

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Área de concentração em Geotecnia

**AVALIAÇÃO DO COMPÓSITO DE RESÍDUOS RECICLADOS DA
CONSTRUÇÃO CIVIL DA CIDADE DE PORTO VELHO/RO E
CIMENTO ALTERNATIVO PARA TRATAMENTO DE TALUDES
FLUVIAIS**

Kleber Lúcio Borges

Porto Alegre

2024

KLEBER LÚCIO BORGES

**AVALIAÇÃO DO COMPÓSITO DE RESÍDUOS RECICLADOS DA
CONSTRUÇÃO CIVIL DA CIDADE DE PORTO VELHO/RO E
CIMENTO ALTERNATIVO PARA TRATAMENTO DE TALUDES
FLUVIAIS**

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

Orientadora: Prof. Dra. **Karla Salvagni Heineck**

Coorientador: Prof. Dr. **Andres Maurício Lotero Caicedo**

Porto Alegre

2024

**AVALIAÇÃO DO COMPÓSITO DE RESÍDUOS RECICLADOS DA
CONSTRUÇÃO CIVIL DA CIDADE DE PORTO VELHO/RO E
CIMENTO ALTERNATIVO PARA TRATAMENTO DE TALUDES
FLUVIAIS**

Porto Alegre, 22 de fevereiro de 2024.

Profa. Karla Salvagni Heineck
Dra. pelo PPGEC/UFRGS
Orientadora

Prof. Andres Maurício Lotero Caicedo
Dr. pelo PPGEC/UFRGS
Coorientador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Nilo Cesar Consoli (UFRGS)
Ph.D. Concordia University, Canadá

Prof. Pedro Domingos Marques Piettro (UPF)
Dr. pelo PPGEC/UFRGS

Prof. Eduardo Pavan Korf (UFFS)
Dr. pelo PPGEC/UFRGS

FICHA CATALOGRÁFICA**CIP - Catalogação na Publicação**

Borges, Kleber Lucio.
AVALIAÇÃO DO COMPOSITO DE RESÍDUOS RECICLADOS DA
CONSTRUÇÃO CIVIL DA CIDADE DE PORTO VELHO/RO E CIMENTO
ALTERNATIVO PARA TRATAMENTO DE TALUDES FLUVIAIS /
Kleber Lucio Borges. -- 2024.
182 f.

Orientadora: Karla Salvagni Heineck.

Coorientador: Andres Maurício Lotero Caicedo.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,
BR-RS, 2024.

1. reciclagem resíduos construção. 2. cimento
álcalis ativados. 3. pó de vidro. 4. solo cimento. 5.
tratamento taludes fluviais. I. Heineck, Karla
Salvagni, orient. II. Caicedo, Andres Maurício
Lotero, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

*Dedico à minha esposa Cristiane e aos meus filhos,
pelo amor, incentivo, compreensão e apoio.
Que esta conquista sirva de inspiração para
os meus filhos na busca de conhecimento.*

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida, pela minha família e amigos.

À minha esposa Cristiane, que sempre me incentivou e apoiou na busca de conhecimento.

Ao PPGEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, que me permitiu aprofundar meus conhecimentos.

À Profa. Karla, minha orientadora, que sempre esteve disponível e me orientou para alcançar o objetivo da melhor forma, apesar do desenvolvimento da pesquisa a 3.500 Km de distância e do meu longo período sem estudar profundamente nesta área.

Ao Prof. Andres, meu coorientador, que me ajudou a alcançar os resultados esperados da pesquisa, auxiliando com seu profundo conhecimento nesta área.

A todos os professores do PPGEC que nos dedicaram o seu tempo e compartilharam seus conhecimentos nas disciplinas ministradas, em especial ao Prof. Lucas Festugato pelo desafio de reviver horas de estudo como na graduação.

Aos meus colegas da minha turma de doutorado, pelo apoio e entusiasmo transmitido, em especial ao Vinícius, mineiro que compartilhou horas de estudo e de futebol.

Ao Márcio, da Betontech, que me auxiliou em todos os ensaios realizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. José Eduardo Alamy Filho da UFU pelo incentivo durante o processo de qualificação e apoio na realização dos ensaios de DRX e FRX posteriormente.

À UFU – Universidade Federal de Uberlândia por permitir a realização dos ensaios de DRX e FRX, em especial aos técnicos Roni (LAMIQ) e Rafael (LAMER).

À Juliana e ao Mauro, da Fiocruz Rondônia, que prontamente se dispuseram a realizar as imagens microscópicas das amostras e das análises delas.

Ao Moreno da Fiocruz Rondônia pelo apoio na análise estatística.

Ao Jansen, diretor da Fiocruz Rondônia, pelo apoio, compreensão e incentivo para o desenvolvimento desse trabalho.

E a todos, que diretamente ou indiretamente, contribuíram para a realização de mais esta conquista.

Registro aqui, toda a minha gratidão!

RESUMO

BORGES, K. L. Avaliação do compósito de resíduos reciclados da construção civil da cidade de Porto Velho/RO e cimento alternativo para tratamento de taludes fluviais. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

A gestão adequada dos resíduos da construção civil é um problema ambiental enfrentado por diversos municípios, bem como o tratamento de taludes fluviais erodidos, como é o caso da cidade de Porto Velho/RO. Uma das soluções para o tratamento destes taludes é a aplicação de solo cimento. Esta pesquisa propôs a avaliar um compósito de resíduos reciclados da construção civil, utilizado como solo e um cimento alternativo, ativado por álcalis, tendo como principal precursor o pó de vidro, outro resíduo da construção civil. Os resíduos de construção civil utilizados, que passaram por uma usina de reciclagem, possuem massa específica = $2,69 \text{ g/cm}^3$ e a sua classificação, de acordo com AASHTO, foi de um solo A-1-b. Foi realizado uma avaliação do compósito com cimento Portland e com o cimento alternativo para comparação. No cimento alternativo foi realizada algumas variações, em 4 fases diferentes, na busca da melhor composição que atendesse aos 2 critérios recomendados pela PCA - Associação de Cimento Portland dos Estados Unidos para o uso no tratamento de taludes fluviais: resistência a compressão a 7 dias e perda de massa. Foi estudado dois tipos de ativadores: hidróxido de sódio e uma solução dele com silicato de sódio. Outra variação foi a adição de cal hidratada junto com o pó de vidro para tentar melhorar o compósito. Os resultados com o cimento Portland ratificaram todas as recomendações da PCA e o melhor teor, que atende aos dois critérios e possui o menor teor de cimento estudado, foi de 10% para o compósito estudado. Já o melhor cimento alternativo também foi de 10% de teor de pó de vidro (partículas $< 0,075\text{mm}$) com adição de cal hidratada (relação cal/precursor = 0,30), com relação água/ligante = 0,40, com ativador composto da solução de hidróxido de sódio com silicato de sódio (razão 1:2,5), concentração molar do hidróxido de sódio = 3,75M, relação ativador/precursor = 0,0615. O melhor compósito com cimento alternativo obteve resistências a compressão maiores do que o com cimento Portland e menor perda de massa, tornando uma opção viável tecnicamente. Os compósitos ativados com hidróxido de sódio tiveram resultados inferiores em comparação aos ativados com a solução dele com silicato de sódio, na última fase da pesquisa. Por fim, o cimento alternativo pode ser considerado mais vantajoso economicamente por possuir um custo de US\$ 31,09/m³ enquanto o mesmo compósito com cimento Portland possui o custo US\$ 36,42/m³, além de ser mais barato que diversas referências com materiais semelhantes, demonstrando-se ser viável técnica e economicamente para o tratamento de taludes fluviais erodidos.

Palavras chaves: *reciclagem resíduos construção, cimento álcalis ativados, pó de vidro, solo cimento, tratamento taludes fluviais.*

ABSTRACT

BORGES, K. L. **Avaliação do compósito de resíduos reciclados da construção civil da cidade de Porto Velho/RO e cimento alternativo para tratamento de taludes fluviais.** 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

The adequate management of construction waste is an environmental problem faced by several municipalities, as well as the treatment of eroded river embankments, as is the case in the city of Porto Velho/RO. One of the solutions for treating these slopes is the application of cement soil. This research proposed to evaluate a composite of recycled construction waste, used as soil and an alternative cement, activated by alkali, with glass powder, another construction waste, as the main precursor. The construction waste used, which passed through a recycling plant, has a specific mass = 2.69 g/cm^3 and its classification, according to AASHTO, was an A-1-b soil. An evaluation of the composite was carried out with Portland cement and the alternative cement for comparison. In the alternative cement, some variations were made, in 4 different phases, in the search for the best composition that met the 2 criteria recommended by PCA - Portland Cement Association of the United States for use in the treatment of river slopes: 7-day compressive strength and weight loss. Two types of activators were studied: sodium hydroxide and a solution of it with sodium silicate. Another variation was the addition of hydrated lime along with the glass powder to try to improve the composite. The results with Portland cement ratified all PCA recommendations and the best content, which meets both criteria and has the lowest cement content studied, was 10% for the studied composite. The best alternative cement was also 10% glass powder content (particles $< 0,075\text{mm}$) with addition of hydrated lime (lime/precursor ratio = 0,30), with water/binder ratio = 0,40, with activator composed of sodium hydroxide solution with sodium silicate (ratio 1:2,5), molar concentration of sodium hydroxide = 3,75M, activator/precursor ratio = 0,0615. The best composite with alternative cement had greater compressive strength than that with Portland cement and lower mass loss, making it a technically viable option. The composites activated with sodium hydroxide had inferior results compared to those activated with its solution with sodium silicate, in the last phase of the research. Finally, alternative cement can be considered more economically advantageous as it has a cost of US\$ 31,09/m³ while the same composite with Portland cement costs US\$ 36,42/m³, in addition to being cheaper than several references with similar materials, proving to be technically and economically viable for the treatment of eroded river embankments.

Keywords: *construction waste recycling, álcali-activated cement, glass powder, cement soil, river slope treatment.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Croquis de usina de reciclagem de RCCR compacta.....	7
Figura 2. Processo de uma usina de reciclagem de RCCR.....	7
Figura 3. Zonas de um talude fluvial.....	10
Figura 4. Diagrama de Hjulstrom.....	13
Figura 5. Erosão e deposição causadas por ação hidráulica.....	14
Figura 6. Processo de erosão do talude fluvial por ação hidráulica.....	14
Figura 7. Relação da inclinação, espessura da face, espessura da camada e largura da camada horizontal.....	20
Figura 8. Seção típica – proteção de taludes fluviais com solo cimento.....	22
Figura 9. Efeito do teor de cimento na resistência dos solos avaliados a 7 dias de cura e após 24h de imersão.....	24
Figura 10. Classificação dos tipos de sistemas de cimento em relação à composição de cálcio (Ca), alumínio (Al) e íons cátions (M^+).....	28
Figura 11. Diagrama de composição dos precursores em função da natureza de seus componentes.....	29
Figura 12. Processo de ativação alcalina em geopolímeros.....	30
Figura 13. Comparação das emissões relativas de CO_2 para cimento Portland e cimentos alternativos.....	32
Figura 14. Quantificação dos poros e a sua distribuição.....	35
Figura 15. Taxa de liberação de calor do metacaulim ativado por diferentes concentrações de NaOH.....	38
Figura 16. Taxa de liberação de calor do metacaulim ativado por NaOH a 5M e 12M.	39
Figura 17. Variação da resistência à compressão em função da molaridade do NaOH.	40
Figura 18. Resultados da resistência a compressão simples da argamassa com 100% metacaulim.....	40
Figura 19. Influência da concentração molar na resistência a compressão simples.....	41
Figura 20. Variação da resistência a compressão simples x molaridade de NaOH.....	42
Figura 21. Evolução do número de publicações relacionadas com RCCR ativados por álcalis.....	45
Figura 22. Comparação de um concreto RCCR ativado com álcalis e.....	49

Figura 23. Resistência a compressão simples do cimento híbrido.	50
Figura 24. Resistência a compressão simples das argamassas.	51
Figura 25. Resistência a compressão simples do concreto com cimento híbrido.....	51
Figura 26. Resultados da resistência a compressão simples para misturas com altos teores de cálcio. a) Pastas curadas a $23 \pm 2^\circ\text{C}$. b) Pastas curadas a $33 \pm 2^\circ\text{C}$	55
Figura 27. Resistência à compressão simples de compósitos GWG-CL compactados com água (0m) e SHS (3m) com 7 e 28 dias de cura.	56
Figura 28. Influência da relação água/ligante na resistência à compressão simples.	57
Figura 29. Efeito da relação água/aglomerante na resistência à compressão simples....	58
Figura 30. Resultados da permeabilidade x relação a/b.	59
Figura 31. Estudo do compósito com solo cimento Portland (fase 2).	64
Figura 32. Estudo do compósito com solo cimento alternativo (fase 3).	64
Figura 33. Estudo do compósito com solo cimento alternativo com cal (fase 4).....	65
Figura 34. Estudo do compósito com solo cimento alternativo com cal (fase 5).....	65
Figura 35. Estudo do compósito com solo cimento alternativo com cal (fase 6).....	66
Figura 36. Localização da usina de reciclagem em Porto Velho/RO.....	69
Figura 37. Usina de reciclagem em Porto Velho/RO.	69
Figura 38. Tijolo de material reciclado e vidro moído produzidos na usina de reciclagem.	70
Figura 39. Britador do vidro moído, na Usina de reciclagem em Porto Velho/RO.	71
Figura 40. Laboratório onde os ensaios foram realizados, em Porto Velho/RO.	71
Figura 41. Amostra de material reciclado coletada para o estudo.	72
Figura 42. Material reciclado após 24h na estufa.	73
Figura 43. Cimento utilizado e homogeneização da mistura (solo + cimento).....	74
Figura 44. Ensaio de compactação realizado (fase de expansão).....	75
Figura 45. Dimensões do molde para corpo de prova.	75
Figura 46. Corpos de prova moldados para ensaio de compressão simples.....	76
Figura 47. Prensa eletro hidráulica digital utilizada.	76
Figura 48. Vidro moído reciclado coletado na usina de reciclagem.	77
Figura 49. Pilão manual para moagem do vidro reciclado.	78
Figura 50. Caracterização granulométrica do vidro reciclado.....	78
Figura 51. Preparo da solução de HS.	81
Figura 52. Preparo da solução de HSSS.	82
Figura 53. Preparo do cimento alternativo (pó de vidro + ativadores).....	83

Figura 54. Moldagem dos corpos de prova.	83
Figura 55. Cal hidratada utilizada.....	85
Figura 56. Preparo do precursor do cimento alternativo (pó de vidro + cal hidratada)..	85
Figura 57. Material retido após a lavagem.	93
Figura 58. Curva granulométrica AASHTO da areia reciclada da construção civil de Porto Velho.....	94
Figura 59. Regressão linear – umidade ótima x teor cimento.	99
Figura 60. Corpos de prova ensaiados.....	100
Figura 61. Perda de massa após cada ciclo de molhagem e secagem.	100
Figura 62. Regressão linear - perda de massa x teor de cimento.....	102
Figura 63. Resultados dos ensaios de resistência a compressão simples (MPa).	102
Figura 64. Resultados das médias dos ensaios a compressão simples e regressão linear.	105
Figura 65. Curva granulométrica AASHTO do pó de vidro reciclado de Porto Velho.	107
Figura 66. Resultado da análise do ensaio DRX – pó de vidro.	107
Figura 67. Resultados de resistência a compressão simples – ativador HS.	109
Figura 68. Resultados das médias dos ensaios a compressão simples e regressão linear, para o ativador hidróxido de sódio.	110
Figura 69. Resultados de compressão simples – ativador HSSS.....	111
Figura 70. Resultados das médias dos ensaios a compressão simples e regressão linear, para o ativador hidróxido de sódio + silicato de sódio.....	112
Figura 71. Corpos de prova ensaiados, ativador HS.	113
Figura 72. Perda de massa após cada ciclo de molhagem e secagem, ativador HS.	114
Figura 73. Corpos de prova ensaiados (ativador HSSS).	115
Figura 74. Perda de massa após cada ciclo de molhagem e secagem, ativador HSSS.	116
Figura 75. Resistência a compressão simples (Fase 3).....	117
Figura 76. Resultados de compressão simples (em MPa) para cura a 7 dias.	118
Figura 77. Resultados de durabilidade (perda de massa em %).	119
Figura 78. Material retido após a lavagem nas diferentes peneiras.....	121
Figura 79. Curva granulométrica AASHTO da areia reciclada utilizada na Fase 4.....	122
Figura 80. Pesagem material para confecção do corpo de prova PVCHidealHS.....	123
Figura 81. Corpo de prova PVCH+5HSSS (15%), que se quebrou ao ser desmoldado.	124

Figura 82. Comparação dos resultados obtidos (Fase 4). Compressão simples a 7 dias.	125
Figura 83. Curva granulométrica AASHTO da areia reciclada utilizada na Fase 5.....	128
Figura 84. Corpos de prova ensaiados a 7 dias.	129
Figura 85. Imagens microscópicas e quantificação dos poros – material Fase 5.....	131
Figura 86. Comparação dos resultados obtidos (Fase 5). Compressão simples a 7 dias.	134
Figura 87. Resultados de resistência a compressão simples – ativador HS (fase 6). ...	135
Figura 88. Resultados das médias dos ensaios a compressão simples e regressão linear, para o ativador hidróxido de sódio (fase 6).	137
Figura 89. Resultados de resistência a compressão simples – ativador HSSS (fase 6).	137
Figura 90. Resultados das médias dos ensaios de resistência a compressão simples e regressão linear, para o ativador hidróxido de sódio + silicato de sódio (fase 6).	139
Figura 91. Corpos de prova ensaiados, ativador HS.	140
Figura 92. Perda de massa, ativador HS (fase 6).	140
Figura 93. Corpos de prova ensaiados (ativador HSSS).	141
Figura 94. Perda de massa, ativador HSSS - fase 6.	142
Figura 95. Resistência a compressão simples (Fase 6).	143
Figura 96. Resultados de resistência a compressão simples (em MPa) para cura a 7 dias.	144
Figura 97. Resultados de resistência a compressão simples (em MPa) para cura a 7 dias – Fase 3 x Fase 6.	145
Figura 98. Comparação dos resultados de durabilidade (perda de massa em %).	146
Figura 99. Quantificação dos poros (compósitos – fase 6, a 7 dias).	147
Figura 100. Análise da relação água/cimento x resistência a compressão simples (MPa) dos compósitos.	152
Figura 101. Análise da relação perda de massa (%) x resistência a compressão simples (MPa) dos compósitos.	153
Figura 102. Bloxplot da resistência a compressão simples (MPa) x tipo de compósito estudado, ao longo do tempo (dias).	154
Figura 103. Análise da relação água/cimento x perda de massa (%).	155

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Subprodutos da reciclagem dos resíduos da construção.....	6
Quadro 2. Recomendações de cimento para tratamento de talude fluviais com solo cimento.....	18
Quadro 3. Percentual de água retida no corpo de prova.....	25
Quadro 4. Perda máxima em função do tipo de solo.....	25
Quadro 5. Estimativa de custo do processamento do solo cimento.....	26
Quadro 6. Alguns estudos realizados utilizando RCCR em cimentos alternativos.....	45
Quadro 7. Exigências químicas para classificação da cal hidratada.....	52
Quadro 8. Exigências físicas para classificação da cal hidratada.....	52
Quadro 9. Resumo da metodologia utilizada na pesquisa.	61
Quadro 10. Programa de ensaios realizados – quantidade de ensaios.....	74
Quadro 11. Montagem dos compósitos – Fase 2.....	77
Quadro 12. Variações estudadas de solo cimento alternativo.	80
Quadro 13. Programa de ensaios realizados da Fase 3 – quantidade	80
Quadro 14. Montagem dos corpos de prova – Fase 3.	84
Quadro 15. Planejamento dos ensaios – Fase 4.....	86
Quadro 16. Montagem dos corpos de prova – Fase 4.	87
Quadro 17. Variações estudadas de solo cimento alternativo.	88
Quadro 18. Programa de ensaios realizados da Fase 4 – quantidade	88
Quadro 19. Montagem dos corpos de prova – Fase 5.	89
Quadro 20. Programa de ensaios realizados da Fase 6 – quantidade	90
Quadro 21. Montagem dos corpos de prova – Fase 6.	92
Quadro 22. Comparação das características e os resultados obtidos para uso do solo como solo cimento.	95
Quadro 23. Recomendações para definição do teor de cimento.....	96
Quadro 24. Resumo dos resultados obtidos para cada teor de cimento estudado.	98
Quadro 25. Resultados dos ensaios de durabilidade realizados.	101
Quadro 27. Avaliação de atendimento aos critérios para cada teor de cimento.....	106
Quadro 28. Resultado da avaliação química (ensaio FRX) do pó de vidro.....	108

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABRECON - Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

ANA – Agência Nacional de Águas

CA – Cimento Alternativo

C-A-S-H - Alumino Silicato de Cálcio Hidratado

CH – Cal Hidratada

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

CP – Cimento Portland

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DRX - Difratorômetro de Raio-X

FISPQ – Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico

FIOCRUZ – Fundação Oswaldo Cruz

FRX - Espectrômetro de Fluorescência de Raio-X

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IECA – Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones

IG – Índice de Grupo

IP – Índice de Plasticidade

ISC – Índice de Suporte Califórnia

HS – Hidróxido de Sódio (NaOH)

HSSS - Hidróxido de Sódio (NaOH) + silicato de sódio (Na₂SO₃)

N-A-S-H - Alumino Silicato de Sódio Hidratado

NBR – Norma Brasileira de Referência

PCA - Portland Cement Association

PV – Pó de Vidro

PVCH – Pó de Vidro e Cal Hidratada

RCC - Resíduos da Construção Civil

RCCR - Resíduos da Construção Civil Reciclado

SC – Solo Cimento

SEMA - Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Porto Velho

SS – Silicato de Sódio (Na_2SO_3)

SUCS - Unified Soil Classification System

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa.....	3
1.2. Objetivos	4
1.3. Hipótese.....	4
1.4. Limitações da pesquisa	5
1.5. Estrutura da tese.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Resíduos de Construção	6
2.2. Erosão em taludes fluviais.....	9
2.3. Tratamento de taludes fluviais erodidos com uso de solo cimento.....	15
2.3.1. Características do solo recomendado.....	17
2.3.2. Tipo de cimento Portland recomendado	17
2.3.3. Teores de cimento recomendados	18
2.3.4. Compactação recomendada.....	18
2.3.5. Teor de umidade recomendado	19
2.3.6. Índice de Plasticidade recomendado	19
2.3.7. Recomendações para proteção de taludes fluviais.....	19
2.3.8. Resistência a compressão.....	23
2.3.9. Ensaio de durabilidade por secagem e molhagem	24
2.3.10. Requisitos técnicos para o uso do solo cimento no tratamento de taludes fluviais.....	26
2.3.11. Aspectos econômicos.....	26
2.4. Cimento alternativo a partir de ligantes álcalis ativados.....	27
2.4.1. Pó de vidro como precursor	32

2.4.2. Ativadores	36
2.4.3. Uso de RCCR ativados por álcalis.....	44
2.4.4. Uso de cal para otimizar o cimento alternativo.....	52
2.4.5. Efeitos da relação água/ligante em ligantes álcalis ativados.....	56
2.5. Conclusões a partir da revisão bibliográfica	59
3. METODOLOGIA	61
3.1. Fases da Pesquisa	63
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	67
4.1. Local do estudo	67
4.1.1. Resíduos da Construção Civil utilizados	67
4.1.2. Usina de reciclagem dos RCC	68
4.1.3. Laboratório utilizado para os ensaios	71
4.2. Fase 1: Caracterização dos resíduos reciclados da construção civil de Porto Velho	72
4.3. Fase 2: Compósito com cimento Portland.....	73
4.4. Fase 3: Compósito de cimento alternativo	77
4.4.1. Preparação da solução com Hidróxido de Sódio.....	81
4.4.2. Preparação da solução com a mistura de Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio	82
4.4.3. Preparação do cimento alternativo	82
4.4.4. Parâmetros de cada compósito (Fase 3)	84
4.5. Fase 4: Compósito de cimento alternativo com adição de cal com resíduos da construção civil reciclado diferente.....	84
4.6. Fase 5: Compósito de cimento alternativo com adição de cal com resíduos da construção civil reciclado semelhante à Fase 3.....	88
4.7. Fase 6: Compósito de cimento alternativo com adição de cal com resíduos da construção civil reciclado semelhante à Fase 3, com alteração na concentração do HS e fixação da relação água/ligante	90

4.7.1. Preparação da solução com Hidróxido de Sódio.....	91
4.7.2. Fixação da relação água/ligante (W/L)	91
4.7.3. Parâmetros de cada compósito (Fase 6)	92
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
5.1. Fase 1: Caracterização dos resíduos reciclados da construção civil	93
5.1.1. Granulometria.....	93
5.1.2. Absorção de água	95
5.1.3. Massa específica.....	95
5.1.4. Discussão dos resultados da Fase 1	96
5.2. Fase 2: Resultados do compósito com cimento Portland	98
5.2.1. Umidade ótima	98
5.2.2. Durabilidade – perda de massa.....	99
5.2.3. Resistência a compressão simples	102
5.2.4. Discussão dos resultados da Fase 2.....	104
5.3. Fase 3: Resultados do compósito com cimento alternativo	107
5.3.1. Caracterização granulométrica do vidro reciclado	107
5.3.2. Caracterização mineralógica e química do pó de vidro	107
5.3.3. Resistência a compressão simples	108
5.3.3.1. Ativador Hidróxido de sódio	108
5.3.3.2. Ativador Hidróxido de sódio + silicato de sódio.....	111
5.3.4. Durabilidade – perda de massa.....	113
5.3.4.1. Ativador Hidróxido de sódio	113
5.3.4.2. Ativador Hidróxido de sódio + silicato de sódio.....	115
5.3.5. Discussão dos resultados da Fase 3	117
5.4. Fase 4: Resultados do compósito com cimento alternativo com adição de cal, com solo RCCR diferente.....	121
5.4.1. Caracterização dos novos resíduos reciclados.....	121

5.4.2. Resistencia a compressão simples.....	124
5.4.3. Discussão dos resultados da Fase 4.....	125
5.5. Fase 5: Resultados do compósito com cimento alternativo com adição de cal	127
5.5.1. Caracterização dos novos materiais reciclados, após reinício da operação da recicladora	127
5.5.2. Resistência a compressão simples.....	129
5.5.3. Discussão dos Resultados – Fase 5	130
5.6. Fase 6: Resultados do compósito com cimento alternativo com adição de cal, concentração de 5% de Na ₂ O ou 3,75M NaOH	135
5.6.1. Resistência a compressão simples.....	135
5.6.1.1. Ativador Hidróxido de sódio	135
5.6.1.2. Ativador Hidróxido de sódio + silicato de sódio.....	137
5.6.2. Durabilidade – perda de massa.....	139
5.6.2.1. Ativador Hidróxido de sódio	139
5.6.2.2. Ativador Hidróxido de sódio + silicato de sódio.....	141
5.6.3. Discussão dos resultados da Fase 6.....	142
5.7. Análise estatística dos resultados	151
5.8. Resposta da hipótese da pesquisa.....	156
6. CONCLUSÕES	159
RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	161
REFERÊNCIAS	162
APÊNDICE 1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS GRANULOMETRIA	173
APÊNDICE 2 – RESUMO DOS DADOS – ESTUDO ESTATÍSTICO.....	175
ANEXO 1 – CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO DA PRENSA UTILIZADA	177

1. INTRODUÇÃO

A construção civil gera diversos resíduos, caracterizando um dos seus principais impactos ambientais. A resolução CONAMA 307 (BRASIL, 2002) estabeleceu diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. De acordo com esta resolução, o Plano Municipal de Gestão dos Resíduos da Construção deve ser o principal instrumento de planejamento para minimizar estes impactos.

