solo, permitindo a dissolução de sílica (S) e alumina (A) presentes no solo e suas reações com a cal (CDIT, 2002). Essas reações geram uma alteração nas propriedades de argila tais como: umidade, plasticidade, pressão de expansão, permeabilidade e compactação, melhorando o comportamento mecânico (resistência e durabilidade) do solo a curto e longo prazo (KAVAK e BAYAL, 2011; TRAN, 2013). No entanto, a reação pozolânica entre a cal e o solo é uma reação lenta, que depende da temperatura ambiente até que os seus resultados possam ser avaliados (CABANE, 2004). Segundo Marques (2009) e Tran (2013), quatro mecanismos são a base dessas transformações: a troca catiônica, a floculação e aglomeração das partículas, a carbonatação e a reação pozolânica.

##### a) Troca de cátions

É uma reação de dupla troca em qual há formação de carbonatos dos cátions eliminados da superfície do argilomineral. Durante esta primeira etapa (troca catiônica), o dihidróxido de cálcio,  $\text{Ca(OH)}_2$ , na presença de água dissocia-se em  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$  (ver reação 13 e Figura 2.5). Esta dissociação dos íons causa uma sucessão de reações que varia de acordo com a composição mineralógica do solo e a composição química das águas inerciais do solo.

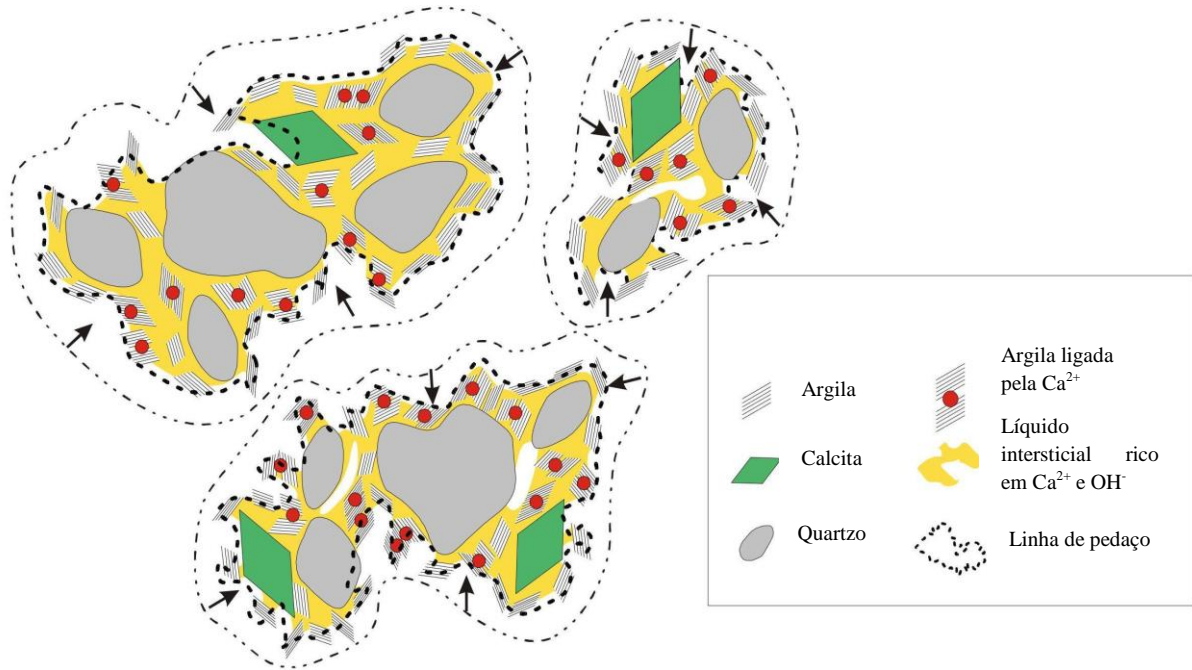
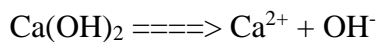


Figura 2.5: O efeito de cal sobre a argila logo após sua adição (CABANE, 2004 *apud* TRAN, 2014).



Eq. (13)

Os cátions  $\text{Ca}^{2+}$  assim formados são rapidamente absorvidos e intercalados no espaço interfoliar para substituir os outros cátions presentes no espaço interfoliar da argila (Figura 2.6). Além disso, durante o mecanismo, o  $\text{Ca}^{2+}$  divalente de  $\text{Ca(OH)}_2$ , substitui cátions de valência única, visto que os íons de alta valência ou concentração substituem aqueles de baixa valência (LITTLE, 1995). Segundo Mitchell et Soga (2005), este fenômeno é chamado a série de Lyotrope e é escrito da forma seguinte:  $\text{Na}^+ < \text{Li}^+ < \text{H}^+ < \text{K}^+ < \text{Rb}^+ < \text{Cs}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Ba}^{2+} < \text{Al}^{3+} < \text{Fe}^{3+} < \text{Th}^{4+}$ . Assim, os cátions  $\text{Ca}^{2+}$  podem substituir  $\text{Na}^+$  e os cátions  $\text{Fe}^{2+}$  substituem  $\text{Mg}^{2+}$  assim por em diante, mas isso depende principalmente da valência, tamanho e abundância relativa de cada tipo de íon. Por outro lado, o íon de alta potência, como o  $\text{Al}^{3+}$ , pode ser substituído pelo íon de baixa potência, como o  $\text{Na}^+$ , se a sua concentração for superior à do íon de alta potência. Este processo é o fundamento e a base do mecanismo da modificação das propriedades do solo argiloso na presença de  $\text{Ca(OH)}_2$  (OLA, 1977).

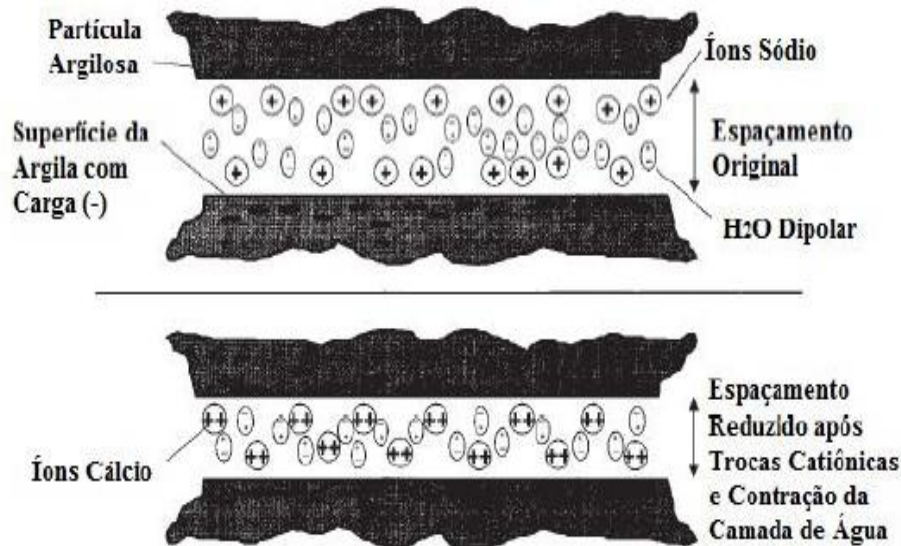


Figura 2.6: Mecanismo de troca catiônica na argila (PRUSINSKI e BHATTACHRJA, 1999 *apud* TRAN, 2013).

#### b) Floculação

Tran (2013) explica que a floculação é o resultado da troca catiônica entre o solo e a cal adicionada em um curto espaço de tempo. É o estágio de alta concentração de eletrólitos e pH elevado, que por reações químicas (troca catiônica) reduz a espessura da camada dupla (EADES e GRIM, 1960; BOARDMAN *et al.*, 2001; TRAN, 2013). É um fenômeno que começa quando a concentração eletrolítica da água intersticial aumenta em relação às partículas superficiais de argila aglomeradas pelo cálcio. Nesta fase, as camadas de solos úmidos que, normalmente, não poderiam ser compactados adequadamente são transformadas em solos granulares, com a facilidade de ser utilizados e compactados. Além disso, a cal adicionada é capaz nesta fase de reduzir o efeito da plasticidade, expansão, massa específica, bem como de aumentar a umidade ótima, resistência à compressão simples e à tração, resistência ao cisalhamento, rigidez e durabilidade do solo (KAVAK e BAYAL, 2012).

#### c) A reação pozolânica

Segundo Kampala *et al.* (2013), a reação pozolânica é uma reação entre os aluminossilicatos e o hidróxido de cálcio numa temperatura ambiental para gerar um novo material com características ligantes. Nesta fase, a reação é mais baseada nas partículas octaédricas e tetraédricas da argila mineral com os íons da cal. Assim, com o pH elevado do meio, os cátions  $\text{Ca}^{2+}$  da cal combinam-se com as sílicas e aluminas da argila dissolvida sob o efeito do ambiente altamente básico para formar materiais com características cimentícias silicato de cálcio hidratado (CSH) e aluminato de

cálcio hidratado (CAH) ou aluminossilicato hidratado (C-A-S-H) das reações (8 e 9) (LITTLE, 1995; KAVAK e AKYARH, 2007; AL-MUKHTAR *et al.*, 2010a; TRAN, 2013).

A reação pozolânica é uma reação lenta que depende do tempo, temperatura e muitos outros fatores que permitem que o material cimentício ganhe a resistência ao longo do tempo. Para maximizar a reatividade, a quantidade necessária de cal a ser adicionada deve ser avaliada e capaz de manter o pH do meio quase constante em 12,4 por um longo período devido à alta solubilidade dos íons  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Kavak (1996) explica que a resistência do solo estabilizado com cal não só aumenta num curto período, mas também continua a aumentar com a evolução do tempo de cura.



#### d) Carbonatação

É a formação de calcita obtida da reação produzida entre a cal e o  $\text{CO}_2$  durante o o tempo de cura (eq 16). É uma reação que, ao contrário das outras, provoca a redução da resistência do material estabilizado devido à queda das partículas de cal presentes para a reação pozolânica (CABANE, 2004).



#### 2.3.2.2. Efeito de Cal no Comportamento de Solo Estabilizado.

Ola (1977) estudou alguns dos efeitos da cal (com um teor de 6%) na estabilização dos solos lateríticos. Os resultados mostraram que todos os solos estudados apresentaram comportamentos diferentes dos comportamentos iniciais antes da adição de cal. Assim, o autor explica que a partir do momento em que a cal foi adicionada aos solos, os índices de plasticidade e densidade seca de cada amostra de solo diminuíram, enquanto o limite de plasticidade e o teor de humidade ótimo aumentaram, respectivamente. Da mesma forma, os testes de durabilidade e de resistência à compressão simples deram resultados satisfatórios. Kavak e Baykal (2012) chegaram à mesma conclusão utilizando caulinita, mas com um teor de cal de 4%. Bell (1996) *apud* Tran (2013) estudou o efeito da cal na resistência à compressão simples da montmorilonita, caulinita e quartzo em função do tempo de cura. Os resultados mostraram que apesar do mesmo teor de cal, as

resistências são variáveis segundo o tipo de solo. Assim, a montmorilonita apresentaram resistências mais baixas do que a caulinita e as maiores resistências foram obtidas com quartzo (Figura 2.7).

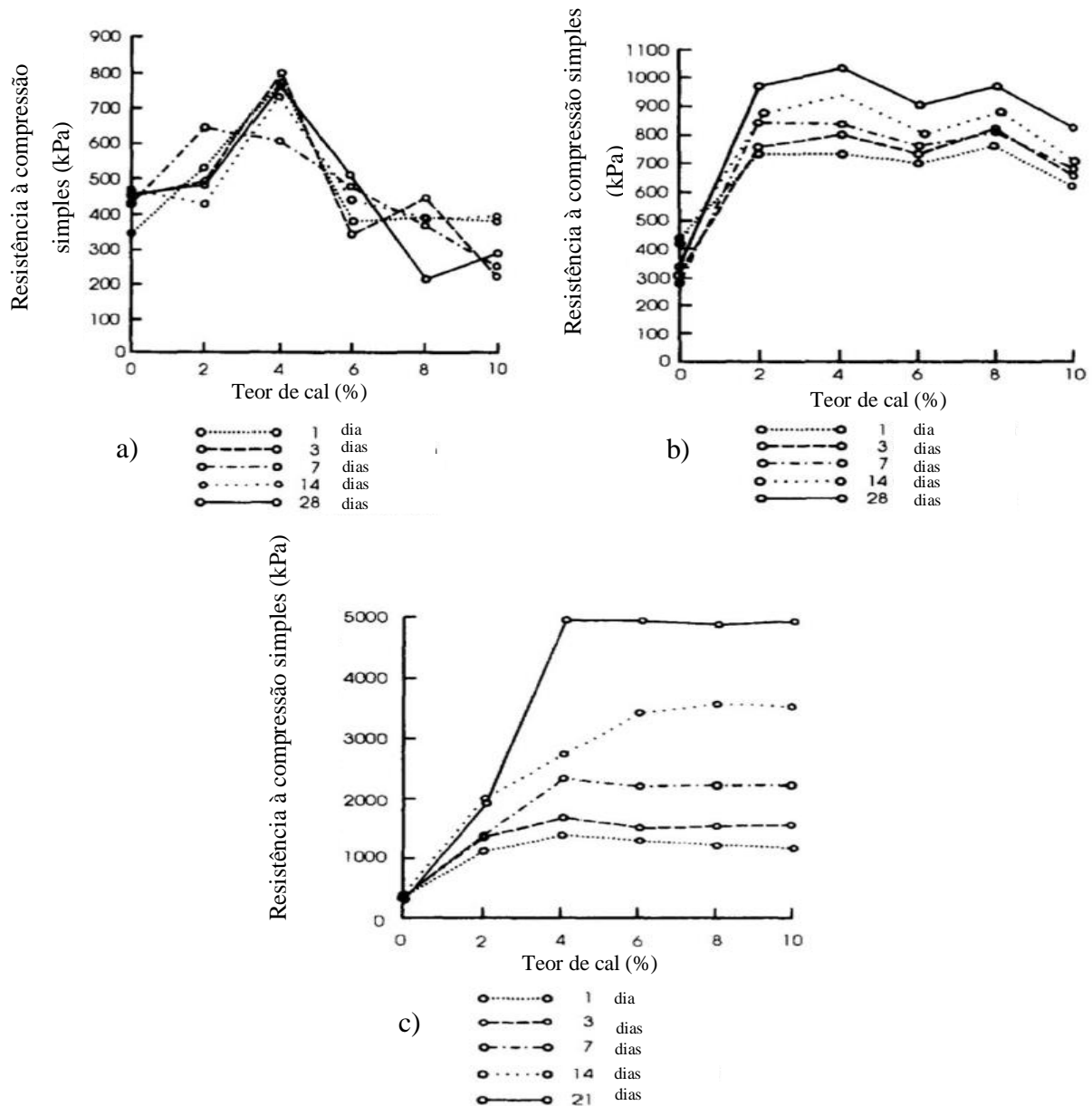


Figura 2.7: Efeito da cal na resistência do solo: a) montmorilonita, b) caulinita, c) quartzo (BELL, 1996).

Molard *et al.* (1987) e Bell (1996) concluíram que os solos tratados com ligantes hidráulicos, contendo quartzo e caulinita, têm características mecânicas diferentes e maior do que os solos contendo uma elevada proporção de argila expansiva, como as montmorilonitas.

Os resultados das pesquisas realizadas por Horpibulsuk *et al.* (2012), Kampala *et al.* (2013) e Bilondi *et al.* (2018) mostraram que quando a quantidade de cal aumenta, o limite de plasticidade do solo estabilizado também aumenta proporcionalmente, enquanto o limite de liquidez diminui lentamente. Consequentemente, o índice de plasticidade diminui até uma determinada taxa de cal (7%), que é devido à floculação das partículas de argila sob o efeito da adsorção dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  resultantes da troca catiônica. A cal reduz assim o peso específico aparente seco do material, aumentando seus comportamentos mecânicos. Para Horpibulsuk *et al.* (2012), o desenvolvimento da resistência de um solo estabilizado com cal pode ser resumido em três zonas, tais como: zona ativa, inerte e deterioração. De fato, a zona ativa é a zona em que a resistência aumenta duas vezes ou de maneira considerável com o aumento de teor de cal. É também a zona onde as moléculas da cal se ligam às moléculas minerais de argila. A zona inerte é a fase de reação durante a qual a resistência à compressão simples permanece constante, apesar do aumento de teor de cal. Além dessas duas primeiras zonas, a resistência começa a diminuir devido à abundância de cal livre na mistura, esta é a zona de deterioração. Esta deterioração é explicada pela abundância de íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$  presentes na solução após a dissolução do  $\text{CaOH}_2$  (BILONDI *et al.*, 2018). Para Cristelo (2001), o desenvolvimento da resistência à compressão simples de um solo estabilizado com a cal é feito em 4 etapas (Figura 2.8).

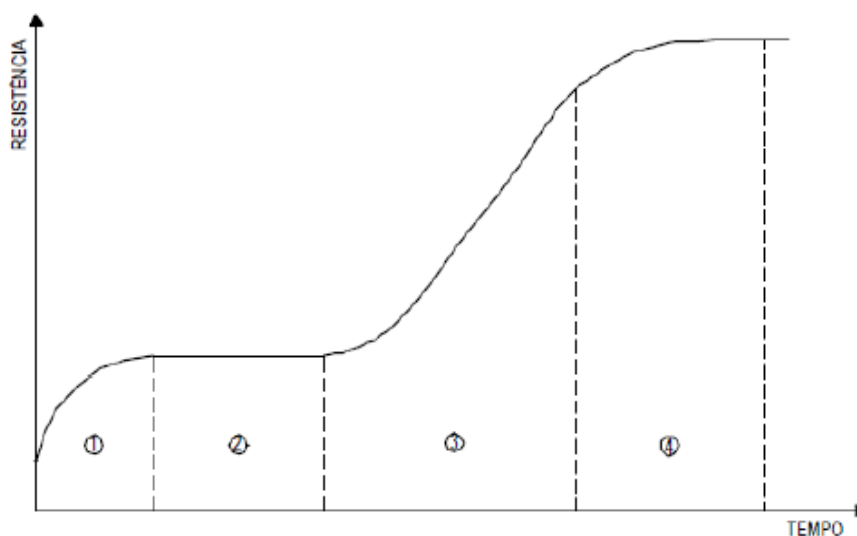


Figura 2.8: Evolução teórica de desenvolvimento da resistência à compressão simples de um solo estabilizado com cal (CRISTELO, 2001).

A primeira é aquela durante a qual ocorre a floculação das partículas minerais argilosas, que se manifesta pela aproximação e aumento do ângulo de atrito das partículas. Este é o início do

aumento da resistência. O segundo corresponde ao estágio de formação dos núcleos de silicato de cálcio hidratado no final das partículas. Nesta fase, a resistência permanece constante à da primeira fase, devido à pequena quantidade de nucléolos formados e à sua insuficiente ligação. Durante a terceira etapa, os núcleos multiplicam-se sob o efeito da dissolução dos silicatos e aluminas do argilomineral e a aglomeração das partículas de cálcio aumenta. Estes promovem a formação do gel C-S-H ou C-A-S-H que provoca a cimentação das partículas do solo, daí o aumento da resistência figura (anterior). A quarta etapa é aquela em que a resistência para de aumentar. Isto pode ser devido à absorção de  $\text{Ca}^{2+}$  cátion pelos minerais argilosos (alumina e silicato).

Solanki *et al.* (2009) estudaram as propriedades mecânicas de solos siltosos misturados com cinzas e cal. Os resultados mostraram que a variação do módulo de elasticidade e da resistência a compressão simples do solo aumentam com o aumento do teor de cal, assim como o módulo resiliente. Estes resultados têm sido comprovados por várias outras pesquisas (CONSOLI *et al.*, 2011 e 2018; KAMPALA *et al.*, 2013). Consoli *et al.* (2011) estudaram os parâmetros que controlam a resistência à compressão simples de solos estabilizados com diferentes teores de cal (3, 5, 7 e 9%). Neste estudo, os autores notaram, primeiramente após os testes, que a resistência à compressão simples do solo aumenta linearmente com o aumento do teor de cal e do peso específico aparente seco (Figura 2.9). Em seguida, observaram que a resistência aumenta exponencialmente com a diminuição da porosidade, o que significa que a redução da porosidade leva a um aumento da resistência. Fato que está relacionado ao contato das partículas do solo que se aproximam mais umas das outras na medida que a porosidade diminui (Figura 2.10). Além disso, a relação entre a porosidade e o teor volumétrico de cal (volume de cal dividido pelo volume total da mistura), permitiu de reduzir a porosidade da mistura e mantém o valor de resistência a compressão simples, especialmente, quando este último é elevado a uma potência de 0,12 (Figura 2.11). A partir destes resultados, os autores concluíram que a resistência à compressão simples é fortemente influenciada pelo teor de cal e pelo peso específico aparente seco da mistura. Contudo, a relação de porosidade e o teor volumétrico de cal ajustada em 0,12 ( $\eta/(\text{L}_{iv})^{0,12}$ ) é um parâmetro muito importante na avaliação da resistência à compressão simples da mistura.

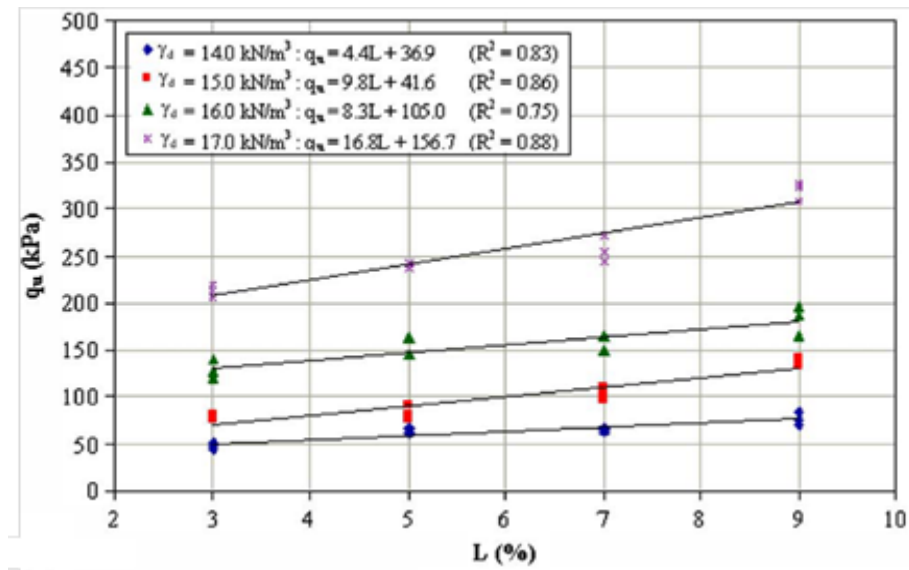


Figura 2.9: Variação de resistência à compressão simples em função de teor de cal (Fonte: CONSOLI *et al.*, 2011).

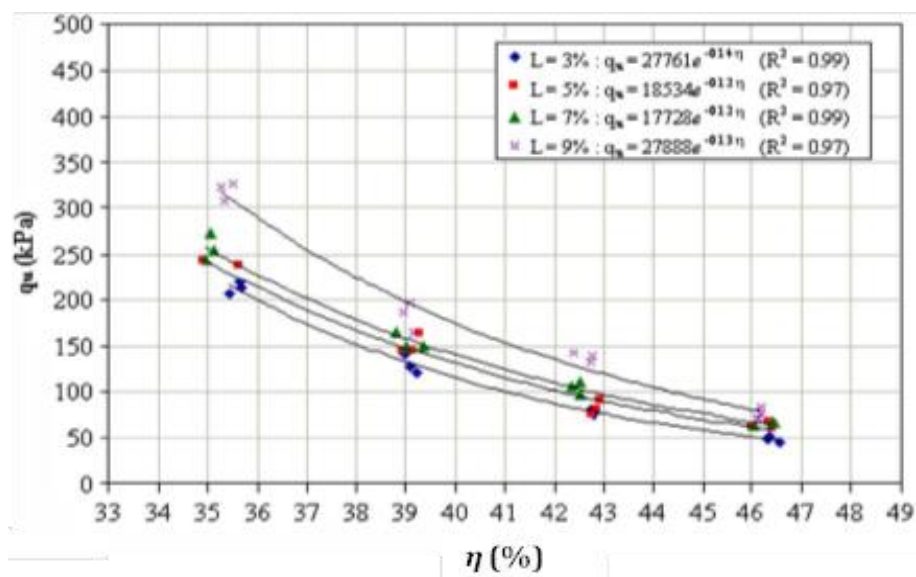


Figura 2.10: Variação de resistência à compressão simples em função da porosidade (Fonte: CONSOLI *et al.*, 2011).



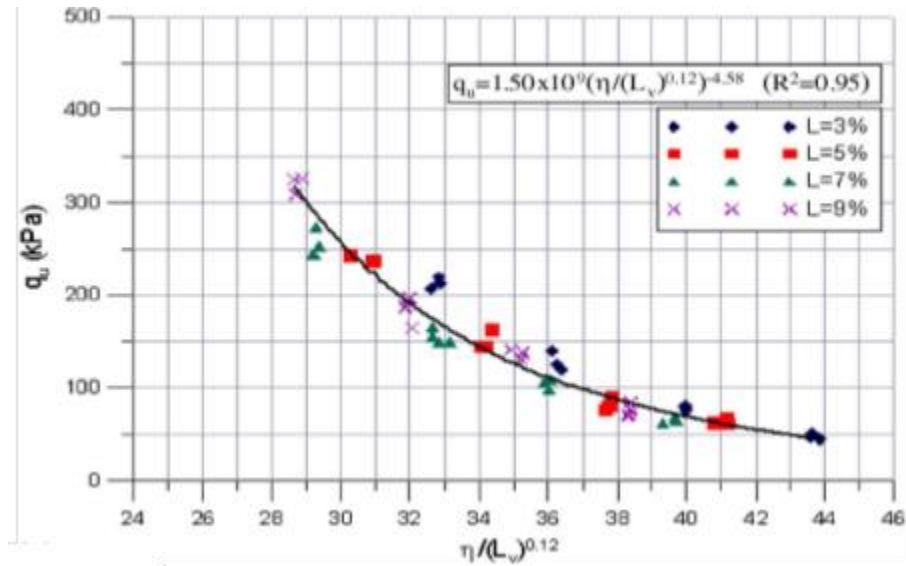


Figura 2.11: Variação de resistência à compressão simples em função da relação entre a porosidade e teor de cal. (CONSOLI *et al.*, 2011)

No entanto, quando o solo não contém minerais argilosos para satisfazer o mecanismo das reações pozolânicas, são geralmente utilizados diversos materiais de origem para alumina, silicato ou aluminossilicato, tais como: escórias, cinzas volantes, cinzas de casca de arroz, cerâmica moída e outras pozolanas em investigação (VAN JAARSVELD *et al.*, 1997, 1999). Também são, por vezes, utilizados como aceleradores de reações químicas entre o solo e as partículas de cal.

Consoli *et al.* (2011) mostraram que a resistência do solo aumenta em dobro ou triplicando quando a cinza volante é adicionada à mistura solo-cal (Figura 2.12).

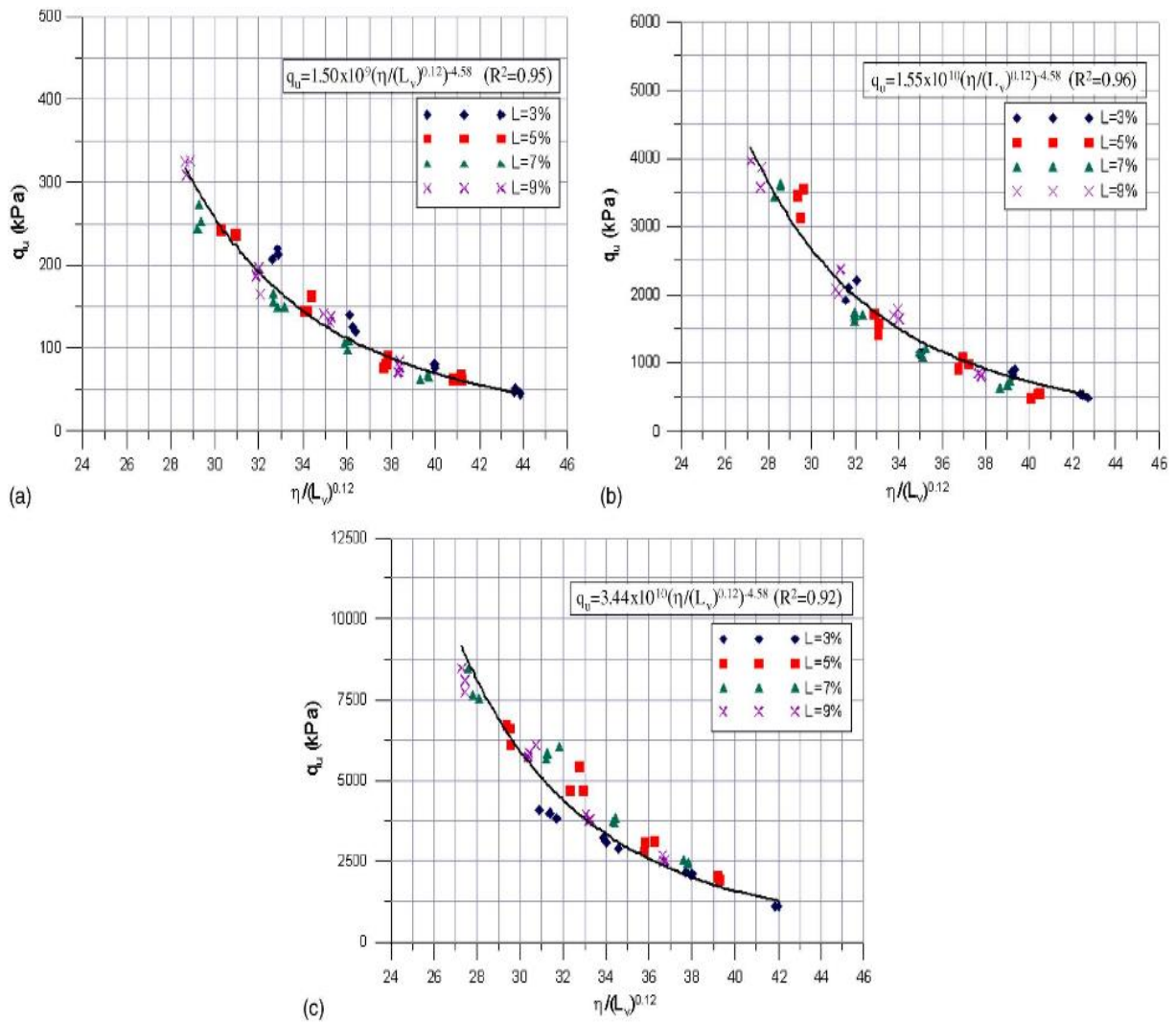


Figura 2.12: Variação da resistência à compressão simples em função da relação entre a porosidade, teor de cal e da cinza volante: (a) apenas a cal, (b) cal e 12,5% cinza volante, (c) cal e 25% cinza volante (CONSOLI *et al.*, 2011).

### 2.3.3. Solo - Vidro

O vidro é um material inorgânico, homogêneo e amorfo, obtido a partir de uma massa fundida. É também um material do tipo cal sodada que não sofre qualquer tipo de alteração na sua composição química independentemente do método de reciclagem (TORRES-CARRASCO, 2015). Os vidros são compostos basicamente de sílica a que se adicionam outros produtos convencionais para obter as propriedades desejadas do produto acabado. Milhares de toneladas de vidro são produzidas no mundo e descartados após o uso.

De acordo com Torres-Carrasco (2015), cerca de 740.000 toneladas de vidro são descarregadas em áreas urbanas da Índia a cada ano e apenas 5% são reciclados. TORRES-CARRASCO, (2015), Cocou Auxence Pierre Daassi-Gli (auxencedaassigli@gmail.com) Dissertação de Mestrado. PPGEC/UFRGS. 2020

explicou que segundo o Ecovidrio (2015), a quantidade de resíduos de vidro produzida anualmente em uma cidade com 1 milhão de habitantes pode ser estimada em 400.000 toneladas, considerando a quantidade total produzida no mundo.

A política de reciclagem de resíduos de vidro ainda não é satisfatória, uma vez que a quantidade deixada pelos usuários aumenta a cada ano. Nos Estados Unidos, apenas 20% dos 12,5 milhões de toneladas por exemplo de resíduos de vidro produzidos são reciclados (TORRES-CARRASCO, 2015). No Brasil, por exemplo, cerca de 45% dos 980 milhões de toneladas de vidro produzidas de diferentes categorias são reciclados de acordo com o Compromisso Empresarial Para Reciclagem (2018) *apud* Winter (2018). Isto representa uma média de 2,34% do total de resíduos sólidos produzidos no Brasil. A Figura 2.13 mostra o armazenamento de resíduos de vidro reciclado.



Figura 2.13: Resíduos de vidro para reciclagem (TORRES-CARRASCO, 2015).

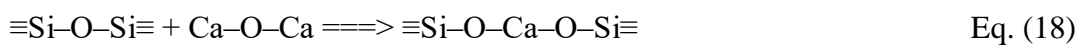
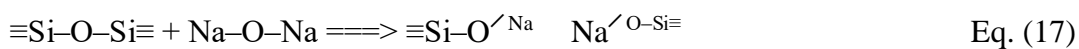
No entanto, as investigações têm demonstrado que a maior parte dos resíduos de vidro reciclados é utilizada para a fabricação de vidro novo ou para outros fins que não têm um impacto significativo no consumo destes resíduos. Conseqüentemente, a quantidade de vidro reciclado e armazenado é crescente, bem como todos os problemas ambientais associados a ele. Com isso, a política econômica, o saneamento de ambientes urbanos poluídos e o consumo máximo de vidro reciclado levaram a uma grande quantidade de pesquisas nos últimos anos visando a reutilização

desses resíduos de vidro na construção civil (SHAO *et al.*, 2000; SHAYAN e XU, 2004, 2006; IDIR, 2009; IDIR *et al.*, 2010, 2011; TORRES-CARRASCO, 2015).

No entanto, antes de reutilizar vidro reciclado em processo de tecnologia convencional, vários parâmetros devem ser estudados e analisados, considerando a reatividade dos componentes que compõem o vidro. Segundo Jani e Hogland, (2014) e Vafaei e Allahverdi, (2016), embora os vidros sejam reciclados da mesma maneira e armazenados juntos, suas características são diferentes um do outro. Assim, a cor, a qualidade, as propriedades e a origem do vidro são fatores muito importantes a serem levadas em consideração quando se estuda a sua reutilização para determinado fim.

O vidro é basicamente formado por óxido de silício (SiO<sub>2</sub>), seja sílica, por isso também é denominado de vidro silício, porém diferentemente da sílica encontrada nas rochas, apresenta um rearranjo desordenado, como pode ser visto na figura 2.18.

Na estrutura da composição química, os elementos alcalinos ou alcalinos terrestres como Na<sub>2</sub>O e CaO, após dissolução do pó de vidro na água, desempenham dois papéis fundamentais como: equilibrar as cargas e quebrar as ligações contínuas de silício da composição química para promover a redução da temperatura de fusão e de viscosidade (equações 17 e 18) (FROHARD, 2014). Da mesma forma, a dissolução do M<sub>2</sub>O contribui para o aumento do pH (Eq 19) (ver figura 2.19).



A composição química, morfológica e mineralógica dos vidros depende da sua natureza e cor (SHAO *et al.*, 2000; SHAYAN, 2004, 2006; IDIR, 2009; IDIR *et al.*, 2010, 2011; TORRES-CARRASCO, 2015). De acordo com esses autores, a composição química dos vidros pode resumida nas Tabelas 2.6 e 2.7. Assim, pode-se observar que os vidros são geralmente compostos de altos teores de SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CaO.

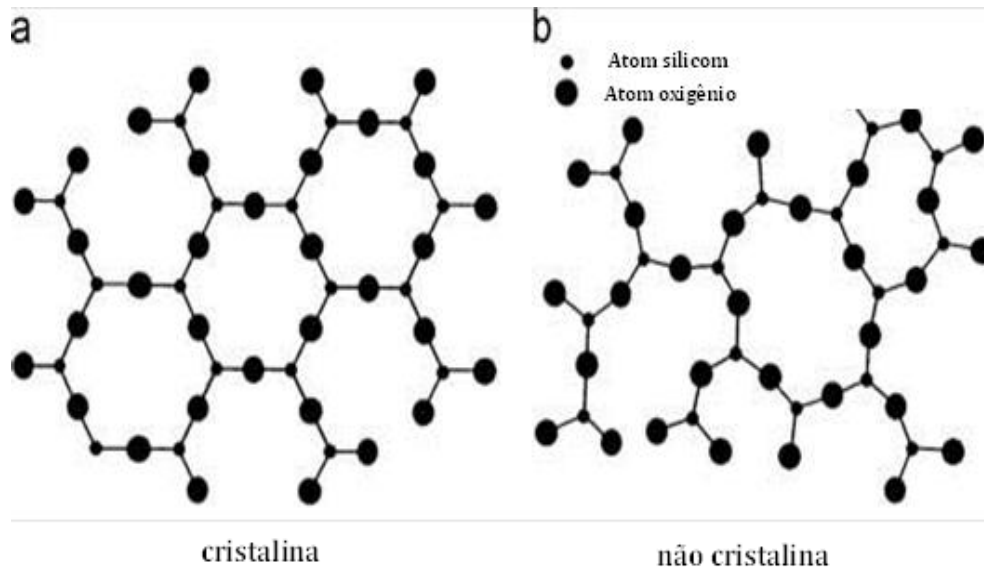


Figura 2.14: Estrutura de a) de quartzo, b) de vidro silício (PARTYKA *et al.*, 2014)

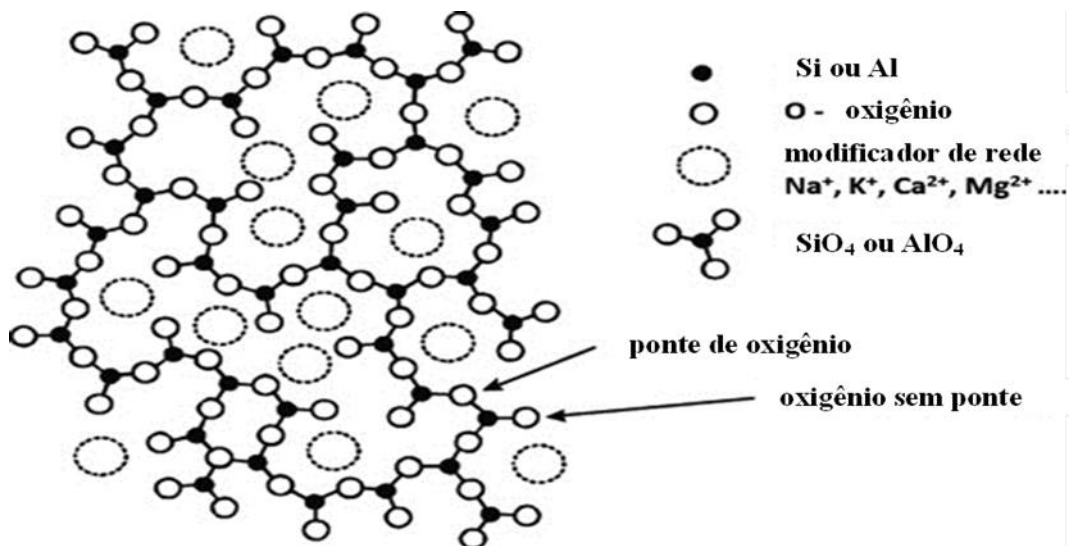


Figura 2.15: Representação esquemática do vidro silicato Na-Ca-K-Mg (PARTYKA *et al.*, 2014)

Tabela 2.6: Composição química vidros determinados por FRX (SHAO *et al.*, 2000 ;SHAYAN e XU, 2004, 2006).

Wt%	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Mínimo	4,9	68,9	1,2	0,3	0,1	0,07	-	10	0,2
Máximo	13	75	3,0	1,1	0,9	0,21	-	16	0,7
Típico	10,5	74	1,3	0,5	0,4	0,2	-	13	0,2

Tabela 2.7: Composição química de alguns tipos de vidros determinada por FRX (TORRES-CARRASCO, 2015).

Wt%	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	*P.F
Vidro branco	9,18	71,41	1,72	3,17	0,14	0,05	0,03	11,49	2,58	0,24
Vidro verde	11,82	70,73	2,11	1,08	0,52	0,07	0,04	11,98	1,06	0,56
Vidro topázio	12,33	70,74	2,01	0,93	0,59	0,09	0,04	11,60	1,06	0,46
Vidro misturado	11,75	70,71	2,05	1,17	0,52	0,11	0,04	11,71	1,08	0,83

\*P.F: Perda ao fogo

A difratometria de raios X (DRX) de pó de vidro moído realizada por Idir (2009) mostrou que o vidro é um material amorfo, exibindo uma auréola vítrea e uma intensidade máxima de sinal muito

baixa (Figura 2.16). Além disso, o autor avaliou o aspecto morfológico do vidro investigado através da análise por microscopia eletrônica de varredura, mostrou apresentar partículas angulares não porosas e uma composição química homogênea (Figura 2.17). Estes resultados DRX foram confirmados por Torres-Carrasco, (2015), que analisou e comparou o DRX de quatro tipos diferentes de pó de vidro (branco, verde, mistura, topázio) (Figura 2.18).

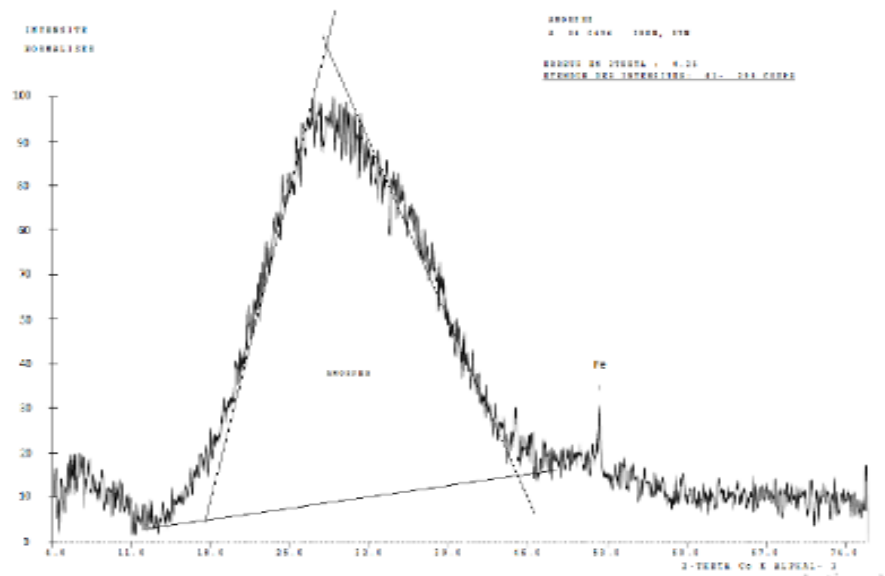


Figura 2.16: Espectro DRX de PV (material tipicamente amorfo) (FROHARD, 2014).

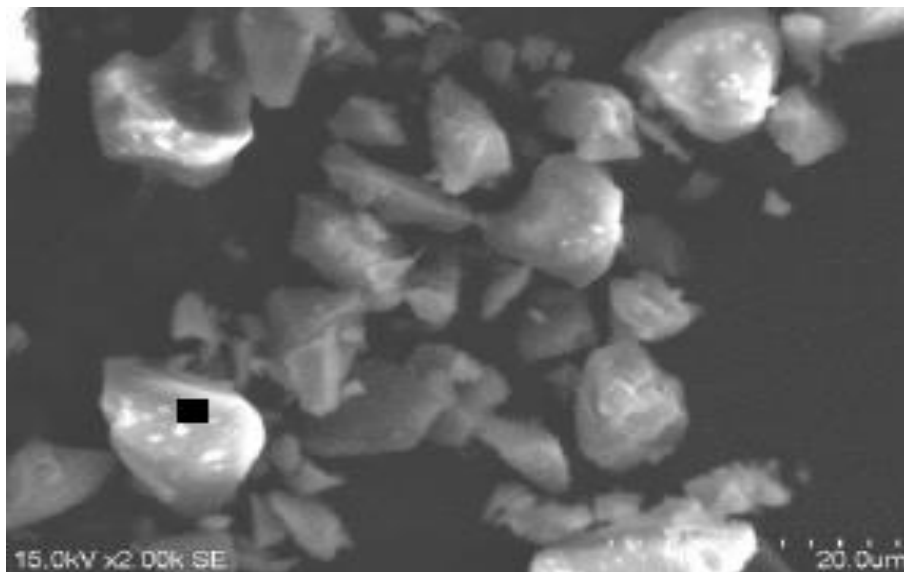


Figura 2.17: MEV de PV e espectro EDS associado (IDIR, 2009).

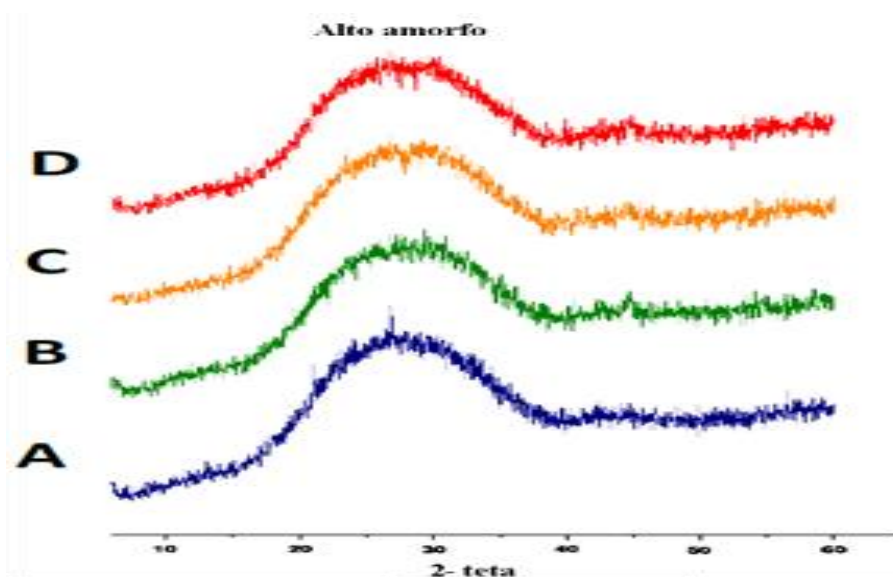


Figura 2.18: DRX de vidro A) branco, B) verde, C) topázio, D) misturado (TORRES-CARASCO, 2015).

Todavia, as reações de pó de vidro dependem das suas reações quando ele é diluído na água. Torres-Carrasco (2015) estudou a solubilidade do pó de vidro sob três condições de dissolução: condição química à temperatura ambiente ( $22 \pm 2^\circ\text{C}$ ) e à temperatura média ( $80 \pm 2^\circ\text{C}$ ) e condição mecânico-química à temperatura ambiente ( $22 \pm 2^\circ\text{C}$ ). Foram estudados três tamanhos de partículas de pó de vidro ( $< 45$ ,  $< 90$  e  $< 125 \mu\text{m}$ ) com os tempos de dissolução de 10min, 2h, 4h e 6h. Os resultados mostraram que a condição de dissolução química a temperatura média alta ( $80 \pm 2^\circ\text{C}$ ), é a que causa a maior solubilidade dos aluminossilicatos ( $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) no pó de vidro, solubilizando 60% dos óxidos de cada um dele. Além disso, o tempo necessário para uma solubilidade ótima e o tamanho das partículas mais solúveis são de 6 horas e  $< 45 \mu\text{m}$ , respectivamente.

Os vidros podem ser utilizados sob a forma de agregados para a produção de concreto ou como aditivo. No primeiro caso, o vidro não precisa ser completamente moído ou pulverizado, mas é usado em grandes quantidades com tamanhos de partículas variáveis para preencher certos vazios no concreto, como mostrado na Figura 2.19. Esta prática reduz a quantidade de agregado que deveria ser normalmente utilizada para a construção. Além do mais, os finos de vidro moídos no concreto podem apresentar reações pozolânicas através de elementos alcalinos, aumentando assim o desempenho do concreto e também reduzindo a quantidade de cimento necessária (IDIR, 2009; IDIR *et al.*, 2010, 2011; FROHARD, 2014).



Por outro lado, no segundo caso, o vidro é moído e utilizado na forma de um pó muito fino (inferior a 75 micron, por exemplo) como aditivo para a substituição do cimento Portland comum em concreto ou argamassa. De acordo com Idir (2009), o pó de vidro não tem propriedades de ligante, mas somente as propriedades de reações pozolânicas. Portanto, o pó de vidro moído precisa ser misturado com outro material, como a cal, por exemplo, para apresentar características cimentícias.



Figura 2.19: Concreto à base de agregados de vidro.

No entanto, as reações pozolânicas do vidro moído são afetadas por fatores, os principais são: o tamanho, a cor e quantidade (teor) dos compostos químicos (SHAO *et al.*, 2000; SHAYAN e XU, 2004, 2006; Idir, 2009; IDIR *et al.*, 2010). Segundo os autores, podem ocorrer duas reações no concreto ou argamassa formado com vidro, dependendo do tamanho das partículas de pó de vidro utilizadas, tais como: a reação álcali-sílica quando as partículas têm cerca de 1mm de tamanho, o que causa efeitos negativos, e a reação pozolânica quando as partículas são muito finas, o que melhora as propriedades do concreto. Para Chen *et al.* (2006) com 75  $\mu\text{m}$  de tamanho, o pó de vidro poderia garantir uma boa reação pozolânica e dar boa resistência ao concreto e à argamassa; enquanto que Shao *et al.* (2000) relataram que quando o tamanho da partícula é 38  $\mu\text{m}$ , aumenta mais os índices de reação pozolânica e o desenvolvimento da resistência à compressão simples ainda melhor do que 75  $\mu\text{m}$ . Além disso, quando o tamanho é mais fino, diminui a taxa de expansão das partículas de pó de vidro, conseqüentemente do concreto (IDIR *et al.*, 2010 *apud* FROHARD, 2014) (Figura 2.20).

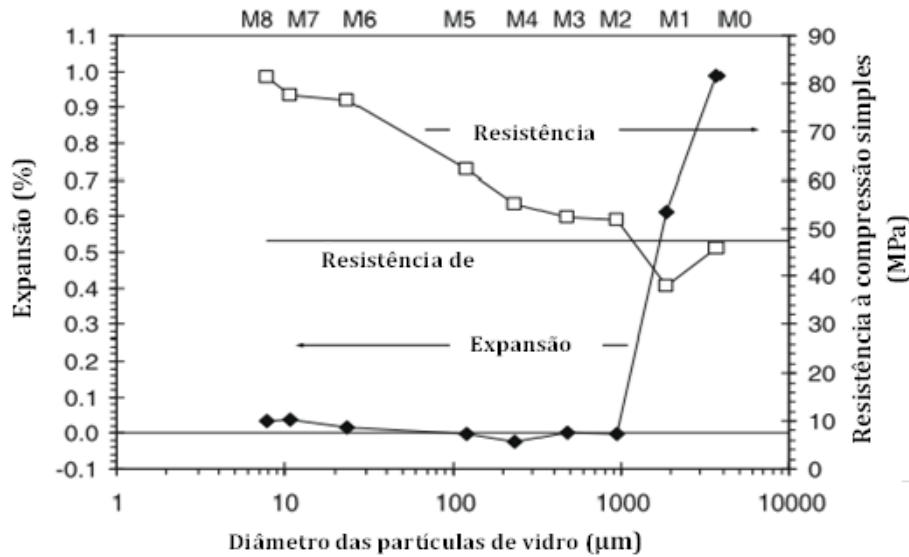


Figura 2.20: Efeito de tamanho das partículas de vidro sobre a expansão e a resistência a compressão simples (IDIR *et al.*, 2010 *apud* FROHARD, 2014 ).

#### 2.3.3.1. Efeito de vidro no comportamento de solo estabilizado

Consoli *et al.* (2018a) utilizaram pó de vidro em combinação com a cal de carbureto para determinar o seu impacto no comportamento mecânico de um solo arenoso e residual. Neste estudo, a resistência à compressão, a estrutura e a durabilidade de um solo arenoso e residual foram avaliadas misturando-os separadamente com três teores diferentes de pó de vidro (10, 20 e 30%). Também foi verificada sua influência sobre o índice  $\eta/B_{iv}$ , o parâmetro que relaciona a porosidade e a quantidade de ligante (cal de carbureto e pó de vidro). Os resultados dos experimentos mostraram que a resistência à compressão simples dos solos testados aumenta proporcionalmente com o aumento do teor de pó de vidro. Além disso, notaram pela durabilidade que, a perda de massa após 12 ciclos de molhagem e secagem dos corpos de provas varia de acordo com o teor de pó de vidro. Assim, as amostras com 30% de teor de pó de vidro têm uma perda de massa menor do que as outras amostras contendo respectivamente 10 e 20% de pó de vidro, independentemente da percentagem de teor de cal de carbureto. Os mesmos resultados foram encontrados para o ensaio de rigidez. Em relação ao índice  $\eta/B_{iv}$ , os valores encontrados são menores a 30% de teor de vidro do que aqueles encontrados com 10% de pó de vidro. Como resultado, o aumento da quantidade de pó de vidro reduz o índice de vazios da mistura. Portanto, concluíram que na presença de água, a mistura de pó de vidro e a cal de carbureto forma um ligante compacto comparável ao cimento hidráulico, que afeta o parâmetro  $\eta/B_{iv}$  ao aumentar a resistência à compressão simples, e diminuir

a perda de massa do material, bem como seu módulo cisalhante a pequena deformação ( $G_0$ ). Os mesmos resultados foram encontrados por Consoli *et al.* (2008), que concluíram que a mistura de pó de vidro com a cal de carbureto tem um desempenho muito importante sobre o comportamento mecânico dos dois tipos de solos que foram estudados.