A reciclagem destes resíduos, uma solução em crescimento, representa vantagens econômicas, sociais e ambientais, tais como economia na aquisição de matéria prima devido a substituição de materiais convencionais pelo resíduo reciclado e diminuição da poluição gerada e suas consequências negativas como enchentes e assoreamento de rios e córregos, além da preservação das reservas naturais de matéria prima (FILHO, 2015).

Segundo o último relatório de pesquisa setorial 2017/2018, publicado pela Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2019), no Brasil, apenas 21% de todo resíduo gerado pela construção civil era reciclado por pouco mais de 360 usinas em todo país. Enquanto, na União Europeia a meta era reciclar mais de 70% dos resíduos de construção civil até 2020 (TORGAL *et al*, 2013).

No último Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020 (ABRELPE, 2020), em 2010 foram recolhidos 33,4 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição, aumentando para 44,5 milhões em 2019. Com isso, a quantidade per capita anual coletada média, passou de 174,3 kg/habitante para 213,5 kg/habitante.

A destinação inadequada dos resíduos de construção é um problema ambiental que deve ser combatido. A redução na geração destes resíduos nas obras somado à reutilização daqueles que ainda inevitavelmente serão gerados é a melhor solução ambiental e econômica.

O reaproveitamento destes resíduos reciclados pode ser utilizado para várias finalidades (ABRECON, 2020):

- Argamassas de assentamento de alvenaria de vedação, contrapisos, solo cimento, blocos e tijolos de vedação;
- Fabricação de artefatos de concreto, como blocos de vedação, pisos intertravados, manilhas de esgoto, entre outros;
- Fabricação de concretos não estruturais e obras de drenagens;

- Obras de base e sub-base de pavimentos, reforço e subleito de pavimentos, além de regularização de vias não pavimentadas, aterros e acerto topográfico de terrenos;
- Obras de pavimentação, drenagens e terraplenagem.

Em paralelo ao reaproveitamento de resíduos, a busca por cimentos ou ligantes alternativos tem sido consistentemente pesquisada, visto que, apenas a produção de cimento comum responde pela emissão de 8% do total global de CO₂ anualmente. Uma das alternativas foi o surgimento de materiais ativados por álcalis para substituir o cimento Portland. Diversas pesquisas (FERRAZZO *et al*, 2024; SIDDIKA *et al*, 2023; REIS *et al*, 2023; MAAZE e SHRIVASTAVA, 2023; BORRACHERO *et al*, 2022; SALAZAR *et al*, 2022; RANGEL, 2022; CHARITHA *et al*, 2022; LIMA *et al*, 2022; PAYÁ *et al*, 2022; PYNGROPE *et al*, 2021; NODEHI e TAGHVAEE, 2021; CONSOLI *et al*, 2021; SALAZAR *et al*, 2020; DAASSI-GLI, 2020; XIAO *et al*, 2020; BASSANI *et al*, 2019; CONSOLI *et al*, 2018; GÜLLÜ *et al*, 2017; ISLAM *et al*, 2017; SALAZAR *et al*, 2017; TORRES CARRASCO e PUERTAS, 2017; RANGARAJU *et al*, 2016; VELAZQUEZ *et al*, 2016; NASSAR & SOROUSHIAN, 2012; SOROUSHIAN, 2012) já demonstraram que o cimento alternativo pode atender aos requisitos técnicos e ser ambientalmente mais adequado. Geralmente, o processo de álcali-ativação consiste numa reação de uma fonte de alumino-silicato sólido (denominado o precursor) que sob condições alcalinas (induzida por um ativador alcalino), produz um ligante endurecido que é baseado em uma combinação de fases álcali alumino silicato hidratado e/ou álcali-alcalino terroso-alumino silicato hidratado (PROVIS, 2018). Há diversos tipos de precursores estudados, sendo que a opção pelo reaproveitamento de resíduos é uma das formas mais comuns observadas na literatura. Já os ativadores mais comuns utilizados são os hidróxidos e silicatos (PROVIS e BERNAL, 2014).

Outro problema ambiental existente em várias cidades é a erosão de taludes fluviais. O tratamento destes taludes deve ser realizado por obras adequadas do ponto de vista técnico, ser viável economicamente e de preferência sustentável.

Vários métodos para o tratamento de taludes fluviais erodidos podem ser utilizados, como por exemplo o enrocamento, bioengenharia de solos, gabião ou o uso de elementos inertes com reforço de materiais geossintéticos e/ou com cobertura de vegetação, que dependerá de cada caso. Outra alternativa atrativa para o tratamento destes taludes é o uso de solo cimento (FILHO, 1996; ACI, 2009).

Diante deste cenário, este trabalho propôs uma avaliação do compósito de resíduos reciclados da construção civil e cimento alternativo no tratamento de taludes fluviais erodidos. O problema da pesquisa foi: o compósito desenvolvido atenderá os requisitos técnicos mínimos recomendados para tratar taludes fluviais? E ainda, seria mais econômico em comparação ao uso do cimento Portland?

1.1. Justificativa

O processo de erosão de taludes fluviais é muito comum em diversos locais. Para conter este processo pode-se utilizar o solo cimento. No entanto, neste trabalho foi utilizado um compósito de resíduos da construção civil reciclados como solo e desenvolveu-se um cimento alternativo, a partir de ligantes álcalis ativados, para ser utilizado como aglomerante como opção ao uso do cimento Portland. Para efeito de comparação, fez-se também o estudo utilizando o cimento Portland associado aos resíduos da construção civil reciclados.

Não foram encontrados registros na literatura do uso de compósitos de resíduos de construção civil reciclados associado ao cimento (funcionando como solo cimento) como alternativa para o tratamento de taludes erodidos das margens de rios. Muito menos, utilizando um cimento alternativo. A maioria das pesquisas utilizam estes resíduos para o uso como agregados em concreto ou argamassa (CARDOSO *et al*, 2016; DELGADO *et al*, 2017; CARASEK *et al*, 2018; PIMENTEL *et al*, 2018; TAVIRA *et al*, 2018; WONG *et al*, 2018; GUALBERTO *et al*, 2019; REIS *et al*, 2021; SILVA *et al*, 2021) ou para a fabricação de tijolos, blocos e bloquetes não estruturais (ABCP, 2000; SEGANTINI e WADA, 2011; SHAKIR *et al.*, 2013; GOMES *et al*, 2017; LOPES, 2017; QUECAN, 2019; FORT e CERNY, 2020; MEDINA *et al*, 2021) ou como base para pavimentos (TRIMIS, 2001; VELÁZQUEZ, 2016; OSSA *et al*, 2016; CANCIAN *et al*, 2017; QUEIROZ, 2017; TAVARES *et al*, 2018; TRANNIN e PANCIERI, 2019; HASAN *et al*, 2020; ZHANG *et al*, 2021). Alguns registros indicaram o uso do resíduo da construção civil reciclado para tratamento de taludes ou uso em muros de contenção ou aterros (SÁ, 2006; SANTOS, 2007; RAHARDJO *et al*, 2013; RAMOS *et al*, 2019; FILHO *et al*, 2020; VIEIRA, 2020), porém, nenhum deles em taludes fluviais. Isso mostra que esta pesquisa é inédita para este tipo de aplicação e preenche uma lacuna ainda existente na literatura sobre a temática de tratamento de erosão de taludes fluviais e ligantes álcali-ativados.

Para o desenvolvimento do cimento alternativo, utilizou-se como precursor o pó de vidro, outro subproduto gerado da reciclagem dos resíduos da construção civil e disponível na usina de reciclagem onde se obteve os materiais para o estudo realizado. E como ativador, utilizou-se dois produtos: o hidróxido de sódio (NaOH) e o silicato de sódio (Na_2SiO_3), dois entre os mais comuns, de baixo custo e fácil disponibilidade (PROVIS e BERNAL, 2014). Foi realizado duas variações: somente hidróxido de sódio e uma combinação dos dois. Além disso foi acrescentado a cal hidratada para otimizar os resultados em outra fase.

1.2. Objetivos

O objetivo geral foi avaliar a utilização do compósito de resíduos da construção civil reciclados, gerados na cidade de Porto Velho/RO, com adição de cimento para o tratamento de taludes fluviais erodidos.

Assim, os objetivos específicos foram:

- Caracterizar os resíduos reciclados da construção civil de Porto Velho, em termos de curva granulométrica, absorção de água, massa específica e classificação do solo;
- Verificar qual o percentual mais econômico de adição de cimento Portland para o compósito proposto que atenda aos requisitos para o tratamento de taludes fluviais;
- Determinar a composição ideal do cimento alternativo para o compósito proposto que atenda aos requisitos técnicos para o tratamento de taludes fluviais;
- Realizar a comparação entre os resultados dos compósitos com cimento Portland e com cimento alternativo em termos técnicos e econômicos.

1.3. Hipótese

A hipótese avaliada foi que o compósito de resíduos da construção civil reciclados com adição de cimento alternativo, funcionando como um solo cimento para o tratamento de taludes fluviais em comparação ao uso do cimento Portland, seria outra solução técnica adequada e economicamente viável.

1.4. Limitações da pesquisa

A pesquisa realizada utilizou os resíduos reciclados da construção civil gerados na cidade de Porto Velho/RO. Porém, é importante ressaltar que a característica destes resíduos é muito variável, pois, depende de uma série de fatores: origem, quantidades e qualidade dos resíduos, composição, possíveis contaminações, misturas, entre outros. Sempre haverá a necessidade de caracterização do material disponível periodicamente a fim de classificá-lo segundo a *AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials* para que se determine o teor indicado de cimento (Portland ou alternativo) a ser utilizado, conforme preconiza a Norma Geral de Dosagem de Solo Cimento.

1.5. Estrutura da tese

Esta tese foi estruturada em seis capítulos, onde o primeiro corresponde à introdução, contendo a justificativa, os objetivos, a hipótese e as limitações desta pesquisa.

No capítulo 2 apresenta-se toda a revisão bibliográfica do assunto abordado, visando dar base científica e o status atual dos conceitos utilizados no desenvolvimento da pesquisa realizada.

O capítulo 3 descreve toda a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, que foi dividida em fases visando atender aos objetivos específicos e conseqüentemente o objetivo geral proposto.

Os materiais e métodos empregados estão relatados no capítulo 4, detalhando o local do estudo e todas as etapas realizadas da pesquisa.

No capítulo 5 apresenta-se todos os resultados obtidos e realiza-se a discussão deles.

Por fim, o capítulo 6 abordam-se as conclusões obtidas da pesquisa e faz-se recomendações para trabalhos futuros sobre o assunto abordado na pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Resíduos de Construção

No mundo, de 25% a 30% dos resíduos sólidos gerados são resíduos da construção civil, um fato alarmante. Uma das soluções para este problema é a incorporação do conceito da “economia circular”, na qual os resíduos são incorporados novamente nos processos de produção de novos produtos e/ou materiais na direção do objetivo de resíduos zero (SALAZAR *et al*, 2020).

No Brasil, a lei federal 12.305 (BRASIL, 2010) instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos. A principal diretriz da política é a redução na geração e o aumento da reciclagem, reutilização e tratamento adequado dos resíduos. Um dos instrumentos é a elaboração dos Planos de Gestão e Gerenciamento dos Resíduos, a nível estadual, municipal e das organizações geradoras.

Somente os resíduos das Classes A, B e C podem ser reciclados. Segundo a ABRECON (2020), o segmento da reciclagem de resíduos da construção e demolição no Brasil ainda é incipiente. A reciclagem deste resíduo é um mercado desenvolvido em muitos países da Europa, em grande parte pela escassez de recursos naturais que aqueles países têm. A implantação de uma usina de reciclagem de resíduos da construção pode gerar alguns subprodutos que podem ser reutilizados na própria indústria da construção civil, como demonstra o Quadro 1.

Quadro 1. Subprodutos da reciclagem dos resíduos da construção.

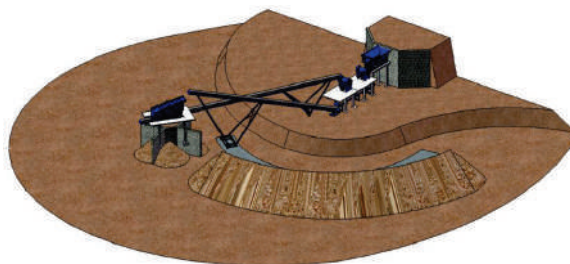
Subproduto	Características	Uso recomendado
Areia reciclada	Material com dimensão máxima característica inferior a 4,8 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto	Argamassas de assentamento de alvenaria de vedação, contrapisos, solo cimento, blocos e tijolos de vedação
Pedrisco reciclado	Material com dimensão máxima característica de 6,3 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto	Fabricação de artefatos de concreto, como blocos de vedação, pisos intertravados, manilhas de esgoto, entre outros
Brita reciclada	Material com dimensão máxima característica inferior a 39 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto	Fabricação de concretos não estruturais e obras de drenagens
Bica corrida	Material proveniente da reciclagem de resíduos da construção civil, livre de impurezas, com dimensão máxima característica de 63 mm (ou a critério do cliente)	Obras de base e sub-base de pavimentos, reforço e subleito de pavimentos, além de regularização de vias não pavimentadas, aterros e acerto topográfico de terrenos

Rachão	Material com dimensão máxima característica inferior a 150 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto	Obras de pavimentação, drenagens e terraplenagem
--------	--	--

Fonte: ABRECON (2020).

Uma usina de reciclagem compacta com rebitador (Figura 1), conforme a empresa PRS (2014), possui dois processos: triagem e trituração. Na triagem manual, é realizada a retirada dos materiais de Classe B, C e D. Já o processo de trituração é realizado por meio da passagem nos seguintes equipamentos: alimentador vibratório, britador, correia transportadora, peneira vibratória e rebitador. Os subprodutos finais são: areia, brita, pedrisco e rachão.

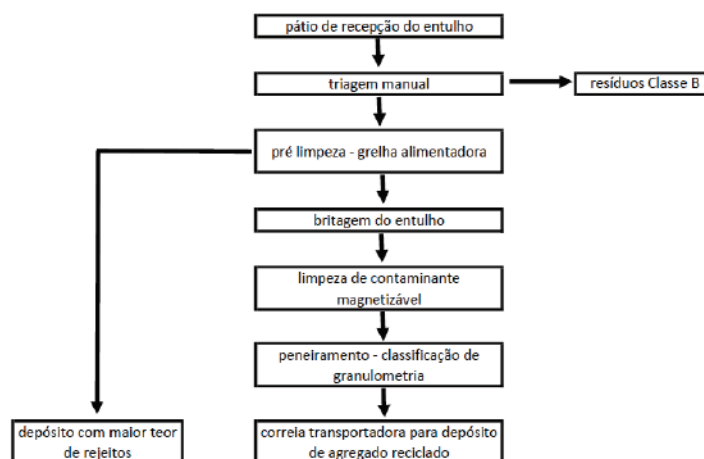
Figura 1. Croquis de usina de reciclagem de RCCR compacta.



Fonte: PRS (2014, p. 10).

Quanto ao processo de produção, de acordo com Manfrinato *et al* (2008), uma usina de reciclagem de RCCR pode também possuir o funcionamento conforme a Figura 2.

Figura 2. Processo de uma usina de reciclagem de RCCR.



Fonte: Manfrinato *et al* (2008, p. 5).

Um estudo de viabilidade econômica para utilização de material reciclado in loco de construção civil para um contrapiso de um edifício na cidade de São Paulo/SP, realizado por Filho *et al* (2014), demonstrou que o custo era 64% mais barato do que a compra de material natural e do transporte, ressaltando-se que, tal viabilidade só era aplicável a partir de um volume acima de 75 m³ (abaixo dele, o custo do material reciclado era maior). Outra verificação foi que, a viabilidade da mobilização do equipamento para reciclagem só era viável para um volume acima de 120 m³ e funcionamento mínimo de 2 horas por dia. A conclusão dos autores foi que era necessário a verificação se a obra forneceria a quantidade mínima de resíduos utilizados como matéria prima para viabilizar o uso deste processo de reciclagem na obra e observar as normas técnicas para saber se o material reciclado produzido seria adequado ao uso proposto.

Na literatura há o registro de três principais utilizações dos RCCR - Resíduos de Construção Civil Reciclados: (1) uso como agregados de concreto ou argamassa; (2) fabricação de tijolos, blocos e bloquetes não estruturais; (3) uso como base para pavimentação. Já há inclusive normas técnicas que especificam as condições mínimas para cada aplicação. A metodologia mais usual é a mistura do RCCR com um solo disponível localmente e cimento, estabelecendo-se diversos estudos para a definição da melhor composição desta mistura, de forma a atender os requisitos mínimos estabelecidos pelas normas, não se deixando de lado a questão econômica.

Como exemplo, Segantini e Wada (2011) realizaram um estudo de dosagem de tijolos de solo cimento com adição de resíduos da construção civil. Foi utilizado um solo arenoso fino (classificado como A-4 - Highway Research Board), cimento Portland CP II Z 32 e RCCR - Resíduos da Construção Civil Reciclado com as seguintes características: 0,7% de argila, 7,3% de silte, 52,5% de areia fina, 30,3% de areia média e 9,0% de areia grossa; não plástico; massa específica = 2,72 g/cm³. Foram realizadas misturas do solo com 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% de RCCR, com teores de cimento de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% por peso da massa da mistura (solo + RCCR). A conclusão dos autores foi que: (1) a melhor mistura foi com o uso de mais de 20% de RCCR, podendo chegar até 100%; (2) o melhor teor de cimento foi de 4%; (3) a maior resistência a compressão simples a 7 dias de cura foi de aproximadamente 3,3 MPa (mínimo seria de 2,0 MPa), conforme a NBR 6136 (ABNT, 2016) para mistura de 60% RCCR com 6% de teor de cimento e para a mistura de 100% RCCR com 6% de teor de cimento.

Outro exemplo, agora sobre o uso de material reciclado da construção civil em pavimentação (base e sub-base), Queiroz (2017) realizou um estudo para determinar a

mistura ideal. Foi analisada uma mistura por peso de 60% do solo local disponível (classificado como A-7-5 – AASHTO) e 40% de RCCR. As características da mistura eram: LL=39; LP=24; IP=15; massa específica real = 2,832 g/cm³, classificado como A-6 – AASHTO. Os teores de cimento avaliados foram: 6%, 7%, 8%, 9% e 10%. As conclusões do autor foram: (1) somente as misturas com teores de 9% e 10% de cimento atenderam a resistência mínima de compressão simples a 7 dias (2,1 MPa de acordo a norma), quando moldados na umidade ótima da mistura; (2) quando moldados com umidade abaixo da ótima da mistura, os teores de cimento de 7%, 8%, 9% e 10% atenderam a resistência mínima de compressão simples a 7 dias; (3) o teor de cimento mais econômico foi de 7%, com corpo de prova moldado com umidade abaixo da ótima da mistura.

Ambientalmente, o reuso de RCCR traz diversas vantagens, dentre eles a redução no consumo de recursos naturais não-renováveis, a redução de área necessária para aterro pela minimização de volume de resíduos, a redução do consumo de energia durante o processo de produção, destacando-se a indústria de cimentos, redução da poluição e de suas consequências negativas, como assoreamento e enchentes (ABRECON, 2020).

Por outro lado, a falta de destinação correta dos resíduos da construção civil pode contaminar os solos e a água (superficial e subterrânea), dependendo das características e origens deles. Nos países nórdicos, há uma grande preocupação na preservação da qualidade das águas e alguns estudos demonstraram que estes resíduos estavam contaminando o solo e a água, devido a lixiviação, com alguns elementos prejudiciais à saúde (HJELMAR *et al*, 2016).

2.2. Erosão em taludes fluviais

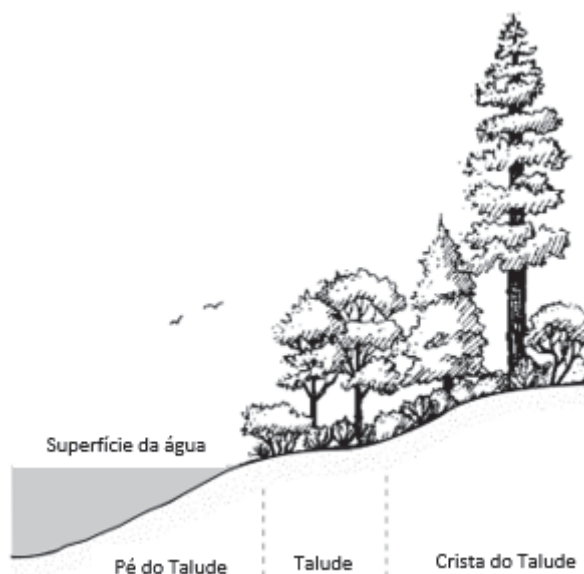
Johnson e Stypla (1993) definiram três zonas nos taludes fluviais (Figura 3):

- Pé do talude: é aquela parte da margem até a cota média do rio (parte submersa). Esta é a zona mais suscetível à erosão, uma vez que é exposto a fortes correntes, detritos e ciclos úmido-seco;
- Talude: é aquela parte acima da cota média até a da cheia normal. É inundado durante os períodos de fluxos moderados. Esses locais ainda estão expostos a erosão periódica decorrentes da velocidade da água, movimento de detritos e tráfego de animais e humanos. O lençol freático

nesta zona é frequentemente perto da superfície do solo por causa de sua proximidade com o rio;

- **Crista do talude:** é aquela parte acima da cota de cheia normal até a cota de cheia máxima. Está sujeito a inundação ou ação erosiva apenas durante períodos ocasionais de cheia acima da média. Esta zona é submetida a recorrentes períodos de seca em que a umidade do solo depende principalmente da característica precipitação da área.

Figura 3. Zonas de um talude fluvial.



Fonte: Adaptado de Johnson e Stypula (1993, p. 3-1).

A erosão fluvial é o desgaste das paredes dos rios, promovendo o movimento de porções dos solos que estão nas margens dos rios. Essa erosão provoca o deslizamento de terra (CHRISTOFOLETTI, 1980; PENTEADO, 1983). Os taludes fluviais apresentam erosões decorrentes da variação da cota do nível d'água e/ou resultante das forças hidrodinâmicas do escoamento da água, que atua como tensão tangencial nas suas fronteiras, o que pode alterar as tensões efetivas no solo. Consequentemente, a ruptura pode ocorrer por redução da resistência ao corte do solo ou por aumento das forças instabilizadoras ou ambos (SILVA, 2014).

Segundo Bastos *et al* (2015), essa erosão ocorre por processos de corrosão, corrasão e cavitação. A corrosão se refere a toda e qualquer reação química entre o material geológico e a água em curso. A corrasão é o desgaste, pelo atrito mecânico, através do impacto das partículas transportadas pela água. A evorsão é um tipo especial

de corrasão, originado pelo movimento turbilhonar sobre as rochas no fundo do leito que é responsável pela formação das marmitas. A cavitação ocorre somente sob condições de velocidade elevada das águas, onde as variações de pressão nas paredes do canal podem gerar fragmentações.

Sholtes (2013) afirmou que a erosão das margens é um processo natural em rios estáveis. Entretanto, pode ser acelerado e exacerbado por impactos humanos diretos (como por exemplo: pisoteio de gado, remoção de mata ciliar) ou indiretos (incisão do canal, em seguida, ampliando a partir da alteração hidrológica na bacia hidrográfica).