Bilondi *et al.* (2018), também observaram em suas pesquisas com pó de vidro (nos teores de 3, 6, 9, 12, 15 e 20%), que resistência à compressão simples aumenta com o aumento da quantidade de vidro mantendo o teor de cal de carbureto constante (7%). Ao contrário de Consoli *et al.* (2018), eles descobriram em seus estudos que a melhor resistência é obtida para as amostras que foram misturados com 15% pó de vidro. Da mesma forma, os autores relataram que todos os corpos de prova com teor de vidro inferior e superior a 15%, têm valores relativamente baixos de resistência à compressão simples (Figura 2.21).

Dos resultados de Consoli *et al.* (2018) e Bilondi *et al.* (2018) pode-se deduzir que a quantidade de pó de vidro necessária para levar a uma melhor resistência depende da natureza do solo a ser estabilizado e do vidro utilizado. Além disso, Bilondi *et al.* (2018) avaliaram a deformação volumétrica e a retração de amostras preparadas com pó de vidro e cimento Portland (com 5%). Os resultados mostraram que todos os corpos de prova contendo mais de 6% de pó de vidro tinham valores de deformação volumétrica menor do que a amostra contendo 5% de cimento Portland, tanto para 7 dias como em 28 dias de cura (Figura 2.22). Da mesma forma, os autores relataram que nos primeiros sete dias a deformação volumétrica é mais crítica para cada amostra do que aos 28 dias (Figura 2.23). Portanto, deduziram que esta baixa taxa de deformação e retração, ou seja, a durabilidade das amostras com vidro seria devido ao endurecimento do agente cimentício formado pelo pó de vidro e cal sob o efeito da reação pozolânica que se desenvolveu durante o tempo de cura.

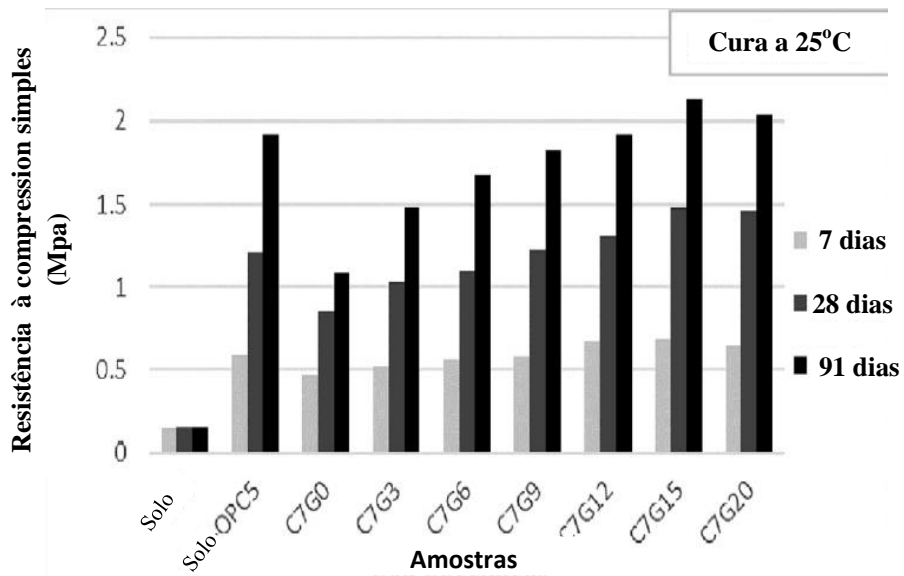


Figura 2.21: O aumento da resistência à compressão simples em função de teor de vidro (G) com o um teor de cal de carbureto (C) constante (7%) (BILONDI *et al.*, 2018)

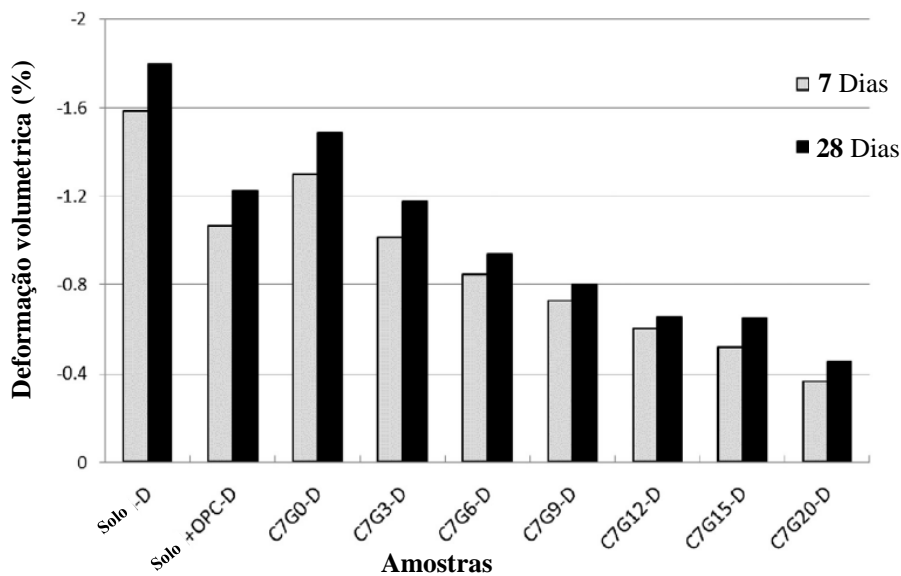


Figura 2.22: O efeito de teor de vidro (G) com um teor constante de cal de carbureto (C) (7%) sobre a deformação volumétrica ao 7 dias e 28 dias (BILONDI *et al.*, 2018).

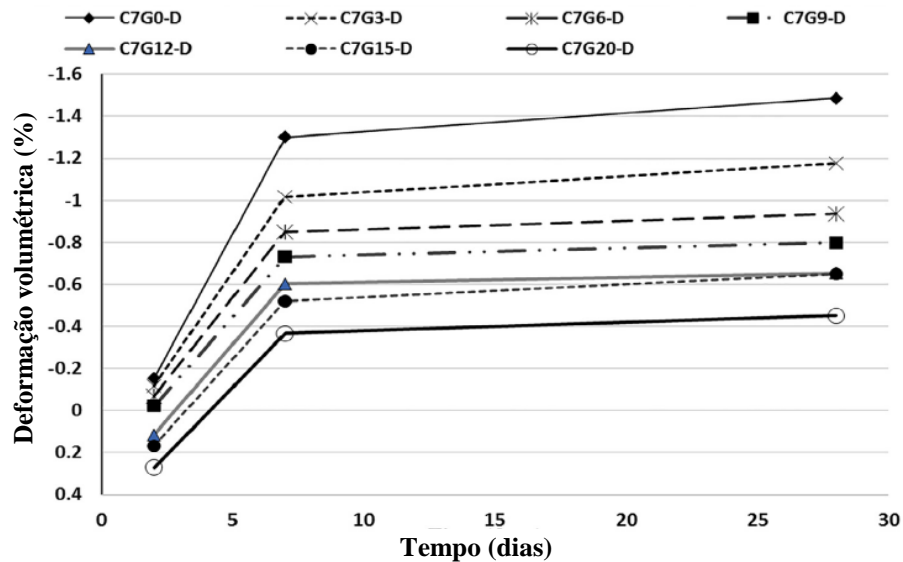


Figura 2.23: A evolução da deformação volumétrica em função do tempo (BILONDI et al., 2018).

#### 2.3.4. Hidróxido de Sódio (NaOH)

O hidróxido de sódio (NaOH) é um produto químico altamente solúvel e miscível na presença de água, produzido pelo processo cloro-alcalino. É uma base forte ainda conhecida como soda cáustica cujo a fórmula química é NaOH. Sua solução aquosa é altamente alcalina e reage de uma maneira muito forte espontaneamente com ácidos. O NaOH é um produto muito importante no ambiente químico, como é o caso dos ácidos sulfúrico e carbonato de sódio (TORRES-CARASCO, 2015). De acordo com Shi *et al.* (2006), o NaOH é o principal produto básico para a fabricação de quase todos os produtos industriais. Sua produção é geralmente feita através do mecanismo de cloro-alcalino com emissão de gases nocivos (CO<sub>2</sub>) no ambiente (Figura 2.24).

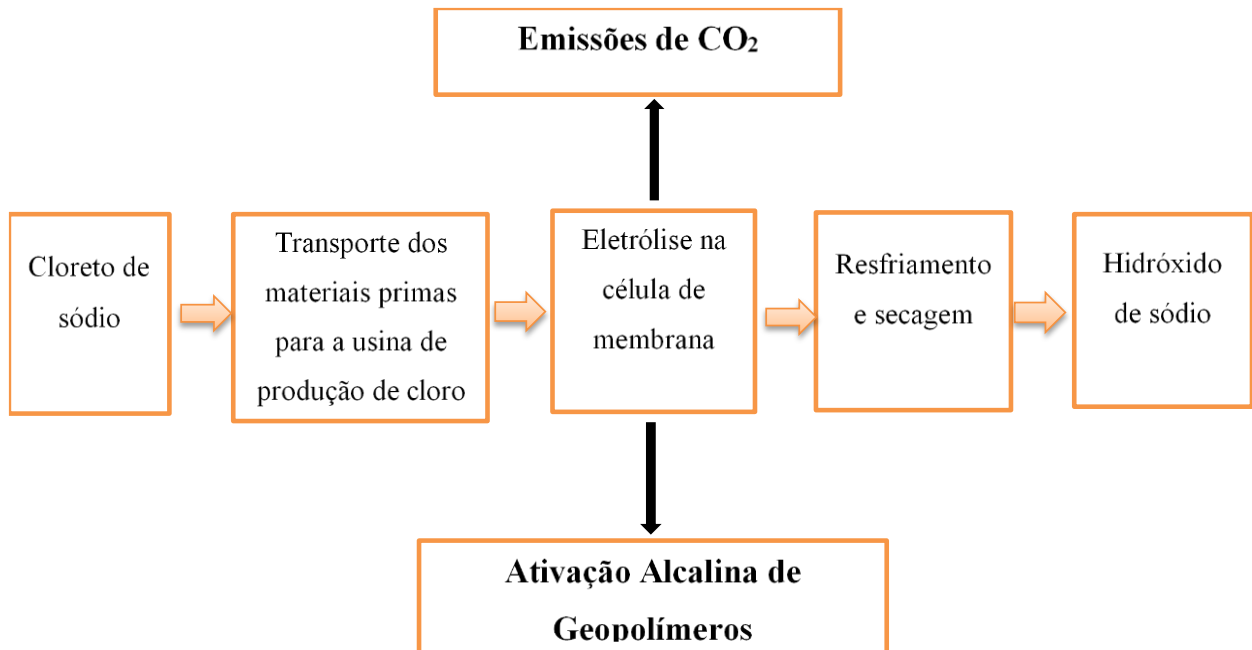


Figura 2.24: Diagrama de emissões de CO<sub>2</sub> na produção de hidróxido de sódio para o setor de saúde (TORRES-CARRASCO, 2013)

No mercado consumidor, o NaOH está disponível como um sólido cristalino (pó, bloco, grão ou) à temperatura ambiente ou como uma solução aquosa com concentrações variáveis, mas com a mesma composição química.

A diluição do NaOH na água provoca um aumento da temperatura (entalpia) e uma liberação de calor (reação exotérmica) que aumenta proporcionalmente com o aumento da concentração. As suas reações podem ser muito violentas ou mesmo explosivas com certos compostos orgânicos ou minerais como: ácidos fortes, hidroquinona, clorofórmio, fósforo, cetonas, ácido clorídrico e anidridos. A Figura 2.25 mostra a evolução da temperatura quando o NaOH é diluído em água com diferentes concentrações. Kurt e Bittner, (2006), explicaram que a solubilidade do NaOH diluído em água é parcial (cerca de 53,3%) (Figura 2.26).

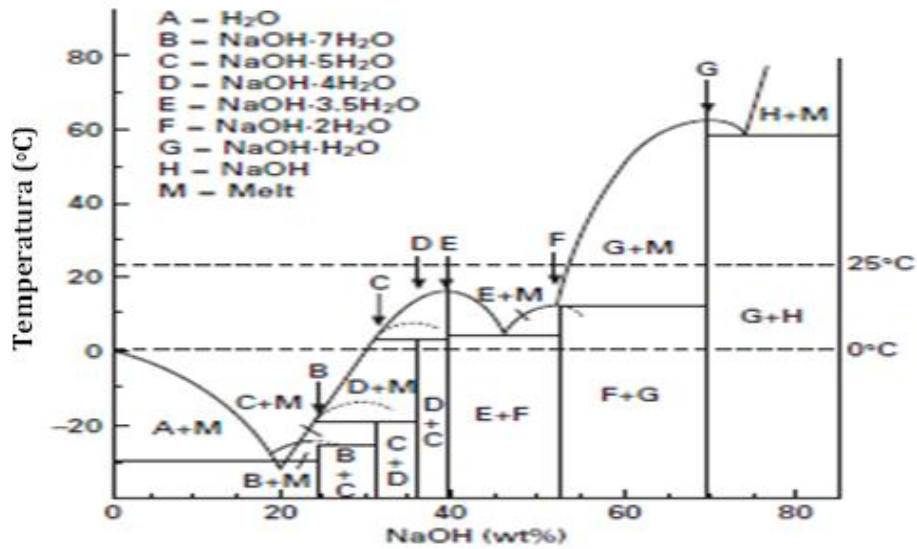


Figura 2.25: Diagrama de fases de NaOH na água (KURT e BITTNER, 2006).

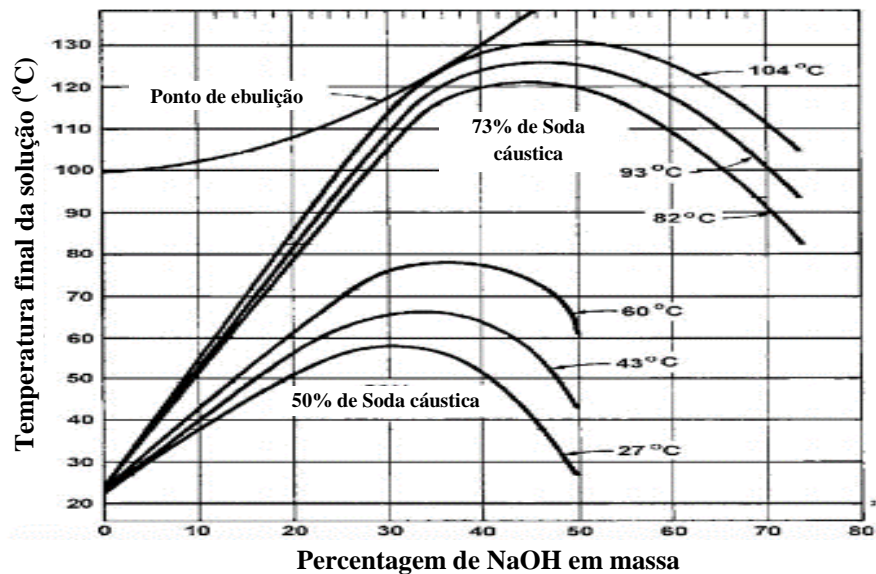


Figura 2.26: Evolução da temperatura de diluição em função da porcentagem de NaOH (DCC, 1993 *apud* SHI *et al.*, 2006)

No entanto, a concentração também influencia a viscosidade da solução. De acordo com Shi *et al.* (2006), a viscosidade aumenta com o aumento da concentração. No entanto, esta evolução da viscosidade pode ser limitada ou reduzida sob o efeito da temperatura. Por outro lado, Shi *et al.* (2006) explicam que a viscosidade diminui lentamente quando a temperatura aumenta. A Tabela 2.8 mostra a evolução da viscosidade a 20°C.

Tabela 2.8: Viscosidade de água neutra e solução NaOH a 20°C (SHI *et al.*, 2006)

Água Neutra		Solução de NaOH	
		10%	20%
Viscosidade a 20°C	1	1,72 m <sup>2</sup> /s	4,5 m <sup>2</sup> /s

Muito higroscópico, o NaOH tem uma facilidade muito grande de captar a umidade circundante (o ar) e de fixar o dióxido de carbono com o qual ele forma o carbonato de sódio. Assim, NaOH é utilizado na fabricação de detergentes, sabões, compostos (minerais e orgânicos), tratamento de água e também na área industrial, tais como: indústria vidreira, farmacêutica, óleo e outros.

Além disso, muita pesquisa tem sido feita para estudar as propriedades de dissolução termodinâmica do NaOH devido à sua elevada alcalinidade (PABALAN e PITZER, 1987; SIMONSON *et al.*, 1989; PETRENKO e PITZER, 1997). Simonson *et al.* (1989) relataram, após seus estudos da entalpia de diluição e da aparente capacidade térmica molar aparente do NaOH, que temperatura, molaridade e pressão são fatores importantes na avaliação da termodinâmica de dissolução do NaOH.

Nos últimos anos, a aplicação de NaOH na área da engenharia civil para a fabricação de concreto com base em ligantes geopoliméricos ou em técnicas de estabilização do solo tem aumentado e é objeto de vários estudos (AL BAKRI *et al.*, 2011; PASCUAL *et al.*, 2014; VAF AEI e ALLAHVERDI, 2017). De fato, o uso de NaOH na engenharia civil deve-se à sua capacidade de aumentar e manter o pH a um valor maior ou igual a 12,4 para facilitar as reações químicas que ocorrem entre as partículas do solo e os aditivos adicionados. Segundo Shi *et al.* (2006), o NaOH é usado como um acelerador de reação na mistura solo-cimento Portland, promovendo o aumento da resistência do material. No entanto, o seu efeito começa a diminuir a partir do 7º dia após a mistura, levando a uma redução na resistência do material alcalino ativado (KOMLJENOVIC *et al.*, 2010).

Torres-Carrasco (2015), explicou que o NaOH é o hidróxido mais utilizado no processo de ativação alcalina, devido ao seu baixo custo, baixa viscosidade e alta disponibilidade no mercado comercial. Também, o NaOH tem uma certa facilidade de dissolução das partículas de aluminossilicatos. Como exemplo de pesquisa, o NaOH tem sido amplamente utilizado como ativador na formação de geopolímeros a partir de cinzas volantes (PALOMO *et al.*, 1999; PROVIS



*et al.*, 2005; FERNÁNDEZ-JIMÉRNEZ *et al.*, 2006; DUXSON *et al.*, 2005; KOMLJENOVIC *et al.*, 2010; AL BAKRI *et al.*, 2011; CASTRO, 2015; PHUMMIPHAN *et al.*, 2016), metacaolinitas (PAOLOMO *et al.*, 1999; BERNAL *et al.*, 2012; VASSALO, 2013; MATOS, 2018), escória (PUERTAS *et al.*, 2003; BERNAL *et al.*, 2012; BONDAR *et al.*, 2018), pó de vidro (TORRES-CARRASCO *et al.*, 2014; PASCUAL, 2014; TORRES-CARRASCO, 2015; TORRES-CARRASCO e PUERTAS, 2015; VAFAEI e ALLAHVERDI, 2017). O NaOH atua como catalisador na síntese de geopolímeros e como acelerador de reação no processo de hidratação do cimento Portland por razões econômicas, de disponibilidade e da sua baixa viscosidade. O NaOH foi usado no processo de formação de geopolímeros por Provis *et al.* (2005), para a formação de estruturas de zeólitas após um período de endurecimento de curto e de longo prazo em condições úmidas e de altas temperaturas. Os resultados desta pesquisa mostraram uma semelhança entre a formação de zeólitas e a diminuição da resistência do material. Além disso, quando a concentração da solução de NaOH é elevada, formam-se partículas finas e brancas chamadas cristais na superfície do material. Este é o fenômeno da carbonatação, que também pode ser devido à reação entre álcalis e gás carbônico (CO<sub>2</sub>) na atmosfera (PROVIS *et al.*, 2005).

## 2.4. ESTABILIZAÇÃO POR ATIVAÇÃO ALCALINA

Os primeiros estudos foram conduzidos em 1895, quando a ideia era produzir um ligante baseado na mistura de escória de alto-forno e soda cáustica granulada com cal hidratada (KRIVENKO, 2017). Alguns anos mais tarde, em 1930, Kühl (1958) publicou os resultados da sua investigação sobre o comportamento de endurecimento da mistura de escória triturada misturada com a solução de potássio cáustica. Dez anos depois, Purdon (1940) publicou os resultados da primeira extensa pesquisa laboratorial sobre cimentos sem clínquer, compostos de escória e álcalis cáusticos produzidos com base alcalina e sal. Em 1957, o cientista ucraniano Gluhovsky descobriu pela primeira vez a possibilidade de fabricar ligantes à base de aluminossilicatos (argilas) com baixo teor de cálcio ou cálcio livre e soluções alcalinas metálicas, a que chamou: "cimento de solo e solo silicatos" para mostrar que ele provém dos minerais naturais. Assim, esses materiais cimentícios álcali-ativadores foram divididas em dois grupos: alcalinas (Me<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O) e alcalino-terrosas (Me<sub>2</sub>O-MeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O) onde *Me* é um íon alcalino do tipo Na, Sr, Mg, Ba, K Li ou Ca, levando em consideração os materiais que as compõem. Isso gerou, posteriormente, vários estudos e pesquisa sobre a formação de argamassas e concretos álcali-ativados a partir de escória, cinzas combustíveis, rochas de aluminossilicato e outros constituintes metalúrgicos (KRIVENKO, 2017). Após as várias tragédias de incêndio na França, entre 1970 e 1972, o pesquisador

Davidovits pensou na formação de um material durável e capaz de resistir mais aos efeitos fogo. Nesse contexto, o autor iniciou suas pesquisas com os polímeros inorgânicos. Alguns anos depois, o autor chegou à formação de um material que ele chamou geopolímeros por causa de sua estrutura semelhante aos polímeros (DAVIDOVITS, 1979, 1991, 1994; PALOMO et al, 1999; DUXSON, 2007; KRIBENKO, 2017; MATOS, 2018).

Segundo Krivenko (1995), os alcalinos e sais de metais alcalinos são semelhantes aos silicatos, aluminatos e aluminossilicatos que reagem em meio aquoso alcalino em condições de alta concentração alcalina. O autor também explicou que essa interação ocorre entre minerais argilosos, vidros de aluminossilicato natural e artificial que não contêm cálcio com sistemas cimentícios à base de cálcio sob condições ambientais adequadas com a formação de álcalis ou terras alcalinas resistentes à água.

Várias pesquisas provaram que a produção de cimento Portland gera uma grande quantidade de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) na atmosfera. De acordo com Anand *et al.* (2006), uma tonelada de cimento Portland emite cerca de 900 kg de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Este valor foi confirmado por Bosoaga *et al.* (2009) que constataram que entre 0,65 a 0,92 kg de CO<sub>2</sub> são liberados por cada quilograma de cimento produzido, ou seja, de 65 a 92% da quantidade de cimento Portland produzida. A quantidade de CO<sub>2</sub> emitida durante a produção de cimento Portland representa cerca de 7% da quantidade total de CO<sub>2</sub> emitida no mundo, (ALI *et al.*, 2011; OLIVER *et al.*, 2015; BAKHTYAR *et al.*, 2017). A fonte fundamental de emissões de CO<sub>2</sub> durante a fabricação do cimento está relacionada com a calcinação do calcário em óxido de cálcio, a combustão de fósseis combustíveis para produzir a energia necessária e o consumo de eletricidade. A maior parte deste CO<sub>2</sub> vem da calcinação do calcário, que requer uma temperatura muito elevada (900 a 1450°C). Pode-se deduzir que a quantidade total de CO<sub>2</sub> liberada depende da matéria-prima, da energia, do combustível e do teor de clínquer necessário para o cimento durante a produção. Anand *et al.* (2006) apresentaram a reação (20) para a quantidade total de CO<sub>2</sub>.

$$\text{CO}_2 \text{ total emitido} = \text{CO}_2 \text{ emitido pelo clínquer} + \text{CO}_2 \text{ emitido pela energia elétrica utilizada} + \text{CO}_2 \text{ emitido pela energia térmica utilizada.}$$

Eq. (20)

Segundo o ROADMAP (2010), de 2000 a 2006, o CO<sub>2</sub> total liberado na atmosfera pela produção mundial de cimento aumentou em 54%. O autor explica que com o crescimento da população mundial, até 2050 cerca de 2,34 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> total podem ser liberadas se não

forem tomadas medidas apropriadas para limitar ou reduzir o consumo e a produção de cimento Portland. Ali *et al.* (2011) fizeram uma classificação da quantidade total de cimento produzido no mundo e do total de CO<sub>2</sub> equivalente a esta produção, Tabela 2.9.

Tabela 2.9: Quantidade mundial de CO<sub>2</sub> liberado de acordo com a quantidade de cimento produzido (Fonte: ALI *e al.*, 2011).

País	Produção de cimento (toneladas CO <sub>2</sub> )	Produção de carvão (toneladas de CO <sub>2</sub> )	Emissão de Carvão (toneladas de CO <sub>2</sub> )	Total (toneladas de CO <sub>2</sub> )
China	423	175	197	372
Europa	182	73	56	129
Países do Pacífico	151	65	41	106
Resto Ásia	124	56	179	235
Oriente Médio	111	51	44	95
América do Norte	88	39	40	79
América Latina	97	42	30	72
Índia	62	28	30	58
África	41	18	15	33
<b>Total</b>	<b>1279</b>	<b>547</b>	<b>632</b>	<b>1179</b>

No entanto, reduzir a quantidade total de CO<sub>2</sub> a fim de preservar os riscos ambientais associados a ele tem sido o principal objetivo de muitos pesquisadores há muitos anos. A política de preservação ambiental requer a pesquisa e estudo de vários materiais, principalmente resíduos industriais ou resíduos que podem levar a um novo material com praticamente as mesmas propriedades do cimento Portland. Isto requer a implementação de técnicas adequadas em relação

à nova tecnologia, não só por razões ambientais e ecológicas, mas também por razões econômicas, a fim de reduzir o elevado custo dos locais de construção relacionados com o uso de cimento Portland. Assim, o uso industrial e comercial do cimento alumina ou silicato alcalino ativado, conhecido como geopolímero (DAVIDOVITS, 1982; PALOMO *et al.*, 1999; DUXSON, 2007), tem sido objeto de várias pesquisas por mais de duas décadas, devido ao seu adequado desempenho e às suas vantagens econômicas e ambientais.

Além disso, o objetivo ainda não foi totalmente alcançado, apesar da extensa pesquisa sobre a redução do CO<sub>2</sub> liberado para preservar a camada de ozônio dos gases de efeito estufa. Turner e Collins (2013), fizeram um estudo comparando a quantidade total de CO<sub>2</sub> emitida por um concreto baseado em cimento Portland e um concreto baseado em geopolímeros. Descobriram que cada metro cúbico de concreto à base de cimento Portland gera 354 kg de CO<sub>2</sub>, enquanto o mesmo volume de concreto à base de geopolímero gera 320 kg de CO<sub>2</sub>. O CO<sub>2</sub> liberado pelo concreto com geopolímeros é cerca de 9,6% menor do que o do concreto cimento Portland. Para o concreto baseado em cimento Portland, a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida está relacionada à planta de fabricação do cimento Portland, conforme descrito acima (269 kg/m<sup>3</sup> de cimento Portland produzido). Por outro lado, para o concreto geopolímero, a emissão de CO<sub>2</sub> está relacionada principalmente com a produção de cinzas volantes, metacaulim, escória de alto-forno, que gera apenas 11 kg/m<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub>. Além disso, o uso de silicato de sódio como ativador alcalino e a alta temperatura de cura também são uma fonte de emissão de CO<sub>2</sub> para geopolímeros (TURNER e COLLINS, 2013; TORRES-CARRASCO, 2015). A Figura 2.27 mostra o diagrama da quantidade de CO<sub>2</sub> emitida por cada fator envolvido na produção de concreto baseado em cimento Portland e de concreto geopolímero. De fato, a ativação alcalina é o mecanismo a partir de qual, os ligantes são obtidos depois uma reação entre os aluminossilicatos (alumínio - Al e silício - Si) e as soluções de hidróxido ou silicato de potássio ou de sódio chamadas de geopolímeros (DAVIDOVITS, 1979 e 1994). O geopolímero, segundo o autor, é definido como a síntese dos materiais orgânicos por meio altamente alcalino e usado como materiais cimentícios suplementares. A ativação alcalina é um processo químico chamado também geopolimerização pelo qual determinadas estruturas parcialmente ou totalmente amorfas se transformam em estruturas com propriedades cimentícias (PALOMO *et al.*, 1999 *apud* PEREIRA, 2016; CASTRO, 2015).

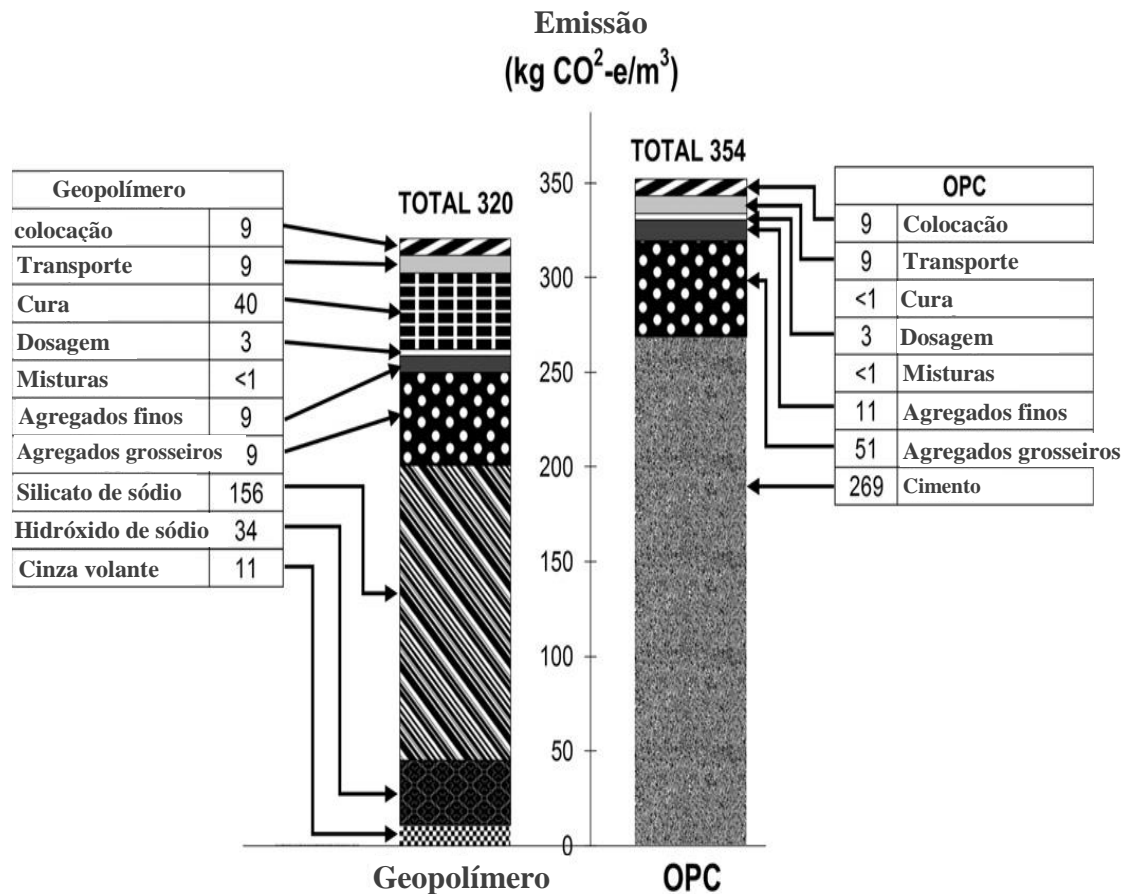


Figura 2.27: Resumo de CO<sub>2</sub> total emitido pela produção de cimento e geopolímero (TURNER e COLLINS, 2013).

#### 2.4.1. A Geopolimerização

Geopolimerização é o processo pelo qual um ligante ou material novo é obtido a partir da mistura dos materiais ricos em alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e silicato (SiO<sub>2</sub>) numa solução alcalina (DAVODOVITS, 1982 e 1991). Segundo Hermann et al, (1999) *apud* KHALE e CHAUDHARY (2007), a geopolimerização é uma sucessão de reações químicas (geossíntese) nas quais estão envolvidos materiais pozolânicos, fonte de silicato e alumina, diluídos com uma solução altamente básica. Davidovits (1991), explica que a solução utilizada para diluir os aluminossilicatos pode ser alcalina ou ácida. Além disso, a geopolimerização é definida como um processo pelo qual um material é obtido a partir da formação de um material a temperatura ambiente ou ligeiramente elevada (entre 20 e 85°C) em duas fases. De acordo com Duxson *et al.* (2007), a primeira fase é a dissolução, também chamada de nucleação, do material aluminossilicose e a formação de espécies poliméricas que são muito dependentes da temperatura e dos parâmetros cinéticos e a segunda fase, é a fase

de rearranjo estrutural. No entanto, o material formado a partir da geopolimerização ou ativação alcalina é chamado de geopolímeros (DAVIDOVITS, 1979) e pode ser escrito sob a seguinte forma de reação (21).



Onda:  $M_n$  é metal alcalino; - indica a presença de ligação;  $z = 1, 2$  ou  $3$ ;  $n =$  grau de polimerização.

Assim, os geopolímeros são grupos de minerais ou polímeros inorgânicos compostos por  $SiO_4$  e  $AlO_4$  (tetraedros) que são ligados alternadamente a átomos de oxigênio (DAVIDOVITS, 1982, 1991; BILONDI *et al.*, 2018). Nesta mistura, os cátions da solução alcalina, como  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Li^+$ ,  $Ba^+$ , etc..., desempenham um papel na transferência de íons de alumina e silicato (DAVIDOVITS, 1991). Provis *et al.* (2005) à semelhança de outros autores, definiram os geopolímeros como materiais aluminossilicatos sintetizados por ativação alcalina ou alcalino-silicato de alumina e/ou materiais contendo sílica à temperatura ambiente ou acima. Este material também é conhecido sob vários nomes por diferentes pesquisadores, tais como: geocimento, por Krivenko (1991); cimento alcalino, por Krivenko, (1994); ou cimento alcalino ativado por Palomo *et al.* (1999 e 2004).

Conforme Davidovits (1994), os chamados geopolímeros e os polissialatos (polisilico-aluminatos) são materiais de grande cadeia molecular composto de silício, alumínio e oxigênio, representando uma estrutura amorfa semicristalina. Esta estrutura chamada polimerização vem da reação chamada geossíntese induzida pela ativação alcalina de aluminossilicatos em uma estrutura silicosa. Este mecanismo de transformação baseia-se na destruição tridimensional e na organização em que os átomos de silício trocam com os átomos de alumínio em arranjo tetraédrico enquanto partilham os átomos de oxigênio entre si (Figuras 2.28 e 2.29).

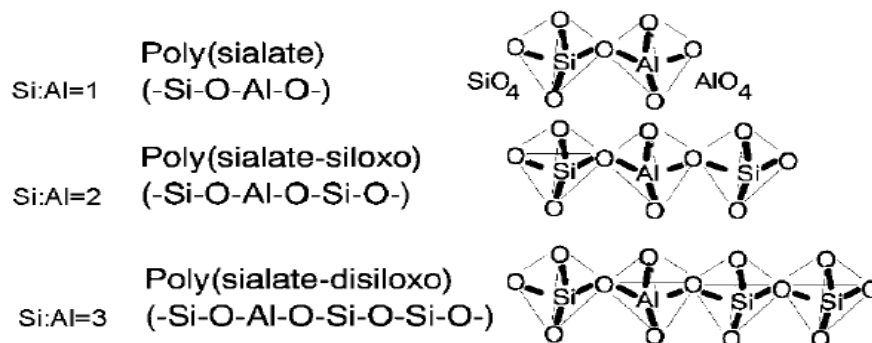


Figura 2.28: Esquema das estruturas moleculares de polissialatos (DAVIDOVITS, 1994)

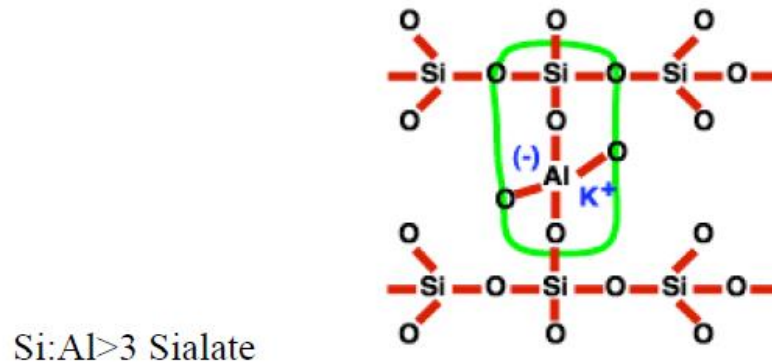


Figura 2.29: Representação das reações dos polissialatos (DAVIDOVITS, 2002)

Os geopolímeros são semelhantes as zeólitas e são formados da mesma forma (DAVIDOVITS, 1991). A composição química (aluminossilicatos) nas zeólitas é a mesma que a dos geopolímeros. Entretanto, a diferença entre os dois está na composição das misturas de reação inicial, ou seja, o aspecto estrutural onde as zeólitas geralmente se formam em sistemas hidrotermais fechados, em oposição aos geopolímeros. Da mesma forma, as zeólitas são obtidas a partir de uma temperatura relativamente elevada (300°C ou superior), enquanto os geopolímeros são inferiores (frequentemente entre 20°C e 85°C). Além disso, os geopolímeros são amorfos a semicristalinos e sua taxa de reação é mais rápida, enquanto as zeólitas são geralmente de natureza cristalina e sua taxa de reação é lenta (PINTO, 2004; BILONDI *et al.*, 2018).

Para Davidovits (1994), os fatores que influenciam a reação das zeólitas e dos geopolímeros são: a razão molar  $\text{SiO}_2/M_2\text{O}$  (sendo  $M$  um cátion metálico), a razão molar  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  e a solubilidade dos aluminossilicatos presentes no alumínio. A Figura 2.30 mostra uma representação esquemática da estrutura das zeólitas e geopolímeros ou polissialatos.

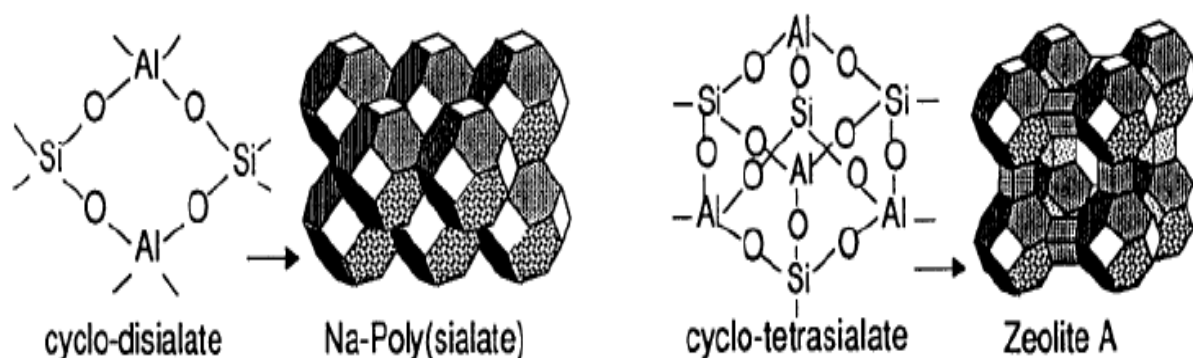


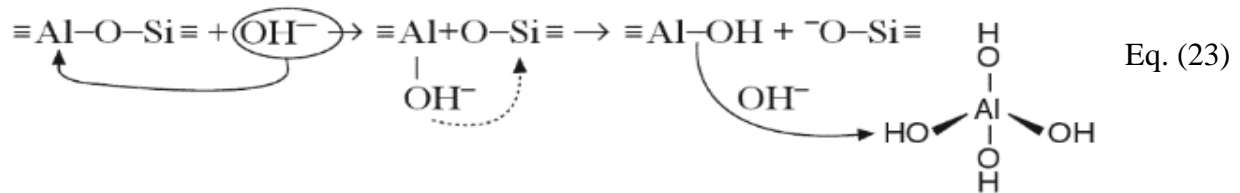
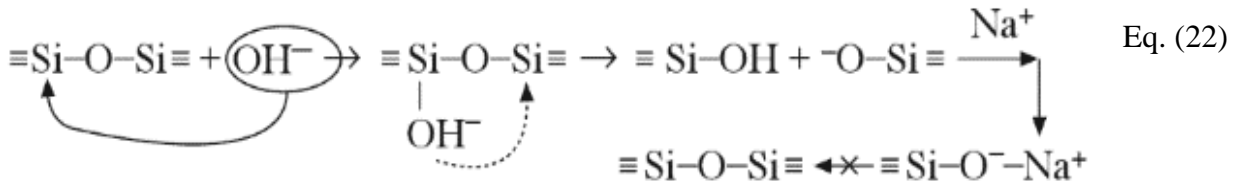
Figura 2.30: Reorganização estrutura do Na-polissialato e Zeólita (DAVIDOVITS, 1991)

#### 2.4.2. Mecanismo de Formação do Geopolímero.

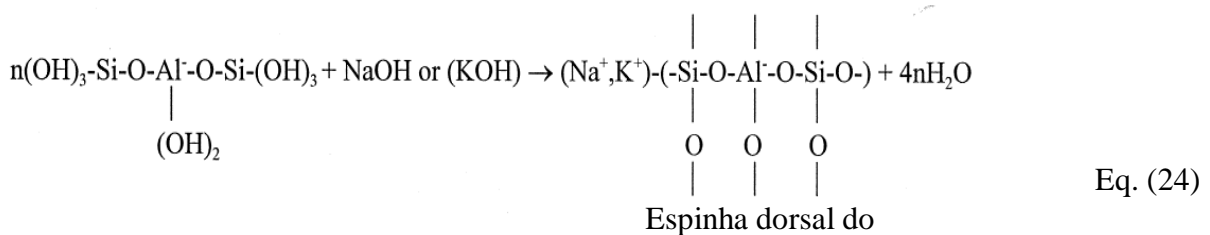
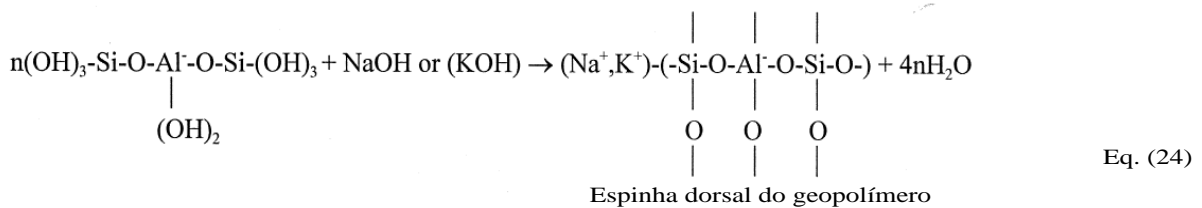
Como discutido brevemente nas seções anteriores, o mecanismo de formação ou geopolimerização do geopolímero é um processo exotérmico (com liberação de calor) que ocorre a partir da policondensação dos oligômeros. Segundo Duxson *et al.* (2007), o mecanismo de geopolimerização pode ser dividido em várias fases de reações sucessivas, tais como: a dissolução inicial da espécie Al e Si, a transferência de espécies, a nucleação e iniciação de formação de gel, reorganização estrutural dos polissialatos e enfim a polimerização e enrijecimento. Além disso, Glukhovsky (1967) agrupou o mecanismo de polimerização em três fases em série tais como: destruição-coagulação, coagulação-condensação e condensação-cristalização.

Na primeira fase, a reação começa com a dissolução dos aluminossilicatos numa solução alcalina a pH elevado (acima de sete). A partir daí, os íons  $\text{OH}^-$  do ativador alcalino adicionado ( $M_n\text{OH}$ ), iniciam a destruição das covalentes ligações Si-O-Si e Al-O-Al. Esta destruição é causada pela redistribuição da densidade de elétrons dos íons  $\text{OH}^-$  em torno do átomo de silício, enfraquecendo assim a resistência à ruptura da ligação Si-O-Si. Para este fim, a hidroxialquilação do silício aumenta e forma o composto ácido silícico da fórmula química  $\text{Si}(\text{OH})_4$ . Além disso, a presença de íons  $M^+$  ( $\text{Si}_3\text{-O}^-M^+$ ), sendo  $M$  o metal alcalino (K, Na, Li, Ca... etc.), neutraliza a carga negativa resultante das espécies oligoméricas aniônicas do grupo  $\text{Si}_3\text{-O}^-$ . Assim, a reação inversa que leva à formação de ligações de siloxano é impedida pela (reação 22). Além disso, os silicatos alcalinos têm a capacidade de intervir nas reações de troca iônica com íons divalentes para formar o complexo Si-O-Ca-OH. Contudo, o mecanismo é análogo, mesmo que a ligação covalente seja Al-O-Si, só que neste caso o composto formado é  $\text{Al}(\text{OH})_4$  (reação 23).





Durante a fase de coagulação-condensação, as espécies diluídas reagem com os íons de aluminossilicato, permitindo que os elementos dispersos sejam reunidos durante a primeira fase. Esta reação é catalisada pelo íon OH<sup>-</sup>. Este é o início da polimerização e a formação da estrutura coagulada. Entretanto, a reação entre os monômeros de sílica levando à formação de dímeros e a reação entre estes e os outros monômeros do meio leva à formação de alumina e tetraedros de sílica chamados polímeros (reação 24).



A terceira fase é a parte da reorganização estrutural e polimerização durante a qual a estrutura final é formada a partir da formação do gel sintetizado.

Além disso, as pesquisas conduzidas por Palomo *et al.* (2005) e Duxson *et al.* (2007) sobre o mecanismo de formação de geopolímeros com base no conhecimento prévio da síntese das zeólitas de Glukhvosky (1967), revelaram mais detalhes sobre a nanoestrutura dos produtos formados durante o processo de ativação alcalina. De acordo com Duxson *et al.* (2007), duas novas fases

foram introduzidas, tais como: a primeira fase de nucleação na qual os aluminossilicatos se dissolvem no meio alcalino, facilitando a formação de precursores zeólitas. Esta reação depende dos parâmetros cinéticos e termodinâmicos empregados para o processo de geopolimerização. A segunda fase é aquela em que a maioria dos núcleos se desenvolve a um nível extremo e os cristais começam a se formar. A Figura 2.31 resume os passos do mecanismo de spolimerização de uma cinza volante ativada.

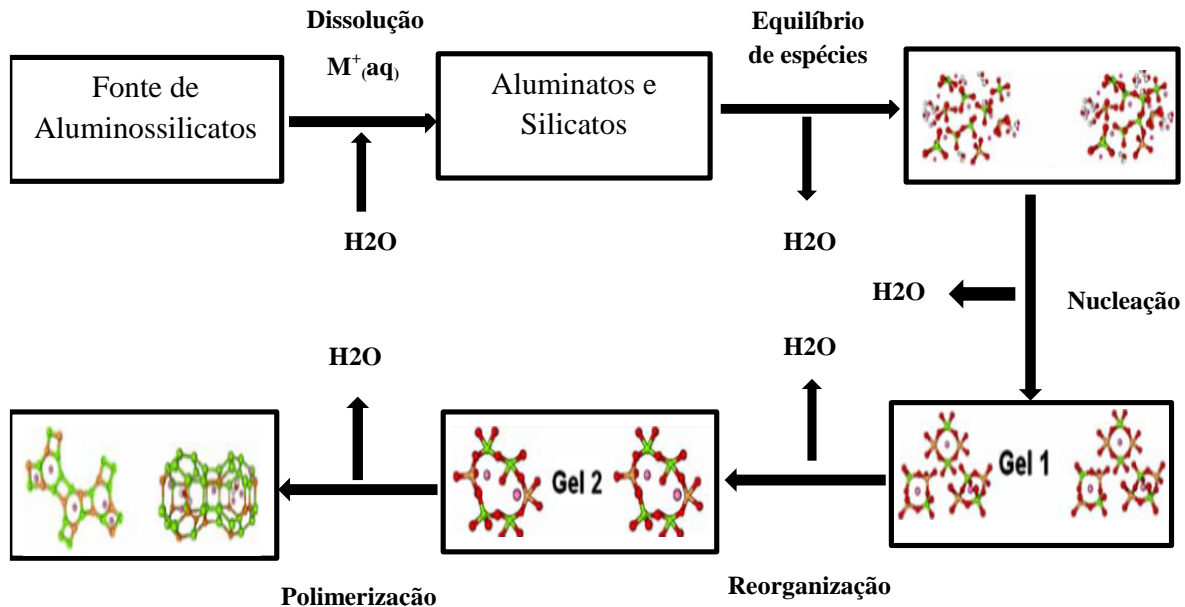


Figura 2.31: Representação esquemática do mecanismo de geopolimerização (DUXSON *et al.*, 2007).

Entretanto, Duxson *et al.* (2007) e Fernández-Jiménez *et al.* (2005, 2006), explicaram que a natureza do gel sintetizado ou do geopolímero formado depende da natureza da matéria-prima (precursor), do ativador alcalino utilizado e de vários outros parâmetros. Por exemplo, a geopolimerização de metacaulim (DAVIDOVITS, 1994; DUXSON *et al.*, 2007) e cinzas volantes (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 2006, 2008; PALOMO *et al.*, 2004; PHETCHUAY *et al.*, 2016) numa solução de NaOH leva à formação do gel de aluminossilicato de sódio hidratado (N-A-S-H) (DUXSON *et al.*, 2007; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 2005, 2006; SHI *et al.*, 2011). Por outro lado, Phummiphan *et al.* (2016), explicaram que quando a solução de NaOH é substituída por  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , a reação leva à formação de hidrato de aluminossilicato de cálcio (C-A-S-H) ou de silicato de cálcio (C-S-H) semelhante ao formado quando se usa cimento Portland. Assim, o gel formado pode ser justificado pelo alto conteúdo de íons  $\text{Al}^{3+}$  e/ou  $\text{SiO}^{4+}$  liberados após a fácil

destruição ou quebra da ligação Al-O e/ou ligação Si-O pela adição do ativador alcalino na primeira fase da geopolimerização.

Duxson *et al.* (2007) relataram que o gel N-A-S-H formado também depende da concentração de silicato solúvel e seu grau de polimerização, que por sua vez depende da solução alcalina. Esses resultados também foram observados por Xu e Van Deventer (2000) em suas pesquisas que levaram à geopolimerização de 16 minerais de aluminossilicato de alumínio. Além disso, os autores explicaram que a relação Si/Al durante a dissolução alcalina e o teor percentual de  $K_2O$  dos materiais estudados são fatores muito importantes que também controlam o desenvolvimento da resistência de um material ativado por via alcalina. Além disso, a quantidade de precursor, único ou combinado, e o grau de alcalinidade do ativador alcalino podem levar à formação de C-N-S-H e C-S-H no mesmo produto ligante (YIP *et al.*, 2003, 2005) (ver Figura 2.32).

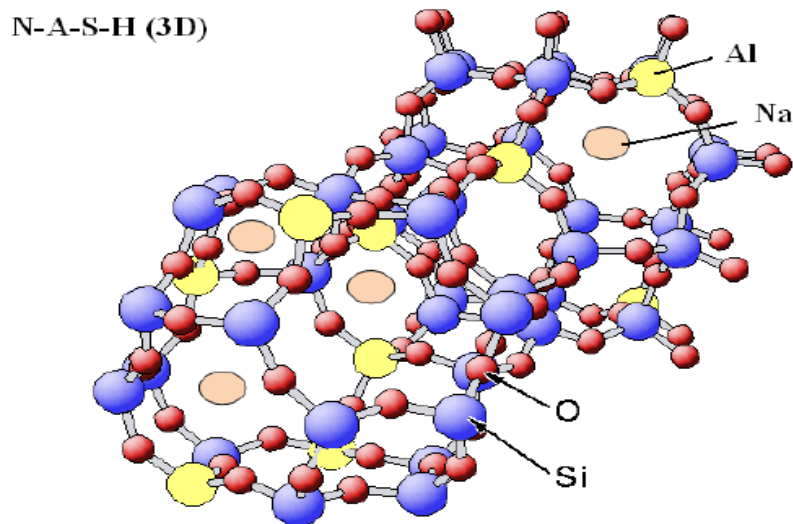


Figura 2.32: Estrutura tridimensional do gel N-A-S-H (GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2014)

Em suma, os principais fatores que influenciam o mecanismo de geopolimerização e afetam o comportamento mecânico do material alcalino ativado são: precursores, ativadores e condições de cura (PALOMO *et al.*, 1999; XU e VAN DEVENTER, 2000; ALONZO e PALOMO, 2001; KHALE e CHAUDHARY, 2007; DUXSON *et al.*, 2005, , 2007; CRIADO *et al.*, 2007a; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 2008; THAKUR e GHOSH, 2009; AL BAKRI *et al.*, 2011, 2012; PASCUAL *et al.*, 2014; PHUMMIPHAN *et al.*, 2016; BILONDI *et al.*, 2017).

Desde alguns anos, muitas pesquisas baseadas no uso de ativação alcalina, denominada geopolimerização, parecem ser alternativas para resolver os outros problemas relacionados à construção na engenharia civil.

#### 2.4.2.1. Ativadores Químicos

Os ativadores são os produtos químicos utilizados para obtenção do ligante álcali-ativado capazes de influenciar as características de uma mistura. Isto requer uma avaliação prévia de como o ativador e a composição química do precursor afetam a resistência do material ativado por álcali (MATOS, 2018).

Assim, para produzir um geopolímero resistente na estabilização de solo, precisa ser avaliada a compatibilidade entre o álcali-ativador e a composição química e mineralógica do precursor e o solo a ser estabilizado. A escolha dos ativadores químicos precisa estar ligada com as características do precursor utilizado, sendo as reações químicas dos produtos geopoliméricos conduzidas pela concentração do ativador adicionado (BEZERRA *et al.* 2013 *apud* MATOS, 2018). Segundo Livi (2013), os ativadores utilizados são os meta-alcalinos e alcalino-terrosos e podem ser classificados de acordo com suas composições químicas da seguinte maneira:

- Álcalis cáusticos ou hidróxidos:  $MOH$ ,  $M(OH)_2$ ;
- Sais não silicatos fracamente ácidos:  $M_2CO_3$ ,  $M_2SO_3$ ,  $M_3PO_4$ ,  $MF$ ;
- Silicatos:  $M_2O \cdot nSiO_2$ ;
- Aluminatos:  $M_2O \cdot nAl_2O_3$ ;
- Aluminossilicatos:  $M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-6)SiO_2$ ;
- Sais não silicatos fortemente ácidos:  $M_2SO_4$ .

Onde,  $M$  é um íon alcalino do tipo Na, Sr, Mg, Ba, K ou Li, ou mesmo alcalino-terroso como o Ca.

A eficiência do material alcalino ativado também depende do tipo de metal alcalino utilizado. Segundo Palomo *et al.* (2008), quando o hidróxido de sódio (NaOH) é usado para ativação alcalina na presença de silicato de sódio ou potássio, a velocidade das reações que ocorrem é alta. Este aumento na velocidade de reação deve-se à rápida solubilização do Si e do Al nas matérias-primas pelo hidróxido de álcali (KOMNITSAS e ZAHARAKI, 2009). Assim, as etapas de reação durante o mecanismo de geopolimerização se sobrepõem de tal forma que a destruição da ligação,

nucleação-reorganização, policondensação e formação de estruturas em gel ocorrem em um período muito curto.

De acordo com Correia (2011) os ativadores mais empregados nos processos de ativação alcalina são os hidróxidos do sódio (NaOH) ou de potássio (KOH), os carbonatos de sódio, os silicatos de sódio ou de potássio e as misturas estruturadas deles.

Xu e Van Deventer (2000) estudaram a ativação alcalina de 15 diferentes minerais com NaOH e KOH para determinar o desempenho dos dois diferentes ativadores. Os resultados mostraram que todos os 15 geopolímeros formados com a solução de KOH têm melhores resistências (cerca de 11% maior) do que os geopolímeros formados com a solução de NaOH. De acordo com os autores, a diferença entre o desempenho dos dois metais alcalinos seria devido a valência de seus íons ( $\text{Na}^+ < \text{K}^+$ ), pois os dois cátions têm a mesma carga elétrica. No entanto, a ligação do par cátion-ânion torna-se mais fraca à medida que o tamanho dos cátions aumenta e o elétron externo se afasta ainda mais do núcleo, considerando que cátions menores promovem hidratação e o mecanismo de ligação do par cátion-ânion com monômeros de silicato, dímeros e trímeros (HENDRICKS *et al.*, 1991 *apud* XU *et al.*, 2002). Assim, os cátions  $\text{Na}^+$  com seu pequeno tamanho e resistência reagem bem com Al e Si assim como  $\text{K}^+$ , o que aumenta o grau de dissolução dos minerais na solução de NaOH, mais do que na solução de KOH. Como resultado, a alta viscosidade na solução de NaOH é maior do que na solução de KOH, o que causa uma redução no desenvolvimento da resistência dos geopolímeros baseados em NaOH.

Komnitsas e Zaharaki (2009) estudaram o efeito do KOH, NaOH e a combinação do KOH- $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  sobre a resistência do geopolímero produzido a partir da escória do alto-forno. Os resultados mostraram em primeira instância que as amostras de solução de KOH mostraram resistências mais satisfatórias do que a solução de NaOH. Da mesma forma, os autores observaram que quando se utiliza a solução de KOH, todas as resistências dos geopolímeros obtidos na faixa de 4 mols a 8 mols são superiores a 40 MPa e a resistência máxima obtida é de 50 MPa a 7,7 mols. Por outro lado, quando a solução de NaOH é usada para a mesma faixa de concentração molar, a resistência das amostras do teste não excede 25 MPa e a resistência máxima é de 25 MPa a 4 mols. Além disso, os resultados mostraram que a resistência dos corpos de prova preparados com a solução de concentração superior a 8 mols diminuiu cada vez que a molaridade aumenta, conforme mostrado na figura 2.33. De acordo com Yip *et al* (2005), quando a concentração de NaOH é alta (acima de 7,5 mols), há uma abundância de pequenos cálcios que se formam e se dispersam por precipitação no aglutinante.

Por outro lado, Komnitsas e Zaharaki (2009) demonstraram que a presença de uma pequena quantidade (2%) de silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), utilizado como aditivo em combinação com as outras soluções, permite obter resistências semelhantes às obtidas sem o aditivo  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , mas num período de cura muito curto do que as outras. Assim, os autores explicaram que o silicato de sódio promove um reajuste da concentração molar das outras soluções utilizadas. Por exemplo, a 8% (a porcentagem ideal) de 0 a 14% de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  utilizado, a concentração molar de KOH e NaOH obtida é de 8,7 mols e 12,2 mols, respectivamente, e a resistência máxima é de 56,2 MPa, conforme mostrado na figura 2.34. Os autores deduziram que  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  acelera ainda mais as reações químicas da geopolimerização, modificando assim o mecanismo de síntese do gel, o que favorece o aumento da resistência (KOMNITSAS e ZAHARAKI, 2009).

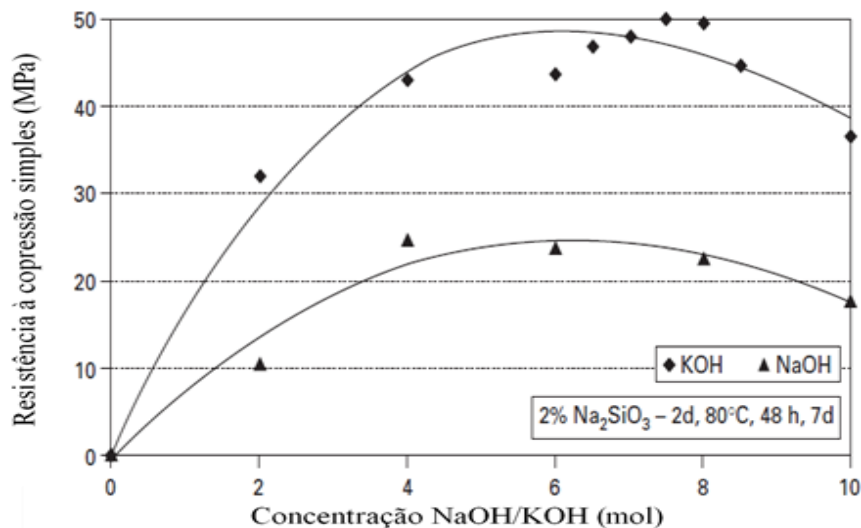


Figura 2.33: Resistência à compressão simples de geopolímeros à base de escória de alto-forno com função de concentração de hidróxidos alcalinos (KOMNITSAS e ZAHARAKI, 2009).

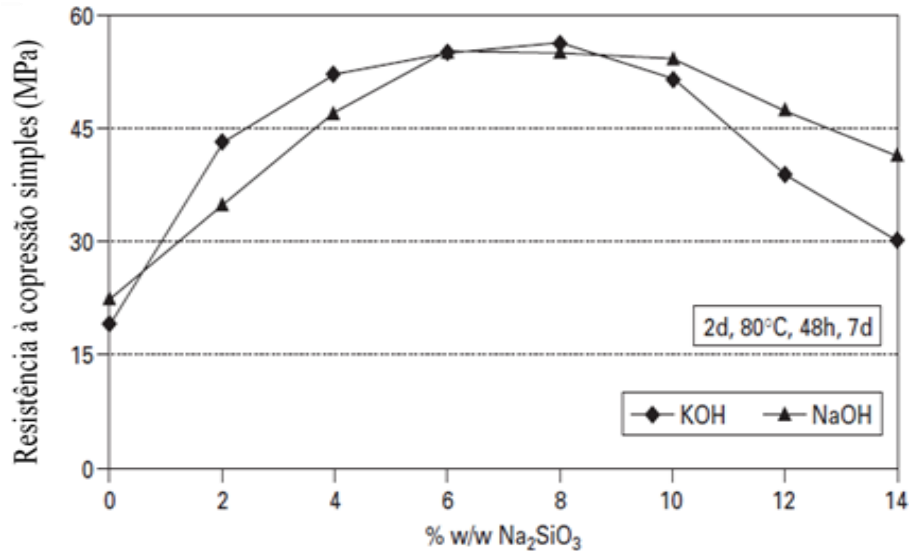


Figura 2.34: Resistência à compressão simples de geopolímeros à base de escória de alto-forno com função da porcentagem de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> com soluções de NaOH e KOH (KOMNITSAS e ZAHARAKI, 2009).

No entanto, vários estudos têm demonstrado que a concentração da solução alcalina utilizada influencia muito o comportamento mecânico, microestrutural e cristalino do produto obtido após a geopolimerização (DAVIDOVITS, 1991, 1994, 1999; PALOMO *et al.*, 1999, 2004, 2005; ALONSO e PALOMO, 2001; FERNÁNDEZ, 2005; VAN DEVENTER *et al.*, 2006; THAKUR e GHOSH, 2009; AL BAKRI *et al.*, 2011).

Al Bakri *et al.* (2011), estudaram a resistência à compressão da argamassa geopolimérica à base de cinzas volantes com diferentes concentrações (6, 8, 10, 12, 14 e 16 mols) a 1, 2, 3 e 7 dias de cura. Os resultados mostraram que para 1 dia, a resistência à compressão simples é maior a 10 mols (63,4 MPa) do que as outras. Por outro lado, para 2, 3 e 7 dias, as melhores resistências são, respectivamente, de 60,2 MPa, 68,1 MPa e 94,6 MPa, todas obtidas a 12 mols. Eles descobriram que após 12 mols a 2, 3 e 7 dias, a resistência para cada corpos de prova diminui (Figura 2.35).

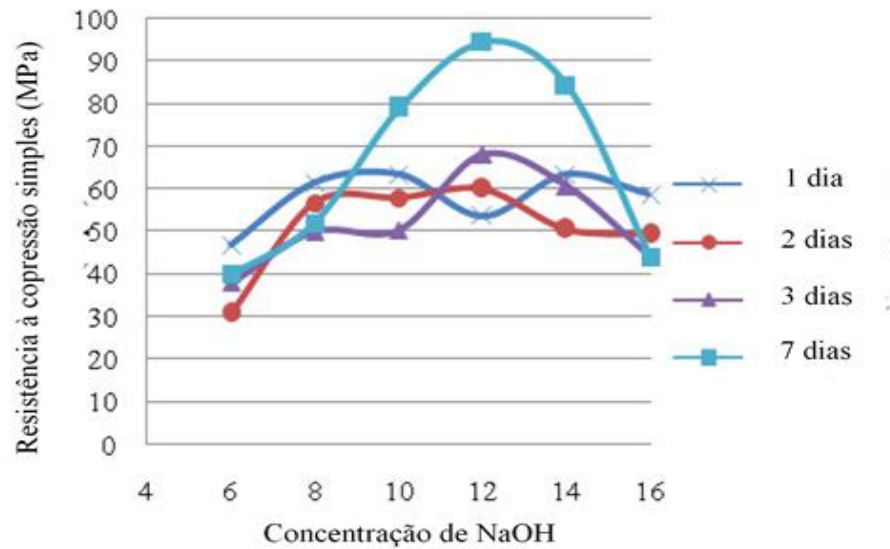


Figura 2.35: Resistência à compressão simples em função da concentração molar (AL BAKRI *et al.*, 2011)

Os resultados da pesquisa realizada por Palomo *et al.* (1999) com o mesmo precursor estão de acordo com os de Al Bakri *et al.* (2011). Eles mostraram que a solução de 12 mols produz melhor resistência do que 18 mols após 7 dias de cura.

Pascual *et al.* (2014), por outro lado, estudaram o efeito da concentração de NaOH (5, 8 e 10 mols) na ativação alcalina do pó de vidro com metacaulim a 5%. Os resultados mostraram que a resistência à compressão simples diminui com o aumento da concentração Figura 2.36.



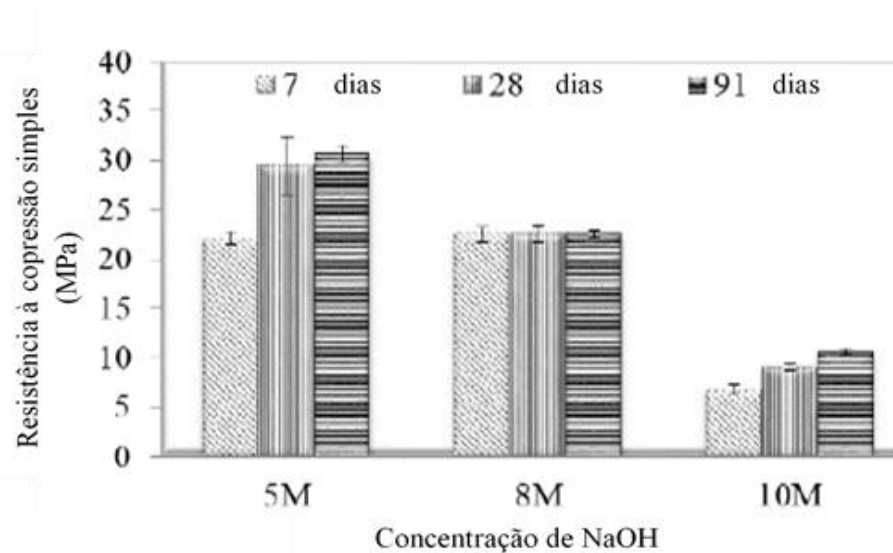


Figura 2.36: Efeito da concentração de NaOH sobre a resistência à compressão simples da mistura de pó de vidro e 5% de metacaulim (PASCUAL *et al.*, 2014).

A microestrutura do geopolímero baseado em cinzas volantes com diferentes concentrações da solução de NaOH foi estudada por Al Bakri *et al.* (2011). Os resultados mostraram a presença de uma matriz colóide heterogênea de cerca de 1 a 20  $\mu\text{m}$  de tamanho que se formou. Os autores destacaram que essa formação de matriz foi devida a reações químicas que ocorreram durante o processo de geopolimerização após a mistura da cinza volante original com a solução de NaOH. Além disso, o volume desta matriz aumenta com o aumento da concentração molar da solução (Figuras 2.37 e 2.38).

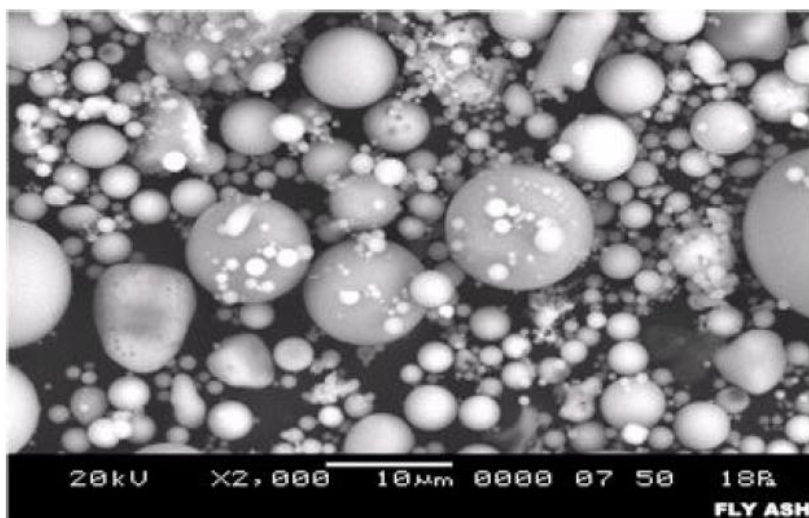


Figura 2.37: SEM de Cinza volante (AL BAKRI *et al.*, 2011).

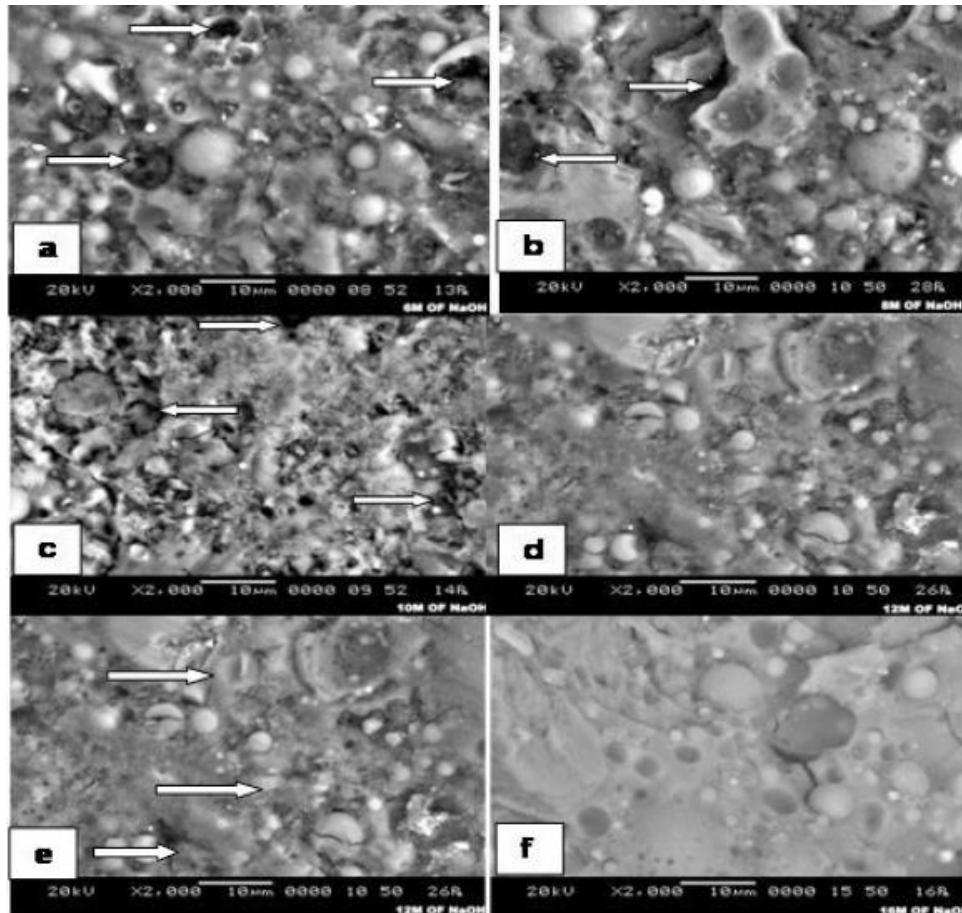


Figura 2.38: MEV de geopolimerose de cinza volante com: a) 6 mols; b) 8 mols; c) 10 mols; d) 12 mols; e) 14 mols; f) 16 mols (AL BAKRI *et al.*, 2011)

Além disso, o hidróxido de cálcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  é usado como ativador por alguns autores para a formação do gel geopolímero (YIP *et al.*, 2008; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2009; e BILONDI *et al.*, 2018). De fato, o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  fornece as condições necessárias para a dissociação das ligações de aluminossilicato e após, a lixiviação da sílica e alumina amorfa devido à sua elevada basicidade ( $\text{pH} > 12$ ), bem como de outros ativadores. Assim, permite o equilíbrio das cargas negativas do grupo aluminossilicato através dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  liberados nos espaços da matriz de geopolimerização após sua hidratação (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2009).

Para conhecer o efeito do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  no comportamento mecânico de um material alcalino ativado, Bilondi *et al.* (2018) estudaram a geopolimerização seguindo cinco teores diferentes (0%, 4%, 7%, 10% e 13%). Os resultados mostraram um aumento da resistência da amostra na faixa de 0% a 7% e redução/regressão da resistência de 10% a 13% (Figura 2.39). Os autores relataram após as análises dos resultados que quando o teor de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  é baixo, significa que as condições

necessárias para a dissolução de minerais aluminossilicatos não são satisfatórias, resultando em um geopolímero com baixas características mecânicas. Entretanto, quando o teor de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  é muito alto (acima de 10%), a viscosidade do ativador alcalino aumenta. O aumento na viscosidade impede a lixiviação da abundante quantidade de partículas de aluminossilicato dissolvidas.

Segundo Yip *et al.* (2008), a diminuição da resistência devido ao alto teor de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pode ser explicada pelo aumento da razão  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  e pelo nível de partículas minerais inertes na solução que impedem o desenvolvimento de reações químicas. Entretanto, a solubilidade do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sob o efeito do ativador alcalino com a formação de precipitados de CSH no gel geopolímero também pode levar à redução da resistência apesar da diminuição do valor da relação  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ .

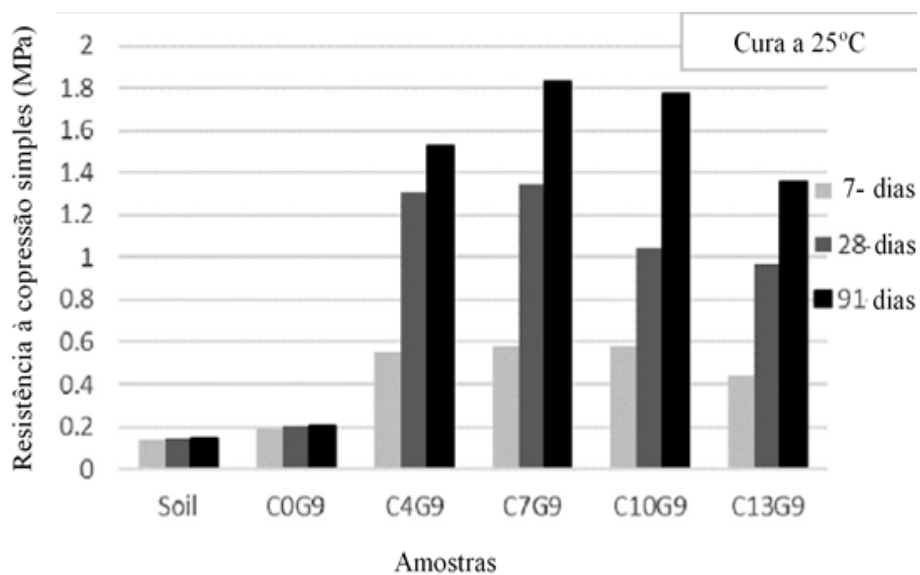
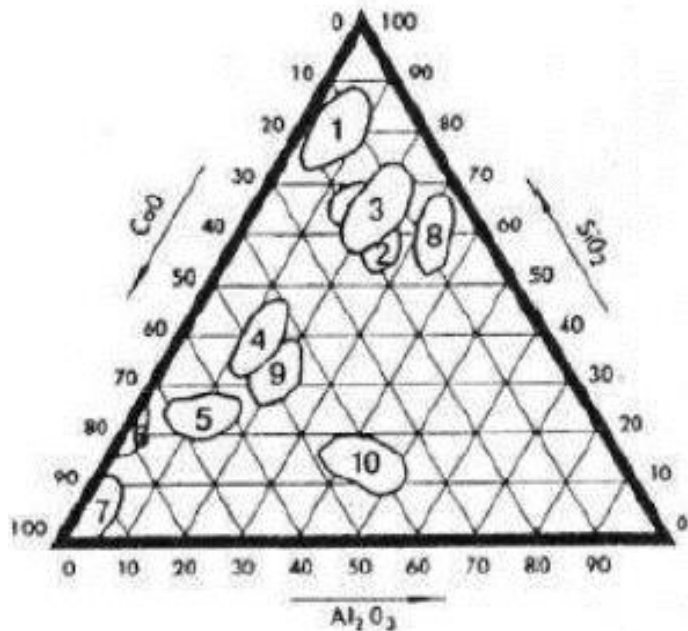


Figura 2.39: Efeito de teor de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (C) sobre a resistência à compressão simples com teor de vidro (G) constante (BILONDI *et al.*, 2018).

#### 2.4.2.2. Precursores

Os precursores são os compostos que, participando da reação, produzem um ou mais compostos. Geralmente, são os materiais muito ricos em alumínio e/ou silício na sua forma ou estado amorfo ou semicristalino. São os materiais que têm a capacidade de fornecer alumina, silicato ou mesmo aluminossilicatos e são capazes de ser dissolvidos por uma solução alcalina. Em outras palavras, os precursores são pozolanas que, em combinação com outros materiais se transformam em um agente cimentício. Eles podem ser naturais, resíduos industriais ou resíduos transformados. Nas pesquisas, os precursores mais usados para a produção de materiais geopoliméricos ou concreto alcalino ativado por geopolymerização são os resíduos provenientes da indústria de mineração e de

usinas termoeletricas tais como escórias de alto forno, metacaulim e cinza volante (CASTRO, 2015). Da mesma forma, pó de vidro, cinza de casca de arroz, cerâmica, caulim, e outros são os precursores, pois contêm elevados teores alumínio e/ou silício. A Figura 2.40 apresenta alguns precursores com seus teores de componentes químicos.



- 1- vidros
- 2- basaltos
- 3- pozolanas
- 4- escória de alto forno
- 5- clínquer em Portland
- 6- escória do conversor
- 7- cal
- 8- cinzas de sílica-alumina
- 9- cinzas de sulfato-cálcio
- 10- cimentos aluminosos

Figura 2.40: Diagrama de Kiel (HOUZE, 2013).

Neste presente trabalho, o precursor utilizado é o pó de vidro.

No entanto, as propriedades mecânicas, físicas, químicas, microestruturais e cristalinas dos geopolímeros formados a partir de metacaulim, cinzas volantes, escória de alto-forno e outras com um metal alcalino (por exemplo Na e K) dependem principalmente da composição química e mineralógica, especialmente do teor de sílica alcalina da matéria-prima (VAN JAARVELD *et al.*, 1999; VAN DEVENTER *et al.*, 2006; FERNÁNDEZ-JIMENEZ, 2005; DUXSON *et al.*, 2007; THAKUR e GHOSH, 2009). De fato, o desenvolvimento da resistência à compressão simples, por exemplo, dos geopolímeros está ligado às principais transformações estruturais dos precursores que ocorreram durante a geopolimerização e, principalmente, devido à formação de uma nova fase do gel aluminossilicato amorfo na matriz do geopolímero.

Thakur e Ghosh, (2014) estudaram o efeito da quantidade de alcalinos e silicatos como ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ), respectivamente, sobre a resistência à compressão simples. Na primeira parte do teste, o teor de  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  variou de 0,46 mol a 0,62 mol e o de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

variou de 3,7 MPa a 4,3 mol na segunda parte. Os resultados encontrados na primeira parte mostraram que a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento do teor de  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  até o valor limite (0,62 mol), como mostrado na figura 2.41. Na segunda parte descobriram que a resistência aumenta até o teor de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  igual a 4,00 onde se obtém a melhor resistência. Só depois disto ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 4,00$ ), a resistência começou a diminuir Figura 2.42. A partir da análise dos resultados estipularam que o teor de silicato controla a dissolução e polimerização do Si e Al no gel de aluminossilicato de cinzas volantes.

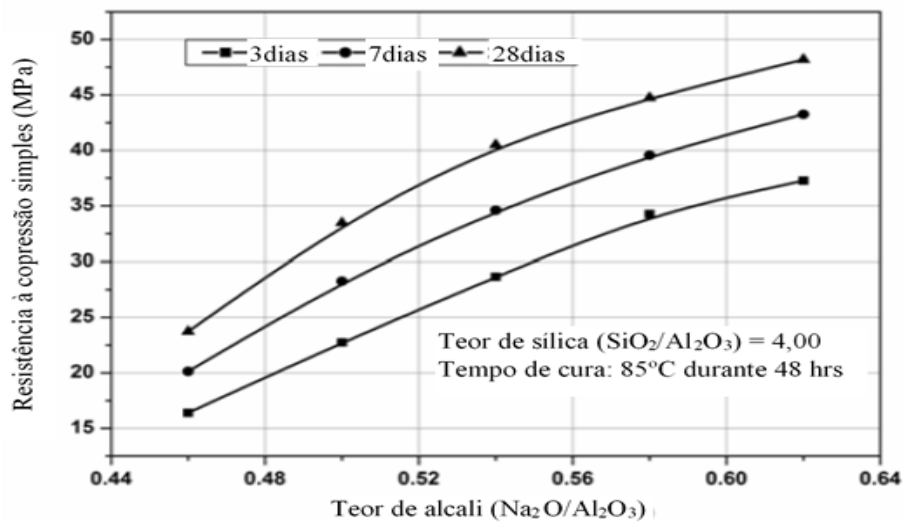


Figura 2.41: Resistência em função de teor alcalino (THAKUR e GHOSH, 2014).

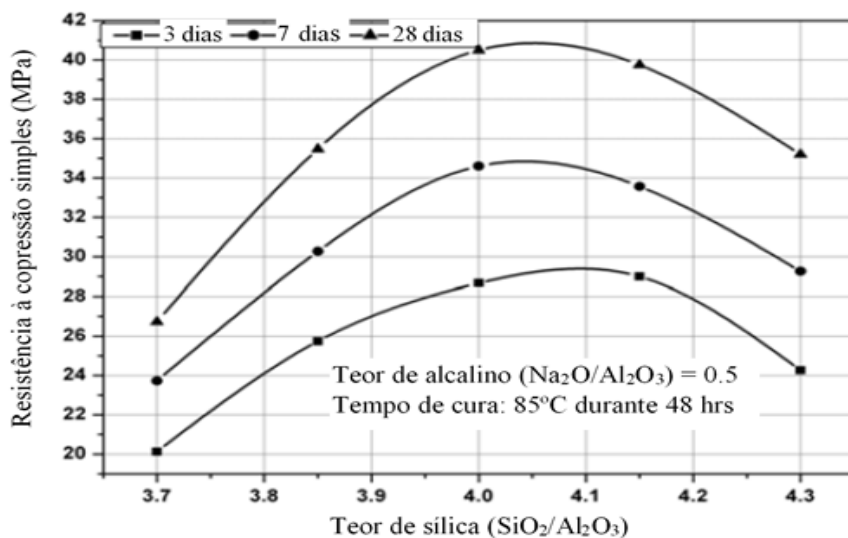


Figura 2.42: Resistência em função de teor de sílica (THAKUR e GHOSH, 2014)

Por outro lado, os estudos realizados por Duxson *et al.* (2005), mostraram que a resistência à compressão simples do geopolímero baseado em metacaulim aumentou duas vezes de  $Si/Al = 0,90$  até  $Si/Al = 1,90$ , onde resistência à compressão simples máxima é obtida e, após este ponto, começou a diminuir. O mesmo é válido para o módulo de Young (Figura 2.43).

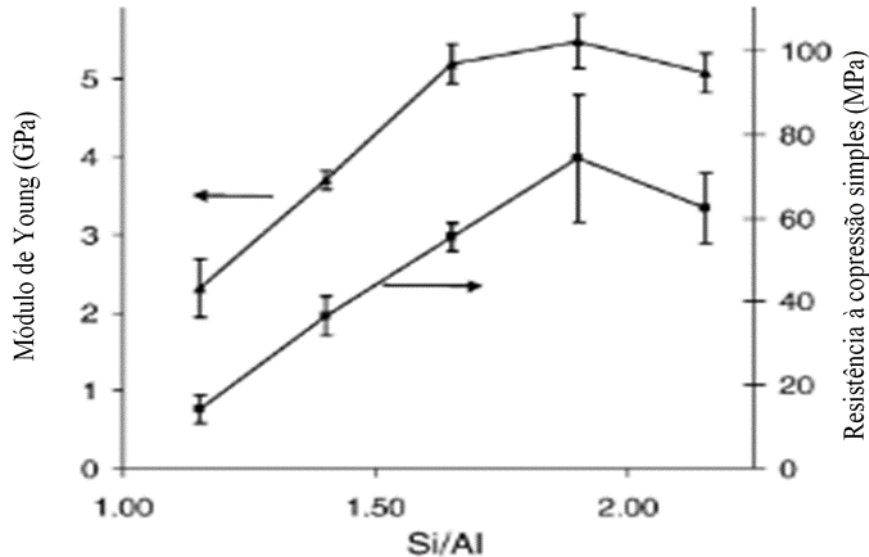


Figura 2.43: Efeito do  $Si/Al$  na resistência compressiva única e no módulo de Young do geopolímero baseado em metacaulim (DUXSON *et al.*, 2005).

O efeito do  $Na_2O/Al_2O_3$  na cristalinidade da cinza volante, pode ser visto através de ensaios de difração de raio-X (DRX), como foi estudado por Thakur e Ghosh (2014) com teores de 0,54, 0,58 e 0,62. Os resultados obtidos mostraram que os geopolímeros formados mostram novas fases cristalinas que não estão presentes nas cinzas originais, tais como: hidroxisodalita ( $Na_4Al_3Si_3O_{12}OH$ ) e herschelita ( $NaAlSi_2O_6 \cdot 3H_2O$ ). Foi também observado pelos autores que o geopolímero obtido com um teor de  $Na_2O/Al_2O_3$  de 0,54 tem menos um elemento (herschelite da fórmula  $NaAlSi_2O_6 \cdot 3H_2O$ ) do que os geopolímeros obtidos com um teor de  $Na_2O/Al_2O_3$  de 0,58 e 0,62 (Figura 2.44). Segundo os autores, estes novos cristais são a base para o desenvolvimento da resistência à compressão simples ao nível das cinzas alcalinas ativadas.

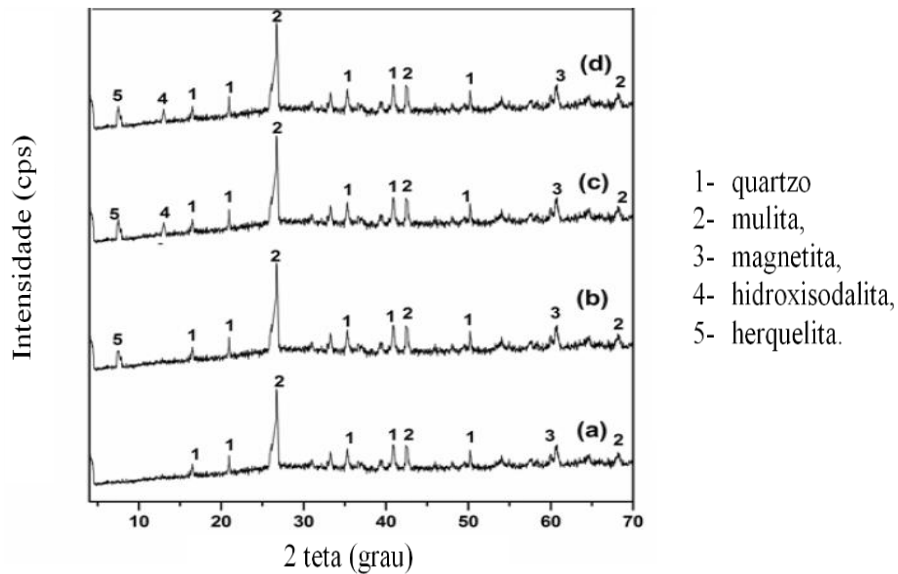


Figura 2.44: Difração de raio-X (DRX) da (a) cinza volante original, e os geopolímeros com  $\text{NaO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  a (b) 0,54; (c) 0,58; e (d) 0,62 (THAKUR e GHOSH, 2014)

Além disso, Duxson *et al.* (2007) estudaram a microestrutura dos geopolímeros produzidos a partir de cinzas volantes e metacaulim com a mesma concentração de solução alcalina (Figura 2.45). Foi observado também nas análises que o tamanho das partículas em metacaulim ativado é mais fino (escória) e mais homogêneo que o das cinzas volantes, apesar de sua similaridade em estrutura molar e nanoestrutura. De acordo com os autores, essa diferença microestrutural observada nos dois materiais está relacionada à relação Si/Al (DUXSON *et al.*, 2005), que não é a mesma nos dois precursores. Assim, a composição de fases que levam à formação de géis é diferente e leva à formação de geopolímeros com características diferentes.

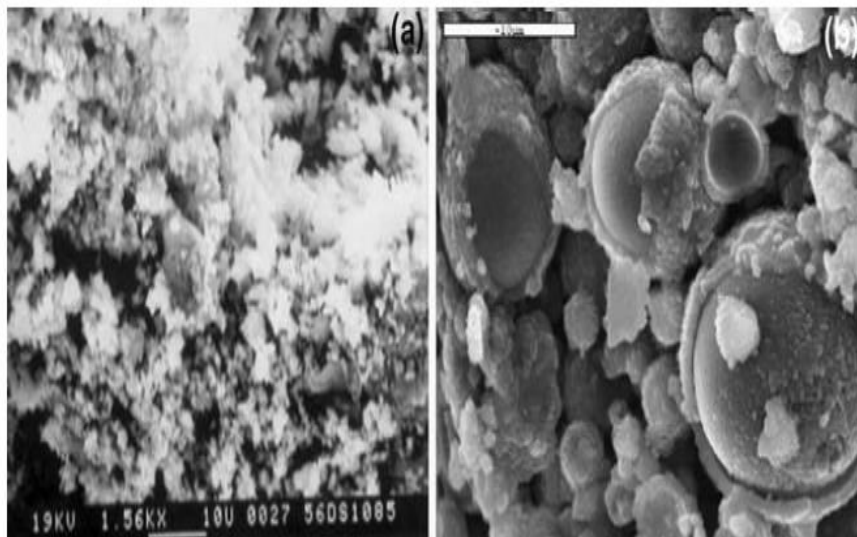


Figura 2.45: Imagem MEV de (a) Metacaulim com 8 mols de NaOH, (b) Cinza volante com 8 mols de NaOH (DUXSON *et al.*, 2007).

### 2.4.3. O Tempo e a Temperatura de Cura

#### 2.4.3.1. Temperatura

A temperatura é reconhecida e tem sido demonstrada em vários estudos como um fator muito importante influenciando a taxa de cristalização na síntese e desenvolvimento da resistência das zeólitas e geopolímeros. De acordo com van Deventer *et al.* (2006) a relação Si/Al e a estrutura porosa dos geopolímeros à base de cinzas volantes varia com o aumento da temperatura. O valor mais alto da relação Si/Al e as partículas finas bem compactadas são obtidas à temperatura mais alta adotada durante o teste. Assim, eles relataram que a temperatura no processo de geopolimerização atua como acelerador de reação, aumentando o volume dos mesóforos para fechar os vazios entre as partículas precursoras.

Thakur e Ghosh, (2009) avaliaram o efeito da temperatura no desenvolvimento da resistência à compressão simples de uma argamassa geopolimérica à base de cinzas volantes, variando a temperatura de 45 a 120°C. Os autores constataram que a resistência do material estudado aumentou linearmente com o aumento da temperatura entre 45°C e 85°C. Da mesma forma, eles descobriram que a maior resistência à compressão (48,2 Mpa) é obtida a 85°C logo após 48 horas ver Figura 2.46.



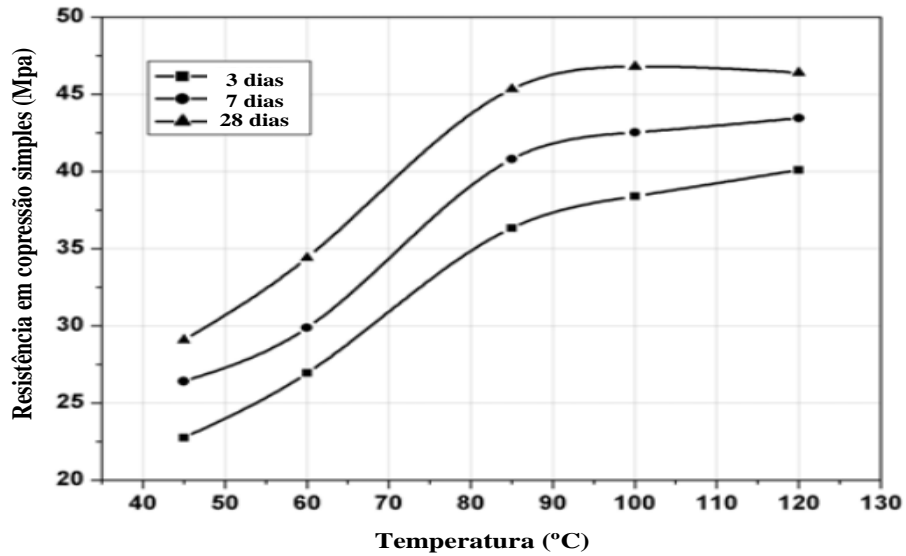


Figura 2.46: Efeito de temperatura sobre a resistência à compressão simples (THAKUR e GHOSH, 2009).

Aparentemente, Palomo *et al.* (1999) também notaram o efeito da temperatura em suas pesquisas, usando cinzas volantes. Seus resultados mostraram que a resistência é maior a 85°C que 65°C e que a resistência a 24°C é, por sua vez, menor que a 65°C. Eles relataram que a temperatura é muito importante, mas seu efeito sobre a resistência é temporário e de curto tempo de cura (2 horas e 5 horas).

Contudo, Phetchuay *et al.* (2014) estudou o efeito da temperatura de cura no comportamento de produto geopolimérico e obtido a partir da cinza volante através da análise microestrutural. Duas temperaturas, tais como: a temperatura ambiente e a temperatura média de 40°C, foram consideradas pelos autores (ver Figura 2.47).

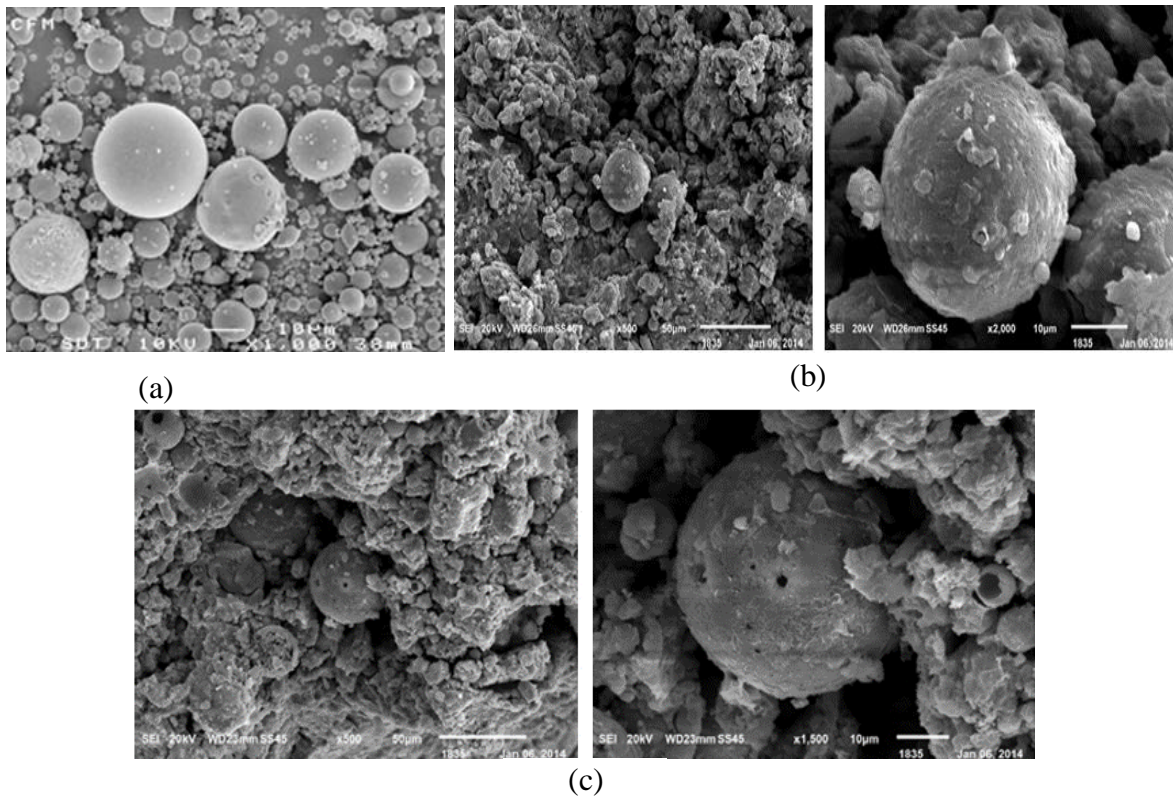


Figura 2.47: MEV de: (a) cinza volante não ativado; (b) cinza volante ativado à temperatura ambiente, depois 7 dias de cura, (c) cinza volante ativado à 40°C, depois 7 dias de cura (PHETCHUAY *et al.*, 2014).

Comparando as figuras 2.50, pode-se ver que os produtos de geopolimerização são mais compactos e têm menos vazios do que as cinzas volantes no seu estado original. Além disso, observa-se entre os geopolímeros que o ataque químico na superfície das partículas de cinzas volantes é mais abundante e mais ilustrado a 40°C do que à temperatura ambiente. Então as partículas parecem maiores a 40°C do que à temperatura ambiente.

No entanto, o efeito da temperatura no comportamento mecânico dos geopolímeros depende das condições de aplicação ou da metodologia utilizada. Existem duas condições de utilização de temperaturas tais como: cura por temperatura seca e cura por temperatura de vapor (HARDJITO e RANGAN, 2005). Os estudos realizados por Hardjito e Rangan, (2005) mostraram que a resistência à compressão simples das amostras do geopolímero à base de cinzas volantes formadas sob condições de cura a temperatura seca é 15% superior ao das amostras do geopolímero obtidos sob condições de cura a temperatura do vapor.

#### 2.4.3.2. Tempo

O efeito de tempo no comportamento mecânico do material alcalino ativado, dependendo das condições ambientais em que as amostras foram colocadas para o período de endurecimento da geopolimerização. Geralmente, quando as condições térmicas são aplicadas, a taxa de aumento da resistência é muito rápida nas primeiras 24 horas (HARDJITO e RANGAN, 2005; THAKUR e GHOSH, 2009). No entanto, o aumento da resistência torna-se lento após 24 horas. Segundo Thakur e Ghosh (2009), pode-se obter uma resistência máxima de geopolímero a 48h de cura em condições de alta temperatura térmica (85°C).

Wallah e Rangan (2006) estudaram a variação da resistência em função do tempo de cura do geopolímero obtido a partir das cinzas volantes. As amostras foram submetidas a uma temperatura de 60°C no forno durante 24 horas antes de serem deixadas em condições normais durante 3 anos. Os resultados mostraram que as amostras ensaiadas depois 7 dias de cura apresentam um grande aumento da resistência à compressão simples, porém um aumento muito lento de resistência à compressão simples é observado para as outras amostras deixados por maiores tempos de cura (Figura 2.48). De acordo com os resultados encontrados, os autores constataram que a resistência na compressão simples só aumentou de 10 a 20% em comparação com a obtida após apenas 7 dias de cura (Figura. 2.49). Assim, os autores deduziram das análises que a resistência à compressão simples aumenta, certamente, com o aumento do tempo de cura, mas um tempo de cura muito longo (semanas, meses ou anos) não leva a um aumento significativo da resistência à compressão simples, especialmente se as condições térmicas forem consideradas ou aplicadas.

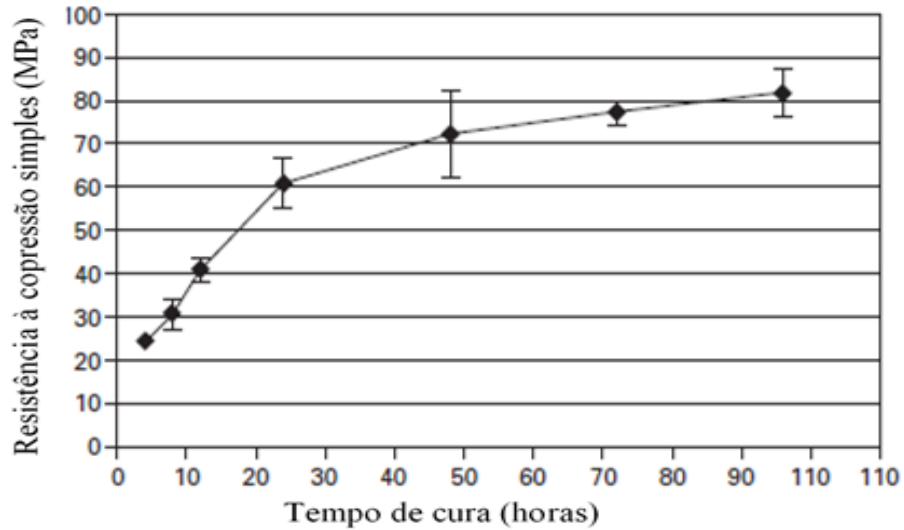


Figura 2.48: Resistência à compressão simples em função do tempo de cura (HARDJITO e RANGAN, 2005).

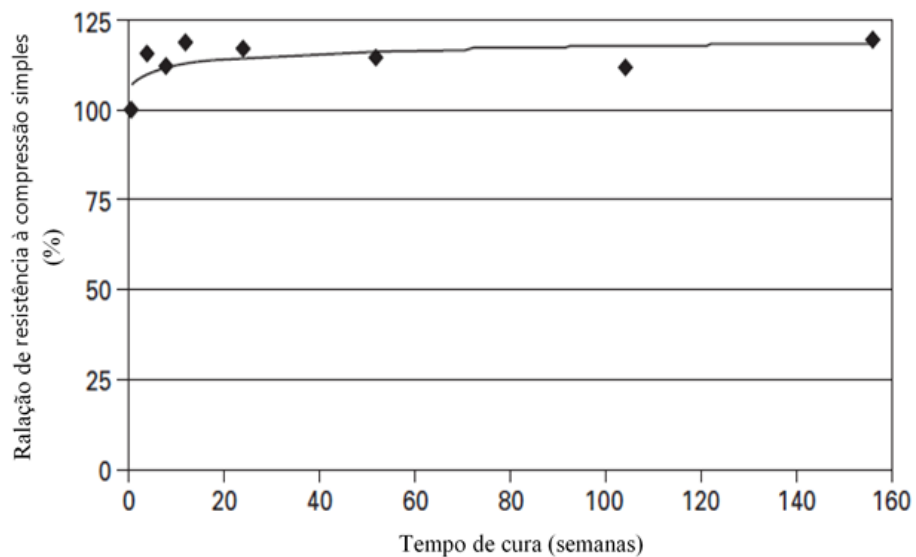


Figura 2.49: Variação da taxa de resistência em função do tempo (WALLAH e RANGAN, 2006)

### **3. MÉTODO E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DA PESQUISA**

A proposta metodológica do desenvolvimento deste trabalho tem como etapa inicial a definição do planejamento experimental dos ensaios e a caracterização dos materiais, avaliando em seguida, as características físicas e mecânicas das misturas de areia fina, pó de vidro e cal de carbureto adicionados do ativador alcalino.

#### **3.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL**

O planejamento experimental desta pesquisa pode ser dividido em três etapas apresentados na tabela 3.1 com uma descrição resumida de cada uma delas.

Essas atividades foram desenvolvidas no Laboratório de Ensaio Geotécnicos e Geotecnologia Ambiental (LEGG) e no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da Escola de Engenharia (EE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Como não existem normas específicas para a confecção, moldagem e ativação dos geopolímeros, estas se deram com base em informações da literatura e nas normas de referência do cimento Portland.

Tabela 3.1: Descrição das etapas

Etapas		Material	Procedimentos	
Etapa 1	Coletas, Preparações e caracterização dos materiais	Areia fina (solo arenoso)  Cal de carbureto  Pó de vidro  Ativador alcalino	Caracterização	Massa Específica Real dos grãos
				Análise granulométrica
				Mineralogia por difração de raio-X (DRX)
				Análise química por fluorescência de raio-X (FRX)
				Granulometria a Laser
				Área superficial específica (BET)
Etapa 2	Avaliação do efeito dos fatores controláveis no comportamento mecânico (resistência, rigidez, durabilidade) da mistura.	Dosagem e mistura da areia fina, pó de vidro e cal de carbureto, mais ativador alcalino	Ensaaios	Ensaaios de compactação
				Resistência à compressão simples
				Rigidez
				Durabilidade
Etapa 3	Comparações de resultados	Mistura da areia fina, pó de vidro e cal de carbureto, mais ativador alcalino	Abordagem	Relação dos resultados obtidos na Etapa 2 com o parâmetro $\eta/B_{iv}$ ; avaliação dos resultados da etapa 2 com as misturas sem ativador alcalino (AA) com objetivo de verificar o desempenho de AA

## 3.2. MATERIAIS USADOS

### 3.2.1. Solo Granular

O solo granular utilizado neste trabalho é uma areia fina proveniente do município de Osório – RS – Brasil, frequentemente usado nas pesquisas desenvolvidas por o grupo do LEGG: Silvani (2013), Marques (2016), Foppa (2016), Leon (2018) e Winter (2018). A partir da análise textural, ela é classificada como uma areia quartzosa, clara, fina e bem selecionada, com estratificações bem desenvolvidas. De acordo com Spinelli (1999 *apud* SILVANI, 2013), ela é proveniente de depósitos marinhos e eólicos da região costeira do estado do Rio Grande do Sul, que pertence ao Cocou Auxence Pierre Daassi-Gli (auxencedaassigli@gmail.com) Dissertação de Mestrado. PPGEC/UFRGS. 2020

Sistema Laguna-Barreira III, cujos depósitos estendem-se de forma quase contínua desde a cidade de Torres até o Chuí, se estendendo por todo o litoral do Rio Grande do Sul. A localização é apresentada na Figura 3.1.