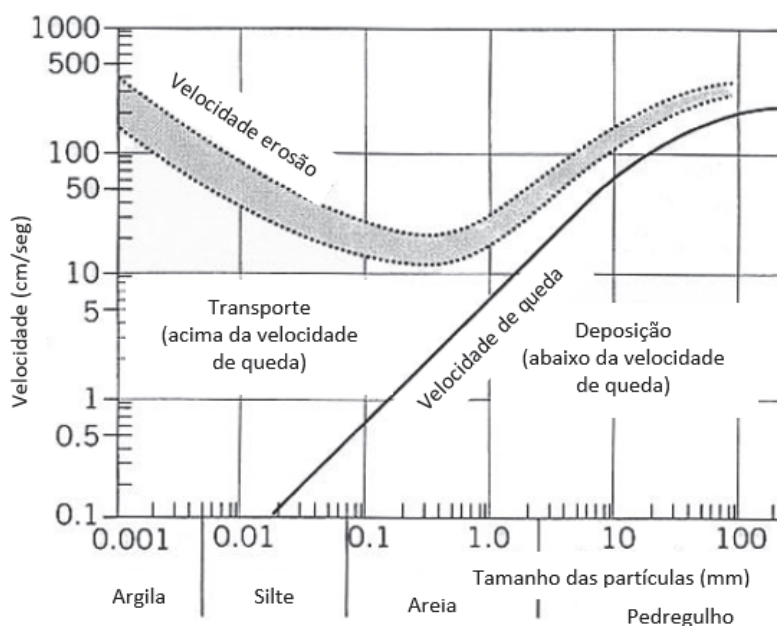
A resistência das margens naturais de rios à erosão está intimamente relacionada com as características do material. Embora esses materiais sejam altamente variados, eles podem ser classificados como (Henderson e Shields, 1984; Simons, Li e Associates, 1982 *apud* Johnson e Stypula, 1993):

- Base rochosa: afloramentos rochosos são estáveis e sujeito apenas a uma erosão gradual e falha de massa intermitente;
- Solos sem coesão: são altamente estratificados com depósitos heterogêneos. Solos sem coesão com sistema de misturas de lodos, areias e cascalhos. Estes solos não têm ligação elétrica ou química por ser entre partículas e são corroídos grão a grão. A erosão de solos sem coesão é controlada por forças gravitacionais e características das partículas como tamanho, formato do grão, gradação, umidade conteúdo e densidade relativa. Outros fatores a incluir, são: a direção e magnitude da velocidade do fluxo da água, flutuações na turbulência, a magnitude e as flutuações no cisalhamento exercido nas margens, força de infiltração e forças das ondas;
- Solos coesivos: erosão é mais complexa de se analisar do que solos sem coesão por causa das características de ligação de partículas do solo. Solos coesos contêm grandes quantidades de partículas finas de argila compostas por minerais quimicamente ativos que criam substâncias químicas fortes ligações cal e eletroquímicas entre as partículas. Outras características do solo que afetam a erosão de solos coesos é o tipo e a quantidade de cátions nos poros água e fluido em erosão, e composição de o solo incluindo o tipo e a quantidade de argila minerais;

- Solos estratificados ou intercalados: são o tipo mais comum em natural sistemas fluviais. Possuem camadas de materiais de vários tamanhos, permeáveis e coesivos. Quando camadas sem coesão são intercalados com solos coesos, o potencial de erosão é decidido pela erodibilidade da composição camadas recentes e a espessura e posição dos extratos sem coesão.

As erosões de taludes fluviais ocorrem por meio de um de três modos (FISCHENICH 1989): (1) forças hidráulicas que removem o leito erodível ou material da margem; (2) instabilidades geotécnicas; ou (3) uma combinação de fatores hidráulicos e geotécnicos. Quando a erosão do talude ocorre porque a água que flui no canal exerce uma tensão que excede a tensão de cisalhamento crítica para a erosão do solo, o modo de falha é hidráulico. A tensão de cisalhamento crítica depende do tipo e tamanho do material. Ele pode ser excedido por tensão de cisalhamento tangencial causada pelo desgaste da água ou pelo impacto direto da água contra um talude. A degradação do leito é um exemplo do primeiro, enquanto a abrasão local induzida por detritos é um exemplo do segundo. A erosão hidráulica é geralmente caracterizada por uma falta de vegetação, altas velocidades da água e nenhuma perda de massa de solo na crista do talude.

O diagrama de Hjulstrom (Figura 4) é um gráfico usado por hidrólogos e geólogos para determinar se um rio irá erodir, transportar ou depositar sedimentos. De forma muito eficaz, mostra a relação entre a velocidade de fluxo, o tamanho do grão de partícula e a consequência (erosão, transporte ou deposição). O tamanho do grão de partícula que é mais facilmente erodido é cerca de 0,2 a 0,3mm, que é uma areia fina. Para tamanhos de grãos menores do que isso, silte e argila, a erosão requer uma maior velocidade de fluxo para ocorrer, pois, as forças coesivas são relativamente mais importantes quando as partículas ficam menores (MILLET, 2011).

Figura 4. Diagrama de Hjulstrom.

Fonte: Adaptado de Millet (2011, p. 4).

Um exemplo de erosão causada por ação hidráulica ocorre quando o fluxo é direcionado para curvas de canal, onde a velocidade da água é mais alta e está próxima da borda externa do canal e perto do centro da profundidade da água (Figura 5). Forças atuam no talude tanto a jusante quanto na direção vertical em direção à base do talude. A força centrífuga faz com que a elevação da superfície da água seja mais alta na parte externa da curva (superelevação). Conforme a gravidade puxa a massa adicional de água para baixo, uma espiral helicoidal rolante é criada, com altas velocidades descendentes contra o talude. Esta força erosiva para baixo, juntamente com a velocidade do fluxo, pode enfraquecer o pé do talude. A força erosiva para baixo na margem será maior em curvas fechadas em oposição a curvas graduais. A erosão do pé do talude mais severa ocorrerá imediatamente a jusante do ponto de máxima curvatura do traçado (JOHNSON e STYPULA, 1993).

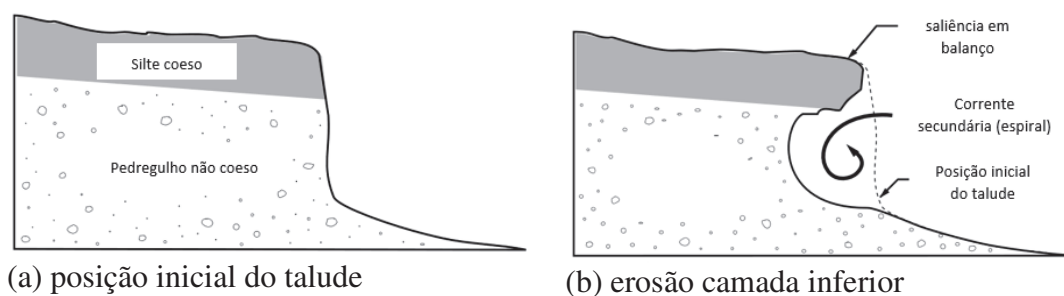
Figura 5. Erosão e deposição causadas por ação hidráulica.

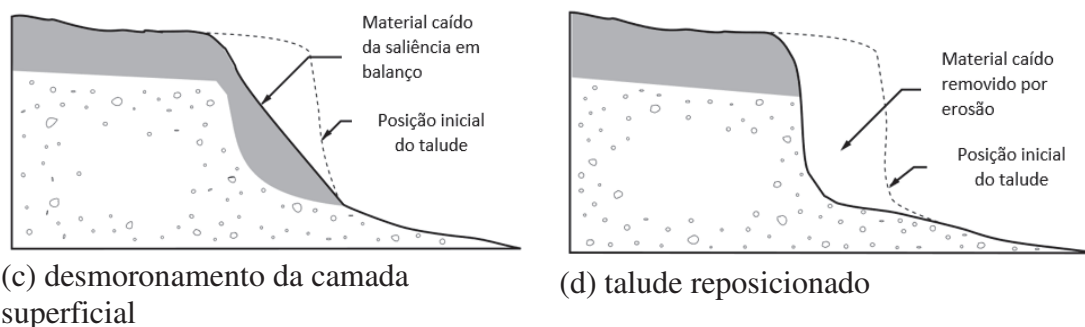


Fonte: Adaptado de Kunzig (1989) *apud* Johnson e Stypula (1993, p. 3-4)

Esse processo de erosão do talude fluvial por ação hidráulica é apresentado em uma sequência de ilustrações na Figura 6. Na posição inicial (a), o talude é composto por camadas consistindo em uma camada superior de material siltoso coeso (comumente reforçado por raízes de plantas) com uma camada subjacente de pedregulho não coeso. Enquanto a água flui ao longo da curva, as correntes secundárias removem o material não coeso no pé do talude, deixando material coesivo em balanço na parte superior; (b) no pé do talude, onde a tensão de cisalhamento excede o cisalhamento crítico, as partículas são carregadas do talude pela água corrente. Isso sobrecarrega o talude, porque as partículas não coesivas mais acima na margem começam a cair em fatias finas e verticais. Quando a camada siltosa coesa é cortada, a saliência em balanço desaba; (c) o material caído é então lavado a jusante, resultando em uma linha de talude reposicionada (THORNE e LEWIN, 1979 *apud* JHONSON e STYPULA, 1993).

Figura 6. Processo de erosão do talude fluvial por ação hidráulica.





Fonte: Adaptado de Thorne e Lewin (1974) *apud* Johnson e Stypula (1993, p. 3-5)

Ainda com relação à ação hidráulica, de acordo com Brighetti e Martins (2001), deve-se avaliar a velocidade máxima admissível e a tensão de arraste. A velocidade máxima admissível é a máxima velocidade média que não causará erosão no corpo do canal. Esta velocidade limite está relacionada ao tipo de material do leito e margens, profundidade do escoamento e traçado do leito. A estabilidade das margens de um canal pode ser analisada pelo método da Tensão de Arraste (LANE, 1955 *apud* BRIGHETTI e MARTINS, 2001) e considera que as tensões de cisalhamento máximas no fundo e nos taludes não devem exceder aos valores admissíveis para o tipo de material do leito.

2.3. Tratamento de taludes fluviais erodidos com uso de solo cimento

O tratamento de taludes erodidos em margens de rios deve ser realizada por obras adequadas do ponto de vista técnico, ser viável economicamente e sustentável. Talude é toda superfície inclinada de um maciço de solo ou de rocha submetida a três forças distintas: forças devidas ao peso dos materiais, ao escoamento da água e à resistência ao cisalhamento. O estudo da estabilidade de taludes leva em consideração todos estes fatores, uma vez que as duas primeiras tendem a gerar instabilidade no maciço de solo, e seu estudo se torna primordial para a correta aplicação de projetos para medidas preventivas ou corretivas (FIORI, 2015).

Vários métodos para o tratamento de taludes fluviais erodidos podem ser utilizados, como por exemplo o enrocamento (rip-rap), bioengenharia de solos, gabião, solo cimento, entre outros (JOHNSON e STYPULA, 1993; BRIGHETTI e MARTINS, 2001; TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA, 2001; HOLANDA *et al*, 2009; PETRY, 2003; SILVA, 2014; SANTOS, 2015).

O solo cimento é um material obtido pela mistura homogênea de solo, cimento e água, em proporções adequadas e que, após compactação e cura úmida, resulta num

produto com características de durabilidade e resistências mecânicas definidas. Sua aplicação em diversas áreas inclui a estabilização de taludes e encostas (FILHO, 1996).

Um relatório sobre o uso do solo cimento, emitido pelo Instituto Americano de Concreto (ACI, 2009), relatou que após a Segunda Guerra Mundial, houve uma rápida expansão dos projetos de recursos hídricos nas Grandes Planícies e regiões Centro-Sul dos Estados Unidos. O uso do rip rap era satisfatório para proteção de taludes, porém, em muitos locais não havia material disponível para a aplicação. Os custos elevados para transporte do rip rap de pedreiras distantes a esses locais ameaçavam a viabilidade econômica de alguns projetos. No final dos anos 1940, a Agência de Recuperação dos Estados Unidos (sigla USBR em inglês) iniciou um grande esforço de pesquisa para estudar a adequação do solo cimento como alternativa ao rip rap convencional. Baseado em estudos de laboratório que indicaram solo cimento feito com solos arenosos podia produzir um revestimento resistente à erosão durável, o USBR construiu uma seção de teste em escala real no Reservatório Bonny, no leste do Colorado em 1951. A localização da seção de teste ao longo da costa sudeste do reservatório foi selecionada por causa das severas condições criadas por ondas, gelo e mais de 140 ciclos de congelamento e descongelamento por ano. Após 10 anos observando a seção de teste, o USBR estava convencido de que solo cimento era uma alternativa técnica e economicamente viável em substituição ao rip rap para proteção de talude. O custo do solo cimento foi menos de 50% do custo do rip rap.

Segundo Pitta (2004), a dosagem de cimento faz-se experimentalmente: diferentes teores de cimento são empregados nos ensaios e a análise dos resultados indica o menor deles capaz de estabilizar o solo sob a forma de solo cimento. A determinação da quantidade adequada de cimento fundamenta-se na análise do comportamento de corpos de prova com diferentes conteúdos de cimento. Em geral, são ensaiados três teores, diferindo do teor médio de 2 pontos percentuais. Ainda de acordo com o autor, a Norma Geral de Dosagem de Solo Cimento pode ser resumida nas seguintes operações:

- a) identificação e classificação do solo;
- b) escolha do teor de cimento para o ensaio de compactação;
- c) execução do ensaio de compactação do solo-cimento;
- d) escolha dos teores de cimento para o ensaio de durabilidade;
- e) moldagem de corpos de prova para ensaio de durabilidade;
- f) execução do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem;

g) escolha do teor de cimento adequado em função dos resultados do ensaio.

Consoli *et al* (2007) definiram que as variáveis que influenciam a resistência mecânica de um solo arenoso artificialmente cimentado eram: teor de cimento, porosidade, teor de umidade de moldagem, relação água/cimento e relação vazios/cimento.

2.3.1. Características do solo recomendado

De acordo com Richards e Hadley (2006) da PCA – Associação de Cimento Portland dos Estados Unidos, uma grande variedade de solos pode ser usada para fazer solo cimento durável proteção de taludes. Para uma economia máxima e uma construção mais eficiente, recomenda-se que: (1) o solo contenha nenhum material retido em uma peneira 2” (50 mm); (2) pelo menos 55% do material passa pela peneira nº 4 (4,75 mm); (3) entre 5% e 35% passem na peneira nº 200 (0,075 mm); e (4) o índice de plasticidade (IP) não deve ser maior que 8. Se a quantidade de material passar na peneira nº 200 (0,075 mm) for superior a 35%, a adição de um material mais grosso pode ser justificada. Solos contendo mais de 35% de passagem de material a peneira nº 200 (0,075 mm) pode ser usada se os finos forem não plásticos e pode ser misturado adequadamente com cimento. Pitta (2000), da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, relatou que, com relação aos tipos de solos empregáveis com bom sucesso no revestimento de solo-cimento, pode-se afirmar que, a não ser os solos finos dos tipos A-6 e A-7 (classificação da American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO), todos os outros já o foram, em barragens, canais, diques ou reservatórios.

2.3.2. Tipo de cimento Portland recomendado

Segundo Pitta (2000), toda e qualquer espécie de cimento Portland normalizada no país também é plenamente utilizável, devendo-se cuidar, entretanto, que cimentos Portland que possam vir a incrementar a retração do solo-cimento (como o de alta resistência inicial, por exemplo) sejam aplicados com as devidas precauções, no tocante à cura, ao teor de água em relação aos materiais secos e ao próprio teor de cimento — os dois últimos itens estritamente ligados à dosagem do material. Porém, no guia básico de utilização de cimento Portland, publicado pela Associação Brasileira de Cimento Portland

(ABCP, 2002) recomenda-se para o solo cimento os seguintes tipos de cimento: comum (CP-I e CP-I-S), composto (CP-II-E, CP-II-Z e CP-II-F), de alto forno (CP-III) e pozolânico (CP-IV).

2.3.3. Teores de cimento recomendados

O Quadro 2 apresenta a faixa típica recomendada de cimento para diferentes tipos de solo. Por causa das condições de exposição mais severas, a proporção de cimento foi aumentada em 2% sobre requisitos típicos de cimento para base de pavimento estabilizado com solo cimento, da qual foi derivada.

Quadro 2. Recomendações de cimento para tratamento de talude fluviais com solo cimento.

Classificação solo AASHTO	% cimento por volume de solo	% cimento por peso de solo seco
A-1-a	7 a 9	5 a 7
A-1-b	9 a 11	7 a 10
A-2-4	9 a 12	7 a 11
A-2-5	9 a 12	7 a 11
A-2-6	9 a 12	7 a 11
A-2-7	9 a 12	7 a 11
A-3	10 a 14	9 a 13

Fonte: Richards e Hadley (2006, p. 13).

2.3.4. Compactação recomendada

A compactação não necessita ser completada em altos níveis, bastando, como no solo cimento comum de pavimentação, adotar a energia normal e um grau de compactação de 100% em relação ao valor de referência da massa específica aparente seca máxima alcançada nessa energia. Preferencialmente, tem-se servido do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem para o estabelecimento do teor de cimento, independentemente da espécie de solo com que se lida. É possível, entretanto, efetivar a dosagem através do método simplificado que se baseia na resistência à compressão simples a 7 dias, sempre que a matéria-prima seja um solo com um máximo de 50% de silte mais argila, não mais do que 20% de argila e menos do que 45% de pedregulho graúdo. Qualquer que seja o processo de dosagem, é preciso ajustar o teor de cimento encontrado às necessidades específicas da aplicação; o ajuste deve tomar em consideração a região do paramento a ser revestida e o seu relacionamento com o regime — permanente

ou temporário — de exposição da superfície do revestimento naquela região (PITTA, 2000).

2.3.5. Teor de umidade recomendado

O teor de umidade e densidade recomendados por Richards e Hadley (2006) para solo-cimento geralmente é determinado por um teste de densidade de umidade, obtendo-se a umidade ótima, que será utilizada para moldar amostras para testes de resistência à compressão e durabilidade.

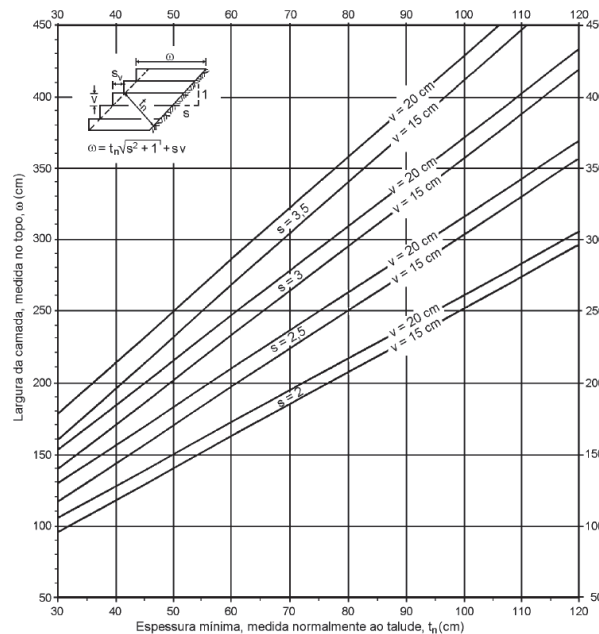
2.3.6. Índice de Plasticidade recomendado

De acordo com Richards e Hadley (2006), quanto mais baixo o IP – Índice de Plasticidade, menos sensível é o solo às variações no conteúdo de água. Bolas de argilas têm uma forte tendência a se formar quando a plasticidade índice é maior que 8. Para proteção de encostas ou outras aplicações onde o solo o cimento fica exposto ao intemperismo, estas bolas de argila tendem a deixar o solo cimento com uma aparência de "queijo suíço", o que pode enfraquecer a sua estrutura.

2.3.7. Recomendações para proteção de taludes fluviais

Para a proteção de taludes fluviais com solo cimento, deve-se observar os seguintes fatores: ângulo de inclinação, dimensões de face (placa ou construção de degraus de escada), borda livre (que leva em conta a onda), estabilidade geotécnica, infiltração e drenagem interna. A Figura 7 mostra a relação entre a inclinação do revestimento (declividade = s), espessura das camadas horizontais compactadas (v), largura da camada horizontal (medida no topo da camada = w) e espessura mínima medida perpendicular à inclinação (t_n).

Figura 7. Relação da inclinação, espessura da face, espessura da camada e largura da camada horizontal.



Fonte: Adaptado de Richards e Hadley (2006, p. 33).

Para determinar a estabilidade do talude tratado com solo cimento, deve-se realizar as análises: fator de segurança, capacidade de carga do solo, potencial de erosão subsuperficial, aumento de pressões hidrostáticas (flutuante) e análise sísmica. O fator de segurança deve ser calculado utilizando um ou mais métodos de avaliação de estabilidade de taludes. De acordo com Richards e Hadley (2006), a capacidade de carga do solo subjacente de suportar o peso do solo cimento é determinado pela sua capacidade de carga, semelhante ao cálculo de uma fundação. A erosão subsuperficial do solo por água percolada produz conduítes subterrâneos semelhantes a tubos. Ela pode afetar materiais que variam de partículas de argila (menos de 0,002 mm) para cascalhos (vários centímetros), mas é comum em solos de granulação fina, como areia fina, silte e argila grossa. Os "tubos" resultantes são comumente frações de uma polegada de largura, mas pode expandir até vários centímetros de tamanho e pode crescer até vários metros ou mais de diâmetro. Ela ocorrerá onde os aterros foram inadequadamente compactados, sendo mais prevalente onde a infiltração tende a se concentrar ao longo das superfícies externas de estruturas, como tubos enterrados ou bueiros. Compactação adequada de aterro ao longo da estrutura enterrada são essenciais para reduzir a probabilidade da sua ocorrência. A pressão hidrostática excessiva pode se desenvolver atrás e/ou abaixo do solo cimento em situações como o rebaixamento rápido do nível d'água. Neste caso, a água presa no solo abaixo a camada de solo cimento, relativamente impermeável, pode criar pressões

maiores do que aquelas que podem ser contrabalançadas pelo peso do solo cimento sobrejacente, aumentando o potencial para levantamento e deslocamento (flutuação). Quando houver previsão de ocorrer rebaixamento rápido do nível d'água, o projeto deve incluir recursos que reduzem o potencial de desenvolvimento destas pressões hidrostáticas excessivas. A análise da estabilidade sísmica deve ser avaliada usando um método adequado, onde uma carga horizontal é aplicada ao declive. Desta forma, onde houver a probabilidade de ocorrência de abalos sísmicos, deve-se calcular o fator segurança adequado à região do país onde o projeto está localizado.

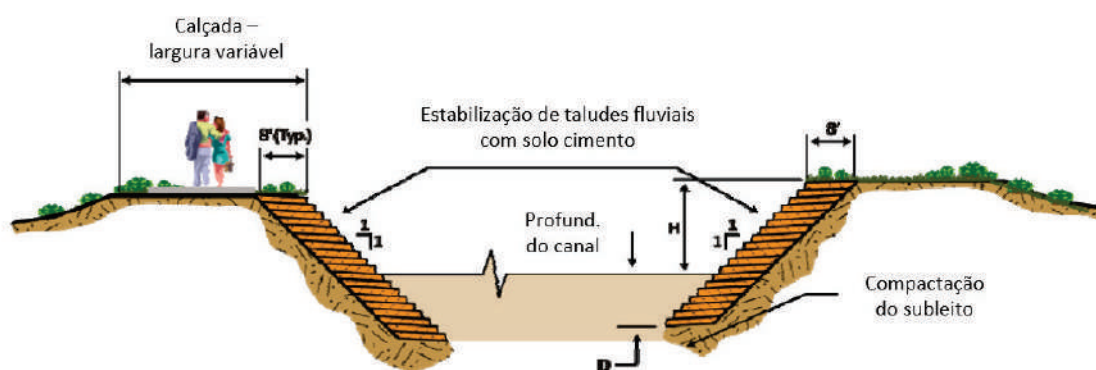
Nussbaum e Colley (1971) da PCA – Associação de Cimento Portland dos Estados Unidos, realizaram extensa pesquisa de laboratório, em modelos reduzidos e outras formas de investigação, durante a qual analisaram, entre outros fatores, o efeito do teor de cimento no comportamento de solos estabilizados, sob condições equivalentes às que sucedem numa barragem, canal ou estrutura similar. Baseando-se nesta e em diversas outras fontes, principalmente originárias da prática, a PCA orienta que:

- a) o solo-cimento destinado a revestir as regiões situadas a mais de 1,5 m abaixo do nível mínimo d'água deve receber o teor de cimento fornecido pelos critérios de perda de massa ou resistência à compressão simples aos 7 dias, conforme o caso;
- b) as regiões situadas acima daquela cota deverão conter 2 pontos percentuais além do teor de cimento determinado pelos critérios mencionados;
- c) caso o solo original possua mais do que 50% de partículas finas (menores do que 0,075 mm), o aumento do teor de cimento, nas condições citadas no item anterior, será de 4 pontos percentuais;
- d) nas regiões sujeitas a fluxo rápido de água, em presença de detritos sólidos, o teor de cimento será 2 pontos percentuais superior ao indicado pelos ensaios de dosagem, e o solo matéria-prima deverá conter 20% ou mais de pedregulho; se a corrente for isenta de sólidos, o teor poderá ser igual ao definido pelos ensaios correntes, e o solo não necessitará conter o teor mínimo de pedregulho antes exigido.