A areia, é comercializada em embalagens plásticas, hermeticamente fechadas em estado úmido, em lojas de materiais de construção. A areia, primeiramente, foi retirada dos sacos plásticos antes ser colocadas nas bandejas. Era deixada numa estufa para secagem sob uma temperatura de  $70^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  durante 48 horas, dependendo da sua umidade. Desse modo a areia perdia totalmente sua umidade para os ensaios.

A distribuição granulométrica por difração a laser foi realizada no LACER, e os ensaios para determinar os índices físicos no LEGG, seguindo as prescrições da NBR 6457 (ABNT, 2016b). Os resultados são exibidos respectivamente na figura 3.2 e na tabela 3.2. Na figura 3.3 é exposta uma amplificação em 40 e 500 vezes da areia de Osório, onde pode ser visualizada facilmente a uniformidade, rugosidade moderada e a condensação dos grãos bem arredondados.



Figura 3.1: Localização da cidade de Osório/ RS – Brasil (Imagens Google Maps) (MARQUES, 2016).

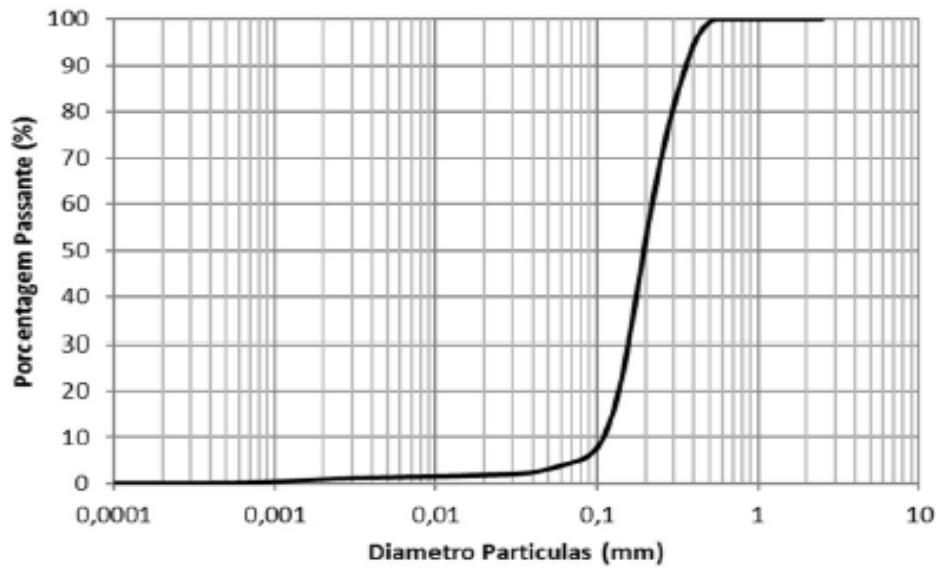


Figura 3.2: Curva granulométrica da Areia de Osório –Laser (MARQUES, 2016).

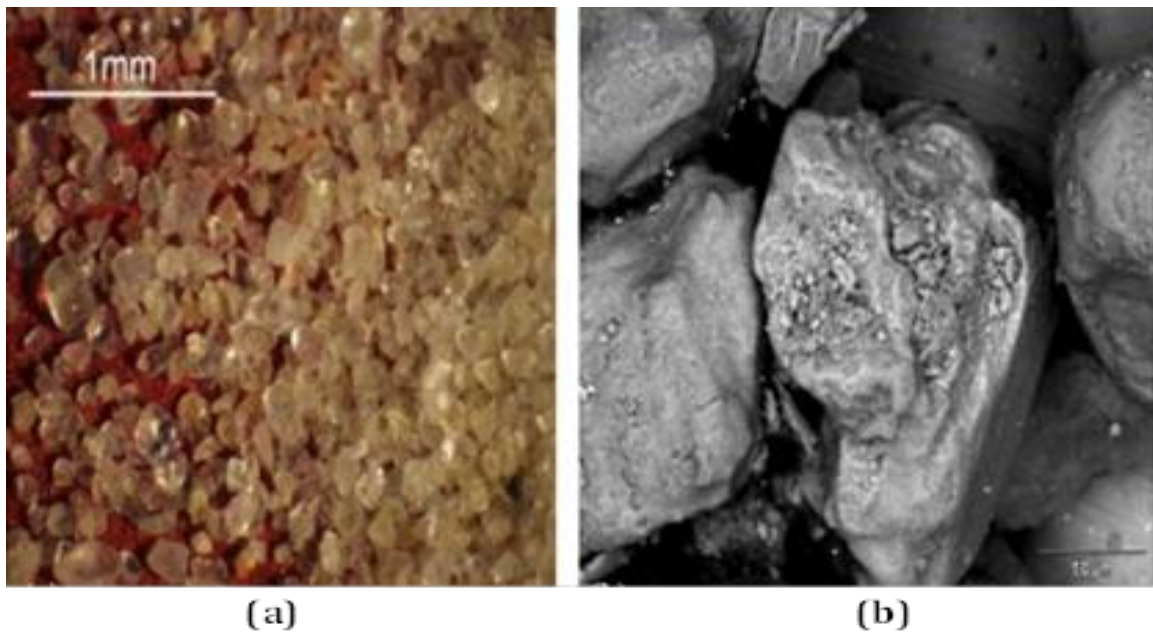


Figura 3.3: Aspecto da areia fina de Osório ampliada em (a) 40 vezes e (b) 500 vezes por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (DALLA ROSA, 2009 *apud* MARQUES, 2016).



Tabela 3.2: Índices físicos da areia de Osório (LEON, 2018).

Índices físicos	Areia de Osório	Norma Técnica
Peso específico real dos grãos, $\gamma_s$	2,65 g/cm <sup>3</sup>	NBR 6458 (ABNT, 2016b)
Coefficiente de uniformidade, $C_u$	1,87	
Coefficiente de curvatura, $C_c$	0,91	
Diâmetro, $D_{10}$	0,083mm	
Diâmetro, $D_{30}$	0,108mm	
Diâmetro, $D_{60}$	0,155mm	
Índice de vazios mínimo, $e_{mín}$	0,60	NBR 12051 (ABNT, 1991a)
Índice de vazios máximo, $e_{máx}$	0,90	NBR 12004 (ABNT, 1990)

### 3.2.2. Pó de Vidro

O pó de vidro utilizado no presente trabalho é oriundo da moagem de vidro plano, apresenta cor esbranquiçada, sendo oriundo e comercializado pela empresa MINASOLO, São Paulo - Brasil. O material moído é comercializado em embalagens de 25 kg, sendo utilizado nesta pesquisa um total de 50 kg do material. A preparação do pó de vidro consistia no peneiramento para obtenção da fração passante na peneira de malha #200 (abertura de 75  $\mu$ m), para facilitar as reações pozolânicas. O rendimento total médio desse processo foi em média 82%.

Os resultados dos ensaios da distribuição granulométrica a laser, difração por raio-X (DRX) e fluorescência de raio-X (FRX) do material obtido após o peneiramento são apresentados nas figuras 3.4 e tabela 3.3. Além destes, a tabela 3.4 mostra os resultados da composição química obtida por outros autores para pó de vidro e neste trabalho para efeitos de comparação.

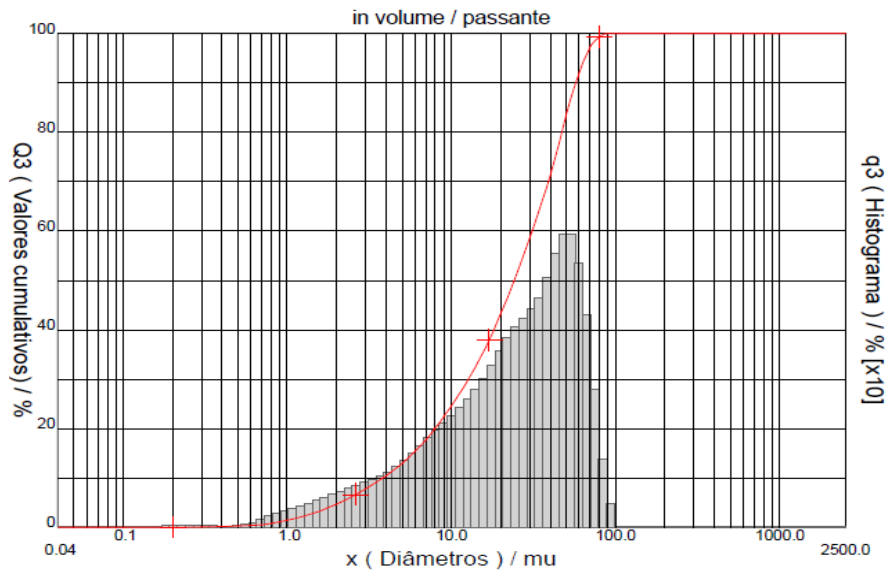


Figura 3.4: Distribuição granulométrica do pó de vidro obtida por laser da fração passante na peneira #200.

Tabela 3.3: Composição química do vidro obtida por fluorescência de raio-X (FRX)

Componentes	Resultados
SiO <sub>2</sub>	71,09 %
CaO	8,35 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,02 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,66 %
Na <sub>2</sub> O	9,00 %
K <sub>2</sub> O	0,70 %
MgO	3,37 %
TiO	0,04 %
SO <sub>3</sub>	-
SrO	-
LOI	1,56 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01 %
MnO	0,01%

Tabela 3.4: Composição química da atual pesquisa e de outros autores

Óxido	Sales et al. (2014)*	Filho (2019)**	Presente Estudo
SiO <sub>2</sub>	72,95 %	75,00 %	71,09 %
CaO	9,28 %	17,36 %	8,35 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,82 %	2,64 %	5,02 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,66 %	1,74 %	0,66 %
Na <sub>2</sub> O	6,00 %	1,44 %	9,00 %
K <sub>2</sub> O	-	1,19 %	0,70 %
MgO	3,58 %	0,21 %	3,37 %
TiO	-	0,19 %	0,04 %
SO <sub>3</sub>	-	0,12 %	-
SrO	0,25%	0,08 %	-
LOI	-	-	1,56 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	0,01 %
MnO	-	-	0,01%

\*vidro âmbar \*\* vidro branco

Os resultados de FRX (composição química), apontam que o pó de vidro é composto majoritariamente por óxido de silício (SiO<sub>2</sub>) (sílica), óxido de cálcio (CaO), óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O) e óxido de magnésio (MgO). Comparando com a composição química dos outros vidros que já foram estudados, percebe-se que o pó de vidro utilizado nesta pesquisa, embora seu maior teor

em CaO e MgO, ainda apresenta LOI, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e MnO que são ausentes em todos outros vidros. O ensaio de massa específica real dos grãos ( $\gamma_s$ ) mostrou que o pó de vidro estudado é 2,5 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.2.3. Cal de Carbureto

A cal de carbureto utilizada nesta pesquisa é um subproduto da produção do gás acetileno. Ela é proveniente da indústria WHITE MARTINS localizada em Sapucaia do Sul, RS-Brasil. Segundo Winter (2018), a produção mensal de acetileno da indústria é 120 toneladas, gerando um passivo de 342 toneladas de cal de carbureto. O procedimento de secagem é o mesmo que da areia, no entanto, a cal de carbureto, após a secagem, é destorroada e peneirada com a peneira de malha #200 (abertura de 75  $\mu$ m). Após, a cal de carbureto em pó é guardada em uma embalagem hermeticamente fechada, de modo a evitar a reação do óxido de cálcio com o dióxido de carbono presente no ar que causaria a carbonatação do material (formação de CaCO<sub>3</sub>). A distribuição granulométrica e a composição química da cal de carbureto utilizada foram determinadas, respectivamente, por granulometria a laser e fluorescência de raio-X (FRX), sendo apresentadas na figura 3.5 e tabela 3.5. A superfície específica, determinada pelo BET, é da ordem de 9,57 m<sup>2</sup>/g.

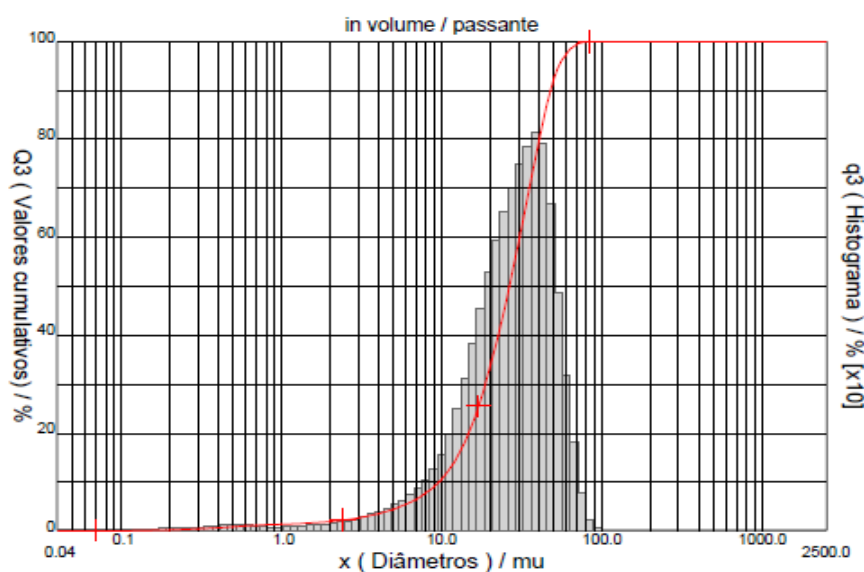


Figura 3.5: Curva da distribuição granulométrica de cal da carbureto.

Tabela 3.5: Composição química da cal de carbureto, obtida por fluorescência de raio-X (FRX)

Componentes	Resultados
CaO	97,9 %
SiO <sub>2</sub>	0,7 %
SrO	0,6 %
SO <sub>3</sub>	0,3 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2 %

#### 3.2.4. Água

A água utilizada para a preparação das misturas e moldagem dos corpos de prova foi destilada. O processo de destilação foi realizado no LEGG, a partir da água proveniente da rede pública.

#### 3.2.5. Hidróxido de Sódio (NaOH)

O hidróxido de (NaOH) utilizado nesta pesquisa é da marca PCC ROKITA S.A. Apresenta aspecto de placas e de cor branca. O NaOH é utilizado na preparação da solução alcalina ativadora, necessária para o processo de álcali-ativação. Note-se que é necessário utilizar luvas e óculos de proteção para manuseá-lo, pois se trata de um material altamente alcalino e perigoso.

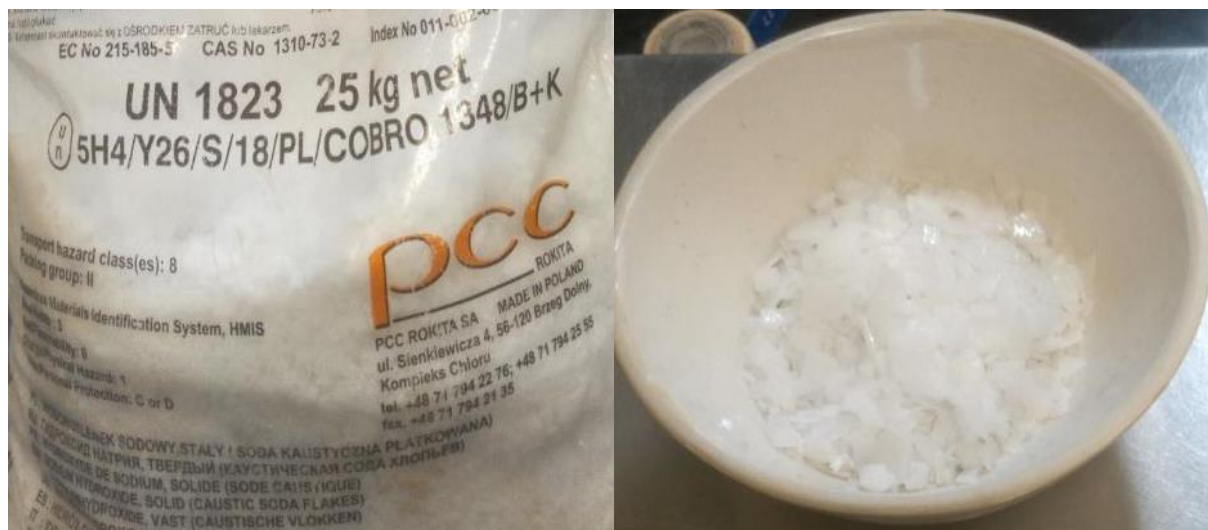


Figura 3.6: Embalagem e aspecto do hidróxido de sódio (NaOH) utilizado na presente pesquisa.

A determinação da massa de NaOH e a preparação da solução (concentração) é apresentada no Anexo I.

### 3.3.MÉTODOS E ENSAIOS REALIZADOS

#### 3.3.1. Métodos

##### 3.3.1.1. Dosagem das Amostras

Esta etapa consistiu em definir as proporções dos materiais a serem aplicados neste processo de estabilização. Assim, foram avaliados os teores de pó de vidro (pozolana/precursor), de cal de carbureto (ativador) e da umidade variando a concentração (molaridade) de álcali-ativador (hidróxido de sódio). O fluxo da dosagem de solo e álcali-ativador está apresentado na Figura 3.7.

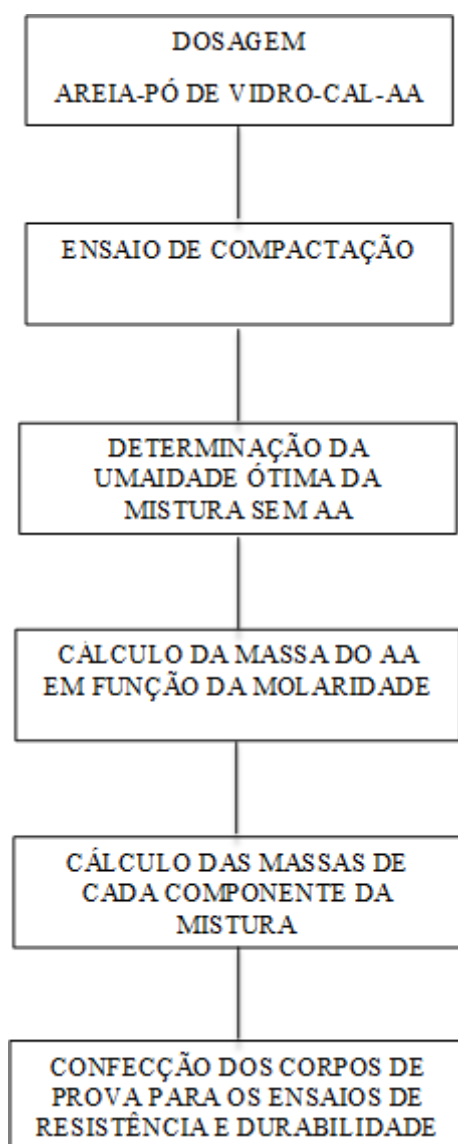


Figura 3.7: Fluxo da dosagem de solo e álcali-ativador.

a) Definição do Peso Específico Aparente Seco e a Umidade das Misturas

Os valores dos pesos específicos aparente seco ( $\gamma_d$ ) foram determinados a partir das curvas de compactação com energia modificada para diversas dosagens (misturas) de areia fina, pó de vidro (teores de 10% e 30% em substituição a areia), cal de carbureto (teores de 3% e 7% em substituição a areia) e álcali-ativador (sem e com 2 e 4 mols) com o objetivo de obter uma boa compactação. O ensaio é feito seguindo a norma NBR 7182 (ABNT, 2016), que prescreve o método a ser seguido durante o ensaio de compactação. As curvas apresentadas na figura 3.8 mostram que o peso específico aparente seco aumenta conforme o incremento da molaridade, no entanto, o teor de umidade diminui. O maior peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) obtido para as diferentes dosagens foi de 19,36 kN/m<sup>3</sup>, cuja umidade ótima ( $w_{ótima}$ ) corresponde a 8,30 %. Assim, de forma a simular



menores energias de compactação, foram escolhidos os valores de peso específico para a realização dos ensaios de 15,5 kN/m<sup>3</sup>, 16,5 kN/m<sup>3</sup> e 17,5 kN/m<sup>3</sup>, dependendo dos teores de vidro e de cal utilizados e também da molaridade da solução. A umidade utilizada foi de 9% em todas as moldagens, compatível com a umidade ótima para as menores energias de compactação.

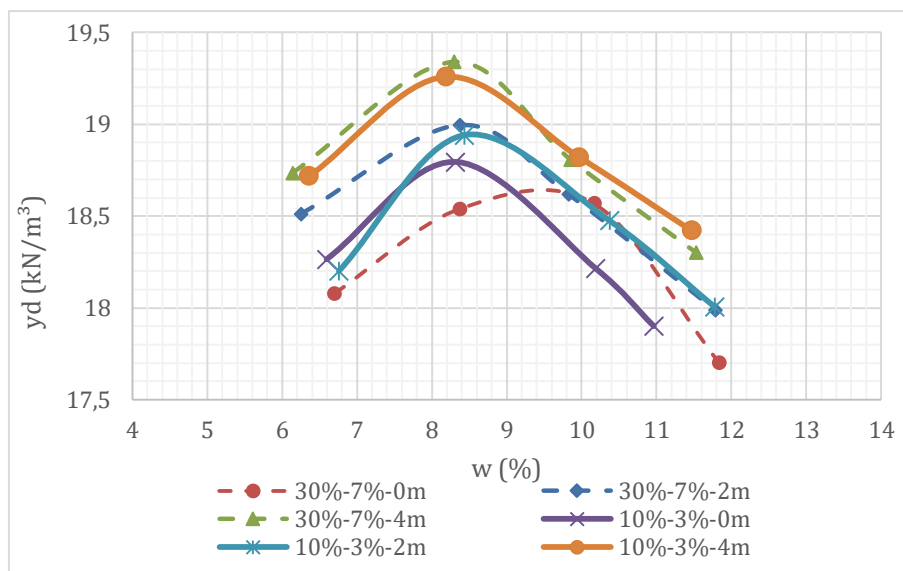


Figura 3.8: Curvas de compactação para diferentes misturas de areia fina, pó de vidro, cal de carbureto e álcali-ativador (sem e com 2 e 4 mols).

#### b) Pó de Vidro

As proporções de pó de vidro foram definidas, seguindo as pesquisas baseadas sobre utilização das pozolanas na área de estabilização de solos, por exemplo Consoli *et al.*, (2011a, 2018a), e Scheuermann Filho (2019). Assim, as misturas foram realizadas através das porcentagens de 10, 20 e 30%. A quantidade de pó de vidro necessária para cada mistura foi calculada em relação à massa seca da areia fina (substituição) (Consoli *et al.*, 2018a).

#### c) Cal de Carbureto

Os teores de cal de carbureto foram definidos com o objetivo de obter melhor resistência possível. Os teores estabelecidos representam a porcentagem de cal de carbureto em relação a massa seca de solo (Consoli *et al.*, 2018a).

Para a definição de um teor mínimo de cal de carbureto, foi utilizado os requisitos da norma ASTM D 6276 (ASTM, 1999), baseada na quantidade mínima de cal adicionada a uma mistura para levar seu pH do valor mínimo à um valor máximo e constante ( $\approx 12,4$ ). Geralmente, o valor mínimo de cal de

carbureto para as misturas de areia fina de Osório, pó de vidro e cal de carbureto é da ordem 5 %, Consoli *et al.* (2018a) em seus estudos empregou um mínimo de 3%. Desta forma, estabeleceu-se um teor intermediário de 5 % e um teor máximo de 7 %.

#### d) Molaridade

Para determinar a molaridade ótima, que fornece um melhor desempenho para o comportamento mecânico da mistura, foram moldados alguns corpos de prova com 20% de vidro e 5% cal de carbureto, variando a molaridade de 0 até 8 mols. Os corpos de prova foram curados durante 7 dias antes de ser ensaiados. Os resultados mostraram um aumento da resistência à compressão simples dos corpos de prova sem hidróxido de sódio (NaOH) (controle) até 3 mols apresentaram um acréscimo de resistência, já a partir de 4 mols houve um decréscimo (ver figura 3.10). Neste sentido, considerando que a maior resistência à compressão simples ocorreu para uma molaridade de 3 mols, adotou-se este valor para a misturas realizadas neste trabalho.

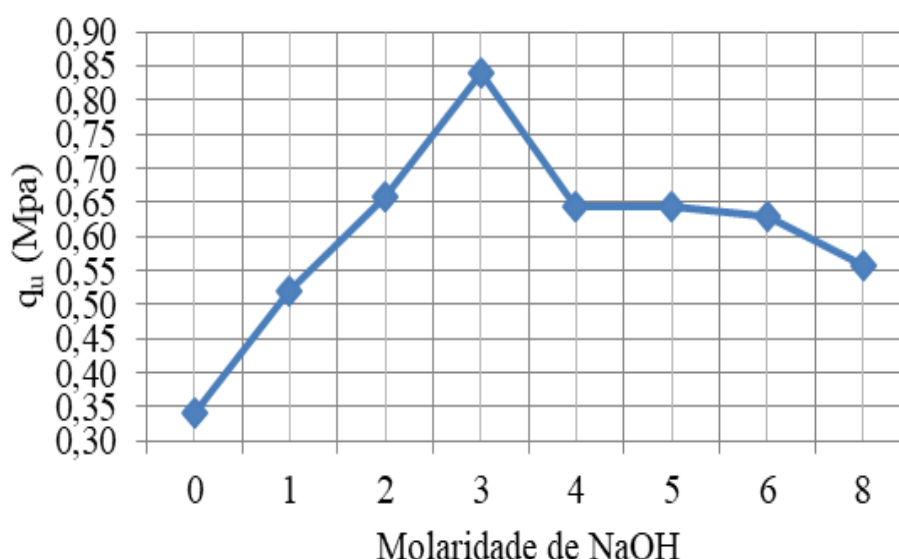


Figura 3.9: Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) pela molaridade.

#### e) Moldagem dos Corpos de Prova

A moldagem dos corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão simples e rigidez foi realizada num molde cilíndrico tripartido de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. A confecção dos corpos de prova foi realizada seguindo os procedimentos de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento, armazenamento e cura.

Inicialmente, efetuava-se a pesagem dos materiais: areia, pó de vidro, cal de carbureto e a solução álcali-ativador (preparada previamente) com uma balança de capacidade de 5 kg e com resolução de 0,01g. Após, os materiais secos: areia fina, pó de vidro e a cal de carbureto, foram misturados com auxílio de uma espátula metálica até se obter uma mistura de cor uniforme. Em seguida, a solução de álcali-ativador foi adicionada e o processo de mistura continuado até obter uma nova mistura homogênea. Depois, a mistura era separada em três porções iguais, previamente calculada e pesada. Cada porção representa uma camada para cada corpo de prova, sendo o mesmo composto de três camadas compactadas de maneira estática. Além disso, após a compactação estática de cada camada, escarificava-se o seu topo de modo a garantir a aderência com a camada subsequente. Da sobra da mistura homogênea úmida, era retirado o material para cada uma das três cápsulas, para a determinação de teor de umidade de moldagem. O procedimento de mistura, pesagem e moldagem eram executada o mais rápido possível (cerca de 5 minutos) para que o corpo de prova não perdesse a umidade. A Figura 3.11 exibe algumas fases de moldagem dos corpos de prova.

O procedimento é o mesmo para os corpos de prova de durabilidade, só que neste caso, o molde tripartido usado é de 10 cm de diâmetro e 12,7 cm de altura.

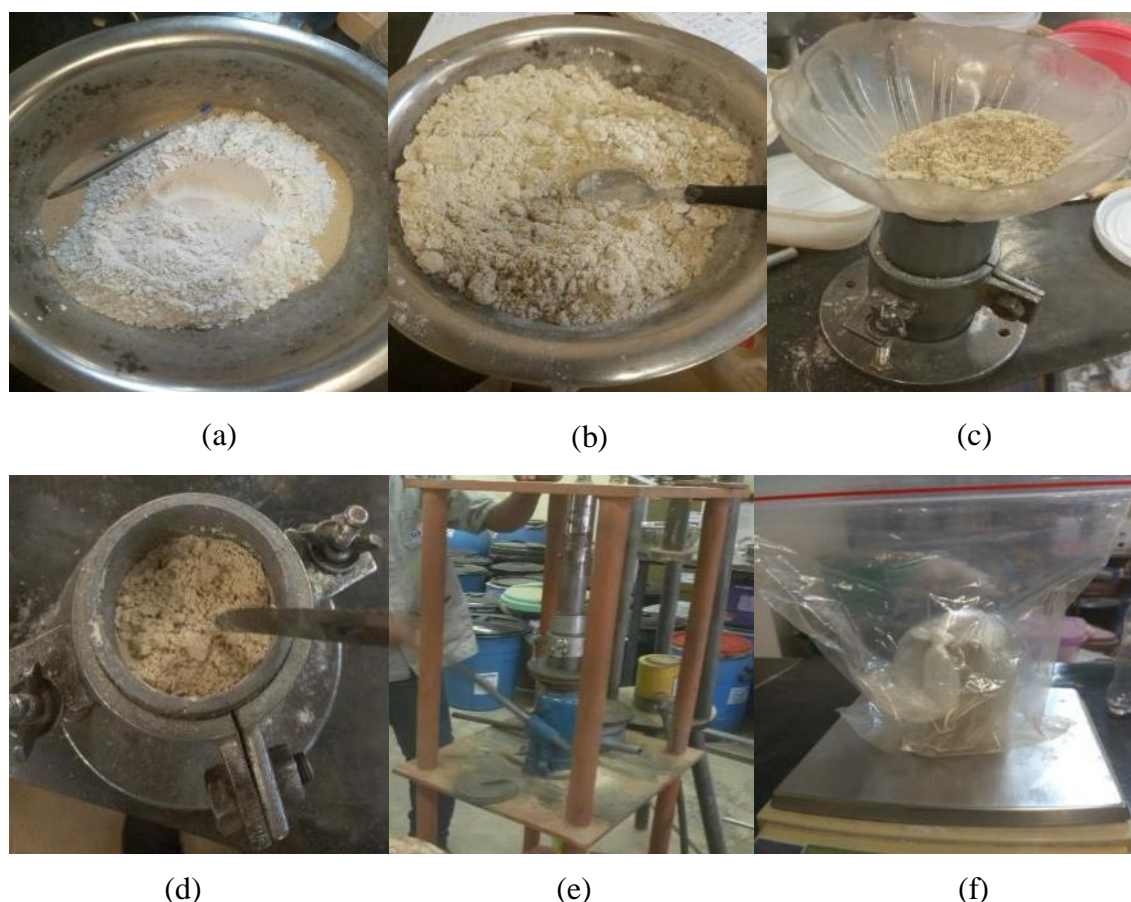


Figura 3.11: Fases de moldagem dos corpos de prova: (a) adição da solução de álcali-ativador a mistura dos materiais secos; (b) homogeneização da mistura após a adição de todo os materiais; (c) colocação da mistura no molde tripartido; (d) escarificação do topo da camada; (e) compactação estática das camadas; e (f) armazenagem dos corpos de prova em sacos plásticos após desmoldagem.

#### f) Temperatura e Tempo de Cura dos Corpos de Prova

A temperatura de cura foi definida como aquela necessária para favorecer o acontecimento das reações químicas, uma vez que as reações pozolânicas dependem muito da temperatura de meio. Conforme citado por Saldanha (2014), as temperaturas mais elevadas aumentam a velocidade das reações pozolânicas. Rao e Shivanadanda (2005 *apud* TRAN, 2013), explicaram que as reações pozolânicas começam principalmente depois 24h de cura a 25°C. Porém, no presente trabalho, todos os corpos de prova foram curados com a temperatura controlada, de 23° C  $\pm$  1°C conforme a Winter (2018).

O procedimento de controle de temperatura de cura é realizado com um termostato acoplado a um termopar imerso em um tanque cheio de água. O termostato possui em uma de suas extremidades,

um marcador de temperatura que permite regular a temperatura e, na outra extremidade, uma resistência capaz de transmitir calor e estabilizar a temperatura no valor desejado (23° C).

Sendo assim, após a moldagem e desmoldagem dos corpos de prova, os mesmos eram depositados dentro de dois sacos plásticos hermeticamente fechados antes de ser colocados dentro de um tanque cheio de água, a fim de evitar seu contato direto com a água. A condição de temperatura de cura empregada era a temperatura úmida com 100% de umidade relativa. Os tempos de cura foram 7 e 28 dias, definidos a partir do tempo necessário para que as reações químicas dessas misturas ocorressem.

### 3.3.2. Ensaios realizados

#### 3.3.2.1. Resistência à Compressão Simples

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados seguindo as diretrizes propostas pela norma norte-americana ASTM D5102 (ASTM, 2004). A ruptura dos corpos de prova era realizada numa prensa mecânica com deslocamento controlado e de capacidade de carga igual a 100 kN. Para estes ensaios, era utilizada uma célula de carga com capacidade de 10 kN com uma resolução de 0,005 kN. Durante o ensaio, o topo e a base do CP eram compelidos entre a base da célula de carga fixa e o topo da prensa (rotulado) com uma velocidade constante de 1,14mm/min. Antes de serem ensaiados, os corpos de prova foram retirados de água e dos sacos plásticos hermeticamente fechados. Depois, eles foram deixados na imersão durante 24 horas na mesma temperatura a que estavam sendo curados, antes da ruptura, para minimizar o efeito da sucção. A resistência à compressão simples ( $q_u$ ) é calculada a partir da equação 25. A figura 3.12 mostra a execução dos ensaios.

$$q_u = Q / (\pi D_m^2 / 4) \quad \text{Eq. (25)}$$

Onde:  $Q$  = carga máxima aplicada ao corpo de prova, pela leitura da célula de carga (kN);  $D_m$  = diâmetro médio do corpo de prova obtido a partir das medições de topo, centro e base (m)

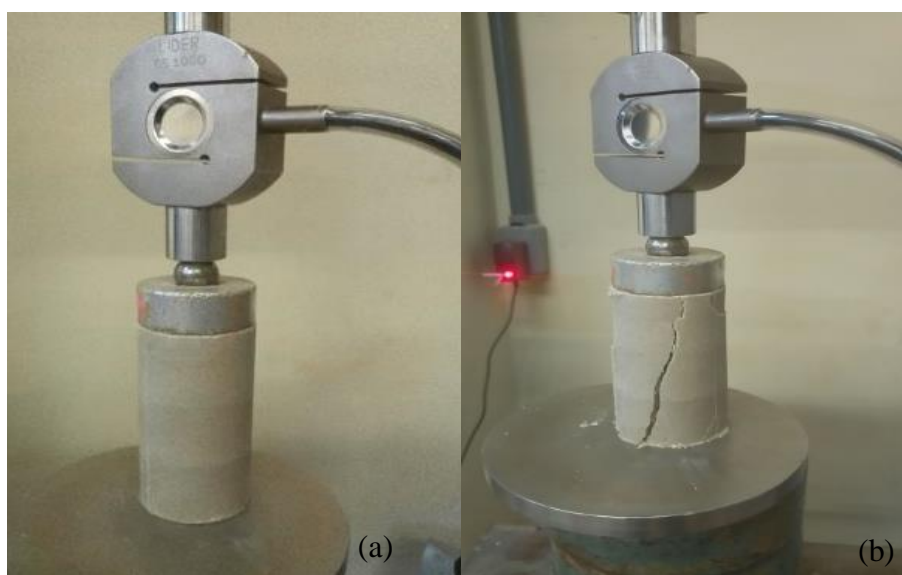


Figura 3.12: Vista dos corpos de prova colocados na prensa para a realização dos ensaios de compressão simples: (a) antes da ruptura e (b) após a ruptura dos corpos de prova, realizada em prensa mecânica com medição da carga por uma célula de carga de 10 kN.

#### 3.3.2.2. Rigidez

A rigidez dos corpos de prova ativados alcalinamente foi avaliada pelo módulo cisalhante a pequenas deformações ( $G_0$ ), sendo medido através a propagação de ondas ultrassônicas que atravessam os corpos de prova, usando o equipamento *Pundit Lab Plus*. *Pundit Lab Plus* é um equipamento que permite medir a velocidade de propagação das ondas de compressão (ondas P) e cisalhantes (ondas S) no material a ser testado (Figura 3.13). De fato, no momento que os transdutores estão acoplados no topo e na base de amostra, as ondas de compressão se propagam, induzem o movimento das partículas do meio na mesma direção e podem se propagar por sólidos e fluidos, sendo filtradas no vácuo.

Após a calibração, a primeira medida em cada corpo de prova era a onda P (compressão), induzida pela vibração de transdutores a uma frequência de 54 kHz, e a segunda, onda S (cisalhantes), deve-se à vibração de outros tipos transdutores a 250 kHz. Lembrando que os transdutores são acoplados no topo e na base de cada amostra com um gel específico que permite a transmissão das ondas e facilita leitura dos valores tais como: a velocidade ( $v_p$  e  $v_s$ ), o tempo de deslocamento ( $t_p$  e  $t_s$ ) e a porcentagem como mostra a Figura 3.14.



Figura 3.13: Aparelho de ultrassom *Pundit Lab Plus*.

O ensaio de rigidez foi feito em todos os corpos de prova submetidos à compressão simples. Lembrando que o ensaio é feito antes do ensaio de compressão simples com os mesmos corpos de prova retirados da imersão depois 24 horas. A equação seguinte permite de calcular o módulo cisalhante a pequenas deformações ( $G_0$ ).

$$G_0 = \rho^2 \cdot t_s \quad \text{Eq. (26)}$$

Onde:  $\rho$  = peso específico do material ( $\text{kN/m}^3$ );  $t_s$  = tempo da onda cisalhante ( $\mu\text{s}$ ).

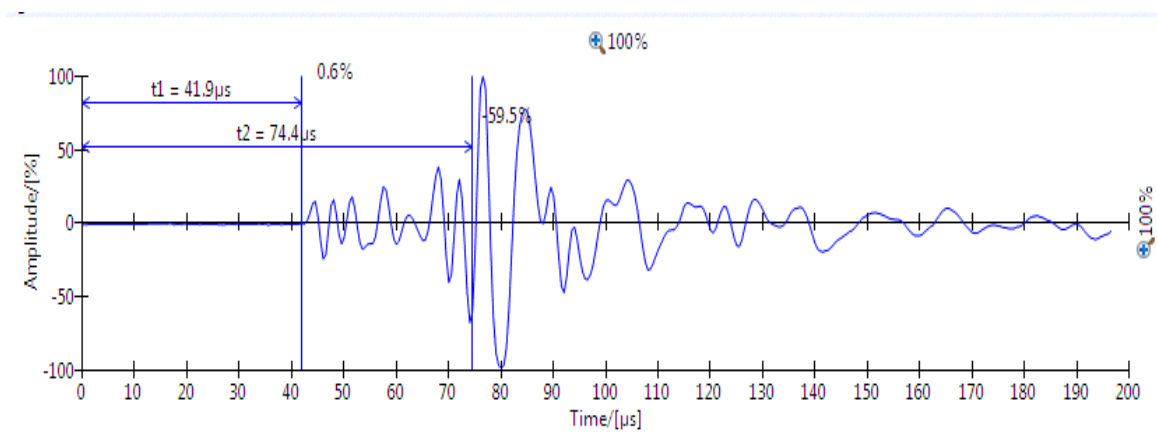


Figura 3.14: Variação da onda cisalhante no ensaio ultrassônico.

### 3.3.2.3. Durabilidade

O ensaio de durabilidade é um processo pelo qual a perda de massa de uma amostra é avaliada por ciclos de molhagem e secagem. Neste trabalho, o ensaio de durabilidade foi feito seguindo os procedimentos descritos na norma ASTM D559 (ASTM 2015). Assim, foram moldados 15 corpos de prova cilíndricos com dimensões 10 cm de diâmetro e 12,70 cm de altura. Após a moldagem

os corpos de prova foram primeiramente curados durante 7 dias e depois deixados 5 horas na imersão antes de ser submetidos a 12 ciclos de molhagem e secagem da seguinte forma:

- Secagem numa estufa a  $71^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  durante 48 horas;
- Retirada da estufa, e medida a massa de cada um;
- Escovação, com uma escova metálica, das faces do topo e da base (4 vezes) e das laterais de 18 a 20 vezes, com força aproximada de 15 N;
- Medição da massa final e comparar esta medida com a massa inicial do ciclo para obter a perda de massa que ocorreu durante o ciclo calcula pela formula:

$$\text{Perda de massa} = (m_1 - m_2) \times 100 / m_1$$

Onde:

$m_1$  = massa seca inicial medida depois a estufa calculado original

$m_2$  = ma seca medida depois escovação

- Medida das cápsulas para avaliar o teor de umidade ocorreu durante o ciclo.
- Repetição o processo voltando à etapa inicial da imersão (5 horas) e secagem até que os 12 ciclos fossem completados.

A figura 3.15 mostra os corpos de prova antes e após os ensaios de durabilidade.

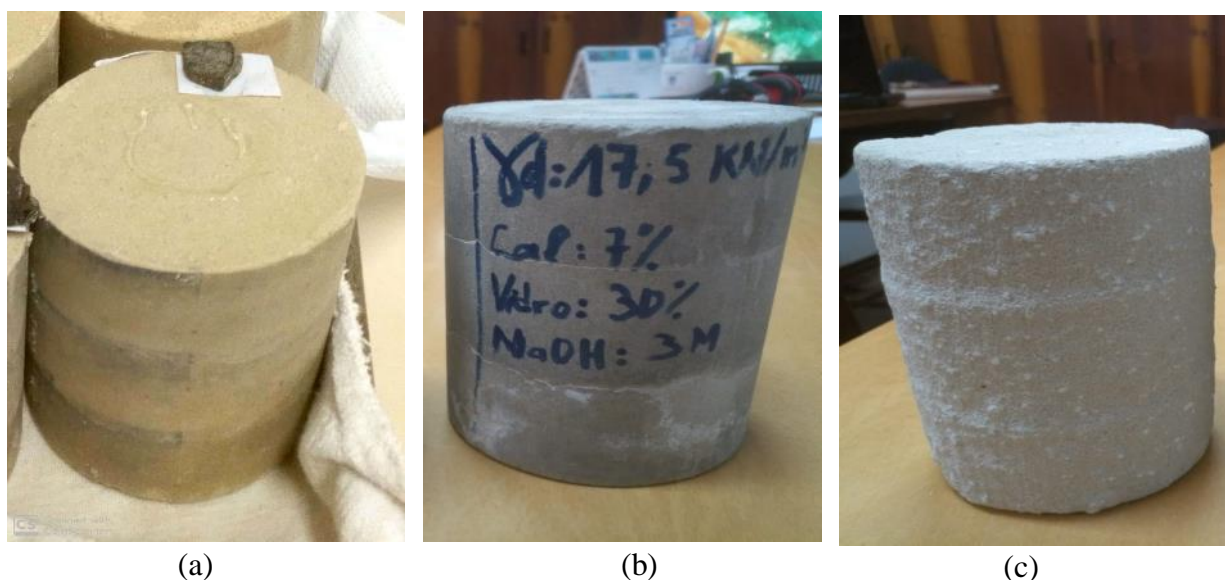


Figura 3.10: Corpos de prova (a) antes os 12 ciclos de molhagem e secagem, (b) depois os 12 ciclos de molhagem e secagem com ativação alcalina (fonte: Elaborado pelo autor); (c) depois os 12 ciclos de molhagem e secagem sem ativação alcalina (WINTER, 2018)



### 3.4.DEFINIÇÃO DAS DOSAGENS

As Tabelas 3.6 e 3.7 mostram as dosagens dos corpos de prova para ensaios de resistência à compressão simples e rigidez e para os ensaios de durabilidade.

Tabela 3.6: Dosagens para determinação da resistência à compressão simples e rigidez para 7 e 28 dias de cura

Mistura	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Vidro (%)	Cal (%)	w (%)	Molaridade (mols)	T (°C)
1	15,5	10	3	9	3	23
2	15,5	10	5	9	3	23
3	15,5	10	7	9	3	23
4	16,5	10	3	9	3	23
5	16,5	10	5	9	3	23
6	16,5	10	7	9	3	23
7	17,5	10	3	9	3	23
8	17,5	10	5	9	3	23
9	17,5	10	7	9	3	23
10	15,5	20	3	9	3	23
11	15,5	20	5	9	3	23
12	15,5	20	7	9	3	23
13	16,5	20	3	9	3	23
14	16,5	20	5	9	3	23
15	16,5	20	7	9	3	23
16	17,5	20	3	9	3	23
17	17,5	20	5	9	3	23
18	17,5	20	7	9	3	23
19	15,5	30	3	9	3	23
20	15,5	30	5	9	3	23
21	15,5	30	7	9	3	23
22	16,5	30	3	9	3	23
23	16,5	30	5	9	3	23
24	16,5	30	7	9	3	23
25	17,5	30	3	9	3	23
26	17,5	30	5	9	3	23
27	17,5	30	7	9	3	23

Tabela 3.7: Dosagens para determinação da durabilidade para 7 dias de cura.

Mistura	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Vidro (%)	Cal (%)	w (%)	Molaridade (mols)	T (°C)
1	15,5	10	3	9	3	23
2	15,5	10	7	9	3	23
3	16,5	10	3	9	3	23
4	16,5	10	7	9	3	23
5	17,5	10	3	9	3	23
6	17,5	10	7	9	3	23
7	15,5	20	3	9	3	23
8	15,5	20	5	9	3	23
9	16,5	20	3	9	3	23
10	16,5	20	5	9	3	23
11	17,5	20	3	9	3	23
12	17,5	20	5	9	3	23
13	15,5	30	7	9	3	23
14	16,5	30	7	9	3	23
15	17,5	30	7	9	3	23

A moldagem dos corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão simples e rigidez foi realizada a partir do método estatístico em triplicata. Por se tratar de projeto fatorial fracionado  $3^3$  completo, com dois tempos de cura, foram moldados ao total 162 corpos de provas. Para os ensaios de durabilidade o projeto fatorial foi do tipo incompleto, não havendo repetição, resultando em 15 dosagens e a cura somente para sete dias, sendo moldado um total de 15 corpos de prova.

## 4. RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DA MISTURA DE AREIA DE OSÓRIO, VIDRO, CAL DE CARBURETO E A SOLUÇÃO NaOH

#### 4.1.1. Resistência à compressão simples aos sete (07) dias de curas.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples dos corpos de prova curados a 23°C durante 7 dias são mostrados neste item em função de teor cal de carbureto, do teor de vidro, do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), e da razão entre a porosidade e teor de agentes cimentantes (índice  $\eta/B_{iv}$ ) com adição do hidróxido de sódio. Também serão analisados os resultados obtidos neste estudo frente aos resultados sem álcali-ativação obtidos por Winter (2018).

##### 4.1.1.1. Resistência em função de teor de cal de carbureto

A Figura 4.1 apresenta a resistência à compressão simples, do material alcalino ativado em função de teor de carbureto com o aumento de teor de vidro. Os resultados são mostrados em termos da média da triplicata de cada dosagem. De fato, a partir desses resultados, notamos que a resistência à compressão simples aumenta proporcionalmente ao aumento do teor de cal de carbureto como esperado. Da mesma forma, observa-se que quanto maior é o peso específico aparente seco, maior é a resistência à compressão simples.

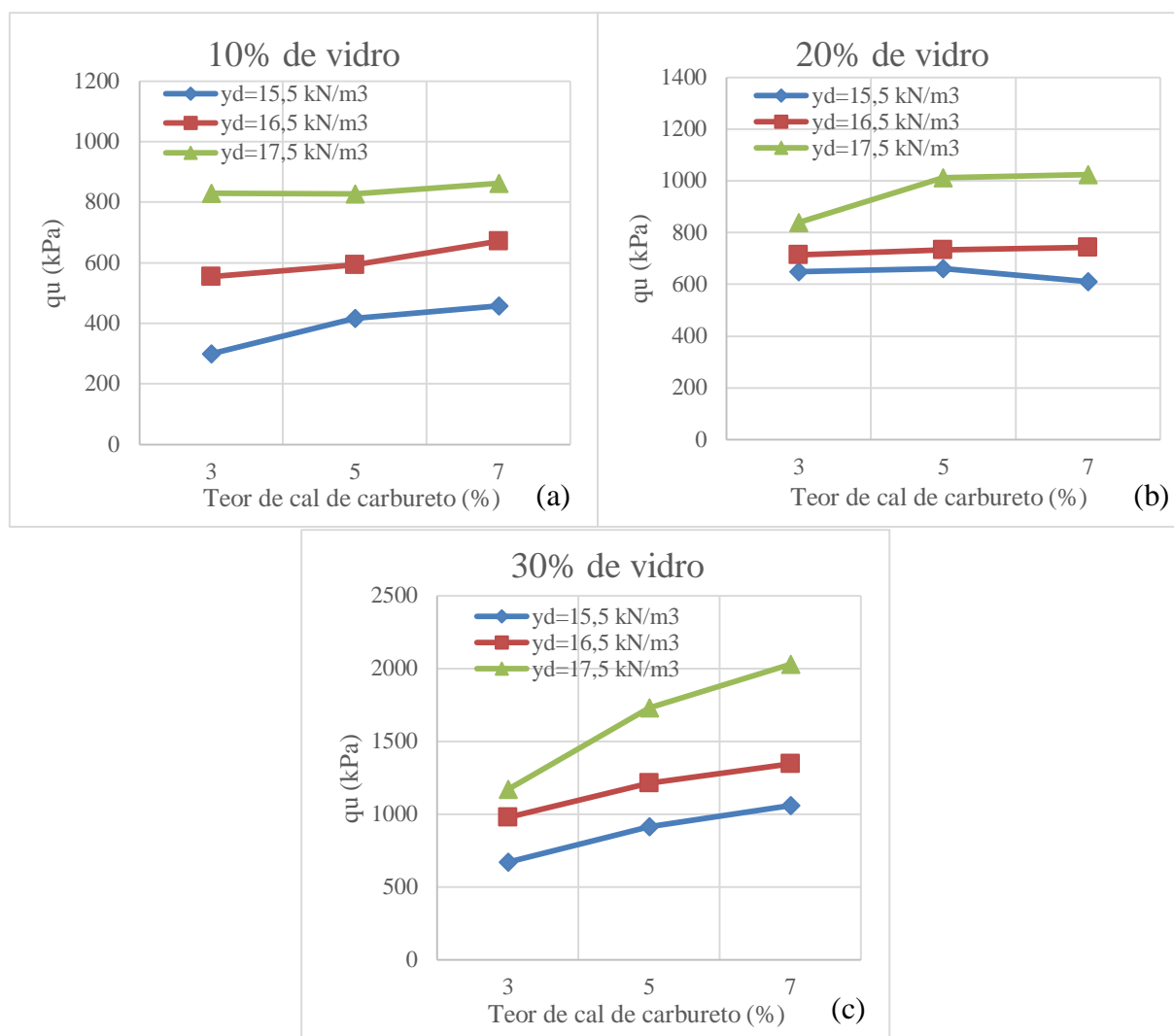


Figura 4.1: Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função de teor de cal de carbureto com aumento de teor de vidro a) 10%, b) 20% e c) 30% , aos 7 dias de cura.

#### 4.1.1.2. Resistência em função de teor de vidro

A figura 4.2 mostra os resultados da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) obtida do material alcalino ativado em função de teor de vidro com o aumento de teor de cal de carbureto carbureto. Os resultados são mostrados em termos da média da triplicata de cada dosagem. De fato, a partir desses resultados, nota-se o aumento da resistência à compressão simples do geopolímero com o aumento do teor de vidro. Da mesma forma, nota-se que quando maior o peso específico aparente seco, maior é a resistência à compressão simples. Observa-se, ainda, que o ganho da resistência à compressão simples entre 10 e 20% de vidro é muito mais fraca do que o ganho entre 20 e 30%.

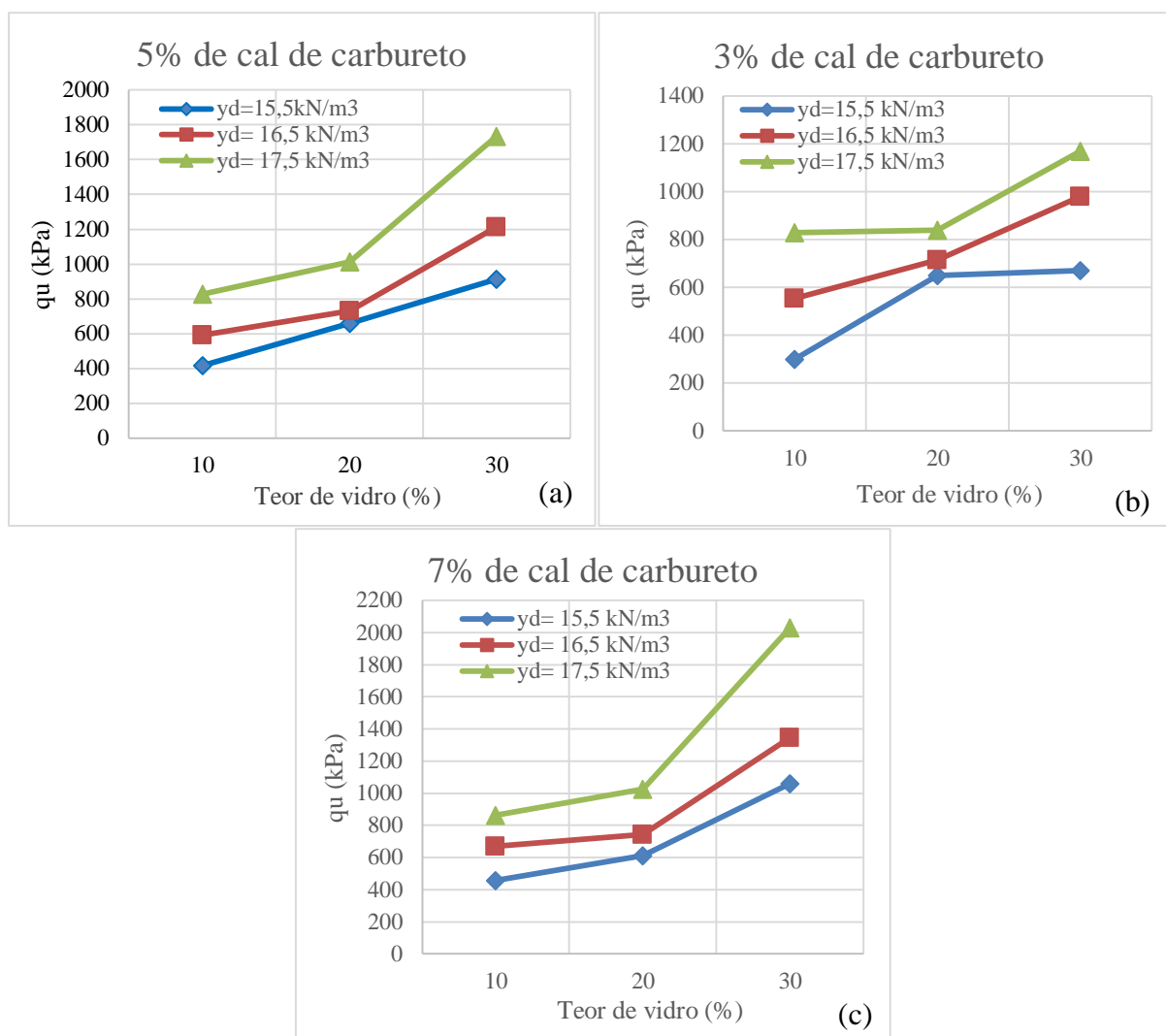


Figura 4.2: Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função de teor de vidro com aumento de teor cal de carbureto a) 3%, b) 5% e c) 7%, aos 7 dias de cura.

#### 4.1.1.3. Resistência em função do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ )

A figura 4.3 mostra a variação da resistência à compressão simples, em função do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) com a variação de teor de vidro e cal de carbureto. Os resultados são mostrados em termos da média da triplicata de cada dosagem. A partir dessas figuras, pode-se observar que a resistência à compressão simples aumenta proporcionalmente ao aumento do peso específico aparente seco da mistura. Pode-se perceber também que, quando maior o peso específico aparente seco da mistura, maior é a resistência, como mostrado por Winter (2018). Da mesma forma, pode-se observar que a variação de teor de vidro tem pouco efeito na taxa de aumento da resistência à compressão simples das misturas estudadas. No entanto, observa-se que, para o teor de pó de vidro igual a 20%, o aumento da resistência é muito baixo ou até invariável, apesar da variação no teor

de cal de carbureto (3, 5 e 7%) e principalmente para um peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de 15,5kN/m<sup>3</sup>, onde a resistência aumenta levemente para um teor de cal de carbureto de 3 a 5% e diminui para de 7%.

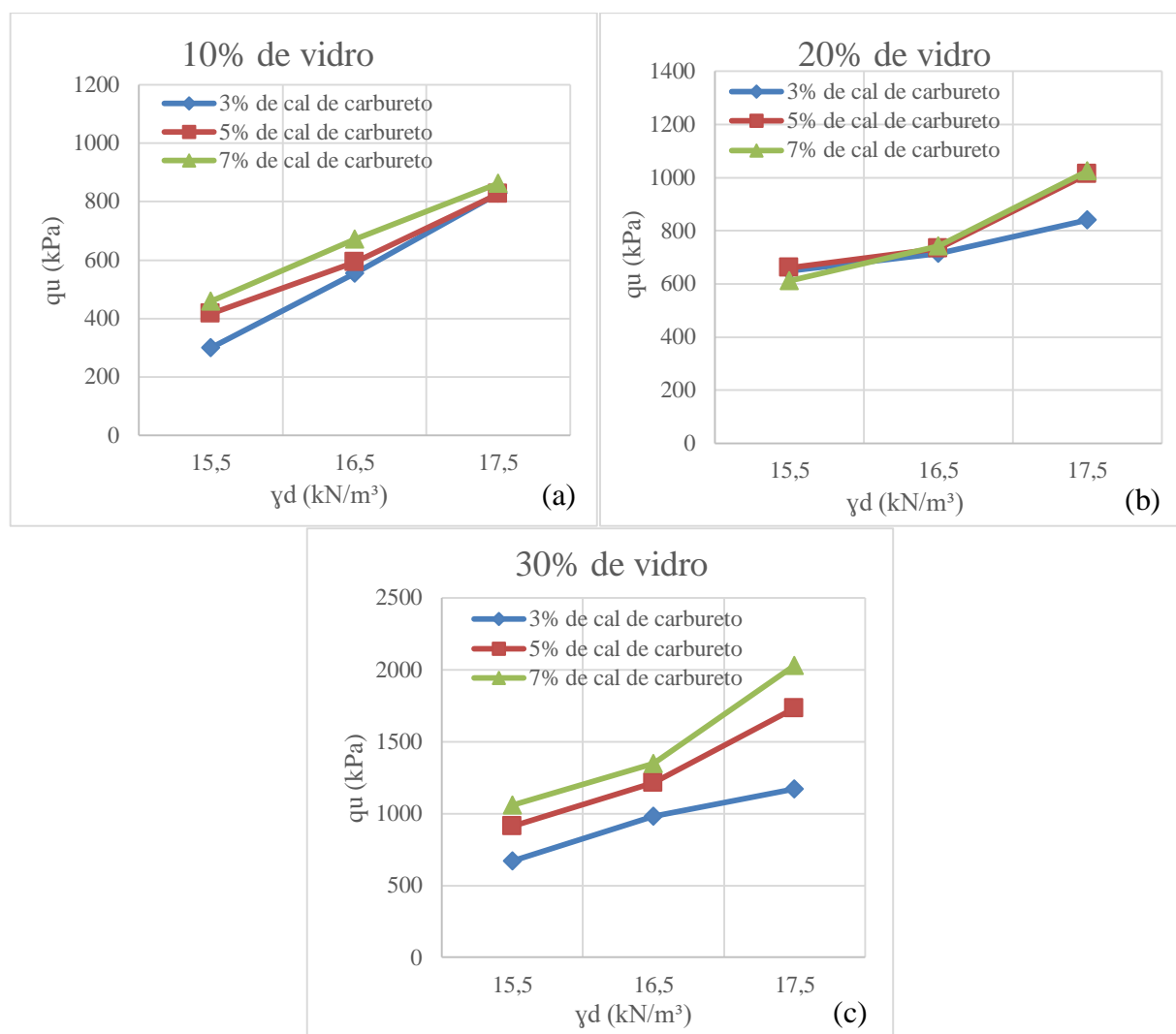


Figura 4.3: Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função em função do peso específico aparente seco com aumento de teor de vidro a) 10%, b) 20% e c) 30% e de cal de carbureto, aos 7 dias de cura.

#### 4.1.1.4. Resistência à compressão simples em função da razão entre porosidade e teor volumétrico dos agentes cimentantes (índice $\eta/B_{iv}$ )

As figuras 4.4 e 4.5 mostram o incremento da resistência à compressão simples em função do índice  $\eta/B_{iv}$  com ativação alcalina e sem ativação alcalina, sendo estes últimos realizados por Winter (2018). O fator  $B_{iv}$  é definido como a soma do teor volumétrico de agentes cimentos, tais com a cal (neste trabalho, a cal de carbureto passante na peneira com abertura de 75  $\mu$ m – malha

#200) e qualquer pozolana (neste trabalho, o pó vidro passante na peneira com abertura de 75  $\mu\text{m}$  – malha #200), conforme proposto por Consoli *et al.* (2018a e b, 2019). No caso do presente trabalho, na composição do teor volumétrico dos agentes cimentantes ( $B_{iv}$ ) também foi incluído o ativador alcalino. No presente estudo o índice  $\eta/B_{iv}$ , o teor volumétrico dos agentes cimentantes ( $B_{iv}$ ) é elevado ao expoente de 0,28 como valor de ajuste da correlação, conforme proposto por Consoli *et al.* (2007). Como esperado pela revisão bibliográfica, nota-se que quanto menor a relação  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ , maior é a resistência à compressão simples. Comparando os resultados apresentados nas figuras 4.4 e 4.5, percebe-se de um lado que a resistência à compressão simples para as amostras ativadas alcalinamente é maior, da ordem de duas vezes ( $1,67 \times 10^7 / 0,75 \times 10^7 = 2,23$ ), ou seja, dobro, que as amostras sem ativação alcalina. De outro lado, notamos que os resultados das amostras sem ativação alcalina se apresentaram sob uma forma de três curvas diferentes de acordo com o teor de vidro, o que não é o caso das amostras com ativação alcalina que se agrupadas todas em um bloco, formando assim uma única curva. Pode-se deduzir que o NaOH permite uma aceleração das reações químicas entre as partículas de vidro e da cal de carbureto, o que favoreceu sua cimentação com a área e, portanto, a uniformidade em torno da curva de correlação. Além disso, observa-se quando o valor mínimo do fator  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$  para as amostras ativadas alcalinamente é superior a 12%, o das amostras sem ativação alcalina é inferior a 12%. Assim, pode-se deduzir desses resultados que nas amostras com adição de álcali-ativador ocorre uma aceleração nas reações químicas, responsáveis pela resistência, em relação às misturas convencionais sem ativação alcalina.

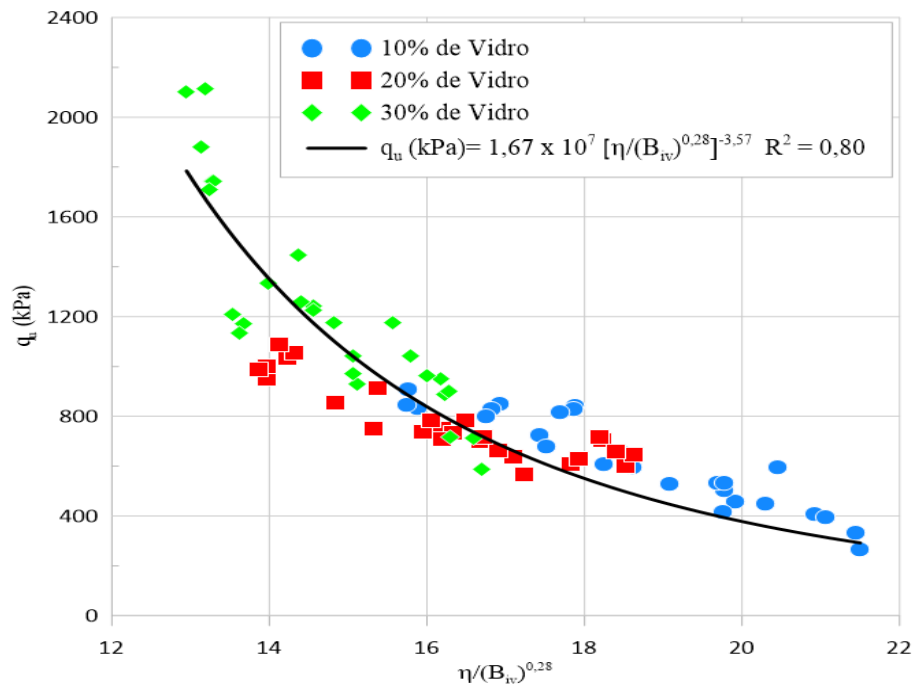


Figura 4.4: Relação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função do índice  $\eta/(B_{iv})^{0.28}$  com ativação alcalina a 3 mols de todos os corpos de prova, aos 7 dias de cura.

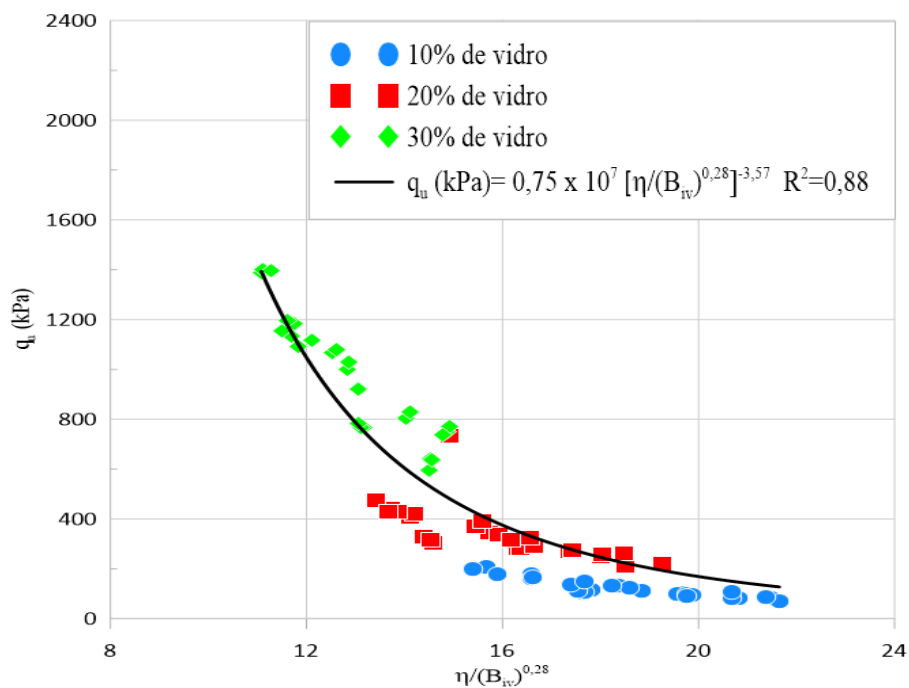


Figura 4.5: Relação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função do índice  $\eta/(B_{iv})^{0.28}$  sem ativação alcalina de todos os corpos de prova, aos 7 dias de cura (Adaptado de WINTER, 2018)



#### 4.1.1.5. Resistência em função da solução NaOH

As figuras 4.6 a 4.8 exibem os resultados de ganho da resistência à compressão simples da mistura de areia fina, cal de carbureto e pó de vidro sem NaOH (resultados de WINTER, 2018) e com NaOH (álcali-ativador) em função do teor cal de carbureto em relação à alteração do peso específico aparente seco. Os resultados são mostrados em termos da média da triplicata de cada dosagem. De fato, a partir desses resultados, notamos que a resistência à compressão simples aumenta proporcionalmente ao aumento da cal de carbureto. No entanto, comparando os resultados, percebemos que as amostras álcali-ativadas apresentam a resistência à compressão simples superior em comparação às amostras sem ativação alcalina, especialmente para os teores de vidro de 10 e 20%. No entanto, o aumento da resistência com o aumento do teor de cal de carbureto para as amostras de álcalis ativadas é proporcional ao das amostras não ativadas. Além disso, observa-se que o efeito do NaOH é muito significativo para uma pequena quantidade de vidro (10 e 20%), o que não ocorre quando o teor de pó de vidro é igual a 30%, onde a diferença do aumento da resistência não é muito grande entre as duas dosagens materiais (sem ativação alcalina e com ativação alcalina).

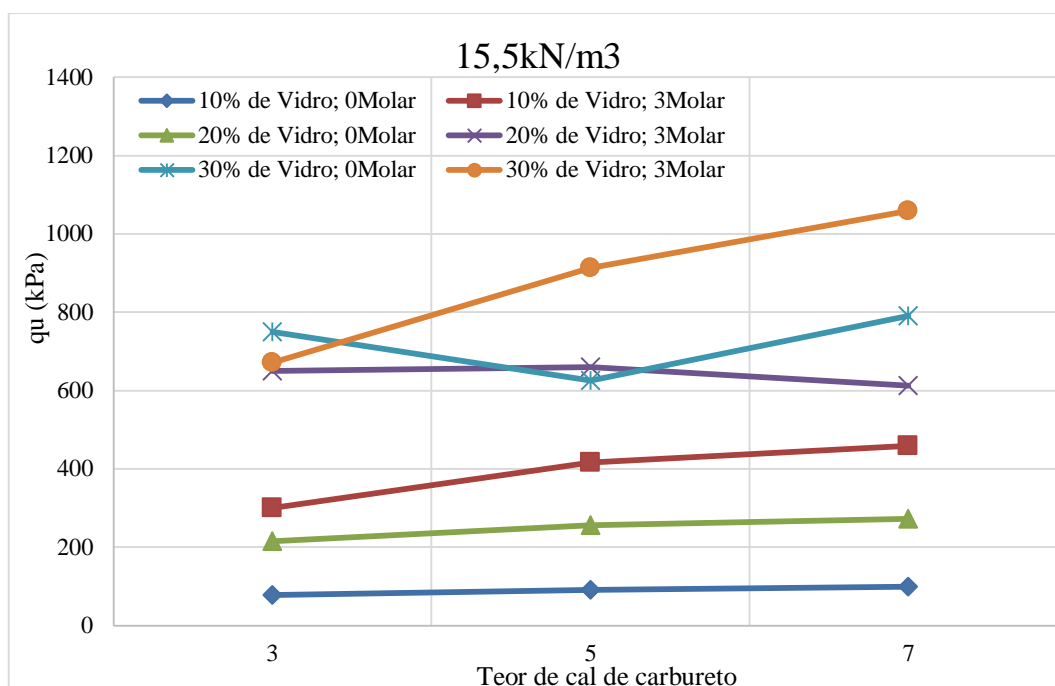


Figura 4.6: Efeito da adição do hidróxido de sódio (NaOH), com 3 mols, na resistência à compressão simples para o peso específico ( $\gamma_d$ ) de 15,5 kN/m<sup>3</sup> em função do teor de cal de carbureto, aos 7 dias de cura.

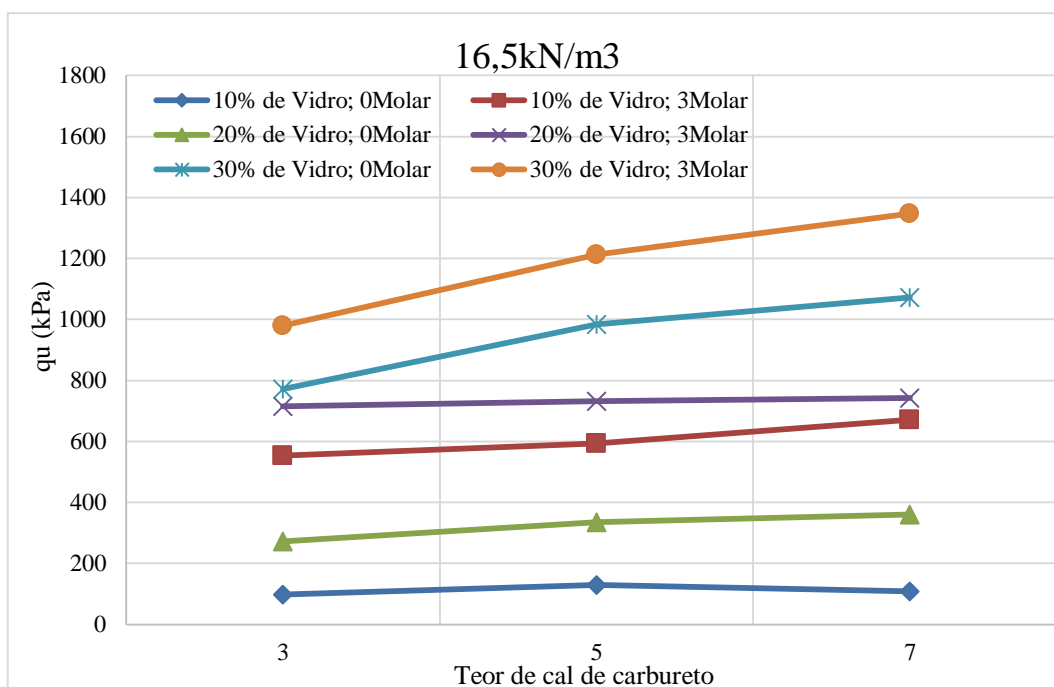


Figura 4.7: Efeito da adição do hidróxido de sódio (NaOH), com 3 mols, na resistência à compressão simples para o peso específico ( $\gamma_d$ ) de 16,5 kN/m<sup>3</sup> em função do teor de cal de carbureto, aos 7 dias de cura.

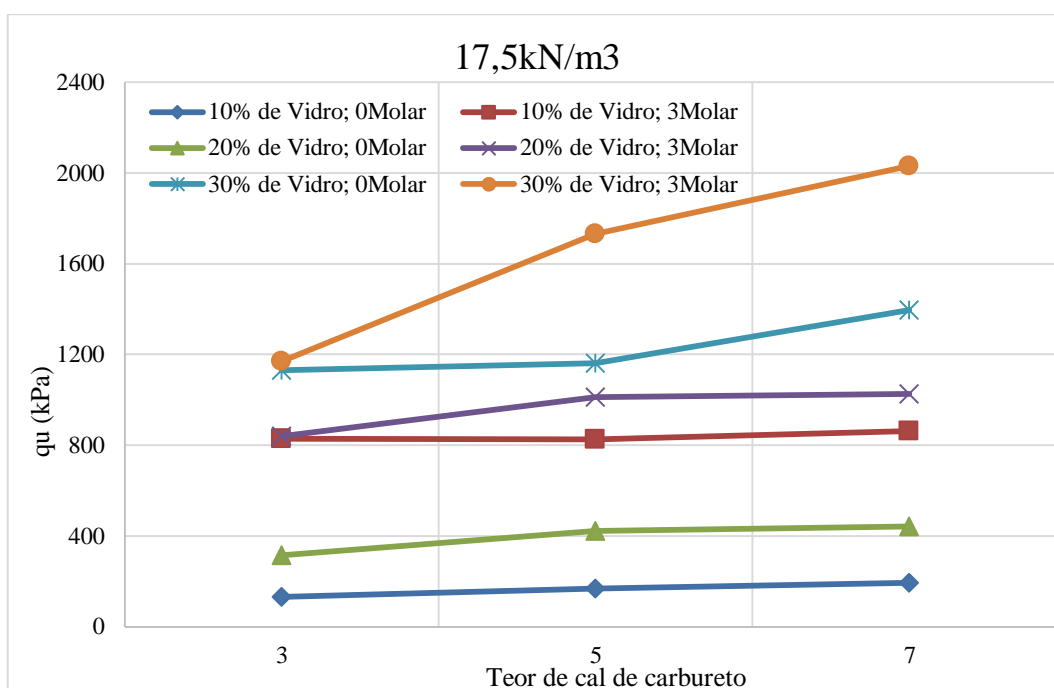


Figura 4.8: Efeito da adição do hidróxido de sódio (NaOH), com 3 mols, na resistência à compressão simples para o peso específico ( $\gamma_d$ ) de 17,5 kN/m<sup>3</sup> em função do teor de cal de carbureto, aos 7 dias de cura.

#### 4.1.2. Resistência à compressão simples aos vinte e oito (28) dias de curas.

Neste item serão apresentados os resultados da resistência simples à compressão das dosagens de areia fina, teor de vidro, teor de cal de carbureto, do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), da razão entre a porosidade e teor de agentes cimentantes (índice  $\eta/B_{iv}$ ), com a adição da solução de NaOH a 3 mols, aos 28 dias de cura, numa temperatura controlada de 23° C. Destaca-se que a comparassão desses resultados com os de sem a adição do álcali-ativador, não pode ser realizada pois os resultados não são disponíveis para uma cura de 28 dias.

##### 4.1.2.1. Resistência em função de teor de cal de carbureto

Os resultados da resistência à compressão simples das amostras curadas durante 28 dias em função de teor de cal de carbureto com a variação de teor de vidro são apresentados na figura 4.9. Os resultados são mostrados em termos da média da triplicata de cada dosagem. De fato, observa-se a partir desses resultados que a resistência à compressão simples aumenta com o aumento de teor cal do carbureto. No entanto, observa-se que não há grande diferença no aumento da resistência por 3% de cal de carbureto à 10% e 20% de teor de vidro.

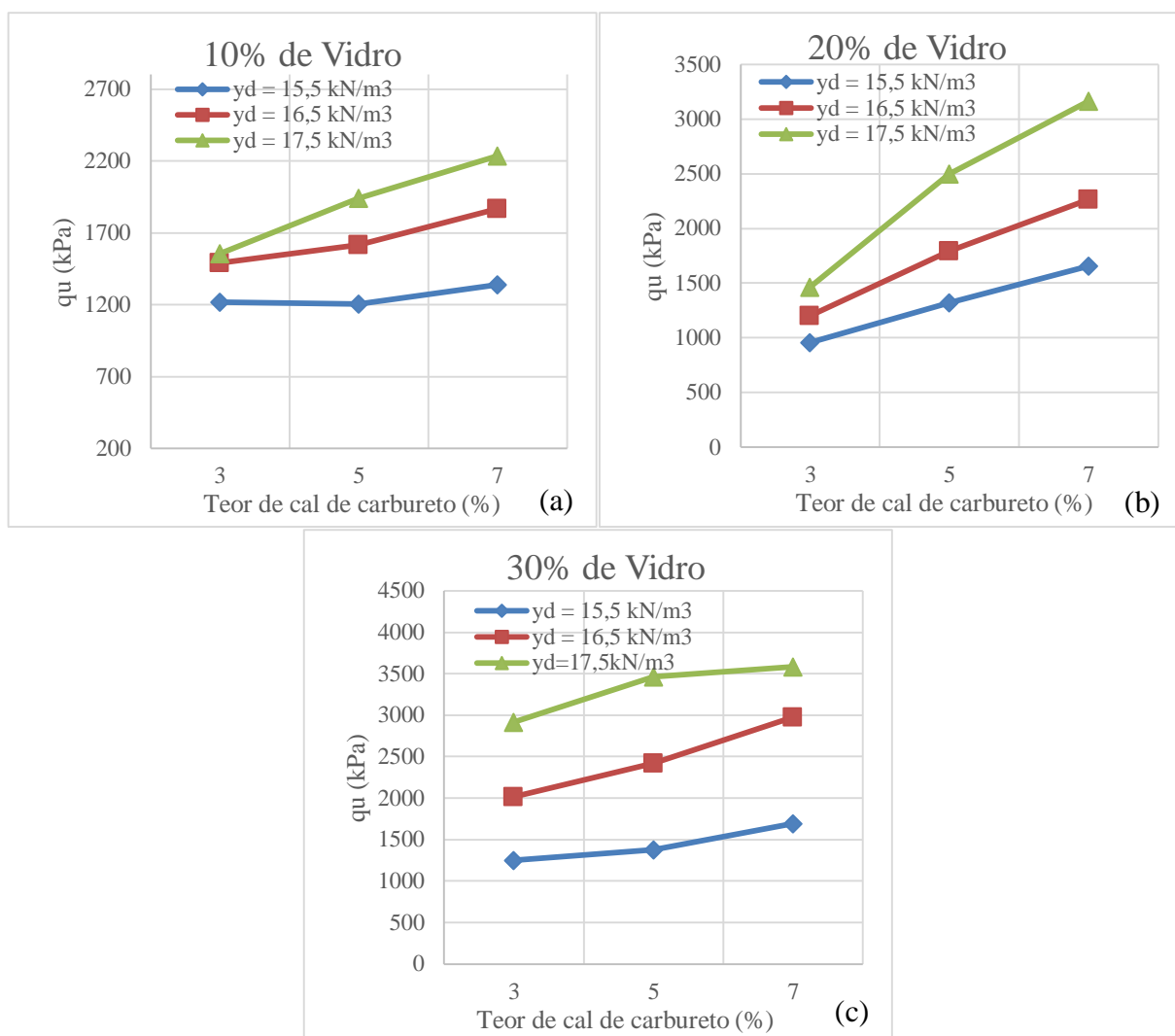


Figura 4.9: Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função de teor de cal de carbureto com aumento de teor de vidro a) 10%, b) 20% e c) 30%, aos 28 dias de cura.

#### 4.1.2.2. Resistência em função de teor de vidro

A figura 4.10 destaca os resultados da resistência à compressão simples do material álcali-ativado em função do teor de vidro com aumento de teor de cal de carbureto. Os resultados são mostrados em termos da média da triplicata de cada dosagem. De fato, a partir desses resultados encontrados, observa-se que a resistência à compressão simples não aumentou de 10% para 20% com 3% de cal de carbureto.

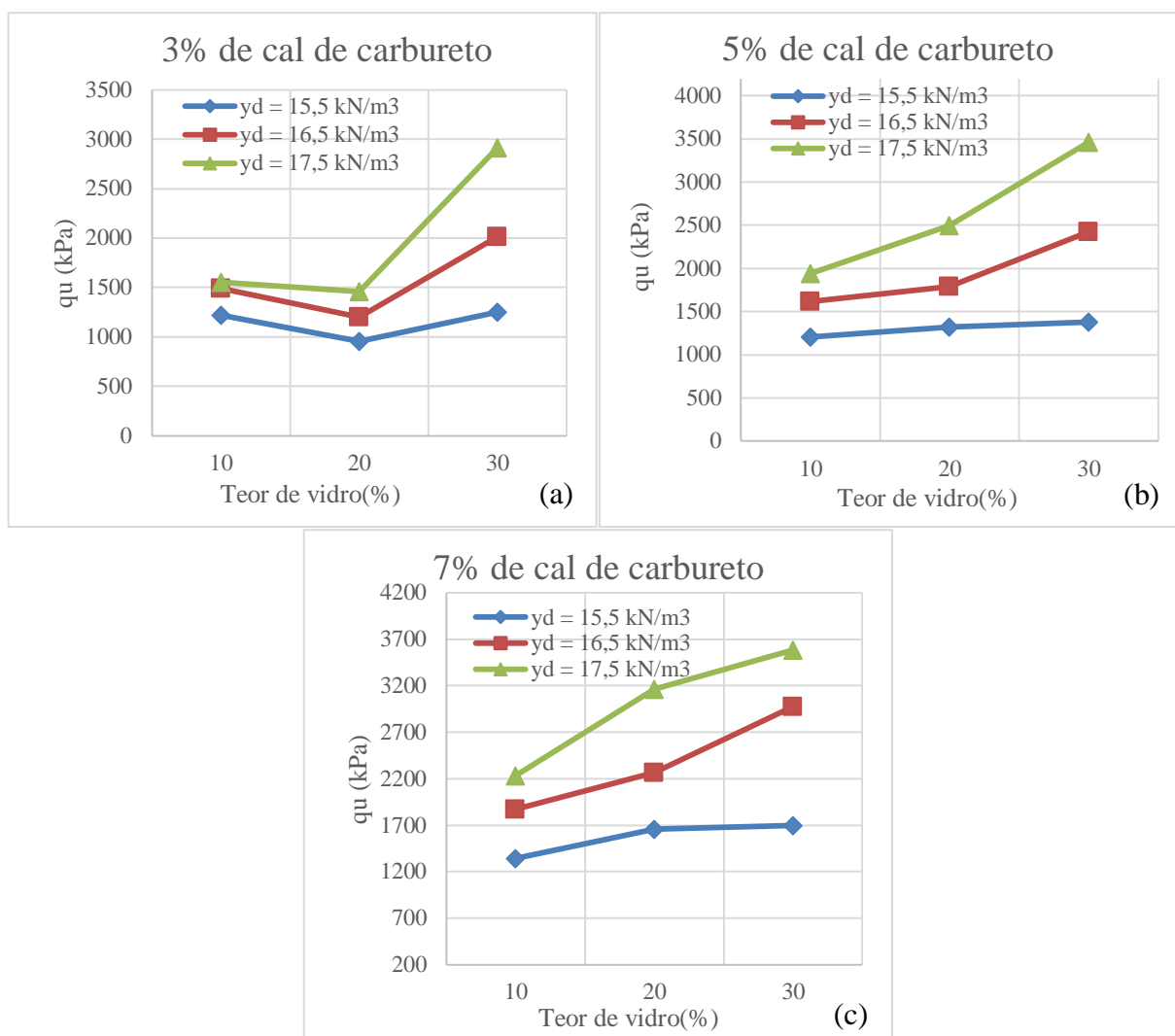


Figura 4.10: Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função de teor de vidro com aumento de teor cal de carbureto a) 3%, b) 5% e c) 7%, aos 28 dias de cura.

#### 4.1.2.3. Resistência em função do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ )

São exibidos na figuras 4.11 os resultado da resistência a compressão simples do material álcali-ativado em função do peso específico aparente seco. Observa-se que a resistência à compressão simples aumenta com o aumento do peso específico aparente seco, conforme observado por Winter (2018). Além disso, percebe-se que o efeito da variação de teor de cal de carbureto na resistência aos 28 dias para 10% de vidro é muito baixo para os pesos específicos aparentes secos (15,5; 16,5; 17,5 kN/m<sup>3</sup>).

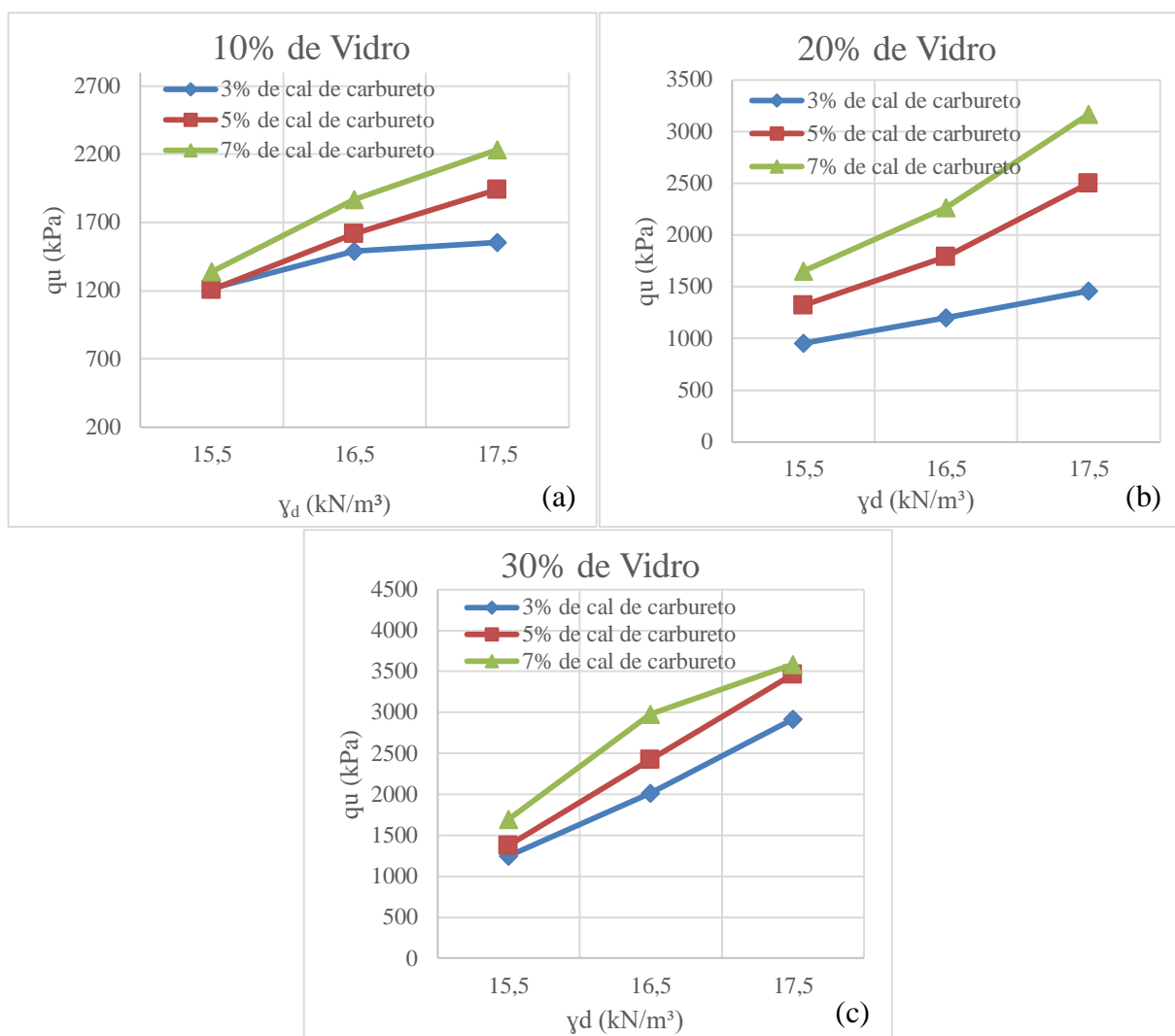


Figura 4.11: Variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função do peso específico aparente seco com aumento de teor de vidro a) 10%, b) 20% e c) 30% e de cal de carbureto, aos 28 dias de cura.

#### 4.1.2.4. Resistência à compressão simples em função da razão entre porosidade e teor volumétrico dos agentes cimentantes (índice $\eta/B_{iv}$ )

A Figura 4.12 mostra os resultados da resistência à compressão simples em função do índice  $\eta/B_{iv}$  aos 28 dias de cura. Como esperado, encontra-se após a análise, que a resistência à compressão simples cresce, na medida em que o índice  $\eta/B_{iv}$  diminui. Comparando-se os resultados aos 28 dias de curas (figura 4.12) com os 7 dias de cura (figura 4.4), verifica-se que uma relação da ordem de duas vezes ( $3,8 \times 10^7 / 1,67 \times 10^7 = 2,28$ ), ou seja, a resistência à compressão simples, na média dobra entre os 7 e 28 dias de cura.

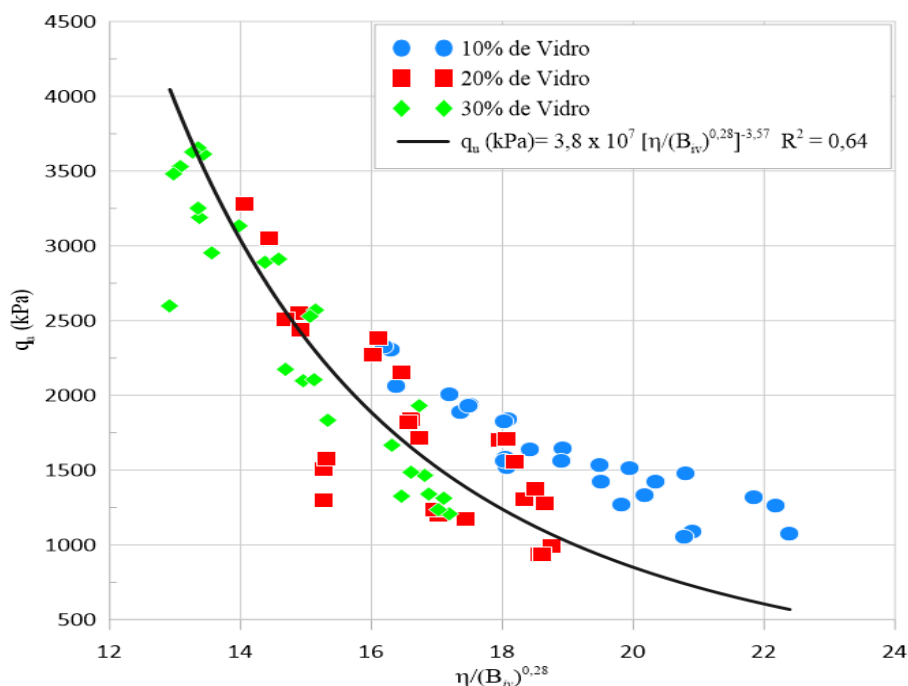


Figura 4.12: Relação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função do índice  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$  com ativação alcalina a 3 mols de todos os corpos de prova, aos 28 dias de cura.

## 4.2. ENSAIO DE RIGIDEZ DA MISTURA DE AREIA DE OSÓRIO, VIDRO, CAL DE CARBURETO E A SOLUÇÃO DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO (NaOH)

### 4.2.1. Rigidez aos 7 dias de cura

#### 4.2.1.1. Rigidez em função de teor de cal de carbureto

O resultado de rigidez, verificada através módulo cisalhante a pequenas deformações ( $G_o$ ), da mistura alcalina-ativada em função do teor de cal de carbureto em de acordo com a quantidade vidro adicionada são apresentados na Figura 4.13. Os resultados são mostrados em termos da média da triplicata de cada dosagem. A partir desses resultados, notamos que a rigidez aumenta sutilmente com o aumento de teor de cal de carbureto. Da mesma forma, pode-se observar pelos resultados que o aumento da rigidez permanece praticamente o mesmo para todos os pesos específicos aparentes secos das dosagens estudadas para cada teor de cal de carbureto adicionado.

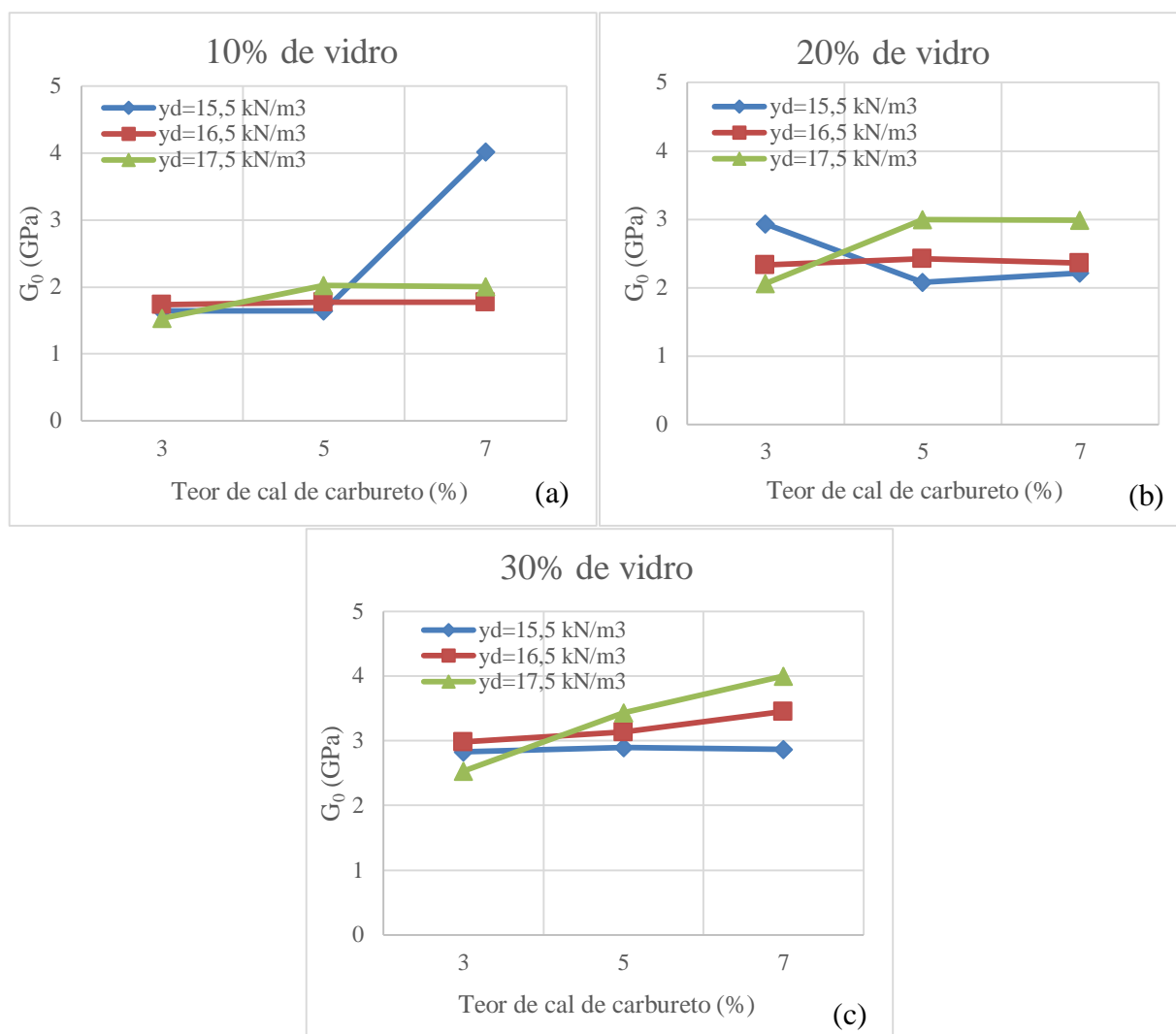


Figura 4.13: Variação da rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações –  $G_0$ ) em função de teor de cal de carbureto com aumento de teor de vidro a) 10%, b) 20% e c) 30%, aos 7 dias de cura.

#### 4.2.1.2. Rigidez em função de teor de vidro

A Figura 4.14 apresenta os resultados de rigidez da mistura álcali-ativada de acordo com o teor de vidro das dosagens estudadas em função da variação do teor de cal do carbureto e do peso específico aparente seco. Os resultados são mostrados em termos da média da triplicata de cada dosagem. A partir desses resultados, notamos que os corpos de prova com menor o teor de vidro e peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) apresentam menor rigidez e os corpos de prova com maior teor de vidro e  $\gamma_d$  apresentam maior rigidez. Podemos deduzir que quando maior o teor de vidro e  $\gamma_d$ , maior é a rigidez.



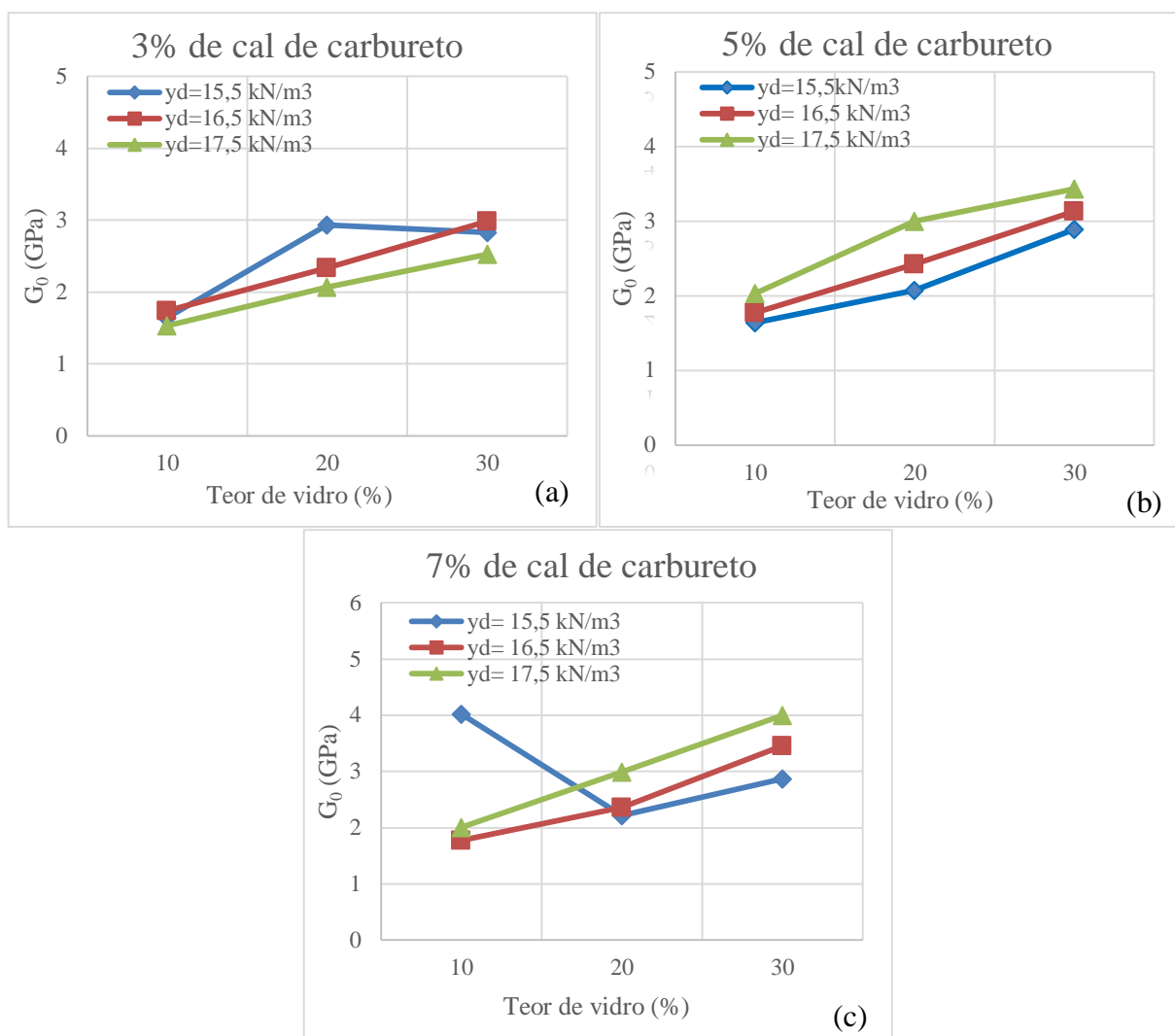


Figura 4.14: Variação da rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações –  $G_o$ ) em função de teor de vidro com aumento de teor cal de carbureto a) 3%, b) 5% e c) 7%, aos 7 dias de cura.

#### 4.2.1.3. Rigidez em função do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ )

Os resultados da rigidez das misturas em função de peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de acordo com variação do teor de cal de carbureto e do teor de vidro são apresentados na figura 4.15. Os resultados são mostrados em termos da média da triplicata de cada dosagem. A partir desses resultados, nota-se que quanto maior o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), maior é a rigidez também de forma proporcionalmente, de acordo com o aumento no teor de pó de vidro e cal de carbureto.

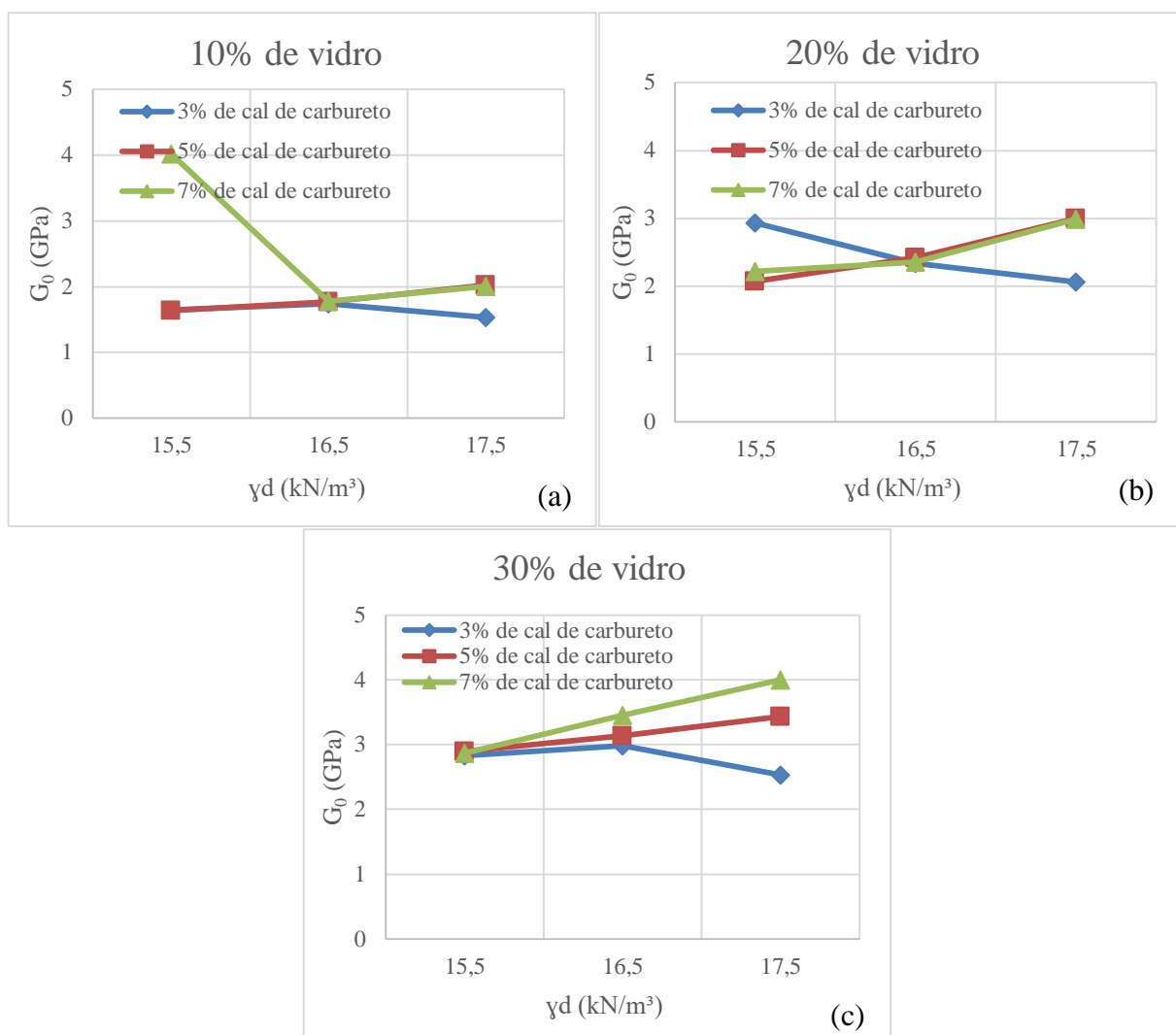


Figura 4.15: Variação da rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações –  $G_o$ ) em função do peso específico aparente seco com aumento de teor de vidro a) 10%, b) 20% e c) 30% e de cal de carbureto, aos 7 dias de cura.