Segundo Hansen *et al* (1983), por quase 50 anos no sudoeste dos Estados Unidos, o solo cimento foi usado para blindar a face de montante de grandes barragens, bem como para proteção de margens de rio nas áreas urbanas. A proteção de taludes com solo cimento para barragens e margens de rios possuem conceitos de projeto diferentes. No entanto, na maioria dos casos, o solo cimento é colocado em camadas horizontais

sucessivas (de 15 a 25cm de espessura) compactadas. Para barragens, a proteção de solo cimento em forma de escada é colocado em uma encosta de aterro que é normalmente 1H:3V e as ondas do reservatório colidir diretamente com o aterro protegido em ângulo de quase 90°. Para proteção da margem, o solo cimento também é colocado em degraus, mas em um declive mais íngreme (geralmente 1H:1V) e a água do rio corre paralela à margem (Figura 8). A proteção do talude é basicamente para proteção contra enchentes e a água do rio age sobre o solo cimento apenas durante eventos de cheia. Os autores avaliaram cinco estudos de caso, onde houve enchentes (eventos extremos) e proteção com solo cimento dos taludes fluviais e a conclusão foi de que o desempenho foi extremamente bom. Em nenhum caso a proteção solo cimento foi violada. Isso ocorreu apesar da proteção estar sujeita à inundação de registros em dois rios e em duas ocasiões, o fluxo ultrapassou o evento de 1 em 100 anos. Com velocidades de até 6 m/s, o tempo máximo de exposição foi de até 2 semanas. Foram observadas em dois casos, a perda do suporte (fundação) abaixo da proteção do solo cimento, resultando na sua separação.

Figura 8. Seção típica – proteção de taludes fluviais com solo cimento.



Fonte: Adaptado de Hansen *et al* (1983, p. 2).

O antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1971) possuía uma especificação de serviço para o tratamento de taludes de estradas com solo cimento, com as seguintes recomendações:

- O solo não deveria ter material retido na peneira 1”;
- No máximo 30% de material retido na peneira de 4,8mm;
- Teor variável de até 10% de peso de cimento Portland comum;
- Aplicar na umidade ótima.

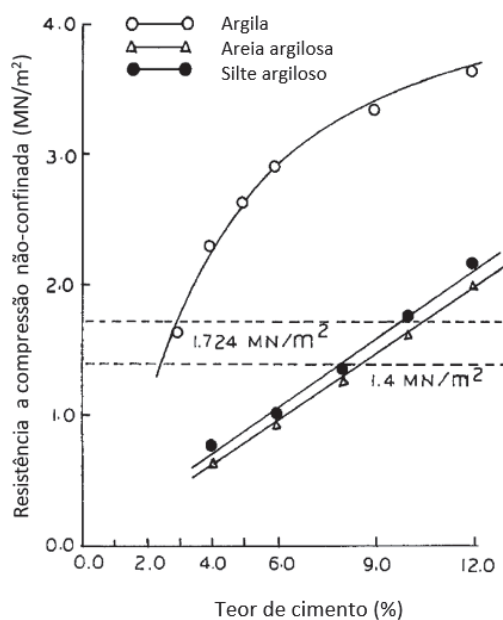
2.3.8. Resistência a compressão

Os testes de resistência à compressão geralmente são feitos subsequentemente para os testes de congelamento-degelo e úmido-seco. Os ensaios de compressão são comumente quebrados na compressão aos 7 e às vezes 14 e 28 dias. A influência do cimento na produção de resistência à compressão em misturas compactadas de solo cimento pode ser analisada a partir de dois pontos de vista. As influências do cimento serão evidenciadas pelo aumento da resistência com: (1) o aumento da idade e (2) com aumentos no teor de cimento. Aos 7 dias, geralmente estará entre 2,1 e 5,5 MPa. Não existem relações diretas entre resistência à compressão e resistência à erosão devido ao fluxo de água ou ação das ondas. No entanto, as especificações para o solo cimento usado em aplicações de recursos hídricos normalmente exigem resistências à compressão de 7 dias entre 4,2 e 5,2 MPa. Para revestimentos, os valores podem ser mais baixos, 3,4 Mpa. Os requisitos exatos de resistência devem ser com base nas condições climáticas, requisitos de abrasão, frequência de uso e condições de transporte de sedimentos pelo leito do rio. Os ensaios de resistência ao cisalhamento normalmente não são realizados no solo cimento para a maioria das estruturas relacionadas aos recursos hídricos, sendo indicada para projetos de barragem de terra que utilizam o solo cimento (RICHARDS e HADLEY, 2006).

Khair *et al* (1991) realizaram uma avaliação de solos diferentes em laboratório, com adição de cimento para estabilização de taludes erodidos para investigar o efeito do fluxo da água no talude revestido com solo cimento. Foram testados três tipos de solos (1) argila (LL=33%; LP=20%; IP = 13); (2) areia argilosa (LL=27%; não plástico); (3) silte argiloso (LL=35%; não plástico). O resultado do ensaio de compressão simples a 7 dias em função dos teores de cimento está representado na Figura 9. Os autores consideraram a resistência mínima de 1,724 MPa (MN/m²) e 1,4 MPa (MN/m²) utilizados para o uso de solo cimento em pavimentos de estradas e blocos de construção respectivamente. Assim, o teor de cimento ideal foi de 8%, 11% e 10% para os solos argila, areia argilosa e silte argiloso respectivamente. Os resultados do teste de erosão do efeito do fluxo da água, com velocidade de 2 m/s e inclinação 1H:1V, nos taludes indicaram que: (1) os taludes revestidos com solo cimento constituídos pelos solos: areia argilosa e silte argiloso, não sofreram erosão pela água corrente, mesmo com teores de cimento abaixo do ideal; (2) o revestimento de solo cimento constituído pelo solo argila

sofreram erosão, devendo ser corrigidos. A conclusão dos autores foi que o uso do solo cimento para revestimento de taludes fluviais é atraente e promissor.

Figura 9. Efeito do teor de cimento na resistência dos solos avaliados a 7 dias de cura e após 24h de imersão.



Fonte: Adaptado de Klair *et al* (1991, p. 156).

2.3.9. Ensaio de durabilidade por secagem e molhagem

O ensaio de durabilidade por secagem e molhagem é realizado para se determinar a perda de massa após o seguinte procedimento (PITTA, 2004):

- Os corpos de prova de solo-cimento devem ser moldados e permanecerem 7 dias em cura na câmara úmida;
- Após os 7 dias de cura na câmara úmida, os corpos de prova devem ser colocados na câmara de imersão, onde ficarão durante 5 horas e, a seguir, numa estufa à temperatura de $71^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, onde deverão permanecer durante 42 horas;
- Ao fim deste período, os corpos de prova devem ser escovados. A escova deve ser aplicada no sentido da geratriz do corpo de prova e paralelamente às bases, de maneira a cobrir toda a superfície do corpo de prova. Dão-se 20 escovadelas verticais na superfície lateral e 4 nas bases do corpo de prova. O esfriamento e a operação de escovação devem durar no máximo 1 hora;

- O procedimento descrito nas duas etapas anteriores constitui um ciclo (48 horas) de molhagem e secagem. Repetem-se essas operações durante 12 ciclos, incluído o primeiro;
- Após os 12 ciclos, colocar os corpos de prova na estufa à temperatura de 105°C e 110°C até constância de massa, e determinar suas massas secas (M);
- Os dados coletados permitirão calcular a perda de massa dos corpos de prova.

Para o cálculo da perda de massa, deve-se corrigir o valor da massa seca do corpo de prova, descontando a massa de água que ficou retida no corpo de prova seco. Para isso, considera-se o seguinte percentual de água conforme o Quadro 3 (PITTA, 2004).

Quadro 3. Percentual de água retida no corpo de prova.

Tipo de Solo (AASHTO)	Água retida (%)
A-1 e A-3	1,5
A-2	2,5
A-4 e A-5	3,0
A-6 e A-7	3,5

Fonte: Pitta (2004, p. 59)

De acordo com a PCA (1969), para cada tipo de solo há um limite de perda tolerável quando se realiza o ensaio de durabilidade por secagem e molhagem.

Segundo Richards e Handley (2006), o percentual máximo de perda está indicado no Quadro 4.

Quadro 4. Perda máxima em função do tipo de solo.

Tipo de Solo (AASHTO)	Perda máxima (%)
A-1-a	14
A-1-b	14
A-2 ⁽¹⁾	14
A-3	14
A-4	10
A-5	10
A-6	7

⁽¹⁾ 10% é a perda de peso máxima permitida para solos A-2-6 e A-2-7

Fonte: Richards e Handley (2006, p. 21)

2.3.10. Requisitos técnicos para o uso do solo cimento no tratamento de taludes fluviais

Após toda a revisão realizada anteriormente, conclui-se que, além das condições de caracterização dos materiais, há dois requisitos técnicos mínimos para o uso do solo cimento no tratamento de taludes fluviais:

- Ter resistência a compressão simples, a 7 dias de cura, de pelo menos 4,2 MPa, conforme detalhado no item 2.3.8;
- Atingir no máximo a perda de massa (%) permitida correspondente à classificação do solo, conforme detalhado no item 2.3.9.

2.3.11. Aspectos econômicos

Com relação ao custo de aplicação do solo cimento, segundo Richards e Handley (2006), um estudo das licitações realizadas em 30 projetos entre 1995 e 2002 nos Estados Unidos, encontraram o custo unitário do solo cimento, incluindo cimento, variando de US\$ 25,96 a US\$ 127,32 /m³, com média de US\$ 76,64/m³, já aplicado no local. O custo total é igual ao custo de processamento mais o custo do cimento. O custo de processamento depende da quantidade de solo cimento a ser colocada. O custo de processamento inclui custo de materiais, transporte, mistura da planta central, água para misturar e curar, transportar solo cimento misturado à área de colocação, espalhamento, compactação e cura. O Quadro 5 fornece guia para estimar o custo de processamento com base na quantidade e grau de dificuldade (preços de 2002), não incluindo o custo do cimento.

Quadro 5. Estimativa de custo do processamento do solo cimento. (não inclui custo do cimento, valores de 2002).

Volume de solo cimento (m ³)	Grau de dificuldade de construção		
	Fácil (US\$/m ³)	Média (US\$/m ³)	Difícil (US\$/m ³)
< 5.400	29,00	41,00	60,00
5.400 a 30.000	18,00	25,00	34,00
30.000 a 75.000	16,00	22,00	29,00
> 75.000	13,00	20,00	25,00

Fonte: Richards e Hadley (2006, p. 57).

Em outro estudo, Hansen e Schexnayder (2000) também relataram que o custo de proteção de taludes fluviais com solo cimento depende do custo do cimento e do custo de produção do solo cimento. O custo do cimento dificilmente é afetado pelo tamanho do

projeto, no entanto, o custo de produção do solo cimento é bastante dependente do volume, bem como da disponibilidade e transporte de agregado, e da facilidade de construção. De acordo com uma avaliação de 1994 a 1997 das licitações de 24 projetos de proteção de taludes fluviais com solo cimento nos Estados Unidos, principalmente no Arizona, a taxa média de cimento aplicado foi 112,6 kg/m³ de solo cimento, com o custo médio do cimento de US\$ 9,88/m³ e o custo total de US\$ 19,24/m³, sendo que o cimento representava 51,3% do custo total.

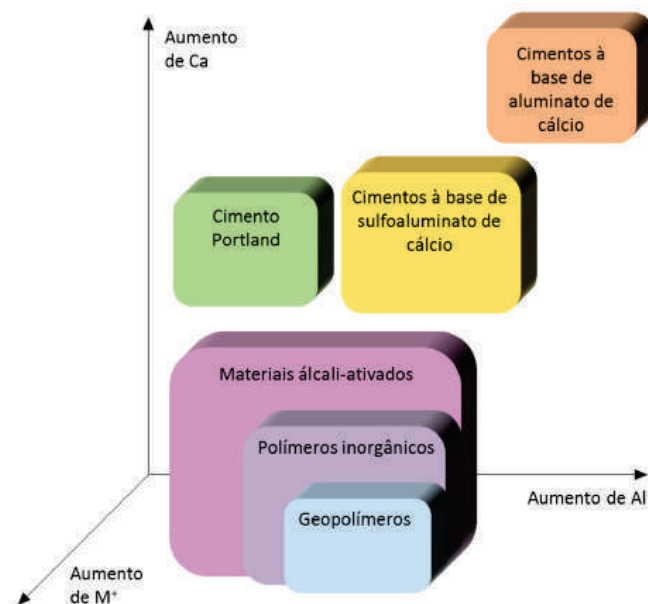
2.4. Cimento alternativo a partir de ligantes álcalis ativados

Cimento alternativo ou agentes de ligação, tem sido pesquisado como alternativa ao uso do cimento Portland, visando reduzir a emissão de CO₂ principalmente. Os ligantes álcalis ativados é uma destas soluções propostas (BIGNOZZI, 2011). A ativação alcalina é um processo químico que permite a transformação de estruturas vítreas (parcialmente ou totalmente amorfas e/ou metaestáveis) em compósitos cimentantes muito compactos (PALOMO *et al*, 1999).

Esses ligantes podem ser obtidos a partir de uma ampla gama de materiais ricos em alumínio silicatos, denominados precursores. Quando misturados com ativadores alcalinos, eles endurecem gerando um material com boas propriedades de ligação. Uma das principais vantagens da tecnologia de ativação alcalina é que, tanto produtos naturais quanto subprodutos e resíduos podem ser utilizados como matéria prima (GARCIA-LODEIRO *et al*, 2015).

Importante destacar que materiais álcalis ativados é uma denominação geral de qualquer aglutinante obtido da reação de um ativador com um precursor. Enquanto, os geopolímeros são uma subcategoria, produzidos a partir de precursores com baixo teor de cálcio onde o gel produzido é quase exclusivamente composto por alumínio silicatos bem ordenados (VAN DEVENTER *et al.*, 2010). A Figura 10 apresenta graficamente a diferença entre os diversos tipos de materiais álcalis ativados, o cimento Portland e outros sistemas de cimento em relação à sua composição de cálcio (Ca), Alumínio (Al) e presença de (M⁺) íons cátions (como por exemplo: Na⁺, K⁺, Li⁺, Ca²⁺, Ba²⁺, NH⁴⁺, H₃O⁺).

Figura 10. Classificação dos tipos de sistemas de cimento em relação à composição de cálcio (Ca), alumínio (Al) e íons cátions (M^+).



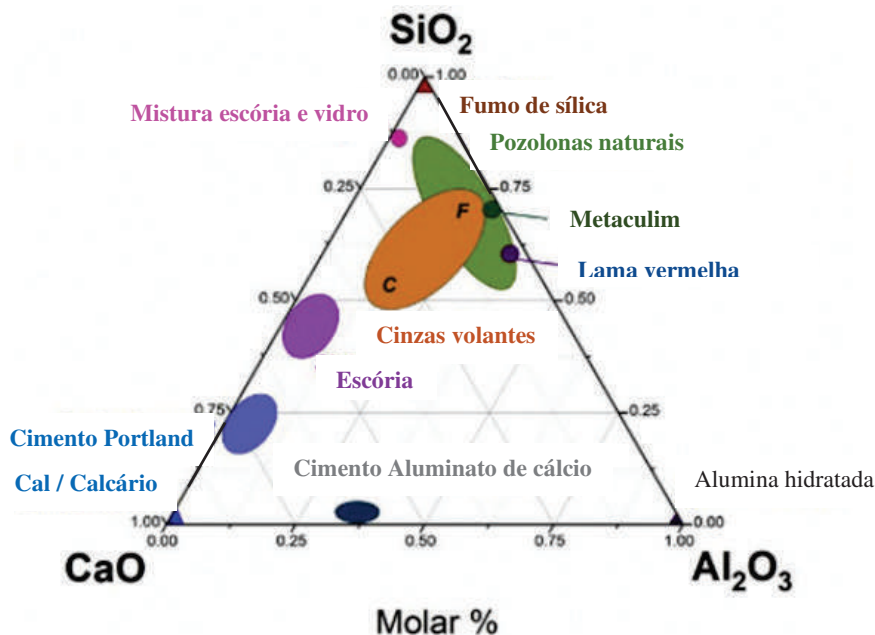
Fonte: Silva (2019, p. 7).

Segundo Pacheco-Torgal *et al* (2008), qualquer material rico em sílica, alumina e cálcio pode ser ativado alcalinamente. No entanto, é preciso ressaltar que esses aluminosilicatos precisam ser reativos para serem álcali-ativados, com destaque para os seguintes parâmetros que interferem na reatividade dos precursores: teor de material amorfo, teor de fase vítrea, superfície específica e tamanhos das partículas.

Os materiais mais comuns utilizados como precursor são: a escória de alto forno, as cinzas volantes e o metacaulim. Porém, há outros precursores alternativos que vem sendo estudados por diversos pesquisadores, como por exemplo, o pó de vidro (ARULRAJAH *et al*, 2016; ZHANG e YUE, 2018; IDIR; CYR; PAVOINE, 2020; LOTERO *et al*, 2021; CONSOLI *et al.*, 2021).

Com base na natureza de seus componentes cimentícios do sistema (CaO ou SiO_2 ou Al_2O_3), conforme demonstra a Figura 11, os cimentos alcalinos podem ser divididos em dois grupos principais: (i) cimentos com alto teor de cálcio e (ii) cimentos com baixo teor de cálcio. Para cada grupo, há diferentes tipos de reações e formação de gel. No caso dos cimentos com alto teor de cálcio, o gel formado é denominado de C-A-S-H (alumino silicato de cálcio hidratado) enquanto, nos cimentos com baixo teor de cálcio, o gel formado é denominado de N-A-S-H (alumino silicato de sódio hidratado).

Figura 11. Diagrama de composição dos precursores em função da natureza de seus componentes.



Fonte: Adaptado de Xiao *et al* (2020, p. 1).

Já Nodehi e Taghvaei (2021) dividiram os materiais álcalis ativados em três grupos:

- baixo teor de cálcio sistema (também conhecido como geopolímero), no qual materiais cimentícios suplementares com baixo teor de cálcio, como cinzas volantes (classe F), fornecem silício e alumínio (Si + Al) como os principais agentes ligantes reativos;
- alto teor de cálcio sistema, no qual o silício e o cálcio (Si + Ca) estabelecem um produto de silicato de cálcio e alumínio rede de hidrato (C-A-S-H) que tem um tempo de cura menor e pode endurecer em temperatura ambiente;
- sistemas híbridos onde cimento Portland comum é frequentemente usado com material cimentício suplementar de alto volume que contribuem parcialmente para os materiais finais e endurecidos.

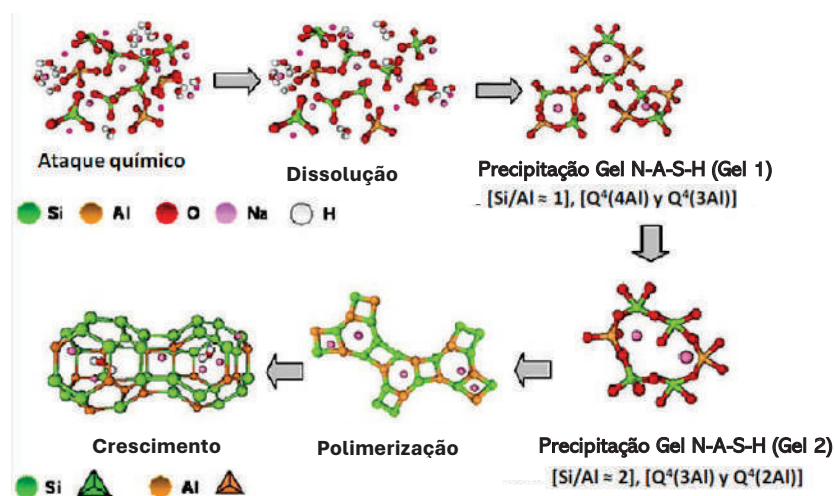
A ativação alcalina é um sistema complexo e multi-cadeia que ocorre na alcalinidade da mistura onde os materiais de alumínio silicato se dissolvem para formar uma nova estrutura de rede. Isto processo começa pela troca iônica e hidrólise de Si, Al e sua quebra de rede. A solução alcalina tem principalmente dois papéis básicos na mistura

de geopolímeros (sistemas com baixo teor de cálcio, que formam gel N-A-S-H): (1) dissolver Si-O e ligação Al-O e seu posterior restabelecimento na rede de geopolímeros e (2) balanceamento de carga da mistura por cátions de metal alcalino. Em suma, o ativador alcalino atua como um catalisador na reação permitindo a formação de um novo polímero (NODEHI e TAGHVAEE, 2021).

Shi *et al* (2011) descreveram esta reação em três etapas (como demonstra a Figura 12):

- Fase 1: o precursor entra em contato com a solução alcalina (ativador), ele se dissolve formando monômeros de sílica e alumina, que por sua vez, interagem formando dímeros e depois trímeros, tetrâmeros etc. Nesta não se observa nenhuma resistência mecânica;
- Fase 2: quando a solução atinge a saturação e se inicia a pega, ocorre a precipitação de um gel metaestável (denominado gel N-A-S-H tipo 1) que produz um revestimento nas partículas que ainda não reagiram. Este gel incorpora grande parte do alumínio reativo disponível, mas não incorpora toda a sílica;
- Fase 3: com a dissolução dos grupos Si-O, aumenta-se a concentração de silício no meio de reação e sua proporção no gel, formando o gel denominado N-A-S-H tipo 2, quando se observa um alto crescimento na sua resistência mecânica.

Figura 12. Processo de ativação alcalina em geopolímeros.



Fonte: Adaptado de Shi *et al* (2011).

A composição do gel governa diretamente a resistência mecânica e a durabilidade da matriz geopolimérica (GARCIA-LODEIRO *et al*, 2015). Em sistemas com alto teor de cálcio é importante avaliar a relação (CaO/SiO₂) e em sistemas de baixo teor de cálcio a relação (SiO₂/Al₂O₃). Segundo Shi e Lothenbach (2019) razões Ca/Si menores que 0,3 resultam em formações de produtos de reação pouco cristalinos. Já razões maiores que 0,5 levam à formação do C-S-H.

De acordo com Nodehi e Taghvaei (2021), para aumentar o pH do meio para dissolver o precursor, os ativadores líquidos foram usados pela primeira vez em produção de materiais ativados por álcalis de duas partes. Um dos principais problemas com esse método foi então encontrado transportando e manuseando tal ativador de líquido corrosivo. Estudos que comparou o resultado dos dois tipos de ativadores mostraram que em caso de utilização de líquido ativadores como hidróxido de sódio ou silicato de sódio, em temperaturas de cura térmica mais altas, um grau relativamente maior de porosidade pode ser esperado. No entanto, em termos de produção de CO₂ dos ativadores, tem sido relatado que o uso híbrido de ativadores (líquido e sólido) pode ser o mais otimizado. Os álcalis ativadores à base de sódio são geralmente mais disponíveis a custos mais baixos e com alta reatividade, enquanto os à base de potássio ativadores têm sido amplamente utilizados para aplicações de alta temperatura.

Payá *et al* (2022) apresentou um estudo comparativo das emissões de carbono entre o cimento elaborado com cimento Portland (CEM I) e o cimento ativado por alcalinos (CAA), utilizando escória de alto forno (ESC) e ativadores comerciais: hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (SS); ativadores alternativos: cinza de osso de oliveira (CHO) e cinza de casca de arroz (CCA). A Figura 13 demonstra esta comparação, considerando uma escala relativa, onde o 100 é para CEM I. Os autores concluíram que:

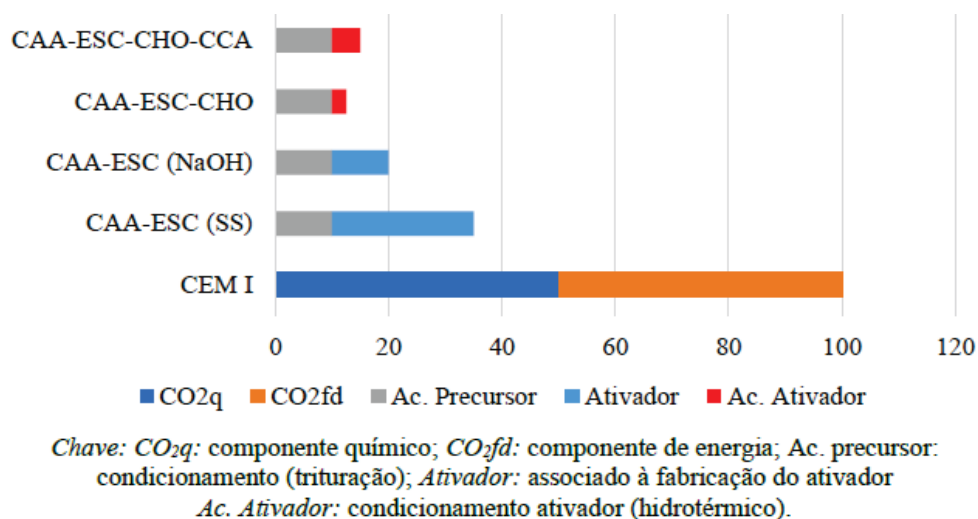
- “a) Os CAA nem sempre implicam em uma redução drástica nas emissões de CO₂ associadas: deve-se considerar que, em alguns casos, as quantidades necessárias de reagentes químicos implicam em uma pegada de carbono comparável aos cimentos Portland;
- b) Precursores como o ESC requerem menores quantidades de ativador, o que tem como consequência que as emissões de CO₂ são menores do que no caso de outros precursores como CV (cinza volante) ou MK (metacaulim);
- c) Os ativadores alternativos podem ser de origem agrícola ou industrial, mas em qualquer caso requerem uma caracterização completa, que integre tanto os estudos de condicionamento prévio necessários como os potenciais problemas de sua utilização

(presença de componentes químicos nocivos para algumas aplicações, tais como, por exemplo, cloretos);

d) Resíduos à base de sílica não podem ser utilizados de forma independente, devido à sua alta acidez (principalmente sílica). Os resíduos de base alcalina podem ser usados independentemente. A combinação dos dois tipos de resíduos pode melhorar o comportamento mecânico do CAA e aprimorar seus usos;

e) A utilização de resíduos sólidos como ativadores alternativos permite a produção de cimentos “one part”. Além disso, pode ser realizada uma retificação da junta do precursor e do ativador, o que melhora a mistura íntima de ambos os componentes (PAYÁ *et al*, 2022, p. 28)”.