#### 4.2.1.4. Rigidez em função da razão entre porosidade e teor volumétrico dos agentes cimentantes (índice $\eta/B_{iv}$ )

Os resultados da rigidez da mistura obtida pelo módulo cisalhante a pequena deformação ( $G_o$ ) em função do índice  $\eta/B_{iv}$  são apresentados nas figuras 4.16 e 4.17. Os resultados com álcali-ativação foram obtidos neste trabalho; já os dados da figura 4,17, sem álcali-ativação, foram obtidos por Winter (2018). Observa-se a partir dos resultados que o módulo cisalhante a pequenas deformações aumenta com a redução do índice  $\eta/B_{iv}$  conforme o esperado. Além disso, algumas amostras, deste trabalho, compostas por 10% de pó de vidro não apresentam uma boa leitura da propagação da onda S para o cálculo do módulo cisalhante. Ao comparar as duas figuras, percebemos que as

amostras da mistura ativada por NaOH têm um módulo cisalhante a pequenas deformações maior do que as amostras sem ativação alcalina, numa razão de quase três vezes ( $4,3 \times 10^4 / 1,6 \times 10^4 = 2,69$ ).

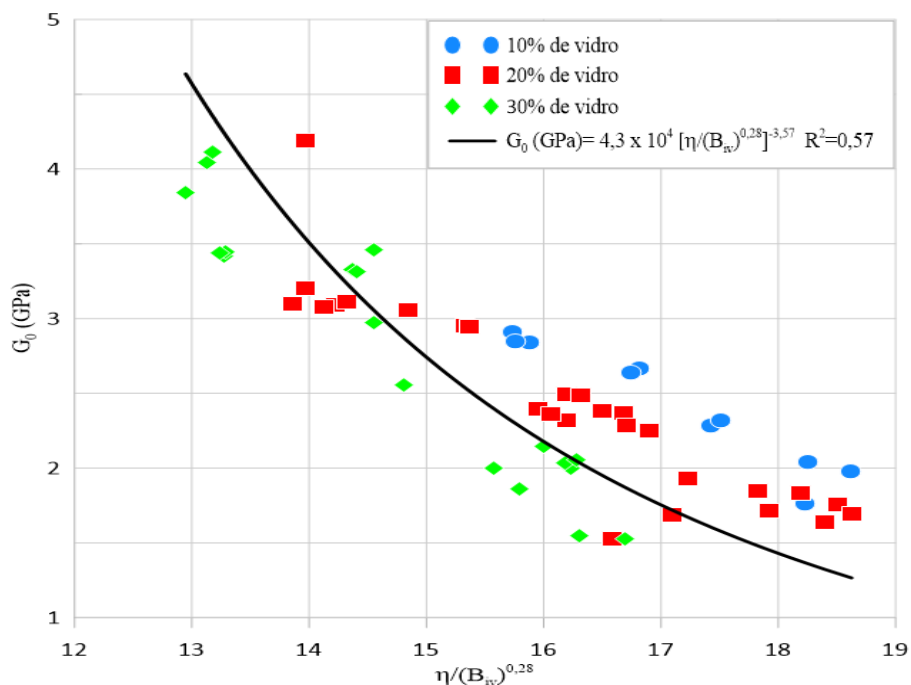


Figura 4.16: Relação da rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações –  $G_0$ ) em função do índice  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$  com ativação alcalina a 3 mols de todos os corpos de prova, aos 7 dias de cura.

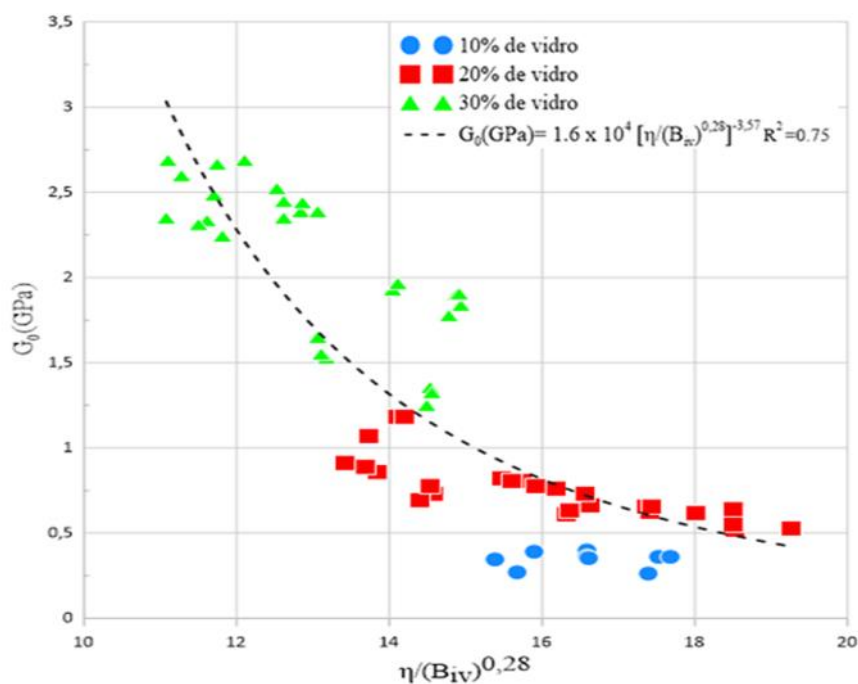


Figura 4.17: Relação da rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações –  $G_o$ ) em função do índice  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$  sem ativação alcalina de todos os corpos de prova, aos 7 dias de cura (Adaptado de WINTER, 2018)

#### 4.2.2. Rigidez aos vinte e oito (28) dias de curas

##### 4.2.2.1. Rigidez em função de teor de cal de carbureto

Os resultados da rigidez, verificada através módulo cisalhante a pequenas deformações ( $G_o$ ), do geopolímero formado em função do teor de cal carbureto empregados são apresentados nas Figuras 4.18. Os resultados são mostrados em termos da média da triplicata de cada dosagem. A partir desses resultados, pode-se observar que a rigidez aumenta muito levemente com o aumento do teor cal de carbureto.

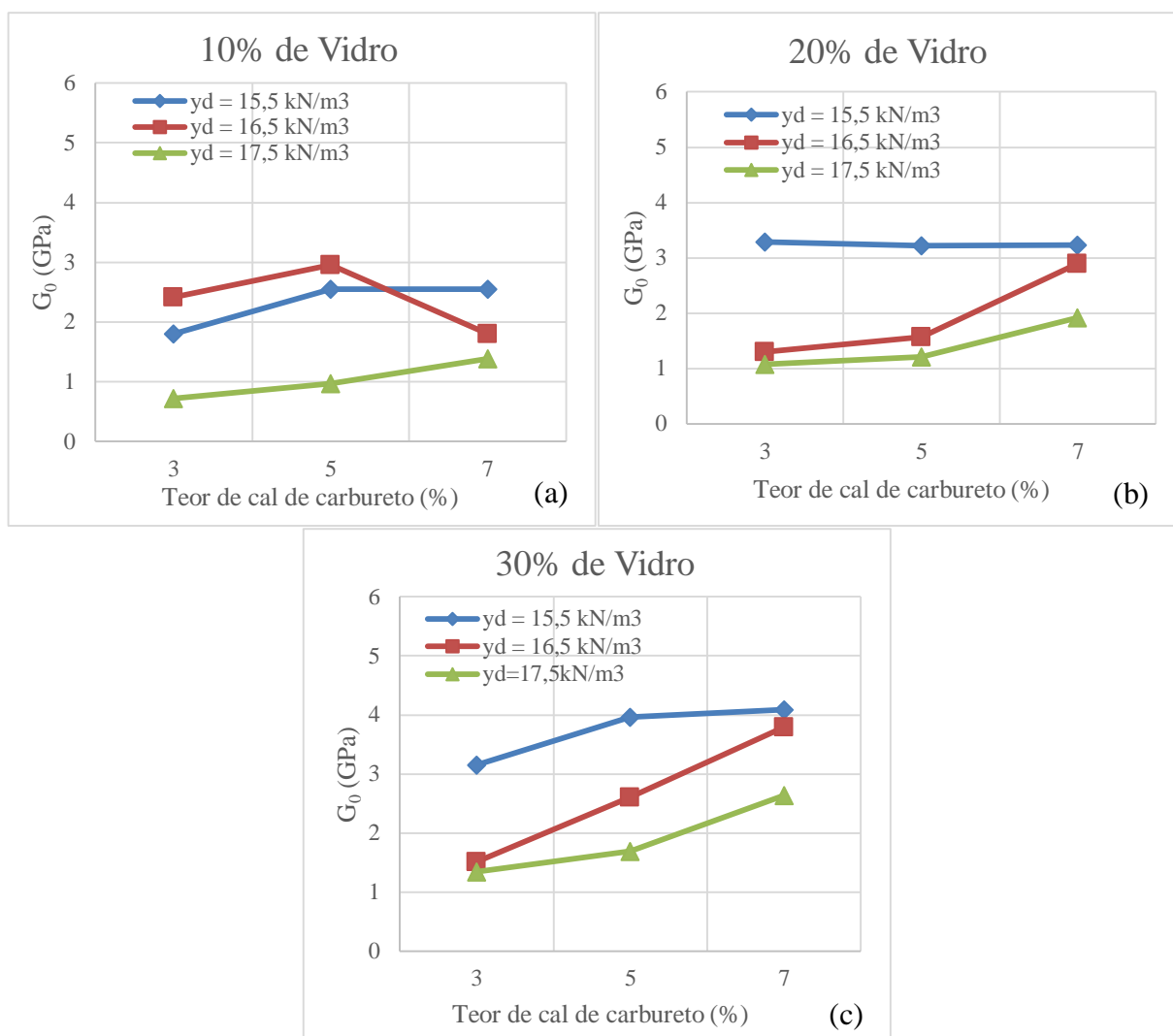


Figura 4.18: Variação da rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações –  $G_0$ ) em função de teor de cal de carbureto com aumento de teor de vidro a) 10%, b) 20% e c) 30%, aos 28 dias de cura.

#### 4.2.2.2. Rigidez em função de teor de vidro

Os resultados da rigidez do geopolímero formado em função de teor de vidro adicionado com aumento do teor de cal do carbureto e do peso específico aparente seco são apresentados na Figura 4.19. A partir desses resultados, nota-se que a rigidez aumentou sutilmente com o aumento de teor de vidro especialmente por de teor de cal do carbureto 7%. Além disso, somente o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de  $17,5 \text{ kN/m}^3$  apresenta um incremento da rigidez com aumento de teor de vidro e cal de carbureto.

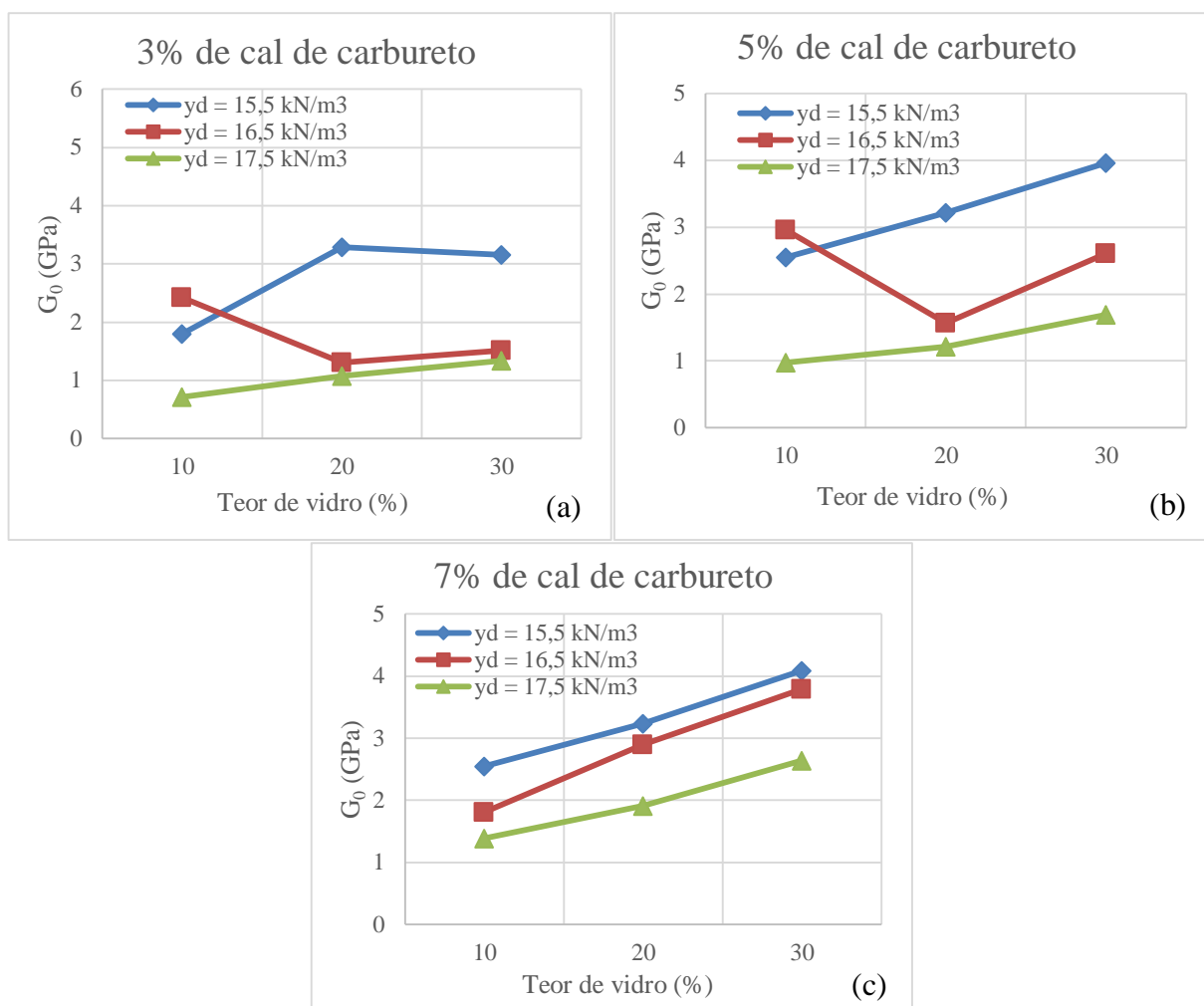


Figura 4.19: Variação da rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações –  $G_o$ ) em função de teor de vidro com aumento de teor cal de carbureto a) 3%, b) 5% e c) 7%, aos 28 dias de cura.

#### 4.2.2.3. Rigidez em função em função do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ )

Os resultados da rigidez do geopolímero formado em função do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) em relação ao teor de cal de carbureto e do teor de vidro são apresentados na Figura 4.20. A partir desses resultados, percebemos que a rigidez diminui com o aumento de peso específico, teor de cal de carbureto e de teor de vidro.

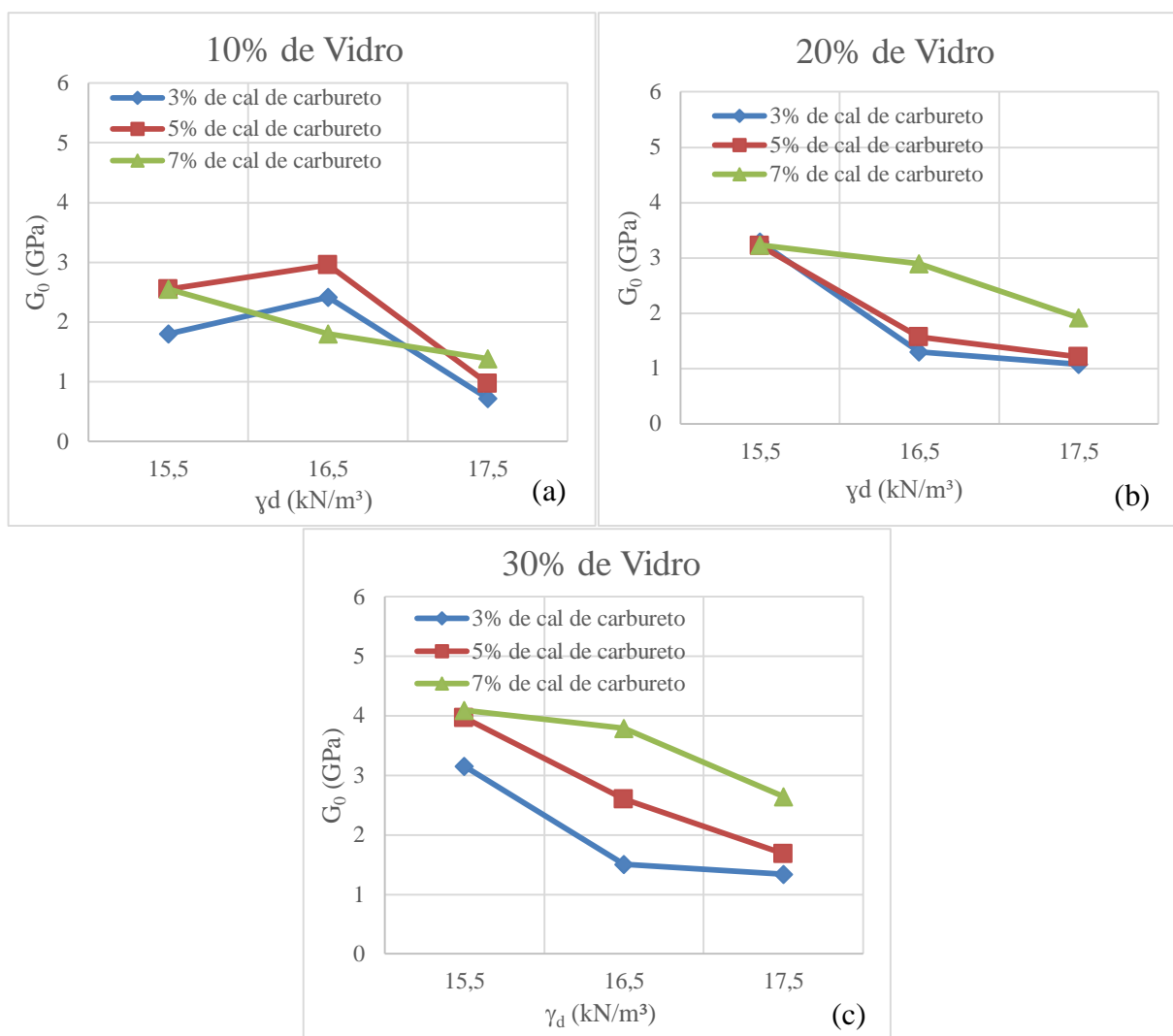


Figura 4.20: Variação da rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações –  $G_o$ ) em função do peso específico aparente seco com aumento de teor de vidro a) 10%, b) 20% e c) 30% e de cal de carbureto, aos 28 dias de cura.

#### 4.2.2.4. Rigidez em função da razão entre porosidade e teor volumétrico dos agentes cimentantes (índice $\eta/B_{iv}$ )

Os resultados da rigidez da mistura, obtida pelo módulo cisalhante a pequena deformação ( $G_o$ ), de geopolímero curada aos 28 dias a uma temperatura controlada de 23° C são mostrados na Figura 4.21. A partir desses resultados, notamos quando o índice  $\eta/B_{iv}$  diminui, a rigidez aumenta. Além disso, pode-se observar que as amostras que contêm um teor de pó de 10% apresentam maior rigidez do que aquelas que contém 30% de vidro. Verifica-se que há grande dispersão nos resultados. Na comparação entre as curvas de rigidez para 7 dias (Figura 4.16) e para 28 dias, verifica-se, na média não ocorre variação na rigidez em função do tempo de curas ( $4,6 \times 10^4 / 4,3 \times 10^4 = 1,07 \sim 1,0$ ).

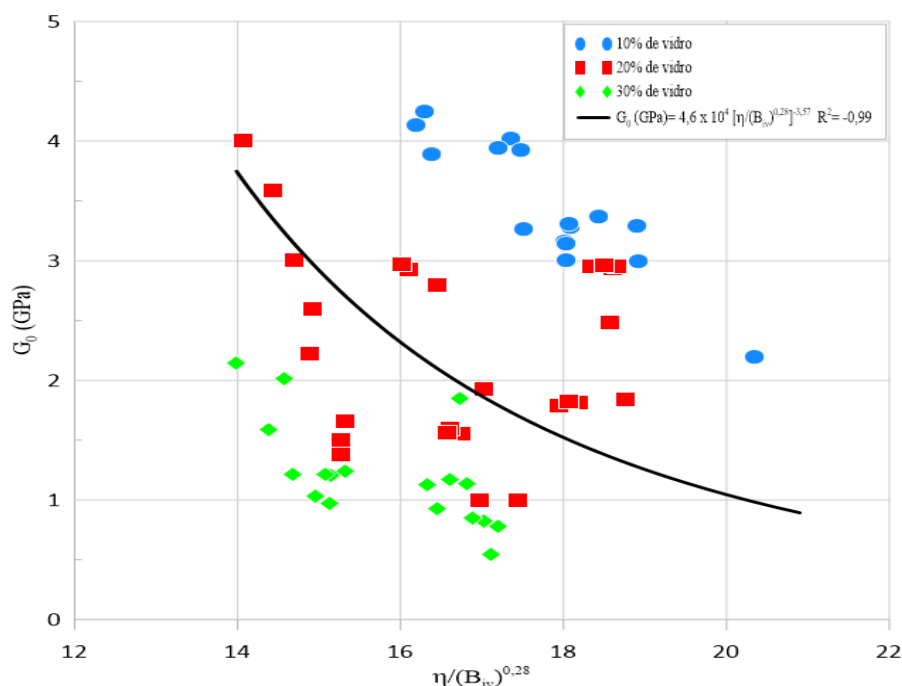


Figura 4.21: Relação da rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações –  $G_0$ ) em função do índice  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$  com ativação alcalina a 3 mols de todos os corpos de prova, aos 28 dias de cura.

### 4.3. ENSAIOS DE DURABILIDADE

Os resultados do ensaio de durabilidade da dosagem das misturas de areia fina, cal de carbureto, pó de vidro, e hidróxido de sódio (NaOH), realizados aos sete dias, são apresentados neste item em termo de perda de massa por ciclo e perda de massa acumulada no final dos doze ciclos de molhagem e secagem, conforme explicado na seção do programa experimental.

#### 4.3.1. Durabilidade em função de teor de cal de carbureto

As Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 destacam os resultados do ensaio da durabilidade em termos de perda de massa por ciclo e perda de massa acumulada de acordo com o teor cal do carbureto. Observa-se através dessas figuras, que quanto maior o teor de cal de carbureto e maior o teor de pó de vidro, menor é a perda de massa por ciclo e a perda acumulada de massa ao final dos ensaios. Assim, observa-se que a maior perda de massa é obtida com o menor peso específico aparente seco (estrutura menos compacta) ( $\gamma_d = 15,5 \text{ kN/m}^3$ ), menor teor cal de carbureto (3%) e menor teor de pó de (10%).



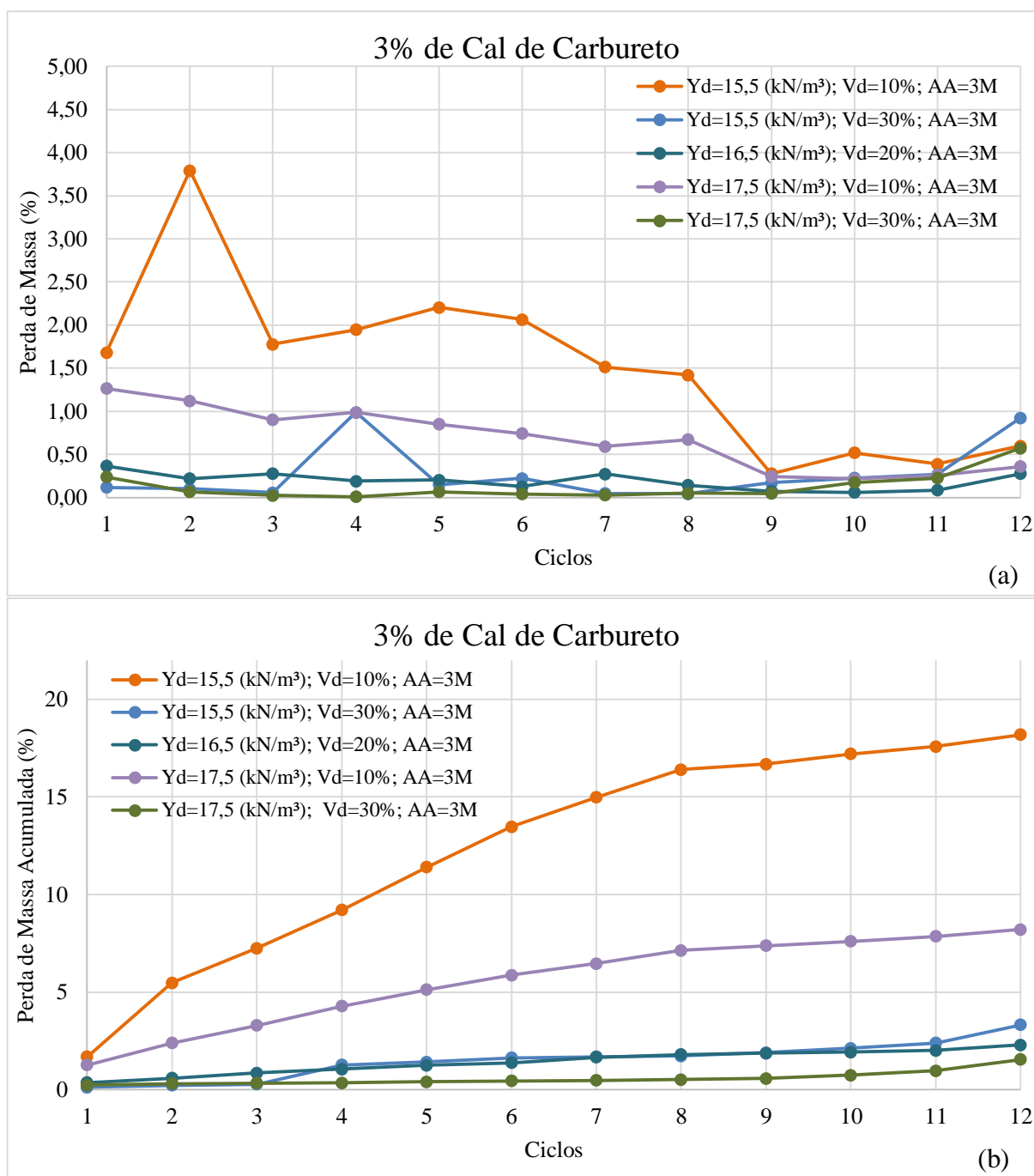


Figura 4.22: Resultados os ensaios de durabilidade: (a) perda de massa por ciclo e (b) perda de massa acumulada ao longo dos ciclos, para 3% de cal de carbureto.

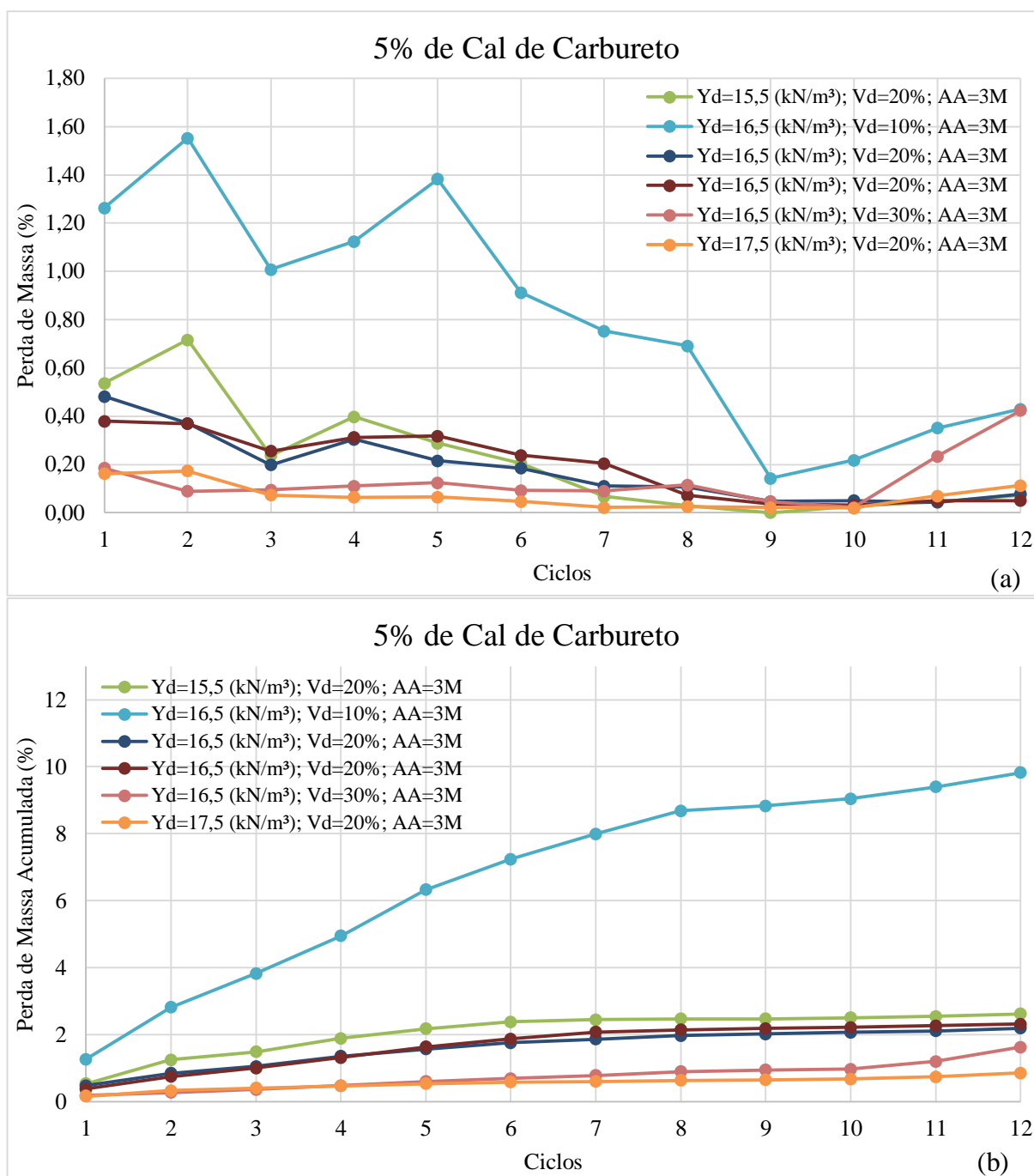


Figura 4.23: Resultados os ensaios de durabilidade: (a) perda de massa por ciclo e (b) perda de massa acumulada ao longo dos ciclos, para 5% de cal de carbureto.

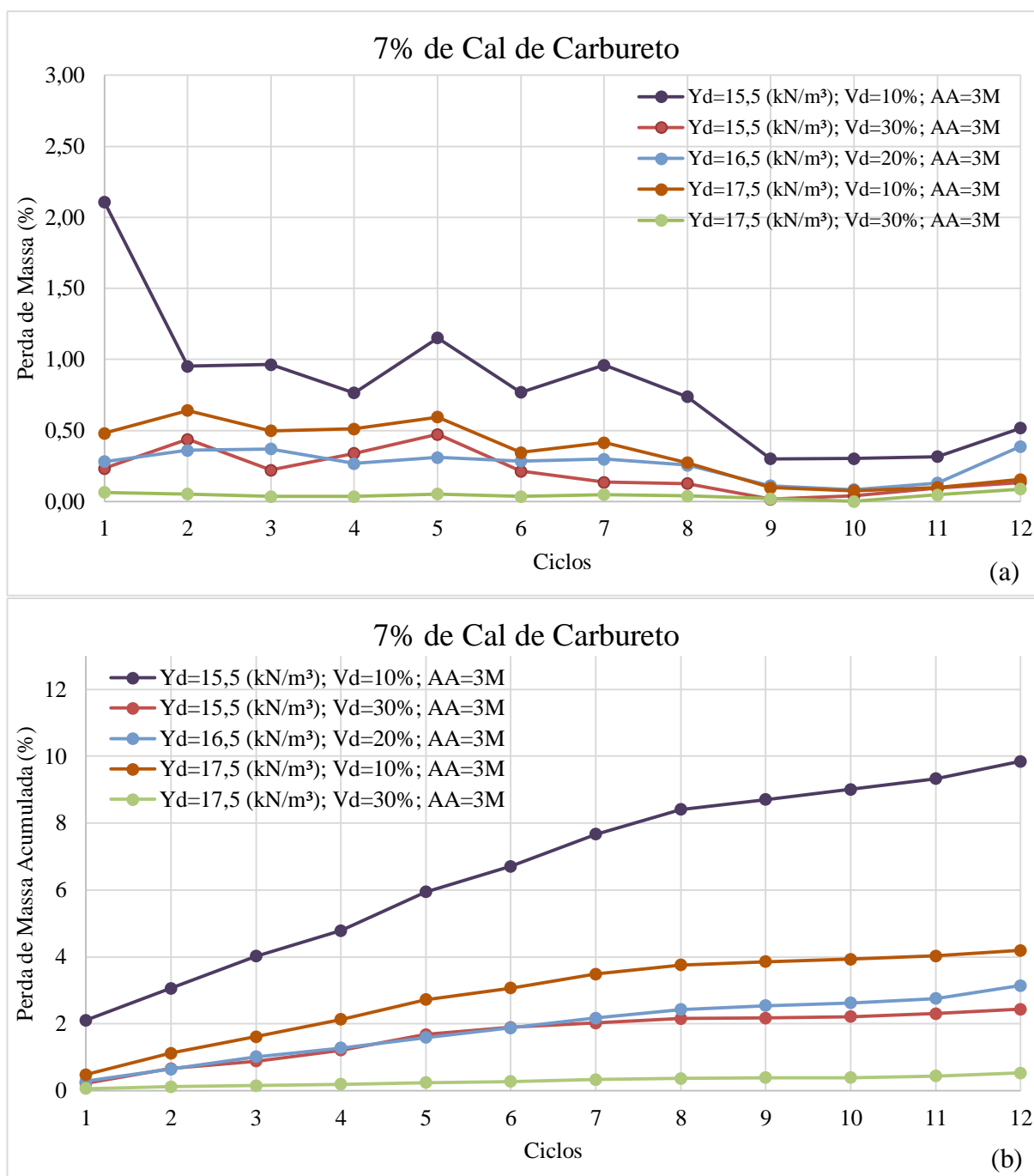


Figura 4.24: Resultados os ensaios de durabilidade: (a) perda de massa por ciclo e (b) perda de massa acumulada ao longo dos ciclos, para 7% de cal de carbureto.

### 4.3.2. Durabilidade em função de teor de vidro

As Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 mostram os resultados de ensaio de durabilidade em termos de perda de massa por ciclo e perda de massa acumulada de acordo com o teor de vidro adicionado. Observa-se através destas figuras, que quanto maior o teor de cal de carbureto e do peso específico aparente seco, menor é a perda de massa por ciclo e a perda acumulada de massa. Assim, observamos que todos os corpos de prova que possuíam o teor de pó de vidro de 30% apresentaram uma perda de massa acumulada inferior a 4%, independentemente do teor de cal de carbureto e do valor peso específico aparente seco ( $\gamma_a$ ).

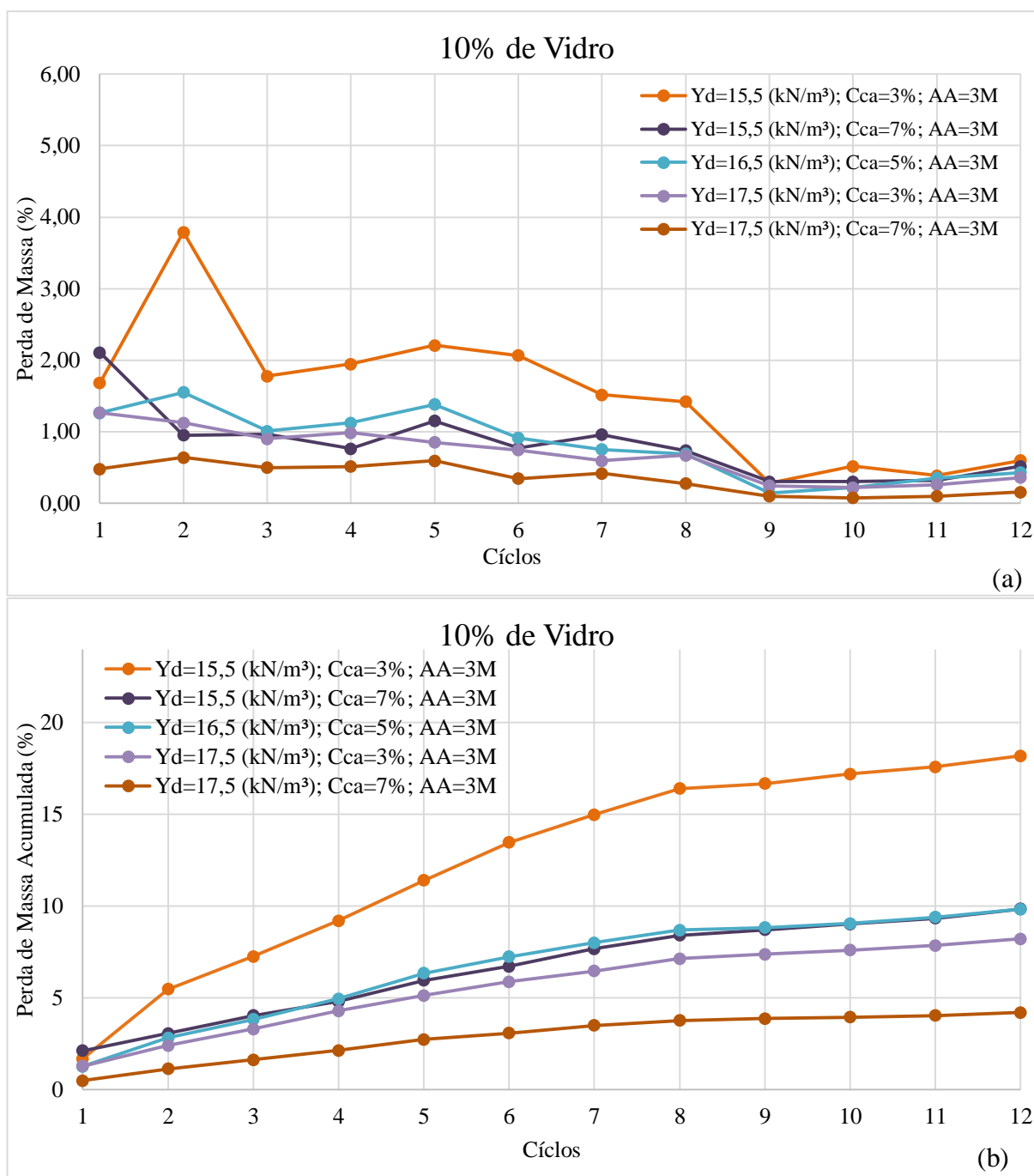


Figura 4.25: Resultados os ensaios de durabilidade: (a) perda de massa por ciclo e (b) perda de massa acumulada ao longo dos ciclos, para o teor de 10% de vidro.

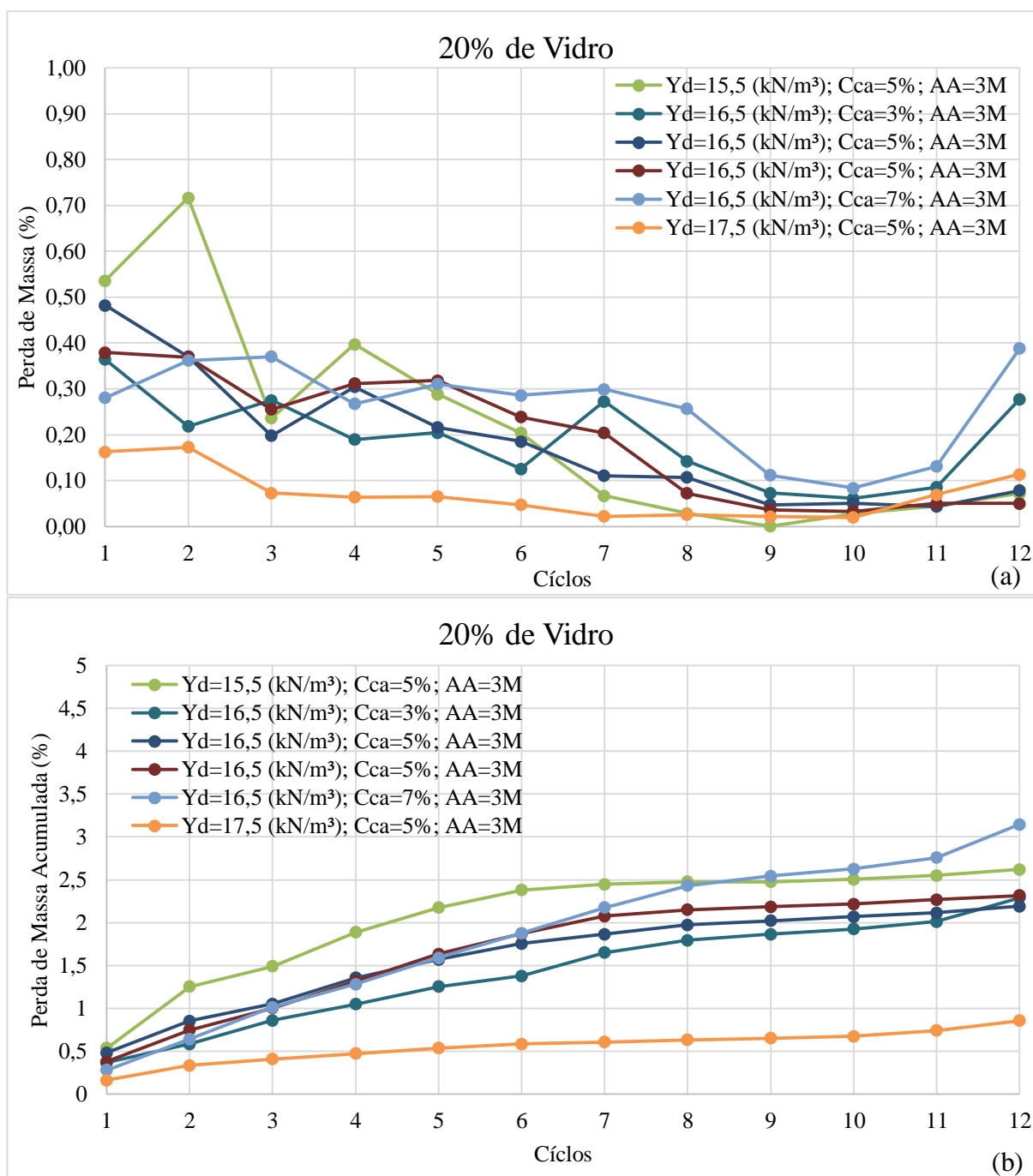


Figura 4.26: Resultados os ensaios de durabilidade: (a) perda de massa por ciclo e (b) perda de massa acumulada ao longo dos ciclos, para o teor de 20% de pó de vidro.

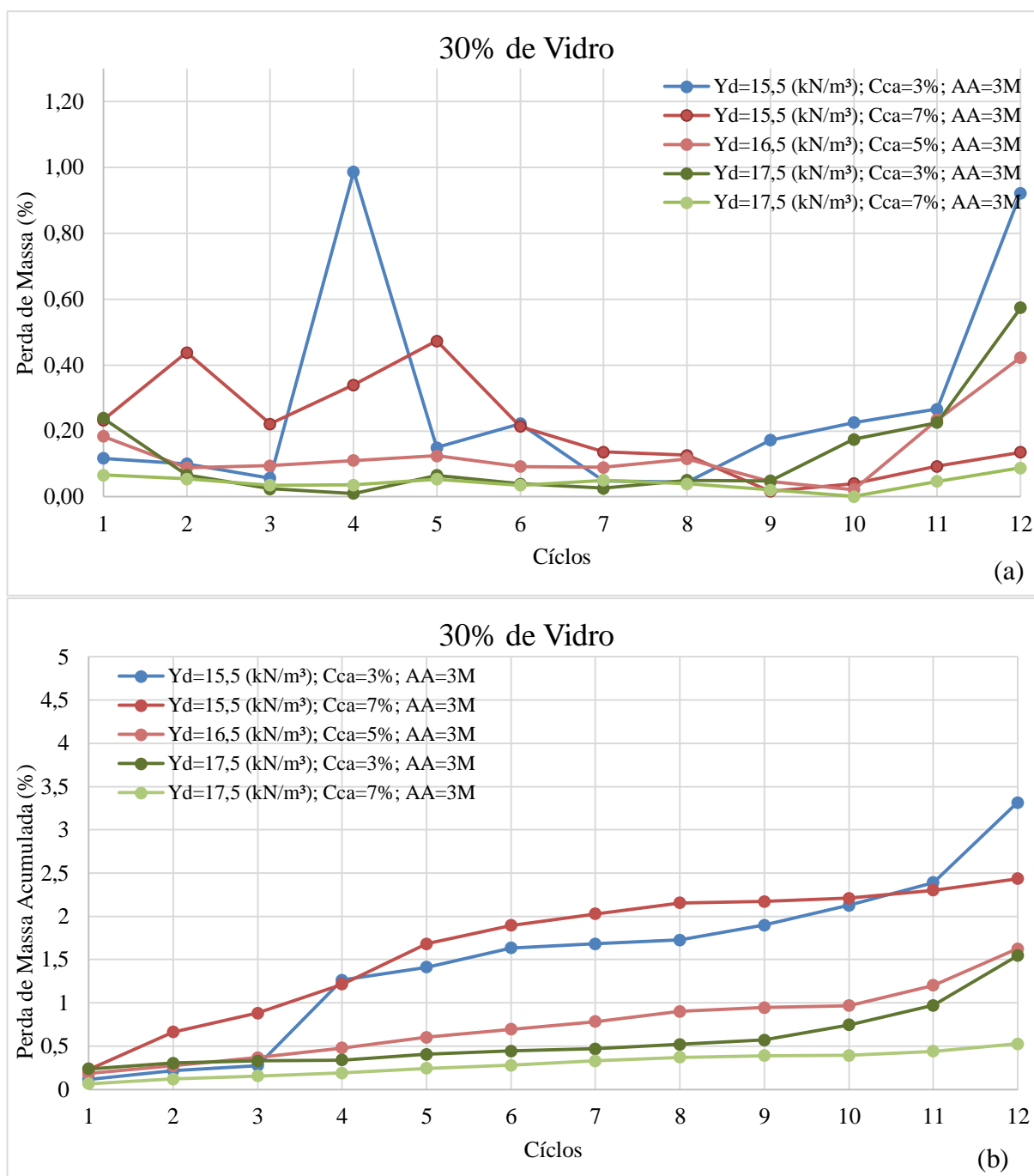


Figura 4.27: Resultados os ensaios de durabilidade: (a) perda de massa por ciclo e (b) perda de massa acumulada ao longo dos ciclos, para o teor de 30% de pó de vidro.

### 4.3.3. Durabilidade em função do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ )

As figuras 4.28, 4.29 e 4.30 mostram os resultados dos ensaios de durabilidade em termos de perda de massa individual e perda de massa acumulada de acordo com o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ). Como esperado, percebe-se dos resultados encontrados que, quando o peso específico aparente seco aumenta, a perda de massa por ciclo e acumulada diminui sistematicamente de acordo com o teor cal de carbureto e o teor de pó de vidro. Observa-se que a perda de massa acumulada de corpos de prova com peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de 17,5kN / m<sup>3</sup>, 7% de cal de carbureto e 30% de pó de vidro é muito baixa (menos de 1%), enquanto ao corpos de prova com  $\gamma_d = 15,5\text{kN/m}^3$ , 3% cal de carbureto e 10% de vidro é alto (superior a 18%).



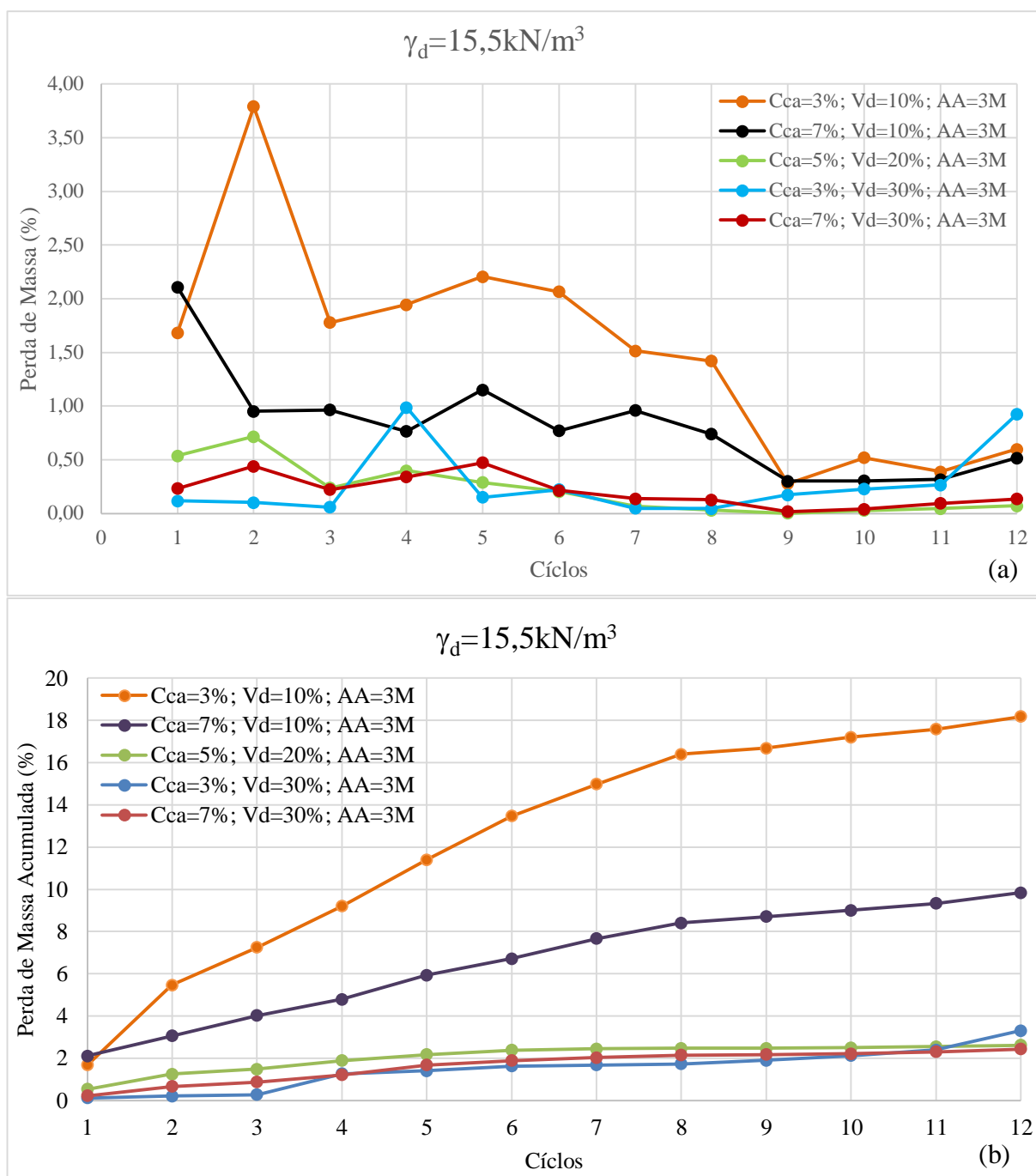


Figura 4.28: Resultados os ensaios de durabilidade: (a) perda de massa por ciclo e (b) perda de massa acumulada ao longo dos ciclos, para um peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de  $15,5 \text{ kN/m}^3$ .