Figura 13. Comparação das emissões relativas de CO₂ para cimento Portland e cimentos alternativos.



Fonte: Payá *et al* (2022, p. 28).

2.4.1. Pó de vidro como precursor

Os principais elementos de composição do pó de vidro branco, considerado um material amorfo, são: sílica (SiO₂) com 71,4%, óxido de sódio (Na₂O) com 11,5% e o óxido de cálcio (CaO) com 9,2% (TORRES CARRASCO, 2015). Em materiais álcalis ativados, o pó de vidro pode ser usado como precursor (partículas menores que 0,075 mm) devido às suas propriedades pozolânicas. Pode substituir o natural agregado ou ser usado como enchimento. Estudos destacaram que o vidro aumenta a alcalinidade do meio enquanto tem expansividade características no caso de ser usado como agregado. Dependendo do tamanho, o pó de vidro é menos reativo do que os principais materiais cimentícios suplementares. Porém, o uso mais fino das partículas, a adição de ativadores

e técnicas de cura adequadas foram relatados para ser capaz de compensar tal deficiência (NODEHI e TAGHVAEE, 2021).

A maioria das pesquisas utilizando pó de vidro, avaliaram o seu uso como substituto parcial do cimento Portland. Nassar & Soroushian (2012) e Soroushian (2012) utilizaram o pó vidro fosco como substituto parcial do cimento, por considerá-lo um material ambientalmente sustentável, amplamente disponível a baixo custo. Rangaraju *et al.* (2016) estudaram o uso de resíduos de fibra de vidro moída e encontraram comportamento mecânico e de durabilidade superior em misturas de argamassa e concreto quando comparados às misturas controle. Güllü *et al* (2017) investigaram o uso de argamassa à base de cimento combinada com pó de vidro para melhorar o solo argiloso por meio de uma técnica de mistura profunda. Os autores descobriram que uma substituição de 3% do cimento Portland por pó de vidro aumentou a resistência à compressão não confinada em 15%. Islam *et al* (2017) concluíram que a substituição de 20% do cimento Portland por pó de vidro residual no concreto foi ideal do ponto de vista econômico e ambiental.

Torres Carrasco e Puertas (2017) realizaram um estudo utilizando o pó de vidro como precursor e diversos tipos de ativadores alcalinos (hidróxido de sódio, carbonato de sódio, silicato de sódio hidratado e hidróxido de potássio) com diferentes concentrações, curado por 20h a 85 °C e a 99% ou 6,5% de umidade relativa para avaliar o efeito dessas variáveis na resistência mecânica da pasta e microestrutura. Os autores concluíram que:

“Resíduos de vidro são aptos como precursores de cimentos alcalinos, pois, desenvolve materiais com resistência mecânica adequada; o principal produto de reação obtido na ativação de resíduos de vidro é um material ativado por álcali; as condições de cura, e mais especificamente a umidade relativa, tem efeito significativo no desenvolvimento de força em álcalis-ativados pastas de vidro. Quando curado por 20h a 85 ± 2 °C e 6,5% de umidade relativa, as pastas desenvolveram resistência 50% a 75% maior do que quando curado pelo mesmo tempo e na mesma temperatura, mas, com 99% de umidade relativa; altas concentrações de ativador alcalino induzem a formação de menos porosas, pastas de maior resistência com microestruturas; a ausência de produtos de reação secundária semelhantes a zeólitas pode ser explicado pelo baixo teor de alumínio nos resíduos de vidro utilizado como precursor” (TORRES CARRASCO e PUERTAS, 2017, p. 352).

Xiao *et al* (2020) realizaram uma pesquisa utilizando vidro reciclado como agregado (10%, 20%, 30%, 40% e 50% de substituição) e pó de vidro como precursor de

um geopolímero para estabilização de bases de rodovias. Foram utilizados o silicato de sódio e hidróxido de sódio como ativadores. A proporção da mistura foi de 80% de agregados e 20% de geopolímero. A razão ativador/precursor utilizada foi 0,4 em massa, sendo que uma menor razão produz geopolímeros de maior resistência com menor variação de volume, porém, causa problemas de trabalhabilidade e consistência. As conclusões, em geral, foram: houve melhoria na compactação e o aumento na temperatura de cura e aumento da umidade melhoram a resistência à compressão, demonstrando que o uso dos resíduos de vidro (tanto como agregado como precursor) é promissor.

Consoli *et al* (2018) realizaram um estudo com a mistura de pó de vidro moído e cal de carbureto para a avaliação do desempenho mecânico de um solo arenoso e residual. Foram avaliados três teores de pó de vidro: 10%, 20% e 30%. Os resultados demonstraram que a resistência à compressão simples aumenta proporcionalmente ao teor de pó de vidro. Com relação à avaliação da durabilidade que, a perda de massa após 12 ciclos de molhagem e secagem, varia de acordo com o teor de pó de vidro e as amostras com 30% de teor de pó de vidro têm menor perda de massa do que as com 10% e 20% de pó de vidro, independentemente da percentagem de teor de cal de carbureto.

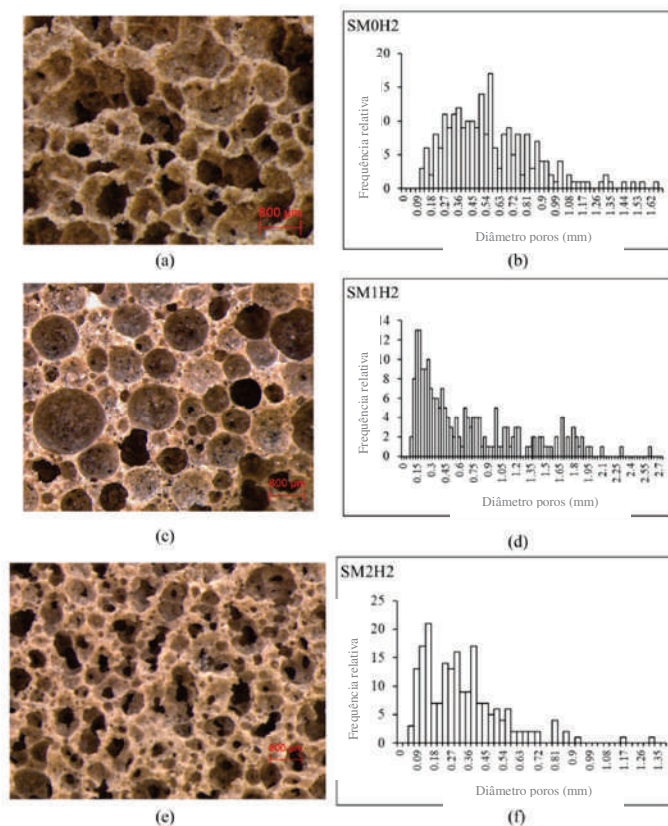
Consoli *et al* (2021) avaliaram o potencial de combinação da cal de carboneto com o pó de vidro como um possível cimento hidráulico para melhorar o comportamento de três tipos de areias: areia de Osório, areia de Rio Pardo e areia de Porto Alegre. Concluíram que a mistura pode substituir o cimento Portland com sucesso, pois, as partículas de vidro fosco interagem com o cálcio em um ambiente alcalino hidratado, produzindo produtos ligantes como o gel de hidrato de silicato de cálcio, que é o mesmo produto formado a partir da hidratação do cimento Portland. Isso representa um grande avanço nas técnicas de melhoramento sustentável do solo. Observou-se que quanto menor for o diâmetro médio das partículas de areia, maior será o efeito dos resultados da estabilização com resíduo de vidro finamente moído mais cal de carboneto por meio dos ganhos observados em termos de resistência, rigidez e durabilidade. O índice de porosidade/ligante ajustado ($\eta/B_{iv}^{0,28}$), para solo compactado (três areias distintas estudadas) com a mistura de vidro fosco e cal de carbureto, é um parâmetro apropriado para avaliar relações únicas em termos de: (a) resistência à compressão não confinada; (b) módulo de cisalhamento em pequenas deformações; e (c) durabilidade após ciclos de umedecimento-secagem.

Há diversos estudos da proporção entre ativador e precursor. A proporção de $SiO_2/Na_2O = 2,0$ foi recomendado por Zuda *et al* (2006). Patel e Shah (2018a) utilizou

um LOI (*loss of ignition*) = 0,45. Ou seja, para cada 100g de precursor, adicionou-se 45 g de ativador. Já o estudo de Sun *et al* (2022) avaliaram o efeito de quatro proporções, em massa, ativador/precursor: 0,43, 0,55, 0,60 e 0,72 (correspondente à relação w/b = 0,33, 0,42, 0,45 e 0,55 respectivamente). O ativador utilizado foi hidróxido de sódio e como precursor uma mistura de pó de vidro e metacaulim. Os resultados demonstraram que a resistência a compressão mais alta foi da razão ativador/precursor = 0,55.

Siddika *et al* (2023) realizaram um estudo utilizando o pó de vidro como precursor associado com cinzas volantes e escórias de alto forno. Foi utilizado uma mistura hidróxido de sódio 10M e silicato de sódio como ativador. Foram 11 compósitos diferentes analisados, variando-se a composição dos precursores e o módulo de sílica (0; 1; 1,5 e 2). Uma das análises realizadas foi a realização de imagem microscópica de seções transversais e a quantificação dos tamanhos dos poros. Os autores concluíram que os tamanhos dos poros e a sua distribuição (Figura 14), bem como as reações álcalis ativados, alteram de forma significativa a resistência mecânica das amostras. Quanto maior a quantidade de poros maiores, menor a resistência obtida.

Figura 14. Quantificação dos poros e a sua distribuição.



Fonte: Adaptado de Siddika *et al* (2023, p. 11).

2.4.2. Ativadores

Segundo Peterman *et al* (2010), a concentração do ativador alcalino é o fator mais crítico para o sucesso da formação do geopolímero e da evolução da resistência à compressão. Independentemente do tipo de ativador, o aumento da concentração aumenta a velocidade e o grau da reação, levando a uma reação menos porosa e material de cimento mais resistente. A adição de ativadores e o aumento da concentração resultam em uma menor porosidade. Embora seja geralmente aceito que uma maior concentração resultará em maiores resistências, parece haver um limite ideal para cada tipo de ativador, de modo que cruzar esse limite resulta no efeito reverso. Conseqüentemente, uma concentração alcalina mais alta aumenta o tempo de pega e atrasa as formações de polímero uma vez que a presença excessiva de íons limita sua mobilidade e potencial para interagir com os reagentes disponíveis.

A relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ é outro parâmetro muito importante para formação de geopolímeros. É bem conhecido que variações na razão $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ modificam significativamente o grau de polimerização, determinando assim as propriedades mecânicas do produto. Maiores porcentagens de sílica solúvel em geopolímeros retarda a dissolução do precursor devido ao aumento da saturação da sílica iônica e promove a precipitação, resultando em um gel mais resistente com uma densidade aumentada. Em intervalos de tempos de cura curtos, um aumento na sílica solúvel favoreceu o desenvolvimento de alta resistência mecânica, enquanto o menor teor de sílica produz os valores de resistências mais altos em tempos de cura mais longos. A presença de sílica solúvel afeta diretamente a cinética da reação, a taxa de cristalização e promove a formação de um gel rico em Si que é responsável pelo desenvolvimento da resistência do material. Uma proporção de 2,0 para SiO_2 e Na_2O (em massa) é recomendado (ZUDA *et al*, 2006).

2.4.2.1. Hidróxido de sódio

Entre os materiais comumente utilizados como ativadores, os silicatos e hidróxidos de sódio (NaOH) e potássio (KOH) são os mais utilizados (ADESANYA *et al.*, 2021; DAVIDOVITS, 2017). Soluções de sódio tem menor custo, ampla disponibilidade e baixa viscosidade (PROVIS e BERNAL, 2014).

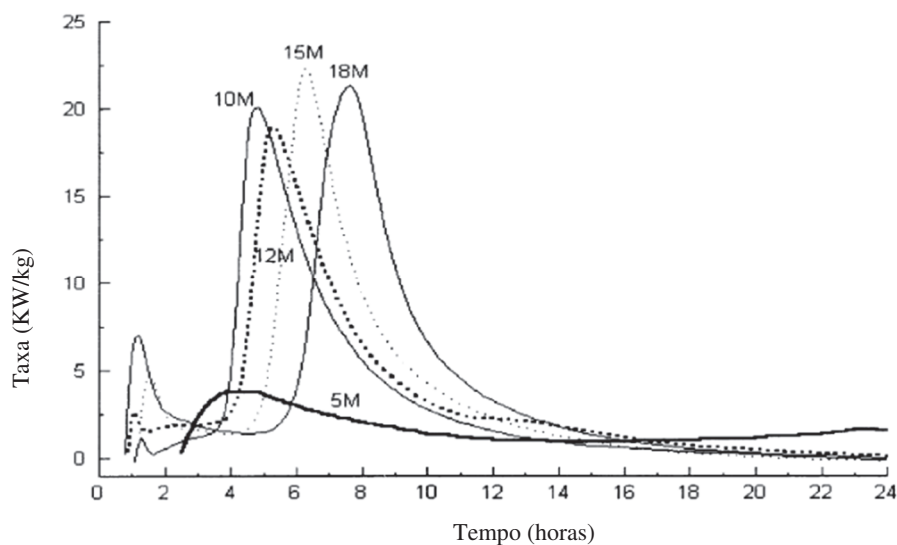
O hidróxido de sódio, também conhecido como soda cáustica, é um composto inorgânico que tem uma variedade de usos na fabricação incluindo sabões, papel, corantes e derivados de petróleo. Por ser uma base forte, tem natureza corrosiva e pode causar reações alérgicas e irritações da pele. Ele pode ser encontrado em estados líquido e sólido que são incolores e não têm odor (NODEHI e TAGHVAAE, 2021).

A solubilidade do NaOH a 25° C é de aproximadamente 28,57-m, mas essa solubilidade diminui para 10,37-m a 0°C (PROVIS, 2009). A utilização de NaOH em geopolímeros leva à formação de estruturas zeolíticas (PROVIS *et al*, 2005), particularmente após longos períodos de cura em condições úmidas ou mesmo após um breve período em temperatura elevada. Em altas concentrações, o NaOH é altamente corrosivo, implicando na necessidade de equipamentos muito especializados para produzir grandes volumes de geopolímeros ativados por esse hidróxido. O surgimento de eflorescências é comum de acontecer em geopolímeros ativados com soluções que têm concentrações elevadas de hidróxido, em consequência da reação do excesso de álcali com o CO₂ atmosférico. Porém, na maioria dos casos, trata-se apenas de um efeito estético indesejado (PROVIS, 2009).

Um estudo comparativo de Esparham, *et al* (2020), entre o uso de hidróxido de sódio e hidróxido de potássio como ativadores, concluiu que o uso de NaOH, proporcionou maiores resistências à compressão de 3 e 7 dias enquanto o uso de KOH resultou em maior resistência à compressão de 28 dias. Tal fato foi explicado por Khale e Chaudhary (2007), que maiores concentrações de NaOH promovem resistências mais altas nos estágios iniciais da reação, porém, com o passar do tempo a resistência diminui devido ao excesso de OH⁻ em solução causando morfologia e não uniformidade dos produtos.

Alonso e Palomo (2001) realizaram ensaios de calorimetria em ligantes obtidos a partir da ativação alcalina do metacaulim com hidróxido de sódio, tendo identificado a formação de picos iniciais correspondentes a dissolução do metacaulim, seguido de um período de indução caracterizado por uma baixa libertação de calor e terminando com picos muito acentuados correspondentes a formação dos produtos de reação variando proporcionalmente à concentração do hidróxido estudados (5M, 10M, 12M, 15M e 18M), conforme demonstra a Figura 15.

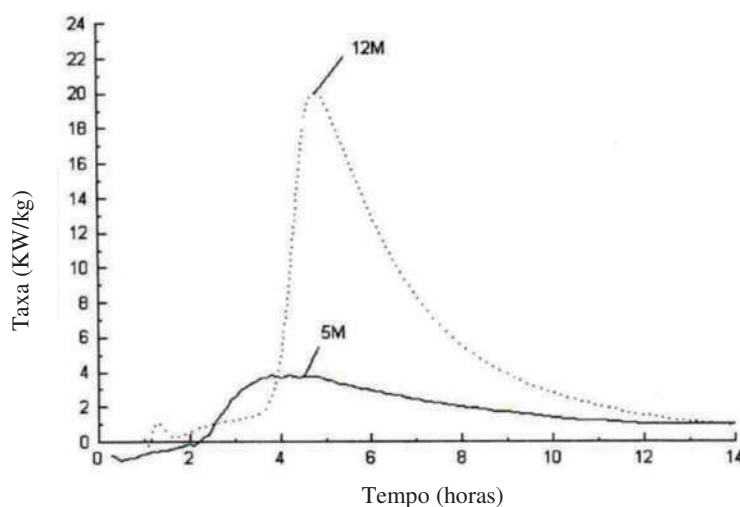
Figura 15. Taxa de liberação de calor do metacaulim ativado por diferentes concentrações de NaOH.



Fonte: Adaptado de Alonso e Palomo (2001, p. 26).

Granizo *et al.* (2002) também estudaram os efeitos do hidróxido de cálcio nos produtos da ativação alcalina de metacaulim por hidróxido de sódio a 5M e a 12M, com dois tipos de amostras: metacaulim e uma mistura de metacaulim com cal hidratada (proporção de 1:1). Os resultados mostraram que nas amostras de metacaulim ativadas pelo NaOH a 12M houve formação de uma rede inorgânica de produtos, causada pela grande quantidade de hidroxilas livres na fase líquida, acelerando a reação. Essa mesma mistura ativada pelo NaOH a 5M não apresentou rigidez; apenas 20% do metacaulim havia sido ativado após 24h, o que mostra que a concentração de 5M não foi suficiente para a reação de geopolimerização somente com metacaulim (Figura 16). Nas amostras de metacaulim e cal hidratada houve a formação de produtos cimentantes com o ativador a 5M, mostrando a eficiência da cal hidratada na formação de C-S-H, mesmo quando o gel geopolimérico não é formado. Já na concentração de 12M os produtos foram o gel geopolimérico e C-S-H, com 20% da sílica mobilizada neste. Os pesquisadores notaram ainda que em ambas as pastas a rede geopolimérica possuía a mesma composição química ($\text{Si}_2\text{:Al}_2\text{:Na}_2\text{:H}_4\text{:O}_{10}$).

Figura 16. Taxa de liberação de calor do metacaulim ativado por NaOH a 5M e 12M.

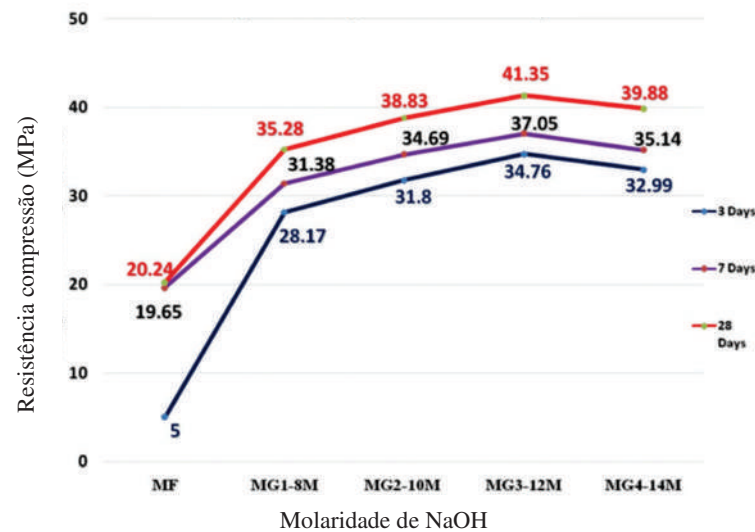


Fonte: Adaptado de Granizo *et al.* (2002, p. 229).

Bezerra *et al* (2013) realizaram um estudo sobre o uso de uma cerâmica vermelha reciclada como precursor e o hidróxido de sódio como ativador. Foram avaliadas três composições da influência da relação Si/Na: 4:1, 2:1 e 1:1. As amostras com maior concentração de ativador apresentaram maior resistência mecânica e a amostra com maior teor de ativador apresentou uma pequena diminuição na porosidade com relação às demais amostras analisadas.

Patel e Shah (2018b) avaliaram a variação da molaridade de NaOH em concreto geopolímero curado em temperatura ambiente. As molaridades foram variadas de 8M a 14M, sendo que a solução com 12M obteve a maior resistência à compressão em 28 dias (41,35 Mpa), observando-se que houve um crescimento conforme aumentava-se a molaridade de 8M até 12M e para 14M já houve um decréscimo (39,88 Mpa) em relação à 12M (Figura 17). O aumento da molaridade da solução ativadora aumenta a solubilidade dos materiais aluminossilicatos. Com maior molaridade de hidróxido de sódio, a produção de ligação reativa aumenta, o que aumenta ainda mais a resistência à compressão do concreto geopolimérico. Isso se deve à dissolução mais rápida da alumina e sílica do material de origem para a solução, auxiliando assim a formação de maiores quantidades de gel polimérico de aluminossilicatos que aceleram a geopolimerização. Em 14M mais íons hidróxido precipitam em gel de aluminossilicato em idade muito precoce de geopolimerização e, portanto, retardam o próximo processo de reação, resultando em menor resistência.

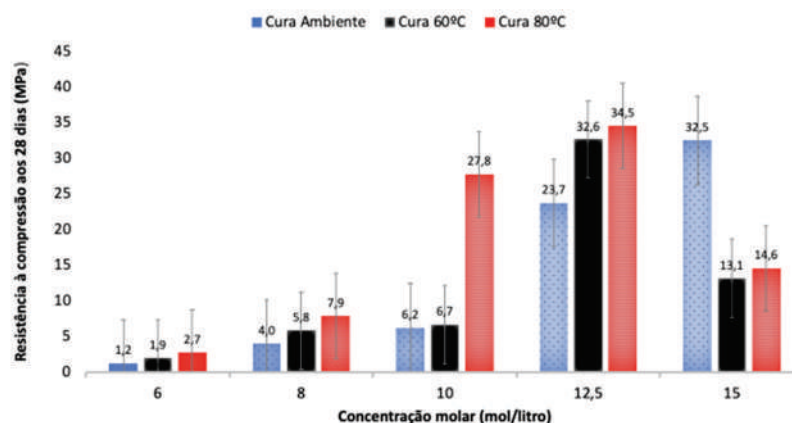
Figura 17. Variação da resistência à compressão em função da molaridade do NaOH.



Fonte: Adaptado de Patel e Shah (2018b, p. 7).

Rangel (2022) na sua dissertação de mestrado estudou a influência da variação da molaridade e da temperatura de cura nas propriedades físicas, químicas e mecânicas de argamassas de metacaulim e/ou resíduo de tijolo moído álcalis ativados por hidróxido de sódio. Foram avaliadas as molaridades de 6M, 8M, 10M, 12,5M e 15M em três condições de temperatura de cura: ambiente, 60°C e 80°C. Os resultados de compressão aos 28 dias, para a mistura somente com metacaulim, demonstraram que o melhor resultado foi com a molaridade de 12,5M curado a 80°C, enquanto, a cura em temperatura ambiente, o melhor resultado foi com 15M, como demonstra a Figura 18.

Figura 18. Resultados da resistência a compressão simples da argamassa com 100% metacaulim.

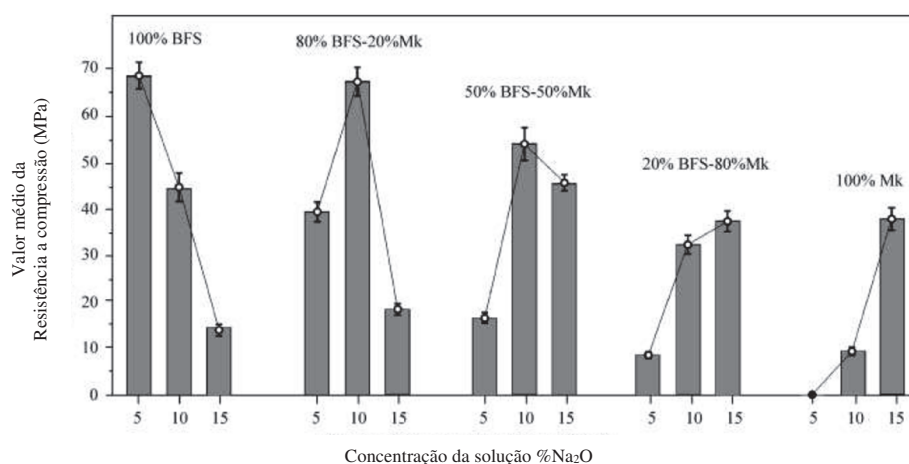


Fonte: Rangel (2022, p. 7).

Por outro lado, vários outros estudos demonstraram que baixas concentrações molares obtêm-se maiores resistências à compressão quando se tem alto teor de cálcio na composição do cimento alternativo. Wang, Scrivener e Pratt (1994) constataram que a melhor dosagem para um ativador alcalino varia entre 3% e 5,55% de Na_2O em relação à massa de escória de alto forno, que possui alto teor de cálcio. Ratificando esta conclusão, Fernandez Jimenez, Palomo e Puertas (1999), também chegaram ao intervalo de 3% a 5% de Na_2O em relação à massa de escória. Ultrapassando esse limite tem-se queda de resistência e surgimento de eflorescências.

Da mesma forma, o estudo de Burciaga-Diaz *et al* (2010) avaliaram a resistência mecânica de compósitos de escória de alto forno (BSF) e metacaulim (Mk), que foram ativados por silicato de sódio, com três teores diferentes: 5%, 10% e 15% de Na_2O em massa. Os precursores estudados foram: 100%BFS, 80%BSF-20%Mk, 50%BSF-50%Mk, 20%BSF-80%Mk e 100%Mk. Os resultados (Figura 19) demonstraram que os compósitos com alto teor de cálcio (100%BFS) apresentaram melhor desempenho mecânico quando ativadas em ambientes de menor alcalinidade (5% de Na_2O), tendo como produto primário de reação o gel tipo C-S-H.

Figura 19. Influência da concentração molar na resistência a compressão simples.



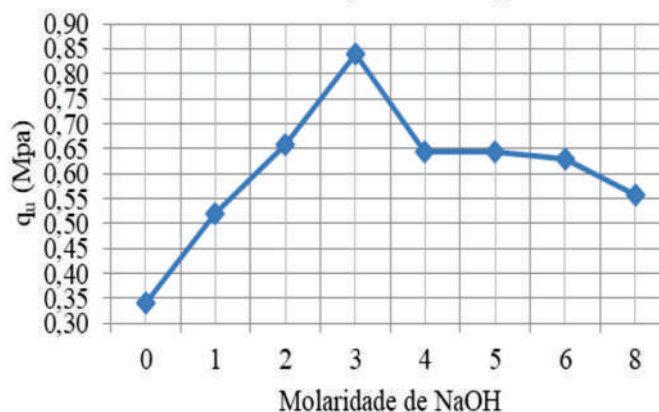
Fonte: Adaptado de Burciaga-Diaz *et al* (2010, p. 543).

Já Lima *et al.* (2022) estudaram a influência do Na_2O concentração nas propriedades mecânicas e microestruturais de misturas ativadas por álcalis. O precursor utilizado foi a escória de alto-forno (BFS) e foram estudados dois tipos de ativadores. O primeiro foi o silicato de sódio (SS) com razão molar ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) = 1,75 e 45,25 % e o segundo foi o metassilicato de sódio pentahidratado (SMP) com razão molar = 1,01 e

57,56 %. A conclusão, em relação à resistência a compressão, foi que o aumento de Na_2O (%) acelerou o ganho em idades precoces, o que foi claramente notado para as misturas com 7,5% de Na_2O . Entretanto, houve um limite de resistência à compressão de 60 MPa para a ativação com SMP e 80 MPa para as misturas com SS. Portanto, visando aplicações práticas, a menos que o objetivo seja obter resistências iniciais significativas, uma concentração de 6,0% de Na_2O pode ser suficiente para atingir a resistência máxima à compressão.

Daassi-Gli (2020) em sua dissertação de mestrado, realizou um estudo para a estabilização de um solo granular com misturas de pó de vidro, cal de carbureto e hidróxido de sódio (NaOH). Para determinar a molaridade ótima, 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 (Figura 20). Logo, a molaridade ótima obtida foi de 3 mols.

Figura 20. Variação da resistência a compressão simples x molaridade de NaOH.



Fonte: Daassi-Gli (2020, p. 106).

2.4.2.2. Silicato de sódio

O silicato de sódio (Na_2SO_3) é um dos silicatos solúveis mais comuns. A composição química do silicato de sódio é usualmente expressa pela relação ponderal ou molecular entre os óxidos de silício e sódio, denominada de módulo de sílica. Assim um

silicato de sódio de relação 3,3 partes por peso de óxido de silício (SiO_2) para 1,0 parte por peso de óxido de sódio (Na_2O). As soluções comerciais de silicato de sódio podem variar de 1,6 a 3,75 partes de SiO_2 para Na_2O , em massa (ILLER, 1979).

A concentração máxima de silicato de sódio em solução é limitada pela viscosidade, pois, não há limite de saturação. Aumentando-se a concentração, aumenta-se a viscosidade, até se tornar sólido. Aumentando-se o módulo de sílica, aumenta-se a viscosidade. O pH cresce com o aumento do teor de Na_2O e cai com a diminuição do módulo de sílica (WELDES e LANGE, 1969).

Os silicatos de sódio são fabricados pela fusão de areia (SiO_2) com sódio ou carbonato de potássio (Na_2CO_3 ou K_2CO_3) a temperaturas superiores a $1.100\text{ }^\circ\text{C}$ e dissolvendo o produto com vapor de alta pressão em um líquido semi-viscoso conhecido como água de vidro. Raramente é usado como uma unidade de ativação independente, porque não possui suficiente potencial de ativação para iniciar a reação pozolânica sozinho. Em vez disso, é comumente misturado com NaOH ou KOH como agente fortificante para aumentar a alcalinidade e aumentar a resistência geral da amostra. A solução de silicato de sódio está disponível comercialmente em diferentes graus, mas deve-se notar que em pó leva a um desempenho inferior em comparação com a forma líquida. Para o melhor resultados, uma solução de silicato com uma razão SiO_2 para Na_2O (em massa) de 2,0 misturado na proporção de 8-16M, 24 horas antes do uso é recomendado. A propriedade mais importante deste produto é sua relação mássica de SiO_2 para Na_2O , que é comercialmente disponível na faixa de 1,5 a 3,2 (sendo 3,2 o mais adequado para geopolimerização). Os silicatos solúveis reduzem a saturação alcalina na solução dos poros e promovem maior ligação interpartículas com os ligantes geopoliméricos e o material agregado incluído. Testes revelaram que soluções de ativação contendo pouco ou nenhum silicato solúvel produziram resistências à compressão significativamente mais fracas de argamassas e concretos do que aqueles ativados com altas doses de silicatos solúveis. Além disso, a presença de tal material de silicato melhora a ligação interfacial entre agregados de rocha e argamassas geopoliméricas. No contrário, pesquisas adicionais mostram que sob temperaturas crescentes, espécimes contendo silicato de sódio diminuem em força enquanto aqueles contendo apenas um ativador de base (NaOH, KOH) produzem maiores resistências (PETERMAN *et al*, 2010).

A adição de silicatos de sódio à mistura aumenta as propriedades mecânicas além da capacidade de um ativador de hidróxido sozinho. No entanto, deve-se ter o cuidado de regular a relação entre cada substância. A experiência laboratorial sugere que a proporção

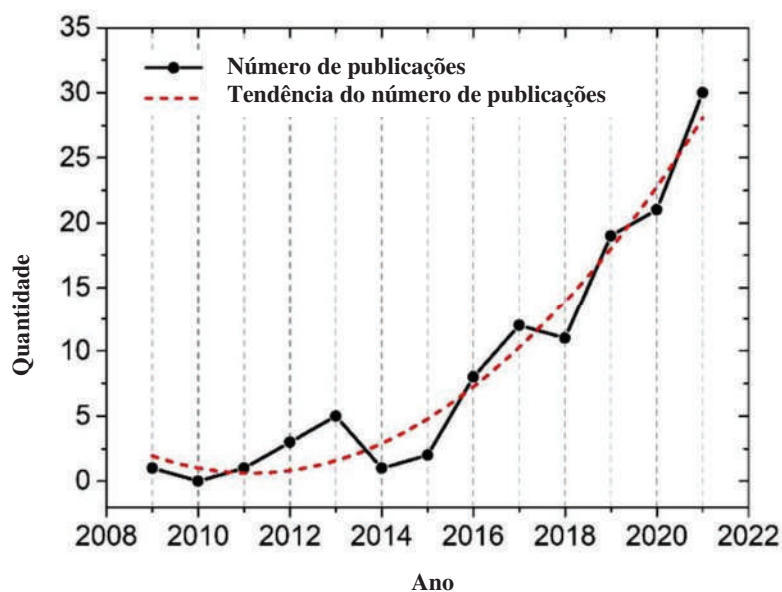
de silicato de sódio/solução de hidróxido de sódio (em massa) deve ser ajustado para um valor aproximado de 2,5 (DOLEZAL *et al*, 2006).

Phoo-ngernkham *et al* (2015) realizaram um estudo para comparação do uso de ativadores nas resistências a compressão e ao cisalhamento de geopolímeros. Os ativadores utilizados foram: hidróxido de sódio a 10M (NH), silicato de sódio (NS) e uma mistura da solução de hidróxido de sódio mais silicato de sódio (SNNH) com relação NS/NH = 2,0. Foram utilizadas cinzas volantes (FA) e escória granulada moída de alto forno (GBFS) como precursores, com três variações diferentes (100% FA, 50% FA + 50% GBFS, 100% GBFS). Os resultados demonstraram que a solução NH é importante para a dissolução de íons Si^{4+} e Al^{3+} das matérias primas e posterior processo de geopolimerização. No entanto, a lixiviação e a reação subsequente são baixas à temperatura ambiente em torno de 23 °C. O uso de NS isoladamente ou em conjunto com NH resultou em silicato adicional no sistema e isso ajudou a acelerar a geopolimerização levando ao aumento da resistência à compressão. A pasta FA + GBFS com SNNH foi o ligante ativado por álcalis mais eficaz e misturas de alta resistência foram obtidas. Da mesma forma, misturas de alta resistência também foram obtidas com o geopolímero GBFS com NS, com desempenho semelhante ao concreto com cimento Portland.

2.4.3. Uso de RCCR ativados por álcalis

Diversos estudos já foram realizados para incorporar resíduos da construção civil reciclados (RCCR), como agregados ou precursores, em concretos e/ou cimentos alternativos, principalmente para a finalidade de blocos, pavimentação e outras aplicações não estruturais, tornando-se uma aplicação promissora. Confirmando esta tendência, de acordo com o levantamento realizado por Salazar *et al* (2022), a Figura 21 demonstra o aumento nas publicações ao longo dos últimos anos relacionadas à ativação alcalina ou geopolimerização de RCCR.

Figura 21. Evolução do número de publicações relacionadas com RCCR ativados por álcalis.



Fonte: Adaptado de Salazar (2022, p. 2).

Destaca-se alguns estudos, descritos no Quadro 6, sobre a utilização de RCCR ativados por álcalis.

Quadro 6. Alguns estudos realizados utilizando RCCR em cimentos alternativos.

Fonte	Estudo	Resultados
Velazquez <i>et al</i> (2016)	Geopolímero baseado em resíduos de demolição de concreto	Foram utilizados sistemas geopolímeros simples (100% CDW), híbridos (CDW + OPC) e binários (CDW + MK) com ativação de NaOH + silicato de sódio. Para o caso de 100% CW com cura a temperatura ambiente, com 6% Na ₂ O, obteve-se 7 MPa de resistência a compressão a 28 dias. Concluiu-se que: os resultados obtidos demonstram que, em condições controladas, é possível utilizar resíduos de demolição de concreto como precursores de cimentos ativados por alcalinos. No entanto, a natureza semi-cristalina desse tipo de resíduos requer o uso de adições ativas ou fontes de alumina reativas, como metakaolina, para atingir resistências superiores. Neste caso, a porcentagem de Na ₂ O utilizado na síntese dos geopolímeros baseados neste precursor deve ser avaliado de acordo com a composição química, pois, um leve excesso diminui a resistência a compressão e causa o aparecimento de eflorescência. O teor ótimo de Na ₂ O neste estudo foi de 6%.
Salazar <i>et al</i> (2017)	Materiais de construção ativados por alcalinos feitos	Foram utilizados 3 tipos de RCCR como agregados: resíduos de tijolo de argila vermelha (RCBW); resíduos de concreto (CW) e resíduos de vidro (GW). Ativador foi

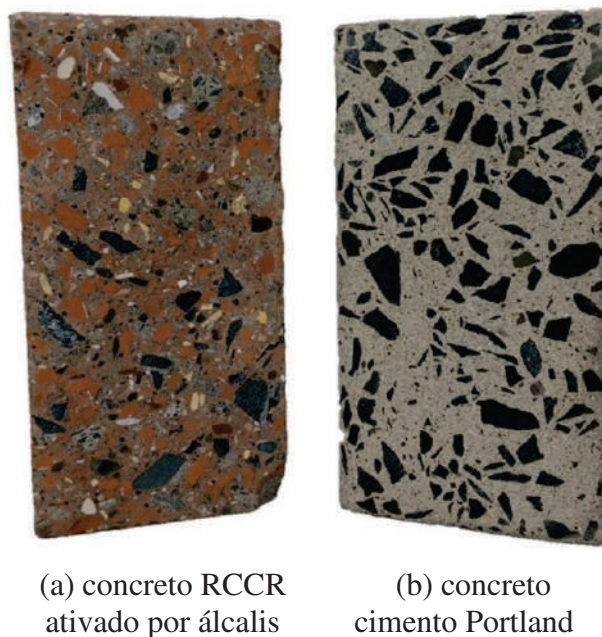
	com resíduos reciclados de construção e demolição	o hidróxido de sódio, uma mistura de NaOH e silicato de sódio e com adição de cimento OPC - Portland (10%, 20% e 30%). Cura a temperatura ambiente e à 70°C 24h. Para os materiais feitos a partir de 100% RCBW ou CW, ou seja, sem OPC, foi possível obter desempenho mecânico adequado quando curado à temperatura ambiente com ajustes apropriados das condições de síntese, particularmente o tipo e proporção do ativador. Para o caso de 100% RCBW ativado com NaOH, a temperatura ambiente obteve-se 7 MPa de resistência a compressão a 28 dias e 41 MPa com adição de 10% OPC; quando ativado por NaOH e silicato de sódio, alcançou-se até 54 MPa com cura inicial a 70°C por 24h e 103 MPa com adição de 20% de OPC. Para o caso de 100% CW ativado com NaOH (6% Na ₂ O), a temperatura ambiente obteve-se 7 MPa de resistência a compressão a 28 dias e 10 MPa com adição de 30% OPC; quando ativado por NaOH e silicato de sódio, alcançou-se até 26 MPa com cura temperatura ambiente (SiO ₂ /Al ₂ O ₃ = 10,0) e 34 MPa com adição de 30% de OPC com cura temperatura ambiente (SiO ₂ /Al ₂ O ₃ = 10,5). Os resultados obtidos indicaram a possibilidade de uso em cimentos, argamassas para assentamento e elementos pré-fabricados.
Bassani <i>et al</i> (2019)	Ativação alcalina de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição sem adição de ligante	RCCR foram estabilizados com hidróxido de sódio e silicato de sódio, com compactação na umidade ótima, para avaliar seu emprego potencial em camadas estabilizadas de pavimento rodoviário de base/sub-base. Foram utilizadas 4 diferentes misturas de ativadores: 100%, diluído em água a 75%, diluído a 50% e 0% (sem adição), com razão molar (SiO ₂ /Na ₂ O) de 3,4. As misturas com 100% obtiveram melhores resultados quanto ao módulo de resiliência, resistência a compressão simples e resistência à tração indireta, comparáveis aos de materiais granulares estabilizados por cimento comuns.
Salazar <i>et al</i> (2020)	Reciclagem de resíduos da construção e demolição como pasta e agregados, em materiais ativados por álcalis: um novo conceito de reutilização	Foi utilizado RCCR como agregado e como pasta, ativado por uma mistura de hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (SS), acrescido de 10% de cimento Portland (OPC), obtendo um cimento híbrido. Observou-se que altas razões (NaOH+SS/RCCR+OPC > 0,35) causa diminuição na resistência à compressão. Porém, a relação NaOH/SS não teve efeito significativo. As razões ideais encontradas (NaOH+SS/RCCR+OPC = 0,35 e NaOH/SS = 0,34), obtiveram resistência a compressão de 16 e 31 MPa aos 7 e 28 dias de cura (temperatura ambiente e umidade relativa > 80%); o ligante pode ser classificado como cimento de uso geral e baixo calor de hidratação. O concreto pode ser utilizado para fabricação de blocos (com resistência a compressão de 26,1 MPa a 28 dias – bem acima dos 13 MPa exigido pela ASTM C90).
Pyngrope <i>et al</i> (2021)	Propriedades do concreto ativado por álcalis	Foi substituído 25%, 50% e 75% de agregados grosseiros e agregados finos por RCCR. Foi utilizado uma mistura de hidróxido de sódio e silicato de sódio como ativador,

	incorporando resíduos de construção demolidos como agregados	com cura em temperatura ambiente. Observou-se uma redução na resistência a compressão (28 dias) em relação ao concreto de referência (sem RCCR - 33,3 MPa): 30,4 MPa, 21,0 MPa e 7,2 MPa para 25%, 50% e 75% de substituição respectivamente. Além disso, houve piora na trabalhabilidade, aumento na absorção de água e redução na resistência a ácidos. Uso indicado para aplicações não estruturais.
Borrachero <i>et al</i> (2022)	Reaproveitamento de Resíduos de Construção e Demolição no Preparo de Cimento Ativado por Álcalis	Foi utilizado RCCR após britado e peneirado e escórias de alto forno (BFS). Uma pasta alcalina ativada à base de RCCR foi preparada usando 9 mol/kg de sódio no $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ razão molar de 1,21 e uma relação água/aglomerante de 0,45. Esta pasta foi curada por 7 dias a 65 °C. Essas argamassas foram preparadas usando cinco diferentes proporções de RCCR/BFS (100/0, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 por massa) como ligante (precursor). Para a solução ativadora, duas concentrações diferentes de NaOH (7 e 9 mol/kg) foram testados, para duas razões molares (1,21 e 1,56). A relação água/aglomerante e a relação areia silicosa/aglomerante foram fixadas em 0,45 e 3, respectivamente. Os resultados de resistência à compressão das argamassas RCCR ativadas por álcalis, utilizando uma mistura de NaOH e silicato de sódio como ativador, obteve uma resistência a compressão de até 18 MPa após 3 dias de cura a 65 °C. Estas resistências são perfeitamente válidas para aplicações não estruturais onde os requisitos de resistência são menos importantes. Quando BFS foi adicionado como parte do precursor, ocorreram melhorias na resistência mecânica, com valores acima de 55 MPa após 7 dias de cura a 65 °C. Essas melhorias nas resistências mecânicas pela adição de BFS permitiriam que sistemas BFS/RCCR mistos fossem usados em aplicações estruturais.
Maaze e Shrivastava (2023)	Otimização do projeto de um tijolo reciclado à base de resíduos de concreto através da ativação alcalina utilizando a metodologia Box-Behnken	A matéria prima utilizada foi o resíduo de concreto reciclado. A ativação alcalina utilizou o hidróxido de sódio e silicato de sódio, com razão $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 2,75. Foi realizado um estudo com variação de 3 fatores: molaridade, temperatura de cura e proporção de mistura alcalina, gerando 15 combinações diferentes. O aumento da molaridade da solução de NaOH melhorou significativamente as propriedades físicas e mecânicas das misturas de tijolos. De acordo com a análise de resposta multiobjetivo da metodologia de superfície de resposta, os parâmetros ótimos foram 12M de molaridade, 2,32 de razão molar ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) e 50 °C temperatura de cura para maximizar a resistência à compressão e à flexão e minimizar a absorção de água e a secagem e um alvo de efluorescência moderada. A confirmação desses ótimos resultados esteve dentro do intervalo previsto de 95% de intervalo de confiança.
Reis <i>et al</i> (2023)	Resíduos de concreto reciclados ativados por álcalis	Foi utilizado resíduos de concreto reciclados como precursor ativados somente silicato de sódio (Na_2SiO_3) e por uma mistura de silicato de sódio com hidróxido de sódio (NaOH e Na_2SiO_3), totalizando 5 compósitos

	<p>diferentes com a variação das misturas dos ativadores. A resistência à compressão das pastas ativadas por álcalis aos 7 dias de cura, variou de 2,12 MPa a 14,71 MPa, sendo que, o maior valor de resistência à compressão foi obtido para a pasta que contém maior percentual de NaOH e Na₂SiO₃. Comparando as pastas compósitas com o mesmo teor de hidróxido de sódio e as pastas com o mesmo teor de silicato de sódio, observou-se um ganho de resistência à medida que o teor de ativador é aumentado. Com o aumento da concentração de NaOH, a dissolução das matérias-primas é favorecida o que consequentemente potencializa a reação ativada por álcali obtendo assim maiores valores de resistência à compressão. O resultado primordial da resistência à compressão foi observado no contexto da ativação alcalina do compósito, registrando um valor de pico de 14,7 MPa após 7 dias de cura, utilizando uma concentração de 8% de NaOH e uma concentração de 9% de Na₂SiO₃.</p>
--	--

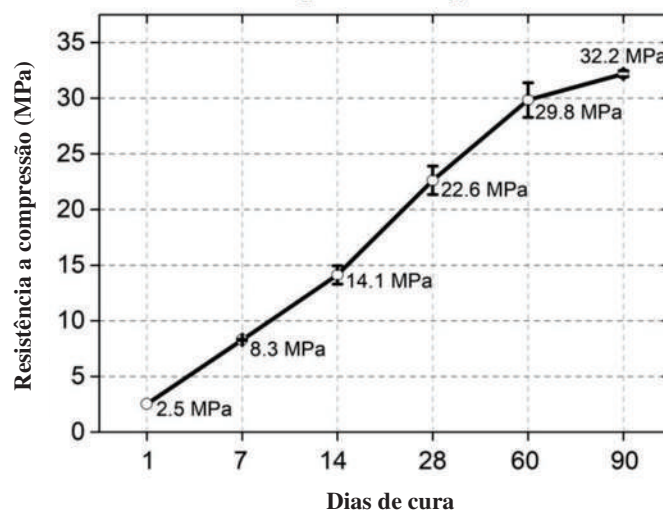
Como ilustração da comparação da aparência interna de um concreto elaborado com RCCR ativado com álcalis (lado esquerdo) e outro com cimento Portland (lado direito), Salazar *et al* (2020) apresentaram a Figura 22, que demonstra além da distribuição adequada (homogênea) dos agregados de RCCR, a cor marrom. Este fenômeno deve-se à cor do precursor do RCCR, principalmente devido aos resíduos cerâmicos (vermelho) e resíduos de alvenaria (vermelho). Segundo os autores, o que em princípio poderia ser considerado uma desvantagem (uma cor diferente da convencional “cinza”), torna-se uma vantagem a nível de aplicação ou industrial. Pois, atualmente, a demanda e produção de concreto arquitetônico colorido tem apresentado um aumento com a modernização da construção civil, apoiando-se em nível tecnológico devido ao interesse particular em pigmentos alternativos aos minerais (resíduos), de baixo custo, com maior estabilidade do que as tintas convencionais, e até mesmo a obtenção de concreto colorido com propriedades refletivas ou isolantes térmicos (concretos de cor fria).

Figura 22. Comparação de um concreto RCCR ativado com álcalis e um concreto com cimento Portland.



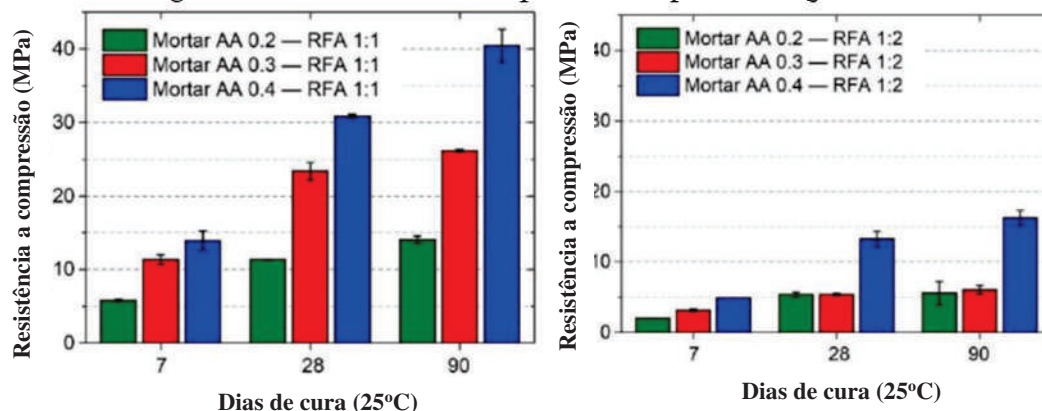
Fonte: Salazar *et al* (2020).

Salazar *et al* (2022) realizaram um estudo sobre o reaproveitamento de RCCR, utilizados como precursores ativados por materiais alcalinos e como agregados, para a obtenção de concreto para pré-moldados. O RCCR era composto por uma mistura de resíduos de concreto, cerâmica e alvenaria, denominada de CDW-Mixed. O ativador utilizado foi uma mistura de hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na₂SiO₃). O cimento híbrido era composto por 90% da mistura do RCCR (30% resíduo de concreto, 30% do resíduo de cerâmica e 30% do resíduo de alvenaria) e 10% de cimento Portland (OPC). A composição química do CDW-Mixed consistia principalmente de SiO₂ (51,5%), CaO (14,6%), Al₂O₃(14,3%), Fe₂O₃ (6,7%) e outros materiais (5,3%). O ativador alcalino (AA) foi preparado, em massa, numa proporção de NaOH/Na₂SiO₃ = 0,25, equivalente a uma razão molar SiO₂/Na₂O = 1. O teor de AA utilizado nas misturas variou em 0,2, 0,3 e 0,4, sendo esses valores equivalentes à razão (em massa) AA/(precursor + OPC). Os resultados da resistência a compressão simples do cimento híbrido, demonstraram que a resistência atingiu 22,6 MPa aos 28 dias de cura à temperatura ambiente (≈25°C) e 32,2 MPa aos 90 dias (Figura 23).