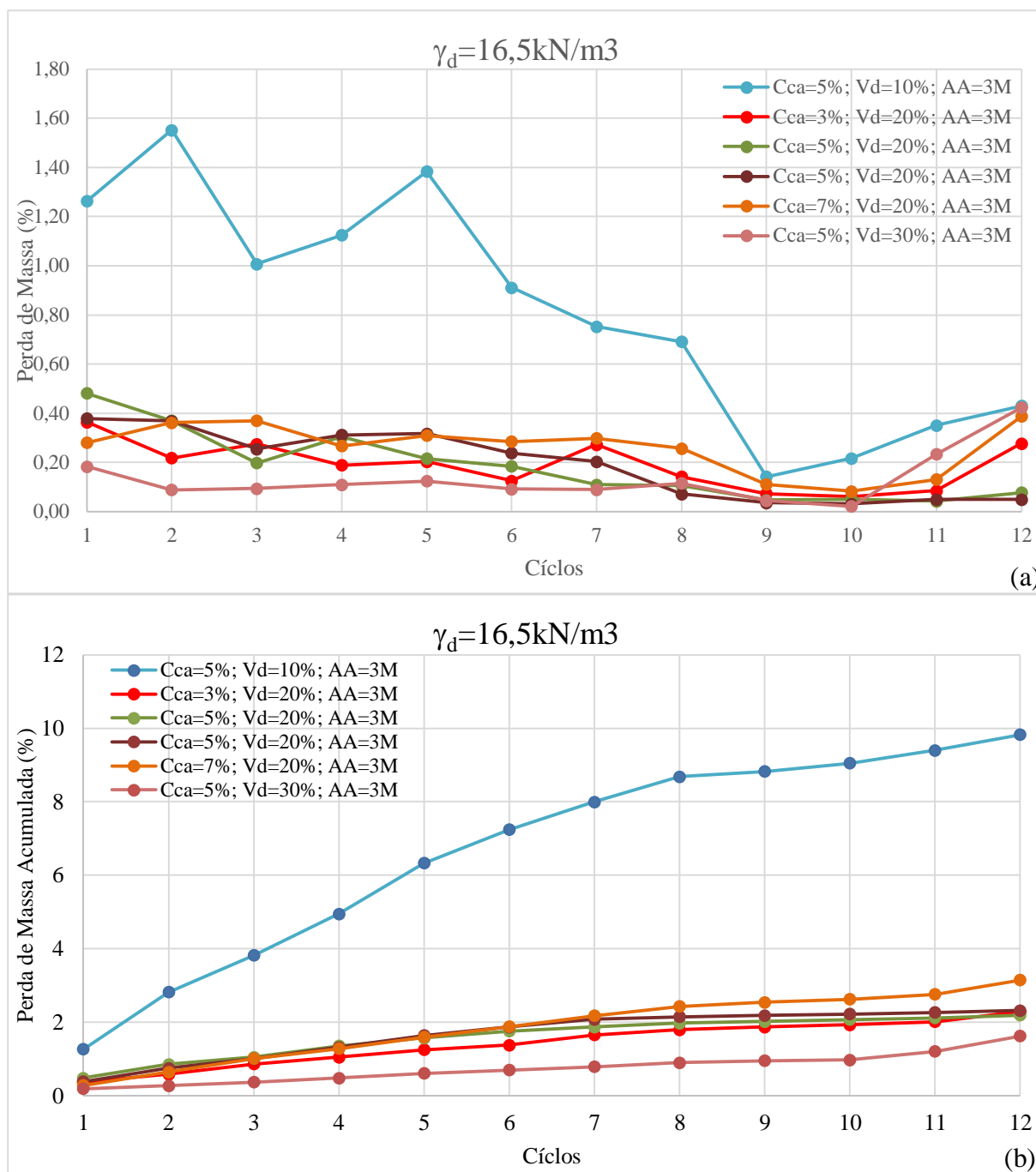


Figura 4.29: Resultados os ensaios de durabilidade: (a) perda de massa por ciclo e (b) perda de massa acumulada ao longo dos ciclos, para um peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de  $16,5 \text{ kN/m}^3$ .

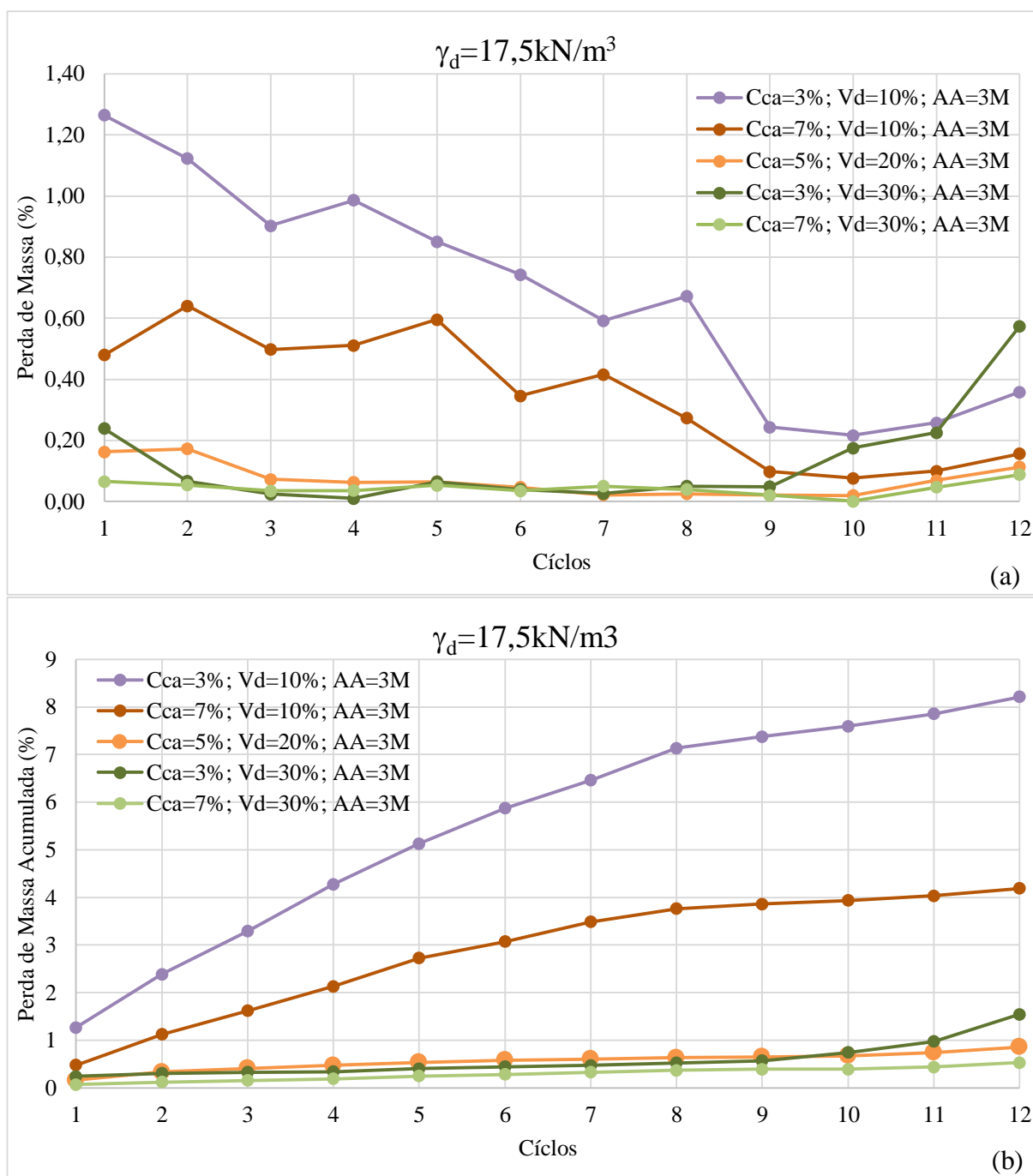


Figura 4.30: Resultados os ensaios de durabilidade: (a) perda de massa por ciclo e (b) perda de massa acumulada ao longo dos ciclos, para um peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de 15,5kN/m<sup>3</sup>.

#### 4.3.4. Durabilidade em função da razão entre porosidade e teor volumétrico dos agentes cimentantes (índice $\eta/B_{iv}$ )

A perda de massa acumulada da mistura álcali-ativada, obtida nesta pesquisa e da mistura não ativada avaliada (realizada por WINTER, 2018) em função do índice  $\eta/B_{iv}$  são apresentadas nas Figuras 4.31 e 4.32, respectivamente. A partir desses resultados, nota-se que quando o índice  $\eta/B_{iv}$  diminui, a perda de massa também diminui. Da mesma forma, observa-se que as amostras com 10% de pó de vidro apresentam uma perda de massa maior do que as amostras compostas por 30% de pó de vidro. Comparando os dois resultados, nota-se que a perda de massa acumulada (PMA) das amostras sem ativação alcalina é da ordem de três vezes maior em relação às amostras com ativação alcalina ( $0,3 \times 10^{-9} / 9 \times 10^{-9} = 3,33$ ).

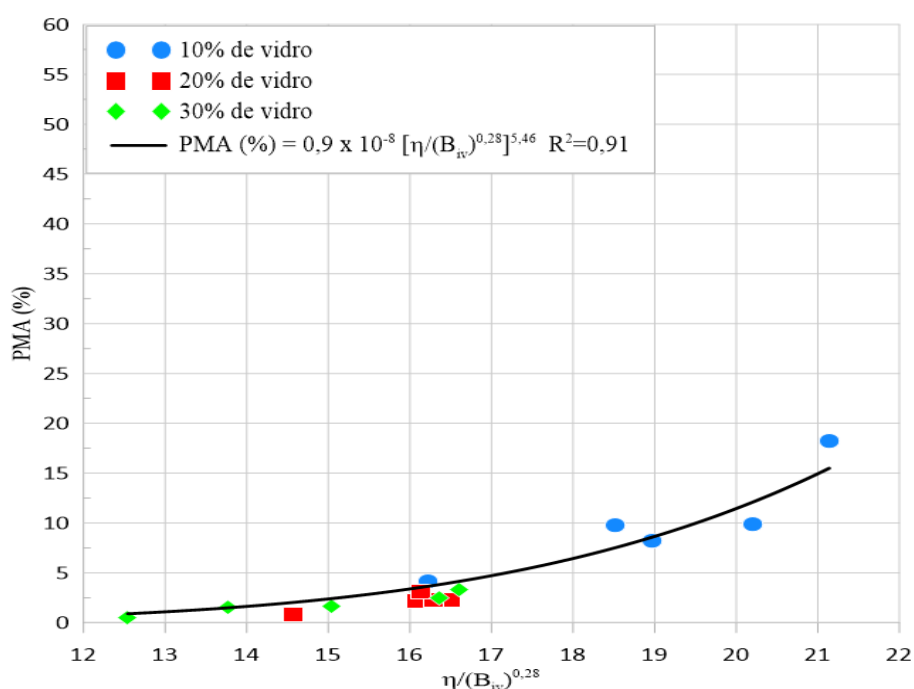


Figura 4.31: Resultado dos ensaios de durabilidade pela perda de massa acumulada (PMA) em função do fator  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$  para as dosagens com ativação alcalina, a 3 mols.

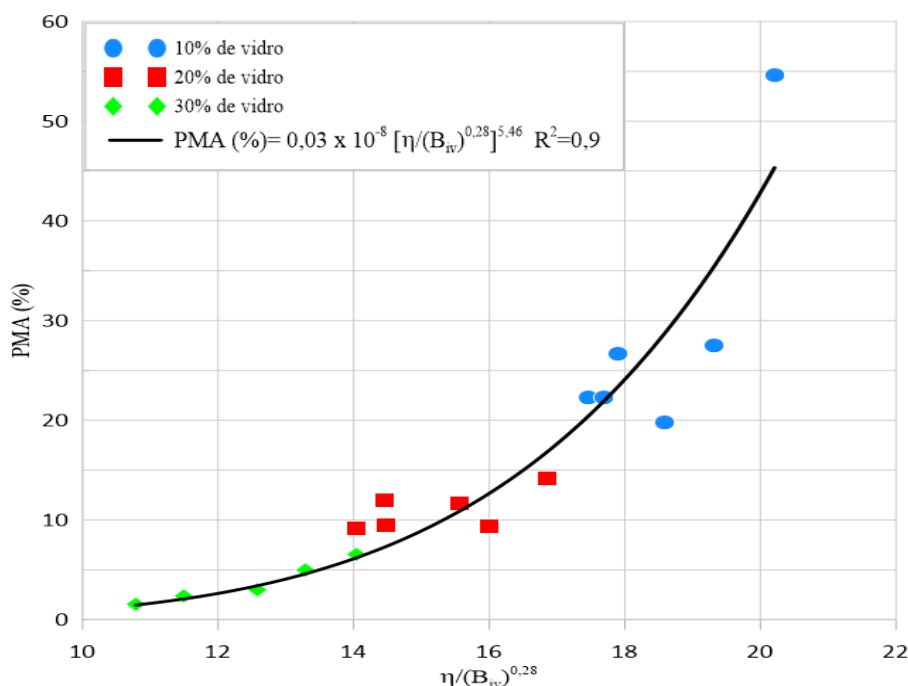


Figura 4.32: Resultado dos ensaios de durabilidade pela perda de massa acumulada (PMA) em função do fator  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$  para as dosagens sem ativação alcalina (WINTER, 2018).

#### 4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DERESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E DE RIGIDEZ

##### 4.4.1. Resistência à compressão simples

De modo avaliar o efeito das variáveis independentes (teor de cal - %C, teor de pó de vidro - %V, peso específico aparente seco -  $\gamma_d$ , e tempo de cura -  $t$ ) sobre a variável dependente ou resposta (resistência à compressão simples -  $q_u$ ) foi realizada uma análise estatística dos resultados dos ensaios, através da análise de variância (ANOVA). A análise de variância (ANOVA) foi feita a partir da regressão linear múltipla, considerando inicialmente a ação das variáveis independentes atuando de forma isolada, após efetuou-se nova análise considerando também a combinação das variáveis. Para a regressão linear múltipla, considerou-se um nível de significância de 95%, sendo que para as variáveis independentes terem influência significativa sobre variável dependente, o valor do teste-P deve ser inferior a 0,05.

Na primeira análise, considerando os ensaios de resistência para 7 dias de cura, observou-se que para todos os valores do teste-P das três variáveis independentes analisados individualmente e combinados são inferiores a 0,05. A regressão linear múltipla, considerando os fatores

isoladamente, resultou em um coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{\text{ajustado}}$ ) de 82,69%. Agora, considerando os fatores individuais e a combinação entre estes, obteve-se um  $R^2_{\text{ajustado}}$  de 96,38%. Isto mostra que há influência de cada variável, bem como existe uma interrelação entre elas. Neste sentido, por exemplo, para ocorrerem reações pozolânicas, há influência isolada do teor de cal e do teor de vidro moído, bem como há influência combinada entre os teores. A figura 4.33 mostra a variação da resistência à compressão simples, aos 7 dias de cura, em função de cada variável estudada. Aos 28 dias, verifica-se a mesma tendência, sendo verificado um  $R^2_{\text{ajustado}}$  de 80,27%, na análise da influência das variáveis isoladamente; e 94,93%, incluindo a combinação dos fatores.

A figura 4.34 mostra a variação da resistência à compressão simples, aos 28 dias de cura, em função de cada variável estudada. Agora, reunindo todos os resultados, levando em consideração o tempo de cura ( $t$ ) como uma variável independente, nota-se que este também é uma variável significativa estatisticamente, contribuindo para o aumento da resistência. Pela análise das variáveis isoladamente obtém-se um  $R^2_{\text{ajustado}}$  de 84,93%; sendo que a combinação das variáveis resulta em um  $R^2_{\text{ajustado}}$  de 97,40%, onde é possível observar que a somente uma combinação de variáveis de terceira ordem ( $\gamma_d$ , %C e %V) que é pouco significativa (teste-P de  $0,054 > 0,05$ ) na resistência à compressão simples, sendo as demais todas significativas.

Assim, observamos que quanto maior o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), o teor de vidro (%V), o teor de cal de carbureto (%C) e o tempo de cura ( $t$ ), maior é a resistência à compressão simples média do compósito formado (ver figura 4.35). Deduz-se que as quatro variáveis separadamente ou em combinação contribuem para o aumento da resistência em 7 e 28 dias.

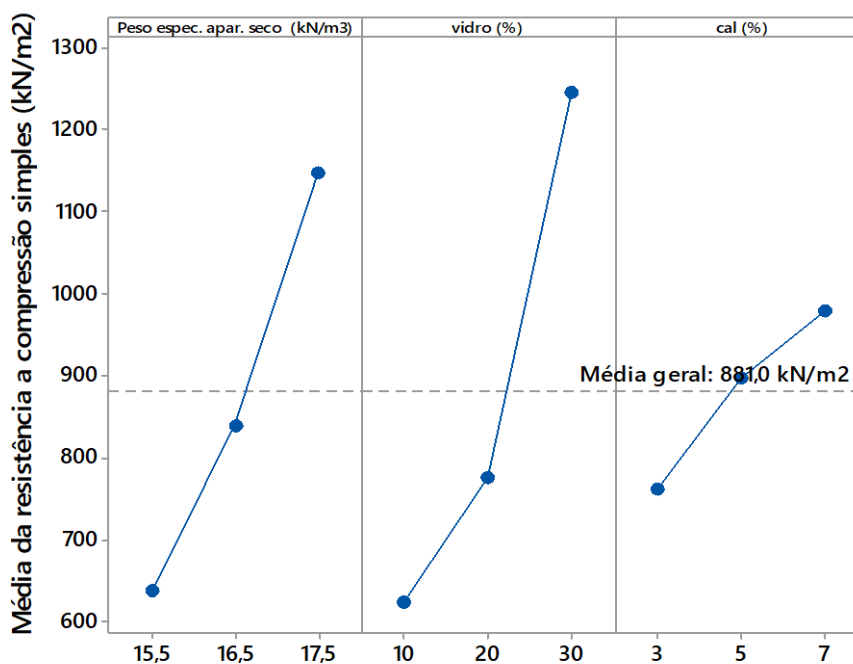


Figura 4.33: Efeitos principais das variáveis independentes na resistência à compressão simples média ( $q_u$ ) aos 7 dias de cura com NaOH a 3 molar.

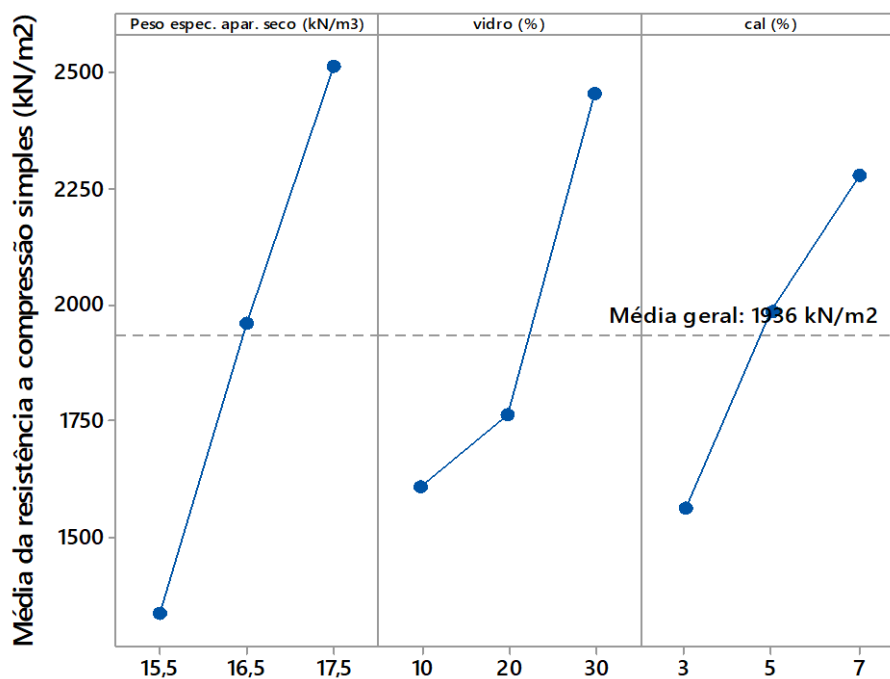


Figura 4.34: Efeitos principais das variáveis independentes na resistência a compressão simples média ( $q_u$ ) aos 28 dias de cura com NaOH a 3 molar.

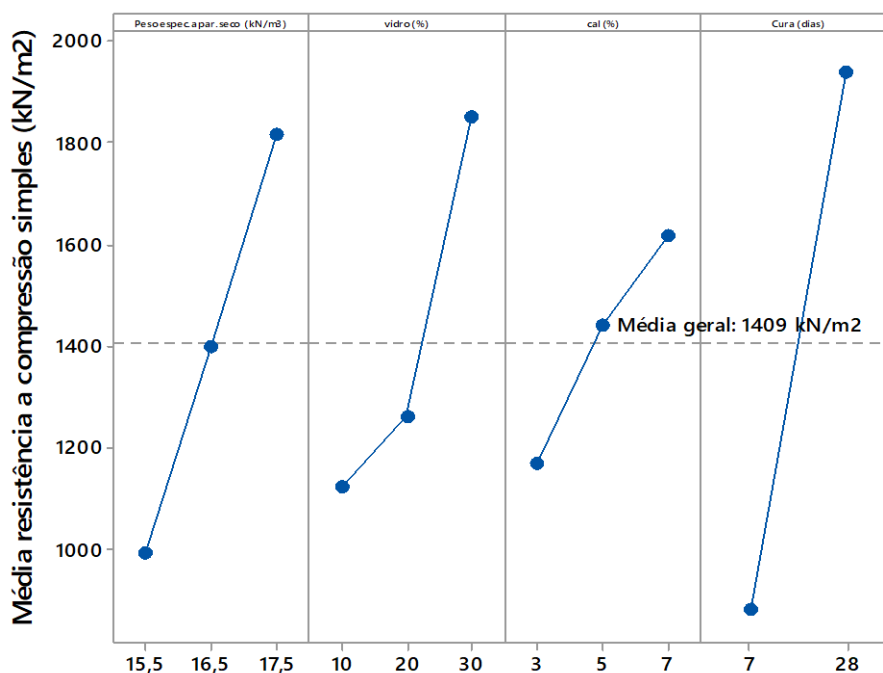


Figura 4.35: Efeitos principais de todas as variáveis independentes na resistência a compressão simples média ( $q_u$ ) com NaOH a 3 molar.

Pela análise anterior, não é possível verificar qual variável é mais significativa na resposta da variável dependente, ou seja, qual variável ou combinação contribui mais na resistência à compressão simples. Assim, para fazer uma classificação ou determinar os fatores que mais influenciam a resistência à compressão simples, é feita outra análise de variância (ANOVA) através da análise do gráfico de Pareto. O gráfico do tipo Pareto permite comparar a magnitude relativa e a significância estatística entre o efeito principal e sua interação. Porém esta análise somente pode ser feita em projetos fatoriais do tipo  $2^k$ , onde cada variável independente deve possuir somente dois níveis de variação (por exemplo: máximo e mínimo, maior e menor, -1 e +1, etc.). Desta forma, para esta análise foram considerados somente os maiores e menores valores dos fatores, já que pela análise das figura 4.35 é possível verificar uma variação próximo a um ajuste linear, quais sejam: (a) peso específico aparente seco de 15,5  $\text{kN/m}^3$  e 17,5  $\text{kN/m}^3$  (fator A); (b) teor de vidro de 10% e 30% (fator B); (c) teor de cal de carbureto de 3% e 7% (fator C); e (d) tempo de cura de 7 e 28 dias (fator D).

A figura 4.36 apresenta a análise de variância através do gráfico de Pareto, para os resultados de resistência aos 7 dias de cura. Pela figura, é possível verificar que todos os fatores são significativos, assim como sua combinação de segunda e terceira ordem, quando se considera o valor do teste-P inferior a 0,05 (95% de significância), de modo que todos os fatores e a



combinação resultam em um efeito estabilizado com valor acima de 2,13 (linha de referência obtida para a significância adotada). Pode-se observar que o fator mais significativo é B (teor de vidro), seguido de A (peso específico aparente seco -  $\gamma_d$ ), C (teor de cal de carbureto), a combinação BC (reação pozolânica), as combinações ABC, AB e AC.

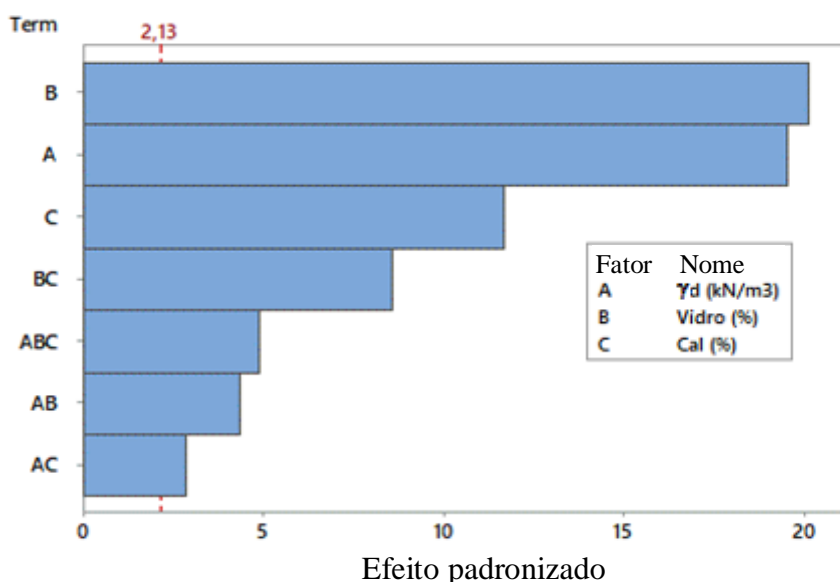


Figura 4.36: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados na resistência à compressão simples para 7 dias de cura.

Ao comparar os resultados desta pesquisa (com álcali-ativação por hidróxido de sódio – NaOH a 3 mols) com os de Winter (2018) (sem álcali-ativação) com as mesmas proporções de cal de carbureto, vidro e peso específico aparente seco, nota-se que os resultados da resistência à compressão simples deste trabalho são melhores que os de Winter (2018). Essa diferença mostra que a forte contribuição do vidro no aumento da resistência à compressão simples se deve à solução alcalina (NaOH) utilizada. De fato, a cal de carbureto ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) se dissolve na água, transformando-se em  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$ . Os íons  $\text{OH}^-$  contribuem para elevar o pH da mistura, tornando-a mais básica e o  $\text{Ca}^{2+}$  (cátion divalente) reage com o argilomineral (aluminossilicato- $\text{SiO}_4$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) para a formação de aluminossilicato de cálcio hidratado (C-A-S-H) ou silicato de cálcio hidratado (C-S-H) das reações pozolânicas (mistura não alcalino-ativada). Por outro lado, na mistura ativada por metal álcalis (geopolimerização), o mecanismo é baseado em  $M^{n+}$  ( $\text{Na}^+$ , íon monovalente, neste trabalho) e  $\text{OH}^-$  liberado pelo ativador alcalino  $Mn\text{OH}$  (NaOH, neste trabalho) após dissolver em água. O  $\text{OH}^-$  participa na elevação do pH e  $\text{Na}^+$  participa na dissociação ou quebra das ligações dos aluminossilicatos ( $\text{SiO}_4$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Este mecanismo leva à formação de gel de silicato de sódio hidratado (N-S-H). Além disso, o pó de vidro possui um alto teor de  $\text{Na}^+$  do

óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), o que leva a um aumento rápido e enorme de seus íons no sistema (PASCUAL *et al.*, 2014). No entanto, de acordo com Mitchell e Soga (2005), o  $\text{Na}^+$  pode substituir o  $\text{Ca}^{2+}$  e o  $\text{Ca}^{2+}$  pode substituir o  $\text{Na}^+$ , dependendo da natureza da mistura. Essa mudança depende principalmente do tamanho, valência e abundância relativa de diferentes tipos de íons. Os íons  $\text{Na}^+$  são menores que os íons  $\text{Ca}^{2+}$  (XU *et al.*, 2000; MITCHELL e SOGA, 2005). Assim, foi demonstrado por McCormick *et al.* (1989 apud XU *et al.* 2000) que a ligação dupla entre cátion e ânion se torna mais significativo quando o tamanho do cátion na mistura aumenta. Os autores mostraram também que o cátion tamanho menor facilita mais a reação do duplo-íon com os silicatos oligoméricos, como silicatos monoméricos, diméricos ou triméricos, como componente principal ( $\text{SiO}_4$ ) do pó de vidro. Portanto, é possível que o  $\text{Na}^+$  do NaOH e também do  $\text{Na}_2\text{O}$  (componente do vidro) com seu pequeno tamanho sejam mais ativos no silicato ( $\text{SiO}_4$ ) do vidro do que o  $\text{Ca}^{2+}$  (tamanho maior) do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Isso justifica a grande reação do vidro em relação à cal de carbureto na resistência do material formado.

Pelos resultados também é possível perceber que o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$  – fator A) tem grande importância, mostrando o efeito do intertravamento, pela aproximação das partículas, e consequente redução do índice de vazios, tem na resistência à compressão simples. Neste sentido, como a areia fina é uniforme, isenta de finos, o pó de vidro contribui para o preenchimento dos vazios da areia, e conseqüentemente, aumentar o número de contatos entre os grãos.

Aos 28 dias de cura, como mostrado na figura 4.61, todos os fatores também são significativos individualmente. Assim, percebemos que o fator mais significativo é o A (peso específico aparente seco -  $\gamma_d$ ), seguido de B (teor de pó de vidro), a combinação AB (efeito do peso específico aparente seco mais o teor de vidro), C (teor de cal), as combinações AC, ABC e BC (reação pozolânica) em ordem decrescente, considerando que a linha de referência passa pelo valor do efeito padronizado de 2,12 (obtida para a significância de 95%) (ver figura 4.37). As combinações ABC e BC (reação pozolânica) não são significativas aos 28 dias.

De fato, aos 28 dias o efeito significativo de peso específico aparente seco pode ser justificado pela do aumento da densidade como mostrado em vários outros trabalhos que estipulam que quando maior peso específico aparente seco, maior é a compactação e o contato dos grãos, menor é o índice de vazios, menor é a permeabilidade e maior é a resistência do material. Este efeito, estatisticamente, se sobressai sobre o efeito das reações pozolânicas, a um maior tempo de cura. As reações pozolânicas, segundo comentado nos parágrafos anteriores, são reação que ocorrem entre o argilomineral (os aluminossilicatos) e a cal de carbureto com a evolução do tempo de cura,

---

Cocou Auxence Pierre Daassi-Gli (auxencedaassigli@gmail.com) Dissertação de Mestrado. PPGEC/UFGRS. 2020

as quais são lentas, portanto, o tempo de cura de 28 dias pode não ser suficiente para potencializar as reações pozolânicas, mesmo com a utilização de álcali-ativador. Embora as reações pozolânicas apresentem um efeito significativo para o aumento da resistência à compressão simples, verifica-se que o efeito da densificação pelo aumento do peso específico e efeito de filler é mais significativo mesmo aos 28 dias. Além disso, o hidróxido de sódio (NaOH) é especificamente usado como catalisador e acelerador de reação, impediria então os acontecimentos das reações entre  $\text{Ca}^{2+}$ , os íons de cal de carbureto e os  $\text{Si}^{4+}$  dos silicatos de vidro. Da mesma forma, a combinação entre ABC (o peso específico aparente seco, vidro e cal de carbureto), depende da reação pozolânica, o que significa que, se a reação pozolânica for insignificante, sua combinação com o peso específico aparente seco também seria insignificante, do ponto de vista estatístico.

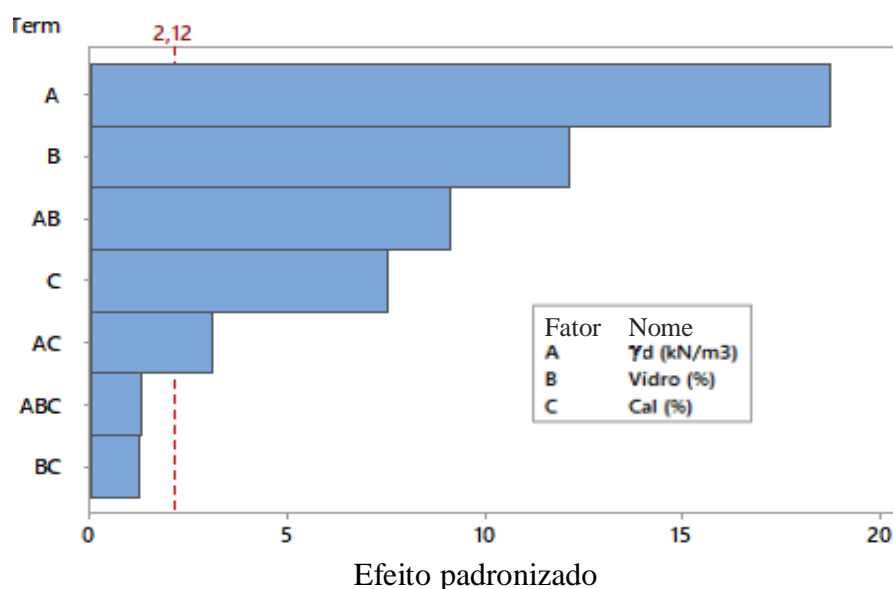


Figura 4.37: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados na resistência a compressão simples para 28 dias de cura.

Agora, juntando todos os resultados, para 7 dias e 28 dias de cura, nota-se que o fator que mais influencia a resistência é o fator D (tempo de cura) seguido por A (peso específico aparente seco,  $\gamma_d$ ), B (teor de vidro), C (teor de cal de carbureto), AB, AD, ABD, BC, AC, ABCD e BCD considerando a linha de referência passando pelo valor do efeito padronizado de 2,04 (valor obtido para uma significância de 95%), conforme mostrado na figura 4.38. As combinações como BD, CD, ACD e ABC não são significativas para a resistência à compressão quando se considera o tempo de cura.

O efeito não significativo das combinações BD (pó de vidro mais o tempo de cura) e CD (teor de cal de carbureto mais o tempo de cura) pode ser justificado pelo fato de que não há reações químicas isoladas devido somente ao pó de vidro ao longo tempo, bem da cal de carbureto isolada. Por outro lado, verifica-se que as combinações BC (pó de vidro mais cal de carbureto) e BCD (pó de vidro mais cal de carbureto mais tempo de cura) são significativos, mostrando que ocorre influência na resistência das reações pozolânicas ao longo do tempo de cura. Da mesma forma, a areia fina estudada, é um material cristalino, e, portanto, não pode reagir com cal de carbureto, apesar da evolução do tempo de cura seja longa, portanto, o efeito não significativo da combinação CD (cal de carbureto com o tempo de cura).

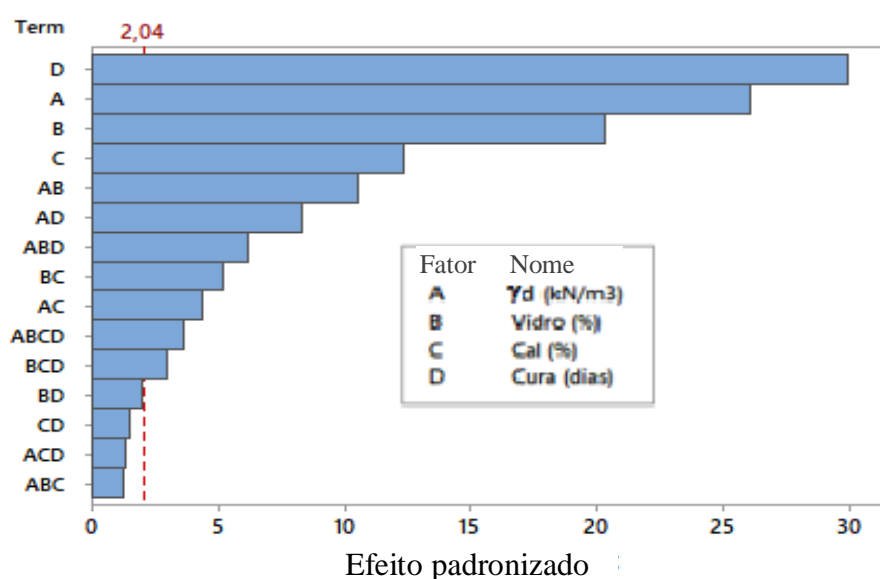


Figura 4.38: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados na resistência a compressão simples considerando todos os fatores.

#### 4.4.2. Módulo cisalhante a pequenas deformações ( $G_o$ )

Também se efetuou a análise de variância (ANOVA) dos fatores de controle da rigidez, dado pelo o módulo cisalhante a pequenas deformações ( $G_o$ ) aos 7 e 28 dias de cura pela regressão linear múltipla. A partir dessa análise, cada fator (peso específico aparente seco, teor de pó de vidro, teor de cal de carbureto e o tempo de cura) é avaliado individualmente (separadamente) e em combinação para verificar a importância e a significância estatística de todos eles.

A partir dos resultados das análises estatísticas, dos ensaios realizados com 7 dias de cura observa-se que todos os valores do teste-P dos fatores analisados individualmente e por combinação são inferiores a 0,05 (considerando um nível de significância de 95%) considerado como o valor limite, exceto o teor de vidro ( $0,507 >$  valor do teste-P de 0,05). Com isso percebe-se que a variação do

teor de vidro não contribui para a variação do módulo cisalhante, como pode ser visto na figura 4.39. Considerando as variáveis independentes isoladamente na regressão múltipla linear, obtém-se um coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajustado}$ ) de 35,19%, que demonstra que a regressão linear não é adequada para explicar a variação do módulo cisalhante. Agora, retirando-se o teor de vidro da análise, uma vez que não tem efeito significativo, verifica-se um  $R^2_{ajustado}$  de 37,57%, não significando uma melhora de ajuste na regressão linear. Agora, considerando a combinação das variáveis, obtém-se um  $R^2_{ajustado}$  de 67,00%, que demonstra uma melhora no ajuste linear, demonstrando que há interdependência entre as variáveis. Porém, mesmo efetuando a combinação dos fatores, verifica-se que o teor de vidro individualmente não é uma variável significativa ( $0,181 > \text{valor do teste-P de } 0,05$ ), embora seja significativo quando combinado com as outras variáveis. Fazendo-se uma nova regressão múltipla linear, retirando-se o vidro da análise combinada, obtém-se um  $R^2_{ajustado}$  de 37,09%, mostrando que um ajuste linear não é adequado. A partir da Figura 4.39, nota-se que, quanto maior o peso específico e maior o teor de cal de carbureto, maior é a rigidez, o que não ocorre com o aumento do teor de pó de vidro utilizado. De modo que o teor de pó de vidro não contribui no ganho da rigidez.

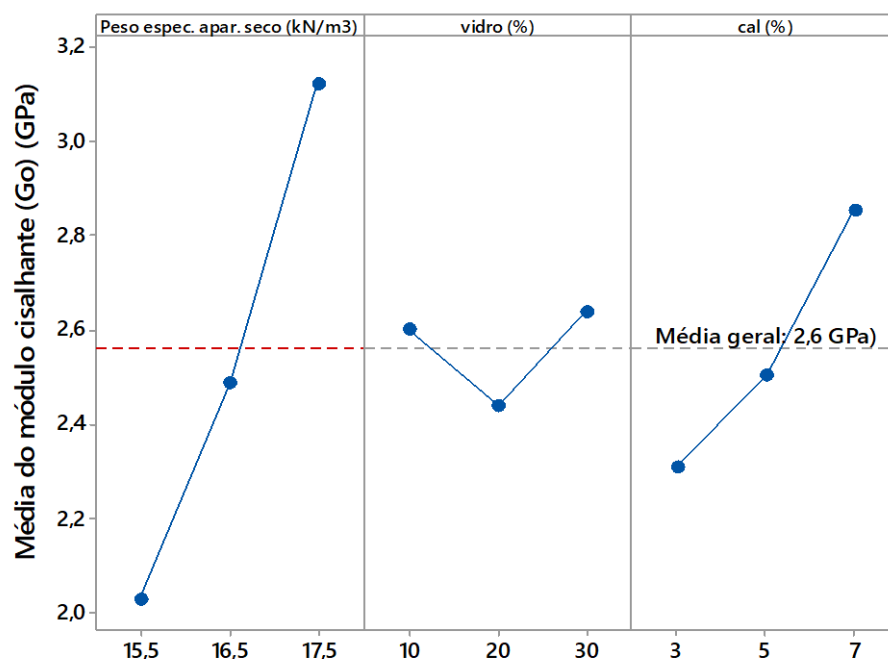


Figura 4.39: Efeitos principais dos fatores para a rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações -  $G_0$ ) aos 7 dias de cura com NaOH a 3 molar.

De fato, diferentemente ao ensaio da resistência à compressão simples, no qual o vidro participa consideravelmente ao ganho da resistência, aos 7 dias de cura, pela reação de NaOH e  $Na_2O$  com

a água, que favoreceriam a abundante dissolução dos íons  $\text{Si}^{4+}$  através os cátions  $\text{Na}^+$ . Entretanto, a abundância desses cátions torna o meio mais viscoso, o que dificulta a propagação das ondas S durante a medida do módulo de cisalhamento a pequenas deformações ( $G_0$ ).

Na análise dos resultados aos 28 dias de cura, observa-se que todas as variáveis são significativas, considerando as individualmente, bem como combinadas entre elas. A partir da Figura 4.40, nota-se que, quando maior o peso específico aparente seco e maior o teor de cal de carbureto, maior é a rigidez; ao contrário do teor de pó de vidro, onde nota-se que com o aumento do teor, diminui a rigidez do material. Em termos de regressão linear múltipla, considerando somente a variáveis individualmente, obtém-se um  $R^2_{\text{ajustado}}$  de 68,14%; já considerando a combinação das variáveis, o  $R^2_{\text{ajustado}}$  sobe para 91,18%, mostrando um ajuste linear adequando, bem como a ocorrência da combinação das variáveis.

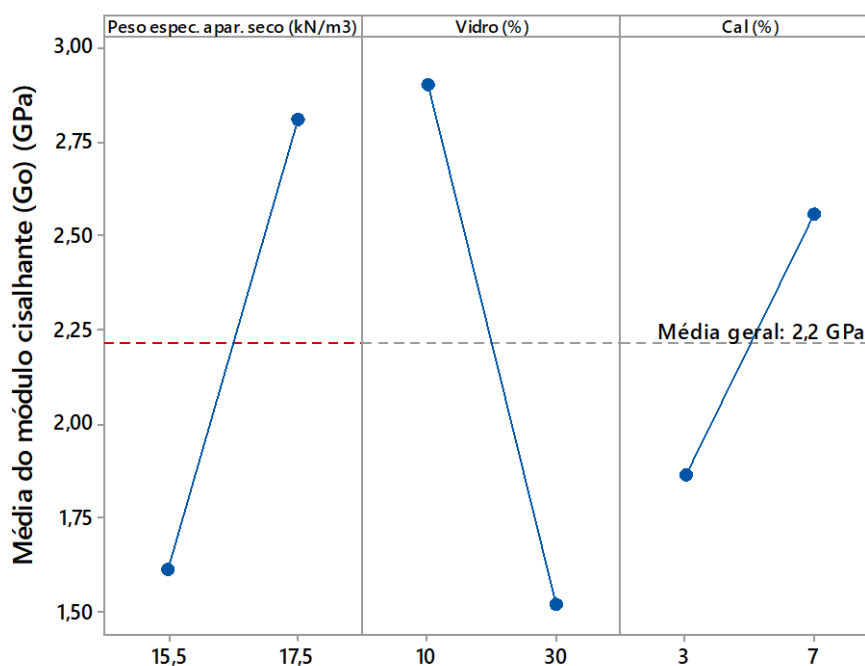


Figura 4.40: Efeitos principais dos fatores para a rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações -  $G_0$ ) aos 28 dias de cura com NaOH a 3 molar.

De fato, cada adição da quantidade de vidro leva a um aumento no teor de silicato ( $\text{SiO}_4$ ) e óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ). Como estes compostos dissociam-se em abundância na mistura, causando um aumento na viscosidade. Essa viscosidade causa a redução da rigidez sob o efeito do aumento do teor de vidro, que é devido ao aumento da quantidade de íons  $\text{Si}_4^+$  dissolvida pelos íons  $\text{Na}^+$ .

Da mesma forma, levando em consideração o tempo de cura com os outros fatores, nota-se que o tempo de cura também é significativo (ver figura 4.41). Ao se visualizar a Figura 4.41, nota-se que quanto maior o peso específico aparente seco e maior o teor de cal de carbureto, maior é a rigidez; por outro lado, quanto maior o teor de vidro e maior tempo de cura, menor é a rigidez. Em termos de regressão linear múltipla, considerando somente as variáveis individualmente, obtém-se um  $R^2_{ajustado}$  de 41,18% (ajuste linear não é adequado); já considerando a combinação das variáveis, obtém-se um  $R^2_{ajustado}$  de 82,45%, mostrando que o ajuste linear é razoável, bem como a ocorrência da combinação das variáveis, embora a combinação do peso específico aparente seco com o tempo de cura seja não significativo (valor do teste-P de 0,079 > limite de 0,05).

De acordo com Bilondi *et al.*, (2018), a alta quantidade de vidro causa menos dissolução das partículas de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  na água, o que reduz seu ataque químico. Além disso, o aumento da quantidade de vidro leva ao aumento dos íons  $\text{Na}^+$ , o que pode causar a carbonatação das amostras, que se torna mais crítica com a evolução do tempo, consequentemente, o efeito negativo do vidro e o tempo cura sobre o aumento da rigidez.

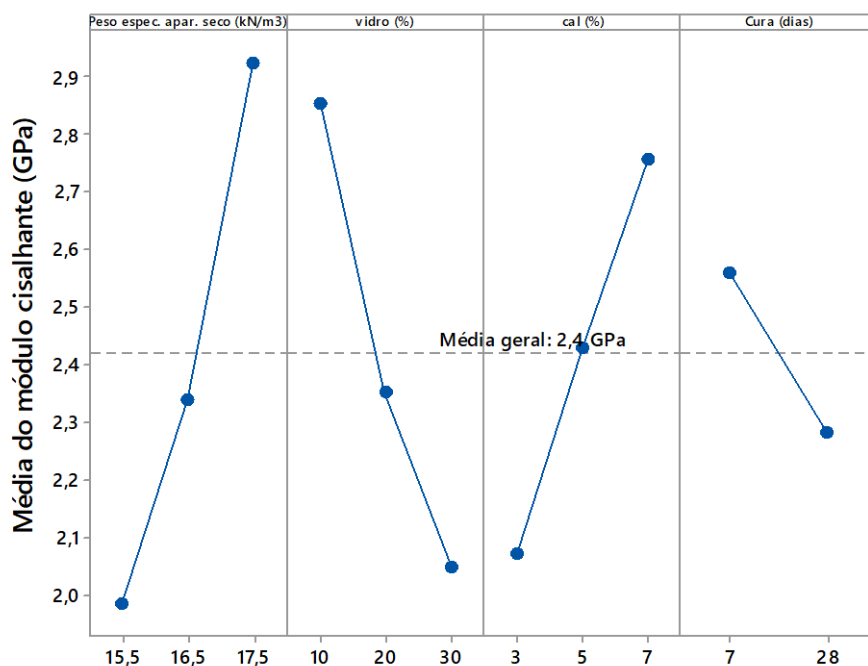


Figura 4.41: Efeitos principais dos fatores para a rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações -  $G_0$ ) considerando todos as variáveis independentes com NaOH a 3 molar.

Pela análise estatística anterior, não é possível verificar qual variável é mais significativa na resposta da variável dependente, ou seja, qual fator contribui mais no módulo cisalhante a

pequenas deformações ( $G_o$ ). Assim, para fazer uma classificação ou determinar os fatores que mais influenciam rigidez, é feita outra análise de variância (ANOVA) para avaliar os efeitos através do gráfico de Pareto. Porém esta análise somente pode ser feita em projetos fatoriais do tipo  $2^k$ , onde cada variável independente deve possuir somente dois níveis de variação (por exemplo: máximo e mínimo, maior e menor, -1 e +1, etc), sendo o presente estudo um programa de experimentos do tipo  $3^k$  (três níveis de variação das variáveis independentes). Desta forma, para esta análise foram considerados somente os maiores e menores valores dos fatores, quais sejam: (a) peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de 15,5 kN/m<sup>3</sup> e 17,5 kN/m<sup>3</sup> (fator A); (b) teor de pó de vidro de 10% e 30% (fator B); (c) teor de cal de carbureto de 3% e 7% (fator C); e (d) tempo de cura de 7 e 28 dias (fator D). Esta consideração só é possível pois a variação do módulo cisalhante a pequenas deformações ( $G_o$ ) apresenta uma variação linear com todas as variáveis independentes (ver figura 4.65).

Na análise dos resultados aos 7 dias de cura, todas as variáveis são significativas, como pode ser visto na figura 4.66. Verifica-se que o teor vidro é a variável menos importante (menos até que as combinações), embora não sendo significativo quando se leva em consideração os três níveis, como mostrado na análise mostrada anteriormente. Pela figura 4.66, considerando a linha de referência passando pelo valor do efeito padronizado de 2,13 (obtido para uma significância estatística de 95%), observa-se que o fator mais importante é C (teor de cal de carbureto), seguido pela combinação fatores de terceira ordem, o fator A (peso específico aparente seco -  $\gamma_d$ ), as combinações AB, AC e o fator B (teor de vidro) em ordem decrescente. A combinação BC (reações pozolânicas) não é significativa estatisticamente.

Aos 28 dias de cura, todos os fatores têm efeitos significativos individualmente na rigidez. Nenhuma combinação de fatores é significativa para o aumento da rigidez. Percebe-se que o fator mais significativo é B (teor de pó de vidro) seguido de A (peso específico aparente seco -  $\gamma_d$ ) e C (teor de cal de carbureto) em ordem decrescente, considerando que a linha de referência passa pelo valor do efeito padronizado de 2,12 (considerando uma significância estatística de 95%). A figura 4.67 mostra o gráfico de Pareto com a importância das variáveis na rigidez aos 28 dias de cura.



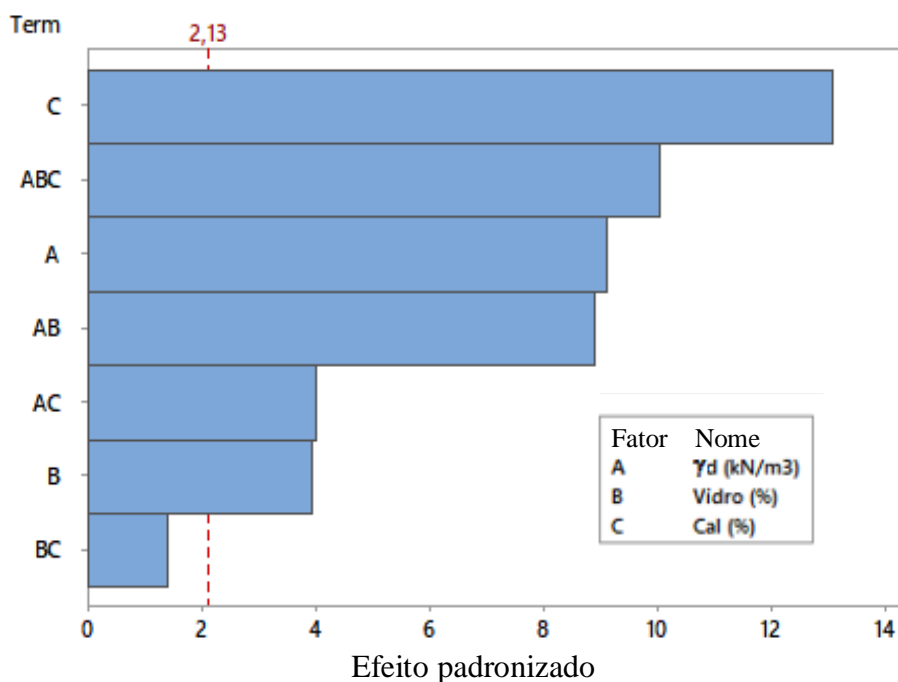


Figura 4.42: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados na rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações –  $G_0$ ) aos 7 dias de cura.

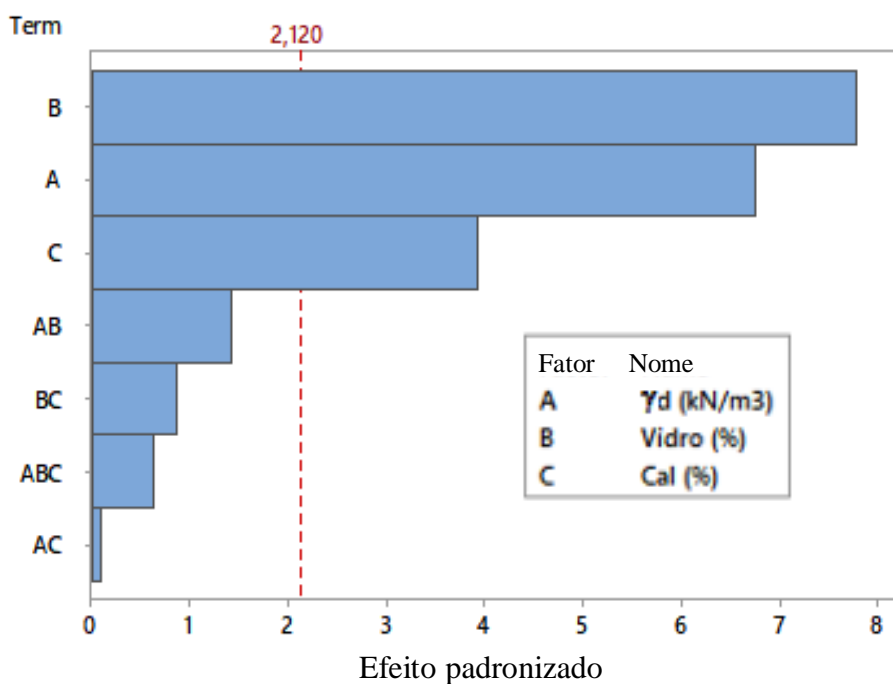


Figura 4.43: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados na rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações –  $G_0$ ) aos 28 dias de cura.

Além disso, reunindo todos os resultados, para 7 dias e 28 dias de cura, incluindo a variável tempo de cura (fator D), nota-se que o fator que mais influencia a rigidez é o fator C (teor de cal de

carbureto), seguido por A (peso específico aparente seco -  $\gamma_d$ ), B (teor de pó de vidro), as combinações BD, ABD, ABC, fator D (tempo de cura), as combinações ABCD, ACD, AB e AD em ordem decrescente, considerando que a linha de referência passa pelo valor de efeito padronizado de 2,04 (obtido para uma significância de 95%). As combinações tais como BCD, CD, AC, AC e BC não influenciam a rigidez. A figura 4.68 mostra o gráfico de Pareto com a importância das variáveis na rigidez considerando todos os resultados.