Figura 23. Resistência a compressão simples do cimento híbrido.

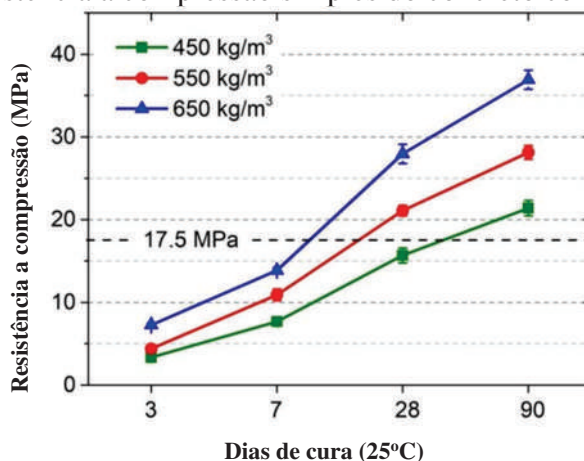
Fonte: Adaptado de Salazar *et al* (2022, p. 7).

Ainda neste último estudo, os autores realizaram a mistura deste cimento híbrido, citado anteriormente, com agregados reciclados finos (RFA), também provenientes de RCCR, obtendo-se uma argamassa. Foram realizadas variações no teor de AA (0,2, 0,3 e 0,4) e no teor de RFA nas relações cimento:agregado de 1:1 e 1:2, totalizando 6 misturas diferentes estudadas (AA0,2—RFA1:1; AA0,2—RFA1:2; AA0,3—RFA1:1; AA0,3—RFA1:2; AA0,4—RFA1:1; AA0,4—RFA1:2). Os resultados obtidos demonstraram que, o aumento do teor de AA favoreceu o desenvolvimento da resistência mecânica das argamassas (Figura 24). Aos 28 dias de cura (25°C), as resistências à compressão das argamassas AA 0,2, AA 0,3 e AA 0,4 com teores de RFA de 1:1 foram de 11,3 MPa, 23,4 MPa e 30,9 MPa, respectivamente. Por outro lado, no caso dos teores de RFA de 1:2, as resistências foram de 5,4 MPa, 5,5 MPa e 13,2 MPa, respectivamente. Em referência ao acima exposto, um maior teor de AA (NaOH + Na₂SiO₃) aumenta a presença sílica solúvel disponível favorecendo as condições necessárias para reações de geopolimerização (ativação alcalina). Da mesma forma, silicato de sódio (Na₂SiO₃) favorece a união (aderência) das partículas precursoras que não reagem (anidras), aumentando assim a resistência de materiais álcali-ativados à base de aluminossilicatos de baixa reatividade, como é o caso dos RCCR.

Figura 24. Resistência a compressão simples das argamassas.

Fonte: Adaptado de Salazar *et al* (2022, p. 11).

E por último, os autores realizaram a mistura deste cimento híbrido, citado anteriormente, com agregados reciclados (30% finos RFA + 70% graúdos RCA), também provenientes de RCCR, obtendo-se um concreto. As variações ocorreram nos teores do cimento aplicados: 450 kg/m^3 , 550 kg/m^3 e 650 kg/m^3 . De modo geral, os resultados obtidos mostraram que um maior teor de cimento híbrido aumenta a resistência à compressão dos concretos ativados por álcalis (Figura 25). As resistências mecânicas máximas foram obtidas para o teor de 650 kg/m^3 , com valores de 7,3 MPa, 13,9 MPa, 28,0 MPa e 36,9 MPa alcançados aos 3, 7, 28 e 90 dias de cura, respectivamente. De acordo com o Padrão Colombiano de Resistência a Terremotos, a resistência mínima à compressão para classificar um concreto como estrutural é de 17,5 MPa. Neste sentido, os teores com 550 kg/m^3 (21,1 MPa) e 650 kg/m^3 (28,0 MPa) atendem à resistência mínima necessária para serem classificados como estruturais aos 28 dias de cura.

Figura 25. Resistência a compressão simples do concreto com cimento híbrido.

Fonte: Adaptado de Salazar *et al* (2022, p. 14).

2.4.4. Uso de cal para otimizar o cimento alternativo

A principal fonte para a produção de cal é o calcário, composto de calcita (CaCO_3) ou dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e de impurezas em quantidades variáveis, sendo as principais: sílica, argila, fosfato, gesso, óxido de ferro e alumínio, sulfetos, siderita, sulfato de ferro e matéria orgânica, entre outros. O carbonato de cálcio (CaCO_3) é geralmente encontrado em grandes quantidades nas rochas, mas pode ser substituído pelo carbonato de magnésio (MgCO_3) (COUTINHO, 2006). Quanto menor o teor de impurezas presentes nas rochas carbonáticas, melhor a qualidade da cal produzida, pois, a qualidade da cal hidratada começa com a escolha da matéria-prima com pureza adequada (CINCOTTO *et al.*, 1995).

De acordo com Batista *et al.* (2016), a composição química da cal hidratada, comumente utilizada na construção civil, é: 49,35% de CaO (óxido de cálcio), 26,45% de MgO (óxido de magnésio), 1,88% de SiO_2 (dióxido de silício), 0,26% de Al_2O_3 (óxido de alumínio), 0,22% de Fe_2O_3 (óxido de ferro), 0,06% de K_2O (óxido de potássio), 0,04% de SrO (óxido de estrôncio) e 0,01% de CuO (óxido de cobre).

A NBR 7175 (ABNT, 2003) classifica a cal hidratada em 3 tipos: CH-I, CH-II e CH-III, atendendo às exigências químicas do Quadro 7 e as exigências físicas do Quadro 8.

Quadro 7. Exigências químicas para classificação da cal hidratada.

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
anidrido carbônico (CO ₂)	na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
	no depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO+MgO)		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
óxidos totais na base de não-voláteis (CaO+MgO)		≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%

Fonte: NBR 7175 (ABNT, 2003, p. 3).

Quadro 8. Exigências físicas para classificação da cal hidratada.

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 0,075mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
retenção de água		≥ 75%	≥ 75%	≥ 70%
incorporação de areia		≥ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2
estabilidade		ausência de cavidades ou protuberâncias		
plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110

Fonte: NBR 7175 (ABNT, 2003, p. 3).

A cal mais utilizada para o tratamento do solo é a cal com alto teor de cálcio, que contém no máximo 5% de óxido ou hidróxido de magnésio. No entanto, pode-se usar também a cal dolomítica, que contém entre 35% e 46% de óxido ou hidróxido de magnésio. Com a cal dolomítica consegue-se a estabilização de um solo, embora a fração de magnésio reaja mais lentamente do que a fração de cálcio. A cal pode reagir com solos contendo apenas 7% de argila e índices de plasticidade menores que 10. Se o solo não for suficientemente reativo, ela pode ser combinada com uma fonte adicional de sílica e alumina. Tais pozolanas incluem cinzas volantes e escória de alto-forno. A sílica e alumina adicionais reagem com a cal para formar a forte matriz cimentícia que caracteriza uma camada estabilizada com cal. Misturas de cal e pozolanas podem modificar ou estabilizar quase qualquer solo, mas são comumente usadas para solos com plasticidade baixa a média (NATIONAL LIME ASSOCIATION, 2004).

Com a adição da cal aos solos argilosos, os íons de hidroxila liberados da cal elevam o pH da mistura até que a sílica e alumina sejam dissolvidos na argila, ocorrendo as reações pozolônicas e a formação da camada cimentante, aumentando a resistência do solo à compressão (ROGERS e GLENDINNING, 2000).

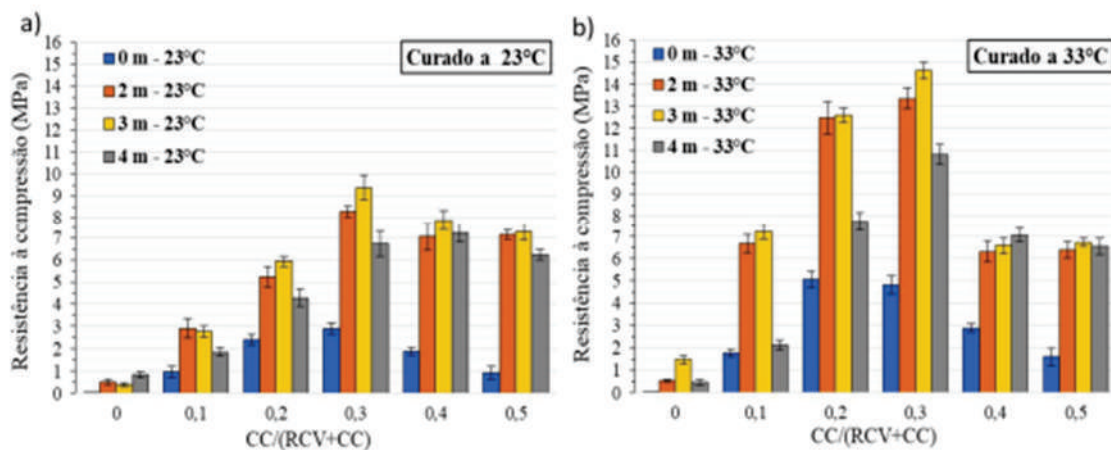
Especificamente para o caso de cimentos alternativos, produzidos por álcalis ativados, segundo Lotero *et al.* (2021), as partículas de vidro moído podem facilmente interagir com o cálcio em um ambiente alcalino hidratado devido à sua estrutura amorfa metaestável e área de superfície específica relativamente alta (quando moídas em partículas minúsculas). As ligações Si-O das partículas de vidro podem ser quebradas em níveis de pH acima de 12,4, o que pode ser alcançado através da dissociação da cal hidratada. Por causa disso, o vidro moído pode fixar a cal, produzindo produtos aglutinantes como gel de silicato de cálcio hidratado ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), semelhante aos produtos de reação formados pelo processo de hidratação do cimento Portland. Este processo químico é geralmente conhecido como reação pozolânica.

Torgal e Jalali (2009) já haviam citado que nos cimentos geopoliméricos patenteados PZ-Geopoly® e Geopolycem® contém na sua constituição 11% de CaO, o que confirma a importância da adição da cal para otimizar a obtenção de ligantes ativados alcalinamente. Pois, quando a concentração do ativador hidróxido de sódio é maior que 10M, a dissolução do Ca(OH)_2 é muito dificultada pela presença de hidróxidos (OH^-) pelo que não haverá quantidade suficiente para a formação de precipitados de silicato de cálcio hidratado (CSH gel), gerando-se antes um aluminosilicato sódico, contudo a formação deste produto, fixa hidróxidos OH^- na sua estrutura, diminuindo consequente

dissolução do hidróxido de cálcio e a sua precipitação em silicatos de cálcio hidratado, como produto de reação secundário.

Caicedo (2020) em sua tese de doutorado realizou um estudo de melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de cerâmica vermelha e cal de carbureto. Na primeira etapa do estudo, avaliou-se a obtenção de um novo cimento alcalino das misturas, em sistema binário, de dois resíduos. O primeiro correspondente aos resíduos de cerâmica vermelha (RCV) do setor da construção e demolição; e a segunda, cal carburada (CC), considerada um subproduto da indústria de produção de gás acetileno, ativado com soluções de hidróxido de sódio (A_c) em diferentes concentrações alcalinas, com baixos e altos teores de cálcio. Para baixos teores de cálcio, foram propostas misturas com relações CC/PR entre 0 e 0,15 (em peso), com incremento de 0,05, para a definição da dosagem da fase sólida da mistura entre RCV-CC. As concentrações do A_c foram ajustadas para valores de 6,0, 8,0 e 10,0 molal (moles de soluto/Lt de solvente). A relação água/cimento (A/C) foi constante em 0,45. Nessas condições de dosagem, foram obtidas pastas ativadas por álcalis cujas concentrações de álcalis (% Na_2O) variaram entre 8%, 10% e 12%, em peso total do precursor. A temperatura de cura foi estudada em duas opções: 23°C e 33°C. Os resultados demonstraram que, o melhor resultado para a compressão simples a 7 dias ($t=33^\circ C$) foi com a mistura CC/PR = 0,10, com A_c de 6,0 molal (8% de Na_2O). Para altos teores de cálcio, foram propostas misturas com relações CC/PR entre 0,10 e 0,50, com incremento de 0,10, para a definição da dosagem da fase sólida da mistura entre RCV-CC. As concentrações do A_c foram ajustadas para valores de 2, 3 e 4 molal. A relação água/cimento (A/C) foi constante em 0,43. Nessas condições de dosagem, foram obtidas pastas ativadas por álcalis cujas concentrações de álcalis (% Na_2O) variaram entre 2,5%, 4,0% e 5,5%, em peso total do precursor. A temperatura de cura foi estudada em duas opções: 23°C e 33°C. Os resultados demonstraram que, o melhor resultado para a compressão simples a 7 dias (tanto para $t=23^\circ C$ quanto para $t=33^\circ C$) foi com a mistura CC/PR = 0,30, com A_c de 3,0 molal (4% de Na_2O), tendo a temperatura de cura = 33°C o maior resultado, como demonstra a Figura 26.

Figura 26. Resultados da resistência a compressão simples para misturas com altos teores de cálcio. a) Pastas curadas a $23 \pm 2^\circ\text{C}$. b) Pastas curadas a $33 \pm 2^\circ\text{C}$.

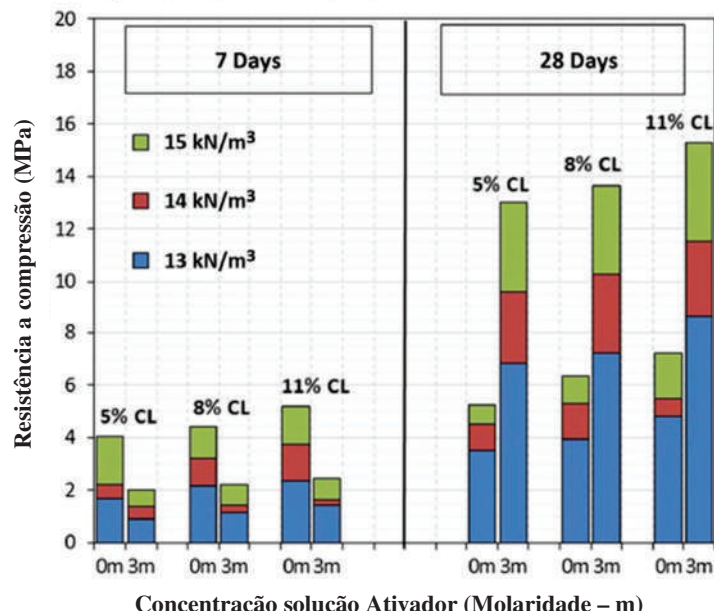


Fonte: Caicedo (2020, p. 140).

Lotero *et al.* (2021) publicou um artigo que visava avaliar o potencial do uso de um compósito de vidro reciclado (GWG), cal de carbureto (CL) e hidróxido de sódio (SHS) como um novo material de interesse para engenheiros geotécnicos e geoambientais que desejam desenvolver geosoluções sustentáveis. O vidro e a cal foram os precursores e o hidróxido de sódio o ativador. Foi realizado um plano experimental baseado em ensaios de resistência e rigidez, como forma de examinar a influência de variáveis como porosidade, teor de CL e inclusão da solução de alta alcalinidade na resposta mecânica desses novos materiais. O percentual de CL variou de 5%, 8% e 11%, moldados com 13% de teor de umidade em três camadas com solo seco de peso unitário com 13 KN/m^3 , 14 KN/m^3 e 15 KN/m^3 . A cura foi realizada em câmara úmida a 23°C a 7 e 28 dias e 95% de umidade relativa. O hidróxido de sódio, utilizado como ativador, teve uma molaridade de 3 molal (3m) e outra com água (0m). Os resultados de compressão simples (7 e 28 dias) demonstraram que, para 7 dias de cura foi possível observar que para todos os espécimes, a resistência a compressão aumenta com o aumento do peso unitário seco e quantidade de carboneto de cal. No entanto, a inserção do SHS de concentração de 3 m causa uma diminuição de cerca de 50% da resistência quando comparado com as misturas ativadas por água (0m). Mas, quando se observa os resultados com 28 dias de cura, todos os espécimes aumentaram ainda mais (quando comparados com 7 dias de cura) a resistência à compressão com o aumento do peso específico seco e do teor de CL. Sendo que, os espécimes ativados por água (0m) aumentaram a resistência entre 25% e 40% quando curados de 7 a 28 dias, e os espécimes ativados por álcali com SHS (3m) aumentaram a

resistência entre 550% e 650% quando curados de 7 a 28 dias, como se observa na Figura 27.

Figura 27. Resistência à compressão simples de compostos GWG-CL compactados com água (0m) e SHS (3m) com 7 e 28 dias de cura.



Fonte: Adaptado de Lotero *et al.* (2021, p. 5).

Acosta (2021) realizou um estudo na sua dissertação de mestrado sobre melhoria de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de vidro e cal de casca de ovo. A cal utilizada foi a hidratada e os resultados demonstraram que a maximização da resistência à compressão se deu para uma relação de 0,23 de teor da cal em relação ao precursor (EHL/PR = 0,23) e uma solução alcalina composta por uma mistura de NaOH e Na₂SiO₃ com módulo (Ms) de 1,6 e teor alcalino (%Na₂O) de 3,5.

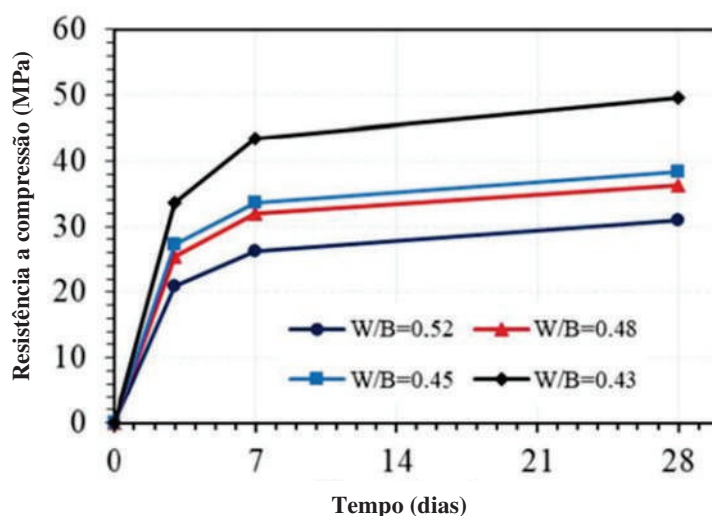
2.4.5. Efeitos da relação água/ligante em ligantes álcalis ativados

A relação água/cimento (*a/c*) em concretos utilizando cimento Portland é obtida para que haja trabalhabilidade necessária para a concretagem. E quanto maior esta relação *a/c*, maior a porosidade e conseqüentemente, menor o desempenho mecânico (HEWLETT, 1998). No caso dos cimentos alternativos ativados por álcalis o importante é garantir a quantidade de água suficiente para promover as reações químicas que levam à formação das fases ligantes (PROVIS e BERNAL, 2014).

Um estudo realizado por Bernal, Provis e Devender (2018) sobre o impacto do conteúdo de água no desempenho de concretos de escória ativados por álcalis (AAS) concluiu que o teor de água nos concretos de escória ativada por álcalis influencia fortemente a resistência mecânica e na sua permeabilidade. Ao contrário do que é esperado para os concretos convencionais à base de Portland, uma correlação direta entre o teor de água do concreto, a resistência à compressão e a porosidade não pode ser estabelecida para os concretos AAS avaliados. Demonstrando que as mudanças na concentração da solução de ativação induzidas por uma ligeira modificação na relação água/ligante dos concretos AAS, podem impactar significativamente o desempenho desses materiais, particularmente em uma idade precoce de cura.

Pham *et al.* (2023) realizaram um estudo para avaliar o efeito de superplastificantes e da relação água/ligante nas propriedades mecânicas de um concreto geopolimérico (GPC) ativado por álcalis. Foi realizada uma série de proporções mistas de GPC com diferentes quantidades de ativador alcalino cristalino sólido (AA), água (W) e superplastificante (SP), usando a razão entre elas e a quantidade total de ligante (B, cinza volante e escória granulada de alto-forno) por peso, a fim de avaliar seu efeito sobre a trabalhabilidade e resistência à compressão do GPC. Os resultados demonstraram que a relação água/ligante (W/B), em peso, tem uma influência significativa na trabalhabilidade e resistência à compressão do GPC (Figura 28). A trabalhabilidade da pasta GPC diminuiu com o aumento da relação W/B.

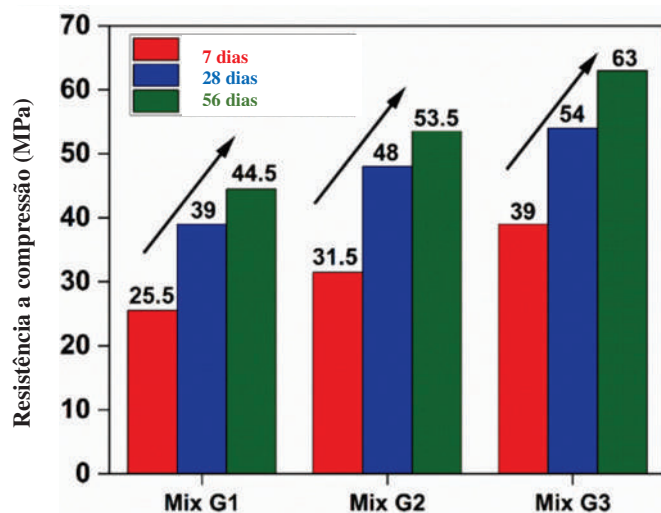
Figura 28. Influência da relação água/ligante na resistência à compressão simples.



Fonte: Adaptado de Pham *et al.* (2023, p. 13).

Yusslee e Beskhuroun (2023) também realizaram um estudo para a avaliação do efeito da razão água/aglomerante (W/B) na estrutura de poros de argamassas alcalinas ativadas. Foram realizados estudos com um mix com três precursores principais de aluminossilicato: Fly Ash Class-F conforme ASTM C618, escória de alto-forno granulada moída conforme ASTM C989 e cimento Portland comum (OPC). Um carbonato de potássio em pó (K_2CO_3 , pureza $\geq 90\%$) foi usado como único ativador alcalino, variando-se a relação água/aglomerante: W/B = 0,30 (Mix G3), W/B = 0,35 (Mix G2) e W/B = 0,40 (Mix G1). Os resultados demonstraram que o desenvolvimento da resistência à compressão de todas as argamassas aumentou com o tempo, independentemente da relação água/aglomerante (W/B), conforme Figura 29. O Mix G3, que possui a menor relação W/B = 0,30, registrou maior resistência à compressão para todos os períodos de cura a partir de 7 dias de idade de cura, sempre superando as outras duas amostras (Mix G1 e Mix G2) nas idades de cura correspondentes. Os autores concluíram que a relação W/B = 0,30 apresentou o melhor desempenho geral no estado de argamassa fresca e endurecida. Uma menor relação W/B também contribuiu para o baixo nível de porosidade da argamassa endurecida pelo controle de sua estrutura de poros.

Figura 29. Efeito da relação água/aglomerante na resistência à compressão simples.

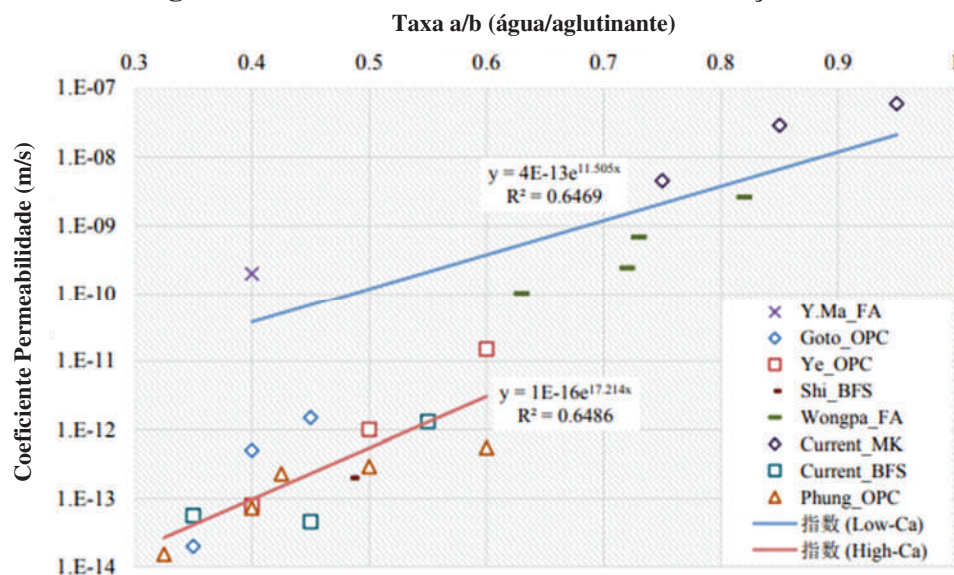


Fonte: Adaptado de Yusslee e Beskhuroun (2023, p. 6).