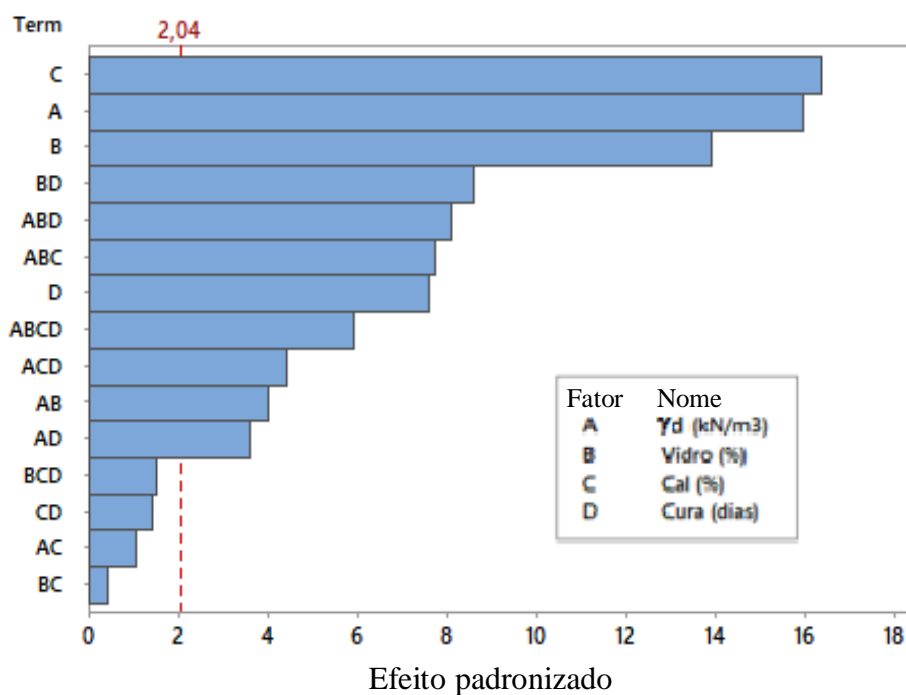


Figura 4.44: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados na rigidez (módulo cisalhante a pequenas deformações –  $G_o$ ) considerando todos os efeitos.

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e das análises realizadas, várias conclusões podem ser feitas a respeito do estudo elaborado.

A mistura da areia fina, pó de vidro e cal de carbureto mais a solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH), na concentração de 3 mols, mostraram resultados satisfatórios para a resistência à compressão simples, rigidez e durabilidade, para variável tempo de cura (7 e 28 dias). Os resultados encontrados foram maiores em comparação aos estudos realizados por outros autores com os mesmos materiais, sem a adição de álcali-ativador (em 7 dias de cura).

Estudos preliminares sobre a molaridade ideal de hidróxido de sódio (NaOH) capaz de afetar o comportamento mecânico da mistura, indicaram satisfatórios em uma concentração molar de NaOH de 3 mols, usada ao longo deste trabalho. Também se verificou que existe um valor ótimo, sendo obtidos valores crescentes de resistência com o aumento da molaridade, até um valor máximo de resistência, passando a resistência a decrescer com o aumento da molaridade.

Pelo estudo, percebe-se que para as três variáveis (teor de cal de carbureto, teor de pó de vidro e peso específico aparente seco), a resistência à compressão simples aumenta com o aumento das variáveis, as quais são estatisticamente significantes pela análise de variância realizada. Também, verificou-se que a taxa de crescimento com tempo da resistência à compressão simples aos 7 dias de cura é muito satisfatória em comparação com a de 28 dias, da ordem de duas vezes, na média.

Comparando os resultados da resistência à compressão simples obtida neste trabalho (com álcali-ativação com hidróxido de sódio - NaOH) com Winter (2018), com os mesmos materiais e mesmas proporções sem ativação alcalina, para 7 dias de cura, nota-se que a resistência da mistura ativada por álcalis mais que dobra em comparação com a mistura sem ativação alcalina.

Nota-se que o aumento do teor de vidro tem um efeito muito significativo, estatisticamente falando, no ganho da resistência em 7 dias, em relação as outras variáveis (teor de cal de carbureto e peso específico aparente seco). Esse efeito positivo de pó de vidro pode ser justificado pela sua reação química com o hidróxido de cálcio (NaOH). De fato, o NaOH facilita as quedas dos aluminossilicatos, composto no vidro, através de seus íons  $\text{Na}^+$  liberados durante sua reação com água (reação exotérmica).

Os resultados obtidos para a rigidez também são coincidentes com os da resistência à compressão simples, ou seja, quanto maior o teor de cal de carbureto, o peso específico aparente seco, maior a rigidez da mistura alcalina ativada. A cal de carbureto tem efeito muito significativo no aumento da rigidez aos 7 dias. No entanto, o teor de pó de vidro tem um efeito pouco significativo sobre o aumento da rigidez aos 7 dias de cura e muito significativo aos 28 dias, porém, o aumento de teor de vidro diminui a rigidez do material geopolímeros. Também, o tempo de cura não foi significativo para a rigidez, porém o material alcalino com uma quantidade elevada de vidro eva a carbonataçãooa longo de tempo por causa dos íons  $\text{Na}^+$  da solução alcalina e de óxido de sódio composto no vidro. Essa carbonatação fragiliza a rigidez do material da maneira progressiva. No entanto, os resultados não permitiram estabelecer uma boa correlação em relação aos da resistência à compressão simples.

Os resultados da durabilidade da mistura de geopolímeros aos 7 dias de cura foram muito satisfatórios, com uma perda de massa acumulada máxima igual a 18% para 10% de pó de vidro e 3% de cal de carbureto e uma perda de massa acumulada mínima igual a 0,52% para 30% de pó de vidro e 7% de cal de carbureto. Comparando esses resultados desta pesquisa (com uso de álcali-ativador) com os resultados de Winter (2018) (sem uso de álcali-ativador), observa-se que as amostras ativadas por álcali-ativadas têm uma perda de massa acumulada inferior (da ordem três vezes) do que as amostras sem ativação alcalina.

Em análise aos resultados, verifica-se a que a razão entre a porosidade pelo teor volumétrico dos agentes cimentantes (índice  $\eta/B_{iv}$ ), quando para este último for considerado a cal de carbureto, a totalidade do pó de vidro passante na peneira com abertura de 75  $\mu\text{m}$  (malha #200) e o hidróxido de sódio (NaOH), é adequada para correlação das propriedades estudadas. Ainda, verificou-se que os melhores ajustes e correlações são obtidos para um expoente de  $B_{iv}$  de 0,28 [ $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ ], que é o mesmo obtidos por diversos autores para o teor volumétrico de dosagens com cimento Portland ( $C_{iv}$ ) e mistura cal e pozolanas ( $B_{iv} = blend$ ). No caso da resistência a compressão simples, para 7 e 28 dias de cura, obtém as equações  $q_u=1,67 \times 10^7 \cdot [\eta/(B_{iv})^{0,28}]^{-3,57}$  (com  $R^2=0,80$ ) e  $q_u=3,80 \times 10^7 \cdot [\eta/(B_{iv})^{0,28}]^{-3,57}$  (com  $R^2=0,64$ ), respectivamente, com álcali-ativador. Pelas equações verifica-se que há um aumento médio na resistência a compressão de superior a duas vezes ( $3,80 \times 10^7 / 1,67 \times 10^7 = 2,28$ ), em função do tempo de cura. Para os resultados sem álcali-ativador, resultados de Winter (2018), para 7 dias de cura, obtém-se a equação:  $q_u=0,75 \times 10^7 \cdot [\eta/(B_{iv})^{0,28}]^{-3,57}$  (com  $R^2=0,88$ ), que corresponde a cerca da metade da resistência se comparado com os resultados médio com álcali-ativador ( $0,75 \times 10^7 / 1,67 \times 10^7 = 0,45$ ). Em se tratando de rigidez

(módulo cisalhante a pequenas deformações), para 7 e 28 dias de cura, obtém as equações  $G_o=4,3 \times 10^4 \cdot [\eta/(B_{iv})^{0,28}]^{-3,57}$  (com  $R^2=0,57$ ) e  $G_o=4,6 \times 10^4 \cdot [\eta/(B_{iv})^{0,28}]^{-3,57}$  (com  $R^2$  não significativa pois o dados experimentais muito dispersos), respectivamente, com álcali-ativador. Pelas equações verifica-se que não há variação na rigidez ( $4,6 \times 10^7 / 4,3 \times 10^7 = 1,07$ ), em função do tempo de cura. Para os resultados sem álcali-ativador, resultados de Winter (2018), para 7 dias de cura, obtém-se a equação:  $G_o=1,60 \times 10^4 \cdot [\eta/(B_{iv})^{0,28}]^{-3,57}$  (com  $R^2=0,75$ ), que corresponde a cerca um terço da rigidez se comparado com os resultados médio com álcali-ativador ( $1,60 \times 10^4 / 4,3 \times 10^4 = 0,35$ ). Por fim, no caso da durabilidade (em termos da perda de massa acumulada ao final dos 12 ciclos – PMA), para 7 dias de cura, com álcali-ativador, obtém a equações  $PMA=9 \times 10^{-9} \cdot [\eta/(B_{iv})^{0,28}]^{5,46}$  (com  $R^2=0,91$ ). Para os resultados sem álcali-ativador, resultados de Winter (2018), para 7 dias de cura, obtém-se a equação:  $PMA=0,3 \times 10^{-9} \cdot [\eta/(B_{iv})^{0,28}]^{5,46}$  (com  $R^2=0,90$ ), que corresponde a cerca um terço da perda de massa total se comparado com os resultados médio, com álcali-ativador ( $0,3 \times 10^{-9} / 9 \times 10^{-9} = 0,33$ ).

## 5.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir deste trabalho pode-se propor uma série de estudos que poderão ser realizados, de modo a contribuir para o estado da arte:

- Realização de ensaios de difração de raio-x (DRX) e fluorescência de raio-x (FRX) e amostras das mistura após os tempos de cura ;
- Realização de ensaios com e sem álcali-ativação, para maiores tempos de cura e temperatura ;
- Emprego de outros tipos de álcali-ativadores ;

## BIBLIOGRAFIA

AIPCR. **Le traitement des sols à la chaux, aux liants hydrauliques et pouzzolaniques** (1991). Rapport du Comité technique 12 << Terrassements-drainage- Couches de forme >> XIXe Congrès mondial de la route, Marrakech.

AL BAKRI, A.M.M., KAMARUDIN, H., BNHUSSAIN, M., KHAIRUL NIZAR, I., RAFIZA, A. R., AND ZARINA, Y. (2011). **Microstructure of different NaOH molarity of fly ash-based green polymeric cement**. Journal of Engineering and Technology Reserch. 3(2), 44-49.

ALI, M.B., SAIDUR, R., HOSSAIN, M.S. (2011). **A review on emission analysis in cement industries**. Renew. Sustain. Energy Rev. 15, 2252–2261.

AL-MUKHTAR, M., LASLEDJ, A., ALCOVER, J.-F. (2010a). **Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20c**. Applied clay science, 50(2), 191-198.

ALONSO, S., PALOMO, A., (2001). **Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: Influence of temperature, activator concentration and solid ratio**. Mater. Lett., 47(1-2): 55-62.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (2004) - **Soil classification system** - from AASHTO M 145 or ASTM D 3282.

AMNADNUA, K., TANGCHIRAPAT, W., JATURAPITAKKUL, C. (2013). **Strength, water permeability, and heat evolution of high strength concrete made from the mixture of calcium carbide residue and fly ash**. Mater. Des., 51, 894–901.

ANAND, S., VRAT, P., DAHIYA, R.P., (2006). **Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation of CO<sub>2</sub> emissions from the cement industry**. J. Environ. Manage. 79, 383–398.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP (1958). **Curso Intensivo de Solo-cimento**. Anais do II Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, Recife-PE e Campina Grande-PB.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 12004 (1990): Solo - **Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos**. Rio de Janeiro: ABNT, 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 12051 (1991)**: Solo - **Determinação do índice de vazios mínimos de solos não-coesivos**. Rio de Janeiro: ABNT, 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 12253 (1992): Solo-cimento – **Dosagem para emprego em camada de pavimento**. Rio de Janeiro: ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 12653 (1992): **Materiais pozolânicos**. Rio de Janeiro: ABNT.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6458 (1984). **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT.

BAHAR, R., BENZAOUZ, M., KENAL, S., (2004). **Performance of compacted cement stabilised soil**. Cement and Concrete Composites, 26(7), 811-820.

BAKHTYAR, B., KACEMI, T., ATIF NAWAZ, M. D. (2017). **A review on carbon emissions in malaysian cement industry**. International Journal of Energy Economics and Policy, 7(3), 282-286.

BEHAK, L. (2007). **Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na modalidade Acadêmico, Porto Alegre.

BELL, F. (1996). **Lime stabilization of clay minerals and soils**. Engineering Geology, 42(4), 223-237.

BENNY, J. R., JOLLY, J., MAREENA, S. J., THOMAS, M. (2017). **Effect of glass powder on engineering properties of clayey soil**. International Journal of Engineering Research & Technology. ISSN: 2278-0181

BERNAL, S. A., MEJIA DE GUTIERREZ, R., PROVIS, J.L. (2012). **Engineering and durability of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends**. Construction and Building Materials, 33, 99-108.

- BILONDI, M. P., TOUFIGH, M. M., TOUFIGH, V., (2018). **Using calcium carbide residue as an alkaline activator for glass power-clay geopolymer.** Constr. Bulding. Mater., 183, 417-428.
- BOARDMAN, D., GLENDINNING, S. and ROGERS, C. (2001). **Development of stabilisation and solidification in lime\_clay mixes.** Geotechnique. 51(6), 533-543.
- BONDAR, D., MA, Q., SOUTSOS. M., BASHEER, M., PROVIS, J. L., NANUKUTTAN, S. (2018). **Alkali activated slag concretes designed for a desired slump, strength and chloride diffusivity.** Bulding. Mater. 190, 191-199.
- BOSOAGA, A., MASEK, O., OAKEY, J.E. (2009). **CO<sub>2</sub> capture technologies for cement industry.** Energy Procedia 1, 133–140.
- BOUSETTA, T. A. (2014). **Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplacants et de hautes performances.** Doctorat 3<sup>eme</sup> cycle, Université de Annaba.
- BRAVO, M. D. (2013). **Estabilização de um solo mole orgânico: avaliação da variação de resistência com o acréscimo de cal, cinza de casca de arroz o microsílica.** Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BURLAND, J. B. (1990). **On the compressibility and shear strength of natural clay.** Géotechnique, London, vol. 40, n. 3, Pp.329-378.
- CABANE, N. (2004). **Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation.** Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Jean Monnet et de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de St-Etienne.
- CASTRO, J. F. A. (2015). **Melhoramento de um solo arenoso por ativação alcalina.** Dissertação (Mestrado) em Engenharia Civil. Especialização em Geotecnia, Universidade do Porto.
- CDIT (2002). **The deep mixing method - Principle, design and construction.**



CONSOLI, N. C., CARRARO, J. A. H. (1998). **The influence of compaction conditions on the behavior of a sandy soil-fly ash-carbide lime mixture.** *Soils and Rocks*, 21(3), 167–173 (in Portuguese).

CONSOLI, N. C., CARRARO, J. A. H., FERREIRA, F. C., AND FRAGA, J., (1997). **Aspects of the utilization of industrial by-products for soil improvement.** *Procs., Geoenviron. Engng. Conf. on Contaminated Ground: Fate of Pollutants and Remediation*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 391–396

CONSOLI, N. C., DE PAULA, T. M., BORTOLOTTI, M. S., DE BARROS, L. M., PEREIRA, F., ROCHA, M. M. (2016b). **Coal fly ash - carbide lime admixtures as an alternative to concrete masonry blocks: Influence of ash grounds.** *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2), 04016224.

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

CONSOLI, N. C., PRIETTO, P., CARRARO, J. A. H., HEINECK, K. S. (2001). **Behavior of compacted soil - fly ash - carbide lime mixtures.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(9), 774-782.

CONSOLI, N. C., WINTER, D., LEON, H. N., SCHEUERMANN FILHO, H. C., (2018). **Durability, strength and stiffness of green stabilized sand.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(9), 04018057.

CONSOLI, N. C.; DA SILVA, A. P.; NIERWINSKI, H. P.; SOSNOSKI, J. (2016c). **Durability, strength, and stiffness of compacted gold tailings – cement mixes.** *Canadian Geotechnical Journal*, 55, 486–494.

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, A.; SALDANHA R. B. (2011b). **Variables governing strength of compacted soil–fly ash–lime mixtures.** *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(4), 432-440.

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

CORREIA, E. A. S. (2011). **Compósitos de matriz geopolimérica reforçados com fibras vegetais de abacaxi e de sisal**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa (Paraíba), 2011.

CRIADO, M., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A. (2007). **Alkali activation of fly ash: Effect of the SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O ratio. Part I: FTIR study**. Microporous and Mesoporous Materials, 106, 180–191.

CRISTELO, N.M.C., (2001). **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal.

DAVIDOVITS, J. (1979). **Synthesis of new high-temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites**. Annu. Pac. Tech. Conf. Disp., (4), 151-154.

DAVIDOVITS, J. (1982). **Mineral polymers and methods of making them**. U.S. Patent (4). 349-386.

DAVIDOVITS, J. (1984). **Synthetic mineral polymer compound of the silicoaluminates family and preparation process**. U.S. Patent 4. 472,199.

DAVIDOVITS, J. (1994). **Geopolymers : man-made rock geosynthesis and resulting development of very early high strength cement**. J Master Educ. 16 (2&3), 91-137.

DAVIDOVITS, J. (2002). **30 years of sucesses and failures in geopolymers applications. Market trends and potential breakthroughs**. Geopolymer Conference, Melbourne, Austrália.

DAVIDOVITS, J., (1991). **Geopolymers - Inorganic polymeric new materials**. J. Therm. Anal. 37, 1633–1656.

DUXSON, P., PROVIS, J. L., LUKEY, G. C., MALLICOAT, S.W., KRIVEN, W.M., VAN DEVENTER, J.S.J., (2005). **Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties**, Colloids and Surf. A: Physicochem. Eng. Asp. 269, 47–58.

DUXSON, P., PROVIS, J. L., LUKEY, G.C.; SEPAROVIC, F. J., DEVENTER, VAN. (2005) **Study of structural ordering in aluminosilicate geopolymer gels**. Langmuir, vol.21, p.3028-3036.

DUXSON, P., MALLICOAT, S.W., LUKEY, G. C., KRIVEN, W. M, VAN DEVENTER, J. S. J. (2007). **The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin based geopolymers.** Colloids Surf, p. 8-20.

EADES, J., L., E GRIM, R., E. (1960). **Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization.** Highway Research Board Bulletin.

ECOVIDRIO, (2015). **Ecovidrio.** <http://www.ecovidrio.es/>.

ENAMORADO, M. A. (1990). **Estudo comparativo entre o método mecânico e o método físico-químico para dosagem do solo-cimento.** Tese de Mestrado - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A., GARCÍA-LODEIRO I., PALOMO A., (2007). **Durability of alkali activated materials.**

FERNÁNDEZ-JIMÉRNEZ, A. M. AND PALOMO, A., (2005). **Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator.** Cement and Concrete Research. 35 (10). 1984-1992.

FERNÁNDEZ-JIMÉRNEZ, A. M., PALOMO, A., LÓPEZ-HOMBRADOS, C. (2006). **Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete.** ACI Materials Journal. No.103-M12.

FERNÁNDEZ-JIMÉRNEZ, A. M., PALOMO, A., MONZÓ, M., VICENT, M., BARBA, A. (2008). **Alkaline activation of metakaolin-fly ash mixtures: Obtain of zeoceramics and zeocements.** Microporous and Mesoporous Materials. 108, 41-49.

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

FROHARD, F. (2014). **Durabilité des éco-bétons : Impact des additions cimentaires alternatives sur la corrosion des armatures dans les bétons armés.** Mémoire de thèse, l'Université de Sherbrooke. Paris.

GLENDINNING S., JONES C.J.F.P., PUGH R.C. (2005). **Reinforced soil using cohesive fill and electrokinetic geosynthetics**. International Journal of Geomechanics. (ASCE)1532-3641(2005)5:2(138)

GLUKHOVSKY, V.D. (1967). **Soil silicate articles and structures**. Budivel'nyk Publish., Kiev, in Russian.

GOUVENOT, D. (1990). **Les nouvelles techniques de reconnaissance et de traitement des sols**. Journées Etudes Int. AFTES. Lille 16-18 Oct.

GRESS, J. C., BOMONT, S. (2010). **Nouvelles applications de l'électro-osmose pour la maîtrise des sols gonflants pour les fondations de bâtiments**. CFMIG 2010 – 9-11 DECEMBRE – TUNISIE.

GUETTALA, A., HOUARI, H., MEZGHICHE, B., CHEBILI, R. (2002). **Durability of lime stabilized earth blocks**. Courrier du Savoir, N°02.

GUIMARÃES, J. E. P. (1998). **Acal-fundamentos e aplicações na Engenharia civil**. São Paulo, Pini.

HARDJITO, D. AND RANGAN, B. V. (2005). **Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete**. Research Report GC1, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, available at [espace@curtin](mailto:espace@curtin).

HORPIBULSUK, S., PHETCHUAY, C., AND CHINKULKIJNIWAT, A. (2012). **Soil stabilization by calcium carbide residue and fly ash**. J. Mater. Civ. Eng., 10.1061/(ASCE) MT. 1943-5533.0000370, 184–193.

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

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

HORPIBULSUK, S. (2017). **Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review**. Construction and Building Materials, 156, 443 – 467.

HOUBEN, H., GUILLAUD H. (2006). **Traité de construction en terre**. CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France.

HOUZE, C. (2013). **Etude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silico- manganèse**. Université Paris-Est. France, 263p.

IDIR, R. (2009). **Mécanisme d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique**. Mémoire de thèse, Université de Toulouse en cotutelle avec l'Université de Sherbrooke, Département Génie Civil, 1-304.

IDIR, R., CYR, M., TAGNIT-HAMOU, A. (2010). **Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars**. Construction and Building Materials, 24(7), 1309–1312.

IDIR, R., CYR, M., TAGNIT-HAMOU, A. (2011). **Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet**. Cement and Concrete Composites, 33(1), 19–29.

INGLES, O. G. and METCALF, J. B. (1972). **Soil stabilization principles and practice**. Technical.

IZEMMOUREN, W. (2016). **Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée**. Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences en : GENIE CIVIL, Option : MATERIAUX DE CONSTRUCTION, Université Mohamed Khider – Biska, Faculté des Sciences et de la technologie.

JALALI, S., ABYANEH, M. Y., KEEDWELL, M. J. (1997). **Differential scanning calorimetry tests applied to lime-fly ash soil stabilization**. Testing soil mixed with waste or recycled materials, STP 1275, ASTM, West Conshohocken, Pa., 181–191.

JANI, Y., HOGLAND, W. (2014). **Waste glass in the production of cement and concrete- a review**, J. Environ. Chem. Eng. 2(3) 1767-1775.

JATURAPITAKKUL, C., AND ROONGREUNG, B. (2003). **Cementing material from calcium carbide residue-rice husk ash**. J. Mater. Civ. Eng., 10.1061/(ASCE) 0899-1561, 15:5(470), 470–475.

KAMPALA, A., HORPIBULSUK, S., CHINKULLIJNIWAT, A., SHEN, S.-L. (2013). **Engineering properties of recycled calcium carbide residue stabilized clay as fill and pavement materials**. Constr. Build. Mater., 46 : 203–210.

KAMPALA, A., HORPIBULSUK, S., PRONGMANEE, N., and CHINKULKIJNIWAT, A. (2014). **Influence of wet-dry cycles on compressive strength of calcium carbide residue-fly ash stabilized clay**. J. Mater. Civ. Eng., 10.1061/(ASCE) MT.1943-5533.0000853, 633–643.

KAVAK, A. (1996). **The behavior of lime stabilized clays under cyclic loading**. Ph.D. thesis, Bogaziçi University

KAVAK, A. and AKYARH, A. (2007). **A field application for lime stabilization**. Environmental Geology, 51(6), 987-997.

KAVAK A., BAYKAL, G. (2011). **Long-term behavior of lime-stabilized kaolinite clay**. Environ Earth Sci., 66:1943–1955.

KAVAK, A., BAYKAL, G. (2012). **Long-term behavior of lime-stabilized kaolinite clay**. Environmental Earth Sciences pp. 1-13.

KHALE, D., CHAUDHARY, R. (2007). **Mecanism of geopolymerization and fators influencing its development : A review**. J. Mater Sci. 42 : 729-746.

KOMLJENOVIC, M., BASCAREVIC, Z., BRADIC, V. (2010). **Mechanical and microstructural properties of alkali-ativated fly ashgeopolymers**. Journal of Hazardous Materials, doi : 10.1016/j.jhazmat. 2010.04.064.

KOMNITSAS, K., ZAHARAKI, D. (2009). **Utilisation of low-calcium slags to improve the strength and durability of geopolymers**. Structures, Processing, Properties and Industrial Applications Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 343-375.

KRIVENKO, P. (1997). **Alkaline cements: terminology classification, aspects of durability**. in: H. Justnes (Ed.), Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Gothenburg, Sweden, Amarkai and Congrex Göteborg, Gothenburg, Sweden.

KRIVENKO, P. V. (1995). **Special alkaline cements**. in Russian, Budivel'nyk Publish. Kiev.

KRIVENKO, P. V. (1996). **Synthesis of cementitious materials of the  $\text{Me}_2\text{OMeO}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  system with required properties, in Russian**, DSc (Eng) Thesis, Kiev Polytechnical University, Kyiv.

KRIVENKO, P. (2017). **Why Alkaline Activation – 60 Years of the Theory and Practice of Alkali-Activated Materials**. J. Ceram. Sci. Technol. 08 [3] 323-334.

KÜHL, H. (1958). **Chemistry of cement**. In German, Band III, Verlag Technik, Berlin.

KURT, C. AND BITTNER, J. (2006). **Sodium hydroxide**. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag. doi:10.1002/14356007.a24-345.pub2.

KURT, H.; VAN. B. E. (1994). **Stabilisation au ciment**. **Bulletin du ciment**. V. 62.

LCPC (2000). **Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des ramblais et des couches de forme**. Guide technique.

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

LEROUEIL, S., VAUGHAN, P. R. (1990). **The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks**. Géotechnique, London, 40(3), 467-488.

LITTLE, D. N. (1995). **Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime**.

LIVI, C., N. (2013). **Desenvolvimento de Pasta de Geopolímero a Base de Cinza Volante e Hidróxido de Sódio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

LOPES JUNIOR, L. S. (2007). **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LOPES JUNIOR, L. S. (2011). **Metodologia de previsão do comportamento mecânico de solos tratados com cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LOVATO, R. S. (2004). **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MALLMANN, J. E. C. (1996). **Estabilização pozolânica de cinzas volantes e pesadas com cal dolomítica hidratada e areia, curadas pelos processos de autoclavagem e câmara à temperatura constante.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MARCIALIS, A., MASSIDDA, L., SANNA, U. (1983). **Low temperature steam curing hydration of lime- fly-ash compacts.** Cement and Concrete Research,13, 887-894.

MARQUES, G. L. de O. (2004). **Estabilização dos solos para fins de pavimentação.** Universidade Federal de Juiz de Fora. Notas de aula da disciplina TRN 32 – Pavimentação. Disponível em: <<http://www.pavimentacao.ufjf.br/Cap4.pdf>>.

MARQUES, G., L., O. (2005). **Estabilização dos Solos para Fins de Pavimentação.** Notas de Aula, Universidade Federal de Juiz de Fora.

MARQUES, G. L. O. (2009). **Estabilização dos Solos para Fins de Pavimentação.** Notas de Aula, Capítulo 4. Juiz de Fora, 2009.

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

MATOS, S., R., C. (2018). **Desenvolvimento de argamassa álcali-ativada para utilização em Sistemas de reparo com incorporação de cinza agroindustrial.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Da Bahia, Escola Politécnica, Salvador.

MCNALLY, G. H. (1998). **Soil and rock construction materials.** CRC Press Llc. ISBN10 0419214208

MITCHELL, J. K. e SOGA, K., (2005). **Fundamentals of soil behavior.**, Third edition. ISBN: 978-0-471-46302-3

MOHAJERANI, A., VAJNA, J., CHEUNG, T. H. H.; KURMIS, H., ARULRAJAH, A.,

MOLARD, J., CAMPS, J., LAQUERBE, M. (1987). **Etude de l'extrusion et de la stabilisation par le ciment d'argiles monominérales.** Materials and Structures, 20, 44-50.



- NONTANANANDH, S., KAMON, M. (1996). **Hydration mechanisms of fly ash stabilized by lime**. Proc., 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Envir. Geotechnics, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 857–862
- OLA, S. A. (1977). **The potentials of lime stabilization of lateritic soils**. Eng. Geol., 11 :305-317
- OLIVIER, J.G.J., JANSSENS-MAENHOUT, G., MUNTEAN, M., PETERS, J.A.H.W. (2015), **Trends in global CO<sub>2</sub> emissions: 2015 report**. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague; European Commission, Joint Research Centre (JRC). Institute for Environment and Sustainability (IES).
- OLUFOWOBI, J.; OGUNDOJU, A.; MICHAEL, B.; ADERINLEWO O. (2014). **Clay soil stabilisation using powdered glass**. Journal of Engineering Science and Technology. 9, 541-558.
- PABALAN, R.T., PITZER, K.S. (1987). **Thermodynamics of NaOH (aq) in hydrothermal solutions**. Geochim. Cosmochim. 51, 829–837.
- PACHECO-TORGAL, F., JALALI, S., CASTRO GOMES, J. P. (2009). **Utilization of mining wastes to produce geopolymer binders**. Structures, Processing, Properties and Industrial Applications Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. 267-293.
- PALOMO A., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., CRIADO M., ALONSO, M. M. (2005). **The alkali activation of fly ashes: from macro to nanoscale**. 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction. Bilbao, Spain.
- PALOMO, A., ALONSO, S., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., SOBRADOS, I. and SANZ, J. (2004). **Alkaline activation of fly ashes: NMR study of the reaction products**. Journal of the American Ceramic Society, 87, 1141–1145.
- PALOMO, A., GRUTZECK, M. W., BLANCO, M. T. (1999). **Alkali-activated fly ashes. A cement for the future**. Cement and Concrete Research, 29, 1323-1329.
- PARTYKA, J., GAJEK, M., AND GASEK, K. (2014). **Effects of quartz grain size distribution on the structure of porcelain glaze**. Ceramics International. V40, 12045-12053.
- PASCUAL, B. A., TOGNONVI, M. T., TAGNIT-HAMOU, A. (2014). **Waste glass powder-based alkali-ativated mortar**. International Journal of reserch in Engineering and Technology. 3. ESSN 2319-1163.

- PEREIRA, P. D. M. (2016). **Avaliação da aplicabilidade de solos estabilizados com cinzas ativas alcalinamente em camadas de pavimentos rodoviários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Minho.
- PETRENKO, S. V., PITZER, K. S. (1997). **Thermodynamics of aqueous NaOH over the complete compositions range and to 523 K and 400 MPa**. J. Phys. Chem. B, 101, 3589–3595.
- PHETCHUAY, C., HORPIBULSUK, S., SUKSIRIPATTANAPONG, C., CHINKULKIJNIWAT, W. A., ARULRAJAH, A., DASFANI, M. M. (2014). **Calcium carbide residue: Alkaline activator for clay-fly ash geopolymer**. Constr. Building. Mater., 69, 285-294.
- PHUMMIPHAN, I., HORPIBULSUK, S. P. E., PHOO-NGERNKAM, T., ARULRAJAH, A., SHEN, S.-L. (2016). **Marginal lateritic soil stabilized with calcium carbide residue and fly ash geopolymers as a sustainable pavement base material**. J. Mater. Eng., ASCE 0899-1561.
- PINTO, A. T. (2004) **Sistemas ligantes obtidos por ativação alcalina do metacaulino**. Tese Doutorado, Universidade do Minho, Portugal.
- PINTO, A. T. (2006). **Introdução ao Estudo dos Geopómeros**. Editora UTAD, Portugal, 105 p.
- POMAKHINA, E., DENELEE, D., GAILLOT, A.-C.; PARIS, M., OUVRARD, G. (2012). **Si solid state NMR investigation of pozzolanic reaction occurring in lime-treated Ca-bentonite**. Cem. Concr. Res. 42(4), 626–632.
- PROVIS, J.L., LUCKEY, G.C., VAN DEVENTER, J.S.J. (2005). **Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? A reexamination of existing results**. Chem. Mater. 17, 3075–3085.
- PUERTAS, F., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. (2003). **Mineralogical and microstructural characterization of alkali-activated fly ash/slag pastes**. Cement Concrete Res., 25, [3], 287 – 292.
- PURDON, A. (1940). **The action of alkalis on blast furnace slag**. J. Soc. Chem Ind., 59, 191 – 202.

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

RAO, S. N. and RAJASEKARAN, G. (1996). **Reaction products formed in lime-stabilized marine clays**. Journal of geotechnical engineering. 122(5), 329-336.

report.

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

ROADMAP, C. T., (2010). **Carbon emissions reductions up to 2050**. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) and International Energy Agency (IEA).

SACHETTI, A., S., CORTE, M., B., RABASSA, C., M., FESTUGATO, L., CONSOLI, N., C. (2009). **Resistência à compressão simples de um solo artificialmente cimentado reforçado com fibras de vidro**.

SALDANHA, R. B. (2014). **Misturas cinza volante e cal de carbureto: Comportamento da resistência à compressão simples para cura acelerada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia na área de Meio Ambiente) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SALES, F. A. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland**. 2014. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SANTOS, J. W. (2009). **Avaliação do uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos de Sergipe**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande , Paraíba.

SANTOS, M., LIMA, D., BUENO, B. (1995). **Estabilização dos solos com cal e betume**. 6ª Reunião de Pavimentação Urbana, Santos-São Paulo.

SANTOS, M. N. (2012). **Análise de efeito da estabilização mecânica em matrizes de terra**. Relatório final de Iniciação Científica, PUC-Rio, Rio de Janeiro.

SAUSSAYE, L. (2012). **Traitement des sols aux liants hydrauliques : aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification**. PhD thesis- Université de Caen.

SCHEUERMANN FILHO, H. C. (2019). **Estabilização se um solo dispersivo com pó de vidro moído e cal de carbureto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia na área de Meio Ambiente) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SERTIER, N., BOURDEAU, J. C., ALAIN; A. (2006). **Amélioration des sols**. Université de la Réunion. France,

SHAO, Y., LEFORT, T., MORAS, S., RODRIGUEZ, D. (2000). **Studies on concrete containing ground waste glass**. Cement and Concrete Research, 30(1), 91–100.

SHAYAN, A., XU, A. (2004). **Value-added utilisation of waste glass in concrete**. Cement and Concrete Research, 34(1), 81–89.

SHAYAN, A., XU, A. (2006). **Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs**. Cement and Concrete Research, 36(3), 457–468.

SHI, C., FERNANDEZ-JIMENEZ, A. (2006). **Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements**. J. Hazard. Mater. 137, 1656–63.

SHI, C., JIMENEZ-FERNANDEZ, A., PALOMO, A., (2011). **New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement**. Cem. Concr. Res. 41, 750–763.

SILVANI, C., (2013). **Influência da temperatura de cura no comportamento mecânico de misturas areia cinza volante-cal**. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SIMONSON, J. M., MESMER, R. E., ROGERS, P. S. Z. (1989). **The enthalpy of dilution and apparent molar heat capacity of NaOH (aq) to 523 K and 40 MPa**. J. Chem. Thermodyn. 21, 561–584.

- SOARES, E. M. M. (2013). **Melhoria do solo residual granítico com recurso à ativação alcalina de cinzas volantes**. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.
- SOLANKI, P., HHOURY, N., ZAMAN, M. M. (2009). **Engineering properties and moisture susceptibility of silty clay stabilized with lime, class C fly ash, and cement kiln dust**. J. Mater. Civil Eng., 21,749–757.
- SPINELLI, L. F. (1991). **Comportamento de fundações superficiais em solos cimentados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFRGS. Porto Alegre. 133p
- TAHA, B.; NOUNU, G. (2009). **Utilizing waste recycled glass as sand/cement replacement in concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering, 21, 709-721.
- THAKUR, N.R. ; GHOSH, S. (2009). **Effet of mix composition on compressive strength and microstruture of fly ash based geopolymer composites**. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 4(4).
- TIMIMI, M.; CAMPS JP.; LAQUERBE, M. (1995). **Valorization of fly ash in the cold stabilization of clay materials**. Resour Conserv Recy, 15(3–4): 219–234.
- TORRES-CARRASCO, M. (2015). **Reutilización de residuos vítreos urbanos e industriales en la fabricación de cementos alcalinos. activación, comportamiento y durabilidad. Memoria para optar al grado de doctor**. Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias. Madrid.
- TRAN, V. D. (2013). **Etudes de l'amélioration des sols par traitement à la chaux**. Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master en Ingénieur Civil des Constructions, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées.
- TURNER, L. K., COLLINS, F. G. (2013). **Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>) emissions : Acomparision between geopolymer and OPC cement concrete**. Constr. Build. Mater. 43, 125–
- USGS – United States Geological Survey (2009). **Crushed stone statistics and information**.
- VAFAEI, M., ALLAHVERDI, A. (2017). **High strength geopolymer binder based on waste-glass powder**. Advanced Powder Technology 28, 215–222.

VAN DEVENTER, J. S. J., LUKEY, G. C., XU, H. (2006). **Effect of curing temperature and silicate concentration on fly ash-based geopolymerisation.** Industrial and Engineering Chemistry Research, 45(10): 3559-3568.

VAN JAARVELD, J. G. S. AND VAN DEVENTER, J. S. J. (1999). **Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymer.** Industrial and Engineering Chemistry Research, 38(10): 3932-3941.

VAN JAARVELD, J. G. S. and VAN DEVENTER, J. S. J. (1999). **Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based Geopolymer.** Industrial and Engineering Chemistry Research. 38(10): 3932-3941.

VAN JAARVELD, J. G. S. ; VAN DEVENTER, J. S. J. ; LORENZEN, L. (1997). **The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic materials. Parti I.** Theory and applications. Miner Eng 10 (7), 659-669.

VASSALO, E., A., D., S. (2013). **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

VENUAT, M.; GUIMARCHO, C.; BONNOT, J. (1984). **Le traitement des sols au ciment et à la chaux.**

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

WALLAH, S. E. ; RANGAN, B. V. (2006). **Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: Long-term properties.** Research Report GC2, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, available at [espace@curtin](mailto:espace@curtin).

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

XU, H., VAN DEVENTER, J., S., J. (2000). **The geopolymerisation of alumino-silicate minerals.** Int. J. Miner. Process. 59(3), 247-266.

YIP, C. K., LUKEY, G. C., PROVIS, J. L., VAN DEVENTER, J. S. J. (2008). **Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation.** Cement and Concrete Research, 38, 554–564.

YIP, C. K., LUKEY, G. C., VAN DEVENTER, J. S. J. (2005). **The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate gel at the early stage of alkaline activation.** Cement and Concrete Research, 35, 1688–1697.

YIP, C. K., VAN DEVENTER, J. S. J. (2003). **Microanalysis of calcium silicate hydrate gel formed within a geopolymeric binder.** Journal of Materials Science, 38 (18), 3851-3860.

## APÊNDICES

### APÊNDICE 1: Determinação e a preparação da solução NaOH

A concentração molar pode ser definida como a quantidade de soluto (n), em mol, dissolvidos num volume de solvente. Ela é determinada pela fórmula seguinte:

$$Cm = \frac{n}{V} \qquad n = \frac{m}{M} \qquad m = C_m \cdot M \cdot V$$

Onde:

C= molaridade

m = massa de soluto (dada em g)

M = massa molar (dada em g/mol)

V = volume (dada em l)

Como preparar uma solução de NaOH ?

#### **Procedimento da preparação de solução NaOH,**

Material utilizado:

- Balança com resolução de 0,01g;
- Bagueta com a resolução;
- Becker de 500 mL;
- Espátula;
- Pipeta graduada;
- Hidróxido de sódio sólido (NaOH).

Procedimento:

- 1 - Tarar um Becker de volume 500 ml e pesar o volume de água a ser preparado
- 2 - Pesar a massa m de NaOH.
- 2 - Adicionar a massa de NaOH, lentamente e sob agitação.



- 3 - Deixar esta solução em repouso, coberta por um papel ou rolha, durante 30 à 60min
- 4 - Depois colocar a solução numa garrafa plástica hermeticamente fechada.

Exemplo:

Agora se, por exemplo, queremos preparar uma solução hidróxido de sódio de volume  $V = 300$  ml e uma concentração molar de  $C_m = 3$  mol/L, precisamos saber qual é sua massa.

Primeiro, temos de somar a massa de cada um dos elementos que compõem o hidróxido de sódio: sódio (Na), oxigênio(O) e hidrogênio(H). Esses valores podem ser obtidos na tabela periódica (Na= 23g/mol, O=16g/mol e H=1g/mol)  $M = 23 + 16 + 1 = 40$  g/mol

De seguida, podemos utilizar a fórmula  $m = C_m \cdot M \cdot V$ , ou seja,

$$\underline{m = 2 \times 40 \times 0,3}$$

$$\underline{m = 24 \text{ g}}$$

APÊNDICE 2: Resultado de todos os de corpos de prova para a resistência à compressão simples e módulo cisalhante a pequenas deformações para 7 dias de cura

Mistura	CP	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Teor de Vidro (%)	Teor de Cal (%)	Solução (Mols)	Tempo de cura (dias)	q <sub>u</sub> (kPa)		G <sub>o</sub> (GPa)	
							q <sub>u</sub> (kPa)	Média de q <sub>u</sub> (kPa)	G <sub>o</sub> (Gpa)	Média de G <sub>o</sub>
1	1 <sup>a</sup>	15.5	10	3	3	7		299.46		1.65
	1B	15.5	10	3	3	7	332.61		1.62	
	1C	15.5	10	3	3	7	266.31		1.67	
2	2 <sup>a</sup>	15.5	10	5	3	7	407.06	416.91	1.65	1.64
	2B	15.5	10	5	3	7	450.01		1.65	
	2C	15.5	10	5	3	7	393.67		1.61	
3	3 <sup>a</sup>	15.5	10	7	3	7	456.14	458.22	4.11	4.02
	3B	15.5	10	7	3	7	501.88		4.05	
	3C	15.5	10	7	3	7	416.66		3.89	
4	4 <sup>a</sup>	16.5	10	3	3	7	533.68	554.44	4.46	2.93
	4B	16.5	10	3		7	534.72		2.08	
	4C	16.5	10	3	3	7	594.91		2.25	
5	5 <sup>a</sup>	16.5	10	5	3	7	655.71	593.01	2.21	2.08
	5B	16.5	10	5	3	7	527.72		2.04	
	5C	16.5	10	5	3	7	595.60		1.98	

6	6 <sup>a</sup>	16.5	10	7	3	7	724.20	670.71	2.28	2.22
	6B	16.5	10	7	3	7	608.83		2.04	
	6C	16.5	10	7	3	7	679.11		2.32	
7	7A	17.5	10	3	3	7	842.63	828.90	2.60	2.83
	7B	17.5	10	3	3	7	829.18		2.60	
	7C	17.5	10	3	3	7	814.88		3.29	
8	8A	17.5	10	5	3	7	850.26	826.56	3.37	2.89
	8B	17.5	10	5	3	7	829.48		2.67	
	8C	17.5	10	5	3	7	799.95		2.64	
9	9A	17.5	10	7	3	7	833.01	862.88	2.84	2.87
	9B	17.5	10	7	3	7	847.78		2.91	
	9C	17.5	10	7	3	7	907.86		2.85	
10	10A	15.5	20	3	3	7	703.82	649.17	1.76	1.74
	10B	15.5	20	3	3	7	597.97		1.76	
	10C	15.5	20	3	3	7	645.71		1.70	
11	11A	15.5	20	5	3	7	609.57	660.55	1.84	1.77
	11B	15.5	20	5	3	7	715.79		1.83	
	11C	15.5	20	5	3	7	656.29		1.63	
12	12A	15.5	20	7	3	7	638.80	611.96	1.69	1.78
	12B	15.5	20	7	3	7	630.45		1.71	
	12C	15.5	20	7	3	7	566.63		1.93	
13	13 A	16.5	20	3	3	7	782.76	714.82	2.38	2.33
	13B	16.5	20	3	3	7	699.78		2.37	
	13C	16.5	20	3	3	7	661.92		2.25	
14	14 A	16.5	20	5	3	7	716.83	732.72	2.28	2.42
	14B	16.5	20	5	3	7	747.77		2.49	
	14C	16.5	20	5	3	7	733.56		2.49	
15	15 A	16.5	20	7	3	7	736.48	742.78	2.40	2.36
	15B	16.5	20	7	3	7	707.23		2.32	

	15C	16.5	20	7	3	7	784.64		2.36	
16	16 A	17.5	20	3	3	7	749.75	839.74	2.95	2.98
	16B	17.5	20	3	3	7	913.39		2.94	
	16C	17.5	20	3	3	7	856.07		3.05	
17	17 A	17.5	20	5	3	7	1032.30	1012.19	3.09	3.13
	17B	17.5	20	5	3	7	1055.43		3.11	
	17C	17.5	20	5	3	7	948.84		3.20	
18	18 A	17.5	20	7	3	7	1001.74	1025.14	4.19	3.45
	18B	17.5	20	7	3	7	986.84		3.10	
	18C	17.5	20	7	3	7	1086.85		3.08	
19	19 A	15.5	30	3	3	7	711.92	671.34	1.52	1.53
	19B	15.5	30	3	3	7	587.56		1.53	
	19C	15.5	30	3	3	7	714.55		1.54	
20	20 A	15.5	30	5	3	7	886.19	912.43	2.00	2.03
	20C	15.5	30	5	3	7	899.69		2.05	
21	21 A	15.5	30	7	3	7	1040.82	1059.03	1.86	2.00
	21B	15.5	30	7	3	7	1173.66		2.00	
	21C	15.5	30	7	3	7	962.61		2.15	
22	22 A	16.5	30	3	3	7	1040.24	980.19	2.07	2.06
	22B	16.5	30	3	3	7	930.51		2.07	
	22C	16.5	30	3	3	7	969.81		2.05	
23	23 A	16.5	30	5	3	7	1175.70	1213.64	2.56	3.00
	23B	16.5	30	5	3	7	1239.98		2.97	
	23C	16.5	30	5	3	7	1225.24		3.46	
24	24 A	16.5	30	7	3	7	1335.45	1346.96	2.33	2.99
	24B	16.5	30	7	3	7	1444.92		3.33	
	24C	16.5	30	7	3	7	1260.50		3.31	
25	25A	17.5	30	3	3	7	1208.05	1170.51	2.20	2.53
	25B	17.5	30	3	3	7	1169.28		2.68	

	25C	17.5	30	3	3	7	1134.22		2.70	
26	26A	17.5	30	5	3	7	1743.92	1731.91	3.41	3.43
	26B	17.5	30	5	3	7	1744.20		3.45	
	26C	17.5	30	5	3	7	1707.60		3.44	
27	27 A	17.5	30	7	3	7	2101.09	2030.73	3.84	4.00
	27B	17.5	30	7	3	7	1878.47		4.04	
	27C	17.5	30	7	3	7	2112.63		4.11	

APÊNDICE 3: Resultado de todos os corpos de prova para a resistência à compressão simples e módulo cisalhante a pequenas deformações para 28 dias de cura

Mistura	CP	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Teor de Vidro (%)	Teor de Cal (%)	Solução (Mols)	Tempo de cura (dias)	$q_u$ (kPa)		$G_o$ (GPa)	
							$q_u$ (kPa)	Média de $q_u$ (kPa)	$G_o$ (Gpa)	Média de $G_o$
1	1 <sup>a</sup>	15.5	10	3	3	28	1260.21	1218.03	1.80	1.80
	1B	15.5	10	3	3	28	1071.81		1.79	
	1C	15.5	10	3	3	28	1322.07		1.82	
2	2 <sup>a</sup>	15.5	10	5	3	28	1478.22	1206.99	2.50	2.55
	2B	15.5	10	5	3	28	1091.17		2.56	
	2C	15.5	10	5	3	28	1051.59		2.60	
3	3 <sup>a</sup>	15.5	10	7	3	28	1267.89	1341.04	2.66	2.55
	3B	15.5	10	7	3	28	1332.93		2.81	
	3C	15.5	10	7	3	28	1422.30		2.19	
4	4 <sup>a</sup>	16.5	10	3	3	28	1422.13	1490.56	3.28	3.29
	4B	16.5	10	3		28	1514.85		3.33	
	4C	16.5	10	3	3	28	1534.71		3.28	
5	5 <sup>a</sup>	16.5	10	5	3	28	1640.89	1615.74	3.37	3.22
	5B	16.5	10	5	3	28	1643.06		3.00	
	5C	16.5	10	5	3	28	1563.27		3.29	
6	6 <sup>a</sup>	16.5	10	7	3	28	1935.36	1868.03	3.27	3.24
	6B	16.5	10	7	3	28	1839.29		3.28	
	6C	16.5	10	7	3	28	1829.44		3.16	

7	7A	17.5	10	3	3	28	1516.85	1556.04	3.31	3.15
	7B	17.5	10	3	3	28	1585.95		3.14	
	7C	17.5	10	3	3	28	1565.33		3.01	
8	8A	17.5	10	5	3	28	1888.11	1941.39	4.02	3.97
	8B	17.5	10	5	3	28	1931.41		3.93	
	8C	17.5	10	5	3	28	2004.66		3.95	
9	9A	17.5	10	7	3	28	2308.43	2234.12	4.25	4.09
	9B	17.5	10	7	3	28	2328.52		4.14	
	9C	17.5	10	7	3	28	2065.42		3.89	
10	10A	15.5	20	3	3	28	994.19	954.60	1.84	2.42
	10B	15.5	20	3	3	28	932.97		2.48	
	10C	15.5	20	3	3	28	936.64		2.94	
11	11A	15.5	20	5	3	28	1306.56	1319.53	2.96	2.96
	11B	15.5	20	5	3	28	1279.43		2.95	
	11C	15.5	20	5	3	28	1372.61		2.96	
12	12A	15.5	20	7	3	28	1702.13	1655.16	1.79	1.81
	12B	15.5	20	7	3	28	1556.33		1.81	
	12C	15.5	20	7	3	28	1707.03		1.82	
13	13 A	16.5	20	3	3	28	1198.38	1201.75	1.93	1.31
	13B	16.5	20	3	3	28	1234.26		1.00	
	13C	16.5	20	3	3	28	1172.60		0.99	
14	14 A	16.5	20	5	3	28	1717.36	1792.97	1.56	1.57
	14B	16.5	20	5	3	28	1841.80		1.60	
	14C	16.5	20	5	3	28	1819.76		1.56	
15	15 A	16.5	20	7	3	28	2378.91	2267.64	2.93	2.90
	15B	16.5	20	7	3	28	2269.89		2.97	
	15C	16.5	20	7	3	28	2154.12		2.79	
16	16 A	17.5	20	3	3	28	1509.52	1461.50	1.38	1.51
	16B	17.5	20	3	3	28	1299.87		1.50	

	16C	17.5	20	3	3	28	1575.12		1.66	
17	17 A	17.5	20	5	3	28	2550.90	2498.69	2.22	2.61
	17B	17.5	20	5	3	28	2509.47		3.00	
	17C	17.5	20	5	3	28	2435.70		2.59	
18	18 A	17.5	20	7	3	28	3049.41	3165.49	3.58	3.79
	18B	17.5	20	7	3	28	3281.56		4.00	
	18C	17.5	20	7	3	28			#DIV/0!	
19	19 A	15.5	30	3	3	28	1204.86	1248.62	0.78	0.72
	19B	15.5	30	3	3	28	1231.71		0.83	
	19C	15.5	30	3	3	28	1309.29		0.54	
20	20 A	15.5	30	5	3	28	1467.36	1379.16	1.14	0.97
	20C	15.5	30	5	3	28	1341.36		0.85	
21	21 A	15.5	30	7	3	28	1665.38	1694.29	1.13	1.38
	21B	15.5	30	7	3	28	1487.55		1.17	
	21C	15.5	30	7	3	28	1929.94		1.85	
22	22 A	16.5	30	3	3	28	2096.84	2012.53	1.03	1.08
	22B	16.5	30	3	3	28	2106.31		0.97	
	22C	16.5	30	3	3	28	1834.43		1.24	
23	23 A	16.5	30	5	3	28	2176.46	2423.70	1.21	1.21
	23B	16.5	30	5	3	28	2567.30		1.21	
	23C	16.5	30	5	3	28	2527.32		1.22	
24	24 A	16.5	30	7	3	28	3133.84	2978.16	2.14	1.92
	24B	16.5	30	7	3	28	2890.03		1.59	
	24C	16.5	30	7	3	28	2910.62		2.01	
25	25A	17.5	30	3	3	28	2598.50	2914.91	1.26	1.35
	25B	17.5	30	3	3	28	2954.92		1.36	
	25C	17.5	30	3	3	28	3191.31		1.41	
26	26A	17.5	30	5	3	28	3253.22	3464.72	1.62	1.69
	26B	17.5	30	5	3	28	3609.56		1.70	



	26C	17.5	30	5	3	28	3531.37		1.74	
27	27 A	17.5	30	7	3	28	3479.41	3586.78	2.79	2.64
	27B	17.5	30	7	3	28	3654.11		2.67	
	27C	17.5	30	7	3	28	3626.81		2.46	