Nugyen *et al* (2020) apresentaram um estudo sobre a permeabilidade à água de materiais ativados por álcalis. Foram utilizados escória granulada de alto-forno (BFS) e metacaulim (MK) com diversas proporções água/aglutinante (a/b) de 0,35, 0,45, 0,55 e

0,75, 0,85, 0,95, ativados por uma solução de hidróxido de sódio e trissilicato de sódio. Os autores concluíram que: quanto maior a relação a/b, maior será a permeabilidade, estando de acordo com diversos outros estudos semelhantes já realizados anteriormente (Figura 30). Dentro de uma relação a/b semelhante, observou-se que os geopolímeros produzidos a partir de precursores com baixo teor de cálcio (por exemplo, MK e FA) apresentam uma permeabilidade maior do que os de alto teor de cálcio (por exemplo, BFS). A diferença pode ser de até 2-3 ordens de grandeza, dependendo da relação a/b. Segundo os autores, isto pode ser explicado pela estrutura mais porosa do NASH (a partir de precursores com baixo teor de Ca) em comparação com a estrutura C-(A)-SH produzida a partir de precursores com alto teor de Ca, resultando em maior porosidade e menor tortuosidade no gel NASH e maior VPV quando o BFS é substituído por FA na mistura BFS/FA ativada.

Figura 30. Resultados da permeabilidade x relação a/b.



Fonte: Adaptado de Nguyen *et al* (2020, p. 826).

2.5. Conclusões a partir da revisão bibliográfica

Após a revisão, percebe-se que os resíduos da construção civil não são adequadamente destinados no Brasil. Um dos pilares da Política Nacional de Resíduos é a redução na geração, porém, ainda temos processos construtivos com perdas elevadas de materiais, resultando ainda na enorme geração de resíduos da construção civil. Uma das alternativas estudadas é o reaproveitamento destes resíduos, principalmente com o

processo de moagem numa usina de reciclagem e aplicação principalmente na construção de bases para rodovias e artefatos pré-moldados.

Com relação à erosão de taludes fluviais, há vários fatores hidráulicos e geotécnicos que influenciam: a geometria do rio, a velocidade da água, tipo do solo, distribuição granulométrica do solo, regime de cheias (variação do nível d'água), entre outros. Há vários tipos de tratamento que podem ser aplicados e que devem ser avaliados o melhor custo/benefício de cada solução para cada caso. Uma das soluções é a aplicação de solo cimento, que possuem diversos requisitos técnicos para se obter os melhores resultados e que possui duas condições a serem atendidas: (1) Mínimo de 4,2 MPa de resistência a compressão simples com 7 dias de cura; (2) Perda de massa máximo em função do tipo de solo utilizado, conforme ensaio de durabilidade por molhagem e secagem.

No solo cimento, o principal componente que dará resistência é o cimento, no entanto, o solo utilizado também deve ser adequado granulometricamente. O uso do cimento Portland vem sendo questionado ambientalmente, devido às grandes contribuições na emissão de CO₂ no seu ciclo de vida. Alternativamente vem sendo estudado o desenvolvimento de cimentos utilizando ligantes ativados por álcalis, por serem em tese, mais viáveis ambientalmente do que o cimento Portland. Há vários tipos de precursores e ativadores que podem ser combinados e variados e que ainda não há o domínio científico de todos os fatores que influenciam nos resultados destas reações. O pó de vidro pode ser utilizado como precursor, por ser considerado um material pozolânico. Cita-se ainda que a adição de cal para otimizar os resultados dos ligantes ativados por álcalis é um dos eixos de estudos nesta área, já comprovadamente reconhecido. Os ativadores com hidróxido de sódio e uma mistura dele com silicato de sódio vem sendo utilizado em função dos bons resultados, além do seu baixo custo e fácil disponibilidade. Existe uma vasta literatura científica publicada sobre diversos estudos sobre o comportamento destes cimentos alternativos, porém, com inúmeras perguntas a serem respondidas, devido ao grande número de variáveis a serem controladas e combinações possíveis.

O uso de resíduos reciclados da construção civil como solo cimento vem sendo estudado cada vez mais e obtendo-se resultados promissores, porém, não se identificou nenhum estudo relacionado à aplicação deste material no tratamento de taludes fluviais, ainda mais com o uso de cimento alternativo (ligantes utilizando álcalis ativados) composto de pó de vidro reciclado como o principal precursor, tornando-se esta pesquisa inédita.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada na pesquisa visa atingir os quatro objetivos específicos e assim, o objetivo geral da pesquisa. Desta forma, a pesquisa foi desenvolvida em 6 fases, seguindo os procedimentos e técnicas descritas no Quadro 9, sendo que, a hipótese foi verificada na Fase 6.

Quadro 9. Resumo da metodologia utilizada na pesquisa.

Objetivo geral	Objetivos específicos	Fase	Procedimentos	Técnicas
Avaliar a utilização do compósito de resíduos da construção civil reciclados, gerados na cidade de Porto Velho/RO, com adição de cimento alternativo para o tratamento de taludes fluviais erodidos	Caracterizar os resíduos reciclados da construção civil de Porto Velho, em termos de curva granulométrica, absorção de água, massa específica e classificação do solo	1	<ul style="list-style-type: none"> • Coleta de amostras na usina de reciclagem • Realização de ensaios • Caracterização do material reciclado 	<ul style="list-style-type: none"> • Absorção de água – NBR 16.916; • Determinação de massa específica - NBR 6458 • Análise granulométrica - NBR 7181 • Determinação do limite de liquidez – NBR 6459 • Determinação do limite de plasticidade – NBR 7180 • Classificação das amostras - AASHTO (M 145)
	Verificar qual o percentual mais econômico de adição de cimento Portland para o compósito proposto que atenda aos requisitos para o tratamento de taludes fluviais	2	<ul style="list-style-type: none"> • Realização de ensaios • Determinação do teor de cimento Portland mais adequado para o compósito 	<ul style="list-style-type: none"> • Montagem dos compósitos (5 variações) • Ensaios de compactação de solo-cimento – DNIT 172/2016-ME • Moldagem dos corpos de prova – ABCP - SC-2; NBR 12.024 • Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – ABCP - SC-3

				<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio de simples compressão a 7, 14, 21 e 28 dias – ABCP – SC-4; NBR 12.025
<p>Determinar a composição ideal do cimento alternativo para o compósito proposto que atenda aos requisitos para o tratamento de taludes fluviais</p>	3	<ul style="list-style-type: none"> • Determinação da composição do cimento alternativo (precursor e ativador) • Realização de ensaios • Determinação da composição e do teor de cimento alternativo mais adequado para o compósito 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio de DRX e FRX do pó de vidro • Montagem dos compósitos (10 variações) • Moldagem dos corpos de prova – ABCP - SC-2; NBR 12.024 • Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – ABCP - SC-3 • Ensaio de simples compressão a 7, 14, 21 e 28 dias – ABCP – SC-4; NBR 12.025 	
	4	<ul style="list-style-type: none"> • Adição de cal para otimização do cimento alternativo • Uso do solo diferente • Realização de ensaios 	<ul style="list-style-type: none"> • Montagem dos compósitos (10 variações) • Moldagem dos corpos de prova – ABCP - SC-2; NBR 12.024 • Ensaio de simples compressão a 7 dias – ABCP – SC-4; NBR 12.025 	
	5	<ul style="list-style-type: none"> • Adição de cal para otimização do cimento alternativo • Realização de ensaios 	<ul style="list-style-type: none"> • Montagem dos compósitos (10 variações) • Moldagem dos corpos de prova – ABCP - SC-2; NBR 12.024 • Ensaio de simples compressão a 7 dias – ABCP – SC-4; NBR 12.025 	
	6	<ul style="list-style-type: none"> • Adição de cal para otimização do 	<ul style="list-style-type: none"> • Montagem dos compósitos (10 variações) 	

			cimento alternativo <ul style="list-style-type: none"> • Alteração da concentração do ativador e relação água/ligante • Realização de ensaios • Determinação da composição e do teor de cimento alternativo mais adequado para o compósito 	<ul style="list-style-type: none"> • Moldagem dos corpos de prova – ABCP - SC-2; NBR 12.024 • Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – ABCP - SC-3 • Ensaio de simples compressão a 7, 14, 21 e 28 dias – ABCP – SC-4; NBR 12.025
	Realizar a comparação entre os resultados dos compósitos com cimento Portland e com cimento alternativo em termos técnicos e econômicos		<ul style="list-style-type: none"> • Comparar os resultados obtidos de atendimento aos requisitos técnicos • Realizar uma avaliação econômica para comparação 	

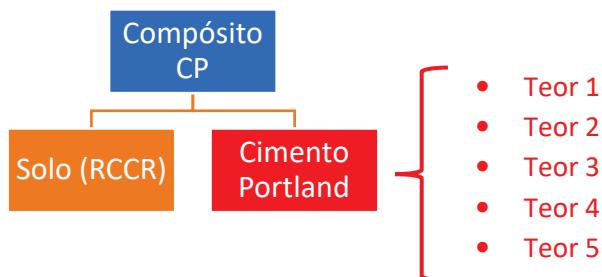
3.1. Fases da Pesquisa

A Fase 1 serviu para caracterizar os (RCCR) Resíduos da Construção Civil Reciclados da cidade de Porto Velho/RO que foram utilizados como solo para a formação dos compósitos estudados nas Fases 2 a 6 desta pesquisa, com exceção da Fase 4, que também utilizou RCCR, porém, com classificação diferente.

Na Fase 2 realizou o estudo com o cimento Portland como aglomerante do compósito para servir de base para comparação com os resultados obtidos com o cimento alternativo, variando apenas o teor de cimento em relação ao solo (RCCR), conforme demonstra a Figura 31, resultando em 5 variações diferentes estudadas. De acordo com as recomendações da Associação de Cimento Portland Americana, para o uso como tratamento em taludes fluviais, as duas características que devem ser atendidas são a resistência a compressão simples e a durabilidade e por este motivo somente estes ensaios foram realizados. Nesta fase obteve-se a melhor composição do compósito de RCCR e

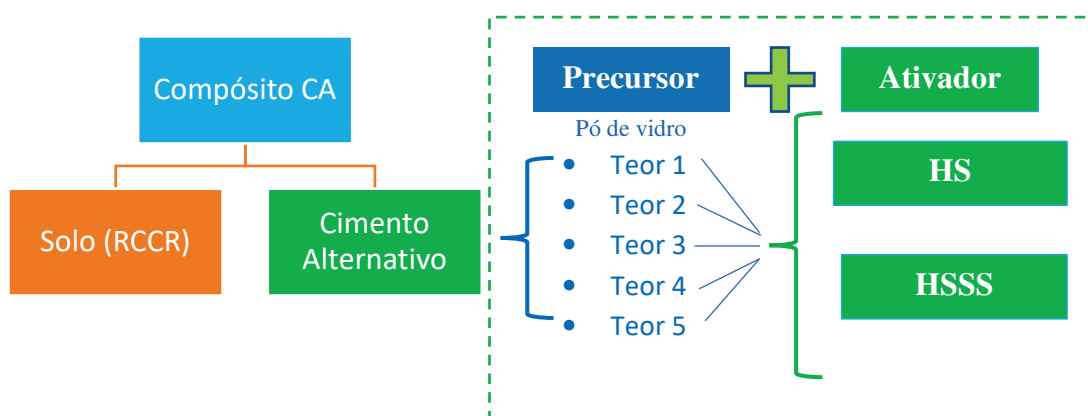
cimento Portland (denominado de Compósito CP), ou seja, o teor mais econômico que atendesse aos requisitos mínimos de resistência à compressão e durabilidade.

Figura 31. Estudo do compósito com solo cimento Portland (fase 2).



Na Fase 3 houve um estudo com o uso do RCCR como solo e o cimento alternativo (precursor + ativador). O precursor utilizado foi o pó de vidro e os ativadores utilizados foram: o hidróxido de sódio (HS) e uma mistura de hidróxido de sódio com silicato de sódio (HSSS) para a formação do compósito de RCCR e cimento alternativo (denominado de Compósito CA), como demonstra a Figura 32, resultando em 10 variações diferentes estudadas. Igualmente à Fase 2, foram realizados os ensaios para obtenção dos resultados de compressão simples e durabilidade, obtendo-se a melhor composição do Compósito CA, que neste caso, seria também o mais econômico que atendesse aos dois requisitos mínimos exigidos para o tratamento de taludes fluviais erodidos.

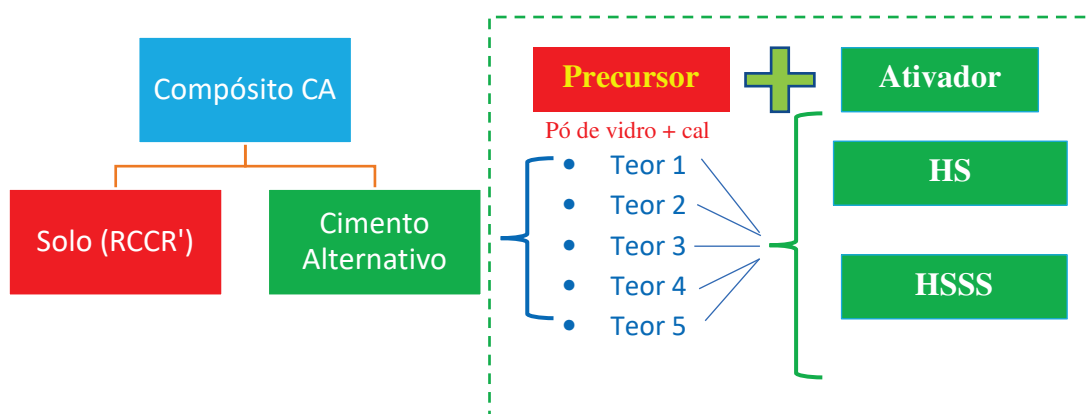
Figura 32. Estudo do compósito com solo cimento alternativo (fase 3).



Na Fase 4 houve a incorporação de cal para otimizar o cimento alternativo. Realizou-se o mesmo estudo da Fase 3, porém, acrescentando-se a cal como fonte de cálcio (mistura de pó de vidro + cal), porém, em um solo (RCCR') diferente, conforme detalha

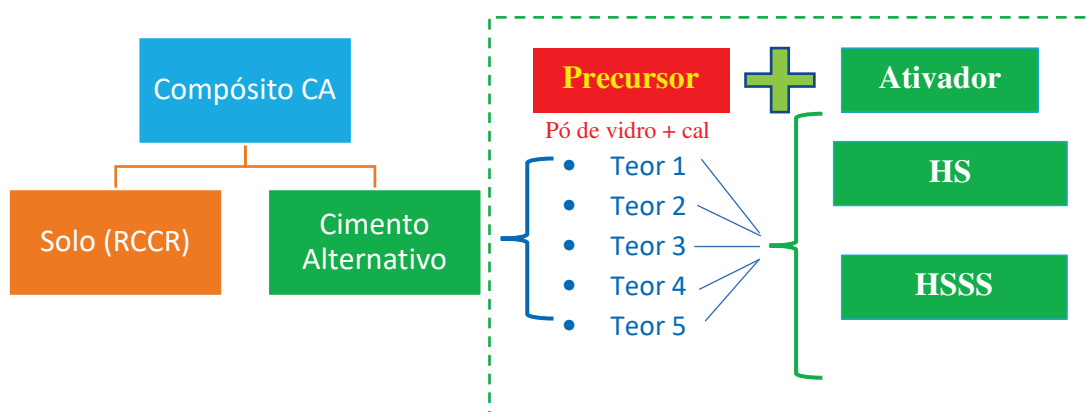
a Figura 33. O solo RCCR' foi considerado diferente em função de não ter a mesma classificação do solo inicial, em função da dinâmica da composição dos resíduos reciclados. Nesta fase houve apenas a investigação preliminar com resultados dos ensaios a compressão com 7 dias.

Figura 33. Estudo do compósito com solo cimento alternativo com cal (fase 4).



Na Fase 5 houve a incorporação de cal para otimizar o cimento alternativo. Realizou-se o mesmo estudo da Fase 3 (inclusive com a mesma classificação do solo RCCR inicial), porém, acrescentando-se a cal como precursor (mistura de pó de vidro + cal), conforme detalha a Figura 34. Nesta fase houve apenas a investigação preliminar com resultados dos ensaios a compressão com 7 dias.

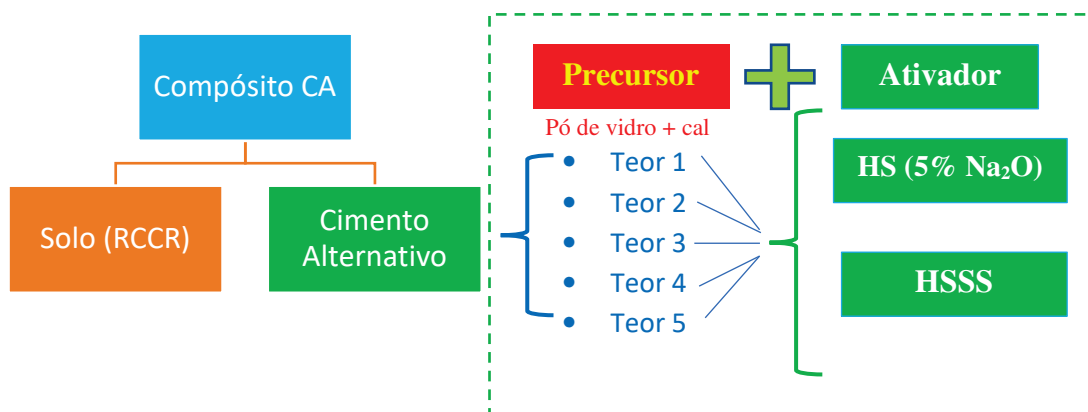
Figura 34. Estudo do compósito com solo cimento alternativo com cal (fase 5).



Na Fase 6 manteve-se a incorporação de cal para otimizar o cimento alternativo. Realizou-se o mesmo estudo da Fase 5 (inclusive com o mesmo solo RCCR das fases

iniciais), porém, alterando-se a concentração do ativador HS, conforme detalha a Figura 35. Igualmente às Fases 2 e 3, foram realizados os ensaios para obtenção dos resultados de compressão simples e durabilidade, obtendo-se a melhor composição do Compósito CA, que neste caso, seria também o mais econômico que atendesse aos dois requisitos mínimos exigidos para o tratamento de taludes fluviais erodidos.

Figura 35. Estudo do compósito com solo cimento alternativo com cal (fase 6).



Após a obtenção de todos os resultados das Fases 1 a 6, foram realizadas análises com técnicas de estatísticas descritivas, utilizando média e desvio padrão para descrever as variáveis coletadas. A verificação da relação entre as variáveis (resistência a compressão simples, relação água/cimento, tempo, tipo de compósito, perda de massa e massa seca inicial) foi feita com um modelo multivariado ajustado a distribuição normal e para checar a adequabilidade dos modelos propostos, utilizou-se a inspeção gráfica dos resíduos gerados. Todas as análises foram realizadas no software estatístico livre R 4.3.2 (R Development Core Team).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Local do estudo

4.1.1. Resíduos da Construção Civil utilizados

Porto Velho, capital do Estado de Rondônia na Amazônia Brasileira, conta com uma população estimada em 539.354 habitantes. Possui uma área de 34.096 Km² – a maior capital brasileira em área territorial (mais extensa que países como a Bélgica e Israel). A cidade surgiu nos meados do século XIX, nos primeiros movimentos para construir uma ferrovia que possibilitasse superar o trecho encachoeirado do rio Madeira (cerca de 380 Km) e dar vazão à borracha produzida na Bolívia e na região de Guajará-Mirim, Santo Antônio do Madeira, província de Mato Grosso. Foi a localidade escolhida para construção do porto onde o caucho seria transbordado para os navios, seguindo então para a Europa e os Estados Unidos da América. As dificuldades de construção e operação de um porto fluvial, em frente aos rochedos da cachoeira de Santo Antônio, fizeram com que construtores e armadores utilizassem o pequeno porto amazônico localizado 7 km abaixo, em local muito mais favorável, onde se deu início ao vilarejo. Criado por desbravadores por volta de 1907, durante a construção da Estrada de Ferro Madeira-Mamoré, tornou-se município em 1914, quando ainda pertencia ao Estado do Amazonas. Em 1943, passou à condição de capital e, juntamente com o município de Guajará-Mirim, passou a constituir o Território Federal do Guaporé, que em 1956 passou a ser denominado Rondônia, vindo a ser elevado à categoria de estado somente em 4 de janeiro de 1982 (IBGE, 2021). O município é cortado pelo Rio Madeira, que limita a oeste a área urbana da cidade.

O Rio Madeira possui uma bacia hidrográfica com área total de aproximadamente 1.420.000 Km² de drenagem e abrange 3 países: Brasil (50% de sua área), Bolívia (40%) e Peru (10%). É formado a partir do encontro dos rios Beni e Mamoré. No Brasil, a bacia hidrográfica do Rio Madeira possui 548.960 Km². Possui disponibilidade hídrica de 7.881 m³/s. Sendo assim, há várias atividades na bacia do Rio Madeira pela enorme disponibilidade hídrica, como por exemplo: navegação, mineração (garimpo de ouro), atividades agropecuárias, aproveitamentos hidroelétricos, captação de água para irrigação, abastecimento público, entre outras (ANA, 2012).

A cidade não possui uma gestão adequada dos seus resíduos gerados da construção civil, conforme descrito pelo estudo de Pimenta e Schroder (2011). No estudo, que serviu

de base para a elaboração do plano de gerenciamento de RCC - Resíduos da Construção Civil do município, os autores relataram que:

“...verificou-se que não há planejamento ou qualquer estratégia na busca de soluções para o impacto ambiental causado pela geração de resíduos na construção civil. O município não dispõe de nenhum sistema de acompanhamento sobre a geração de RCC e sequer conhece o volume de resíduos gerados. A prefeitura apenas limita-se a credenciar empresas que fazem o transporte desses resíduos. As empresas despejam a maior parte dos resíduos no lixão municipal a céu aberto ou em áreas de aterro para fins de construção de prédios ou ruas, mesmo aqueles resíduos passíveis de serem submetidos ao processo de reuso e reciclagem...” (PIMENTA E SCHRODER, 2011, p. 7).

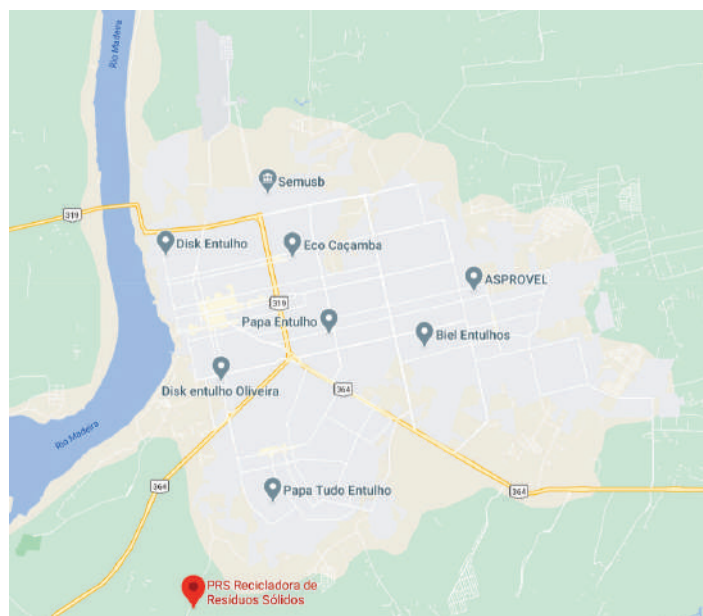
Em 2016, a Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SEMA) de Porto Velho credenciou uma empresa para o recebimento de resíduos da construção civil. Esta empresa apresentou um projeto para montagem no município de uma usina de reciclagem visando produzir agregados finos: areia e brita (PRS, 2014). Segundo o Relatório Técnico de Gestão Ambiental – 2017, emitido pela SEMA – Secretaria de Meio Ambiente (PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO VELHO, 2018a), em 2016 foram reciclados 2.709 m³ de resíduos da construção civil e 8.931 m³ em 2017, porém, neste relatório não foi apresentado a estimativa de geração total, nem a estimativa que representaria esses volumes e nem se eles foram reutilizados como matéria prima de outros processos. De acordo com dados do diagnóstico preliminar para a revisão do plano diretor, foram gerados 182 mil de toneladas de resíduos sólidos na capital de Rondônia em 2017, estimando-se que 15% deste total eram resíduos da construção civil, ou seja, aproximadamente 27 mil toneladas (PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO VELHO, 2018b). Já no Relatório de Gestão Técnico de Gestão Ambiental – 2018 (PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO VELHO, 2019), a geração total de resíduos sólidos foi de 174,9 mil de toneladas, sendo 19% de resíduos da construção civil, equivalente a 32,9 mil de toneladas.

4.1.2. Usina de reciclagem dos RCC

A usina de reciclagem de RCC escolhida é particular, de uma empresa denominada PRS Recicladora, localizada na zona sul da cidade de Porto Velho/RO, a uma distância média de 7 Km até o centro, conforme a Figura 36 (coordenadas: 8°49'29"S, 63°54'20"W). De acordo com a PRS (2014), a capacidade de produção é de aproximadamente 2.400 m³/mês, porém, atualmente recebe em média 800 m³/mês (ou

seja, apenas 1/3 da sua capacidade). O preço médio de venda da areia reciclada é de R\$ 12,00/m³ e de R\$ 17,00/m³ para a brita e pedrisco, retiradas na usina (sem o custo do transporte).

Figura 36. Localização da usina de reciclagem em Porto Velho/RO.



Fonte: Google Maps (2021).

A usina de reciclagem de Porto Velho/RO recebe os resíduos transportados, geralmente em caçambas de entulhos ou caminhões caçambas até a usina. Após inspeção visual inicial, o material recebido passa pelo alimentador vibratório, depois pelo britador, segue pela correia transportadora até a peneira vibratória, passando finalmente pelo rebritador. Os subprodutos finais são: ração, pedrisco, brita e areia reciclados (Figura 37).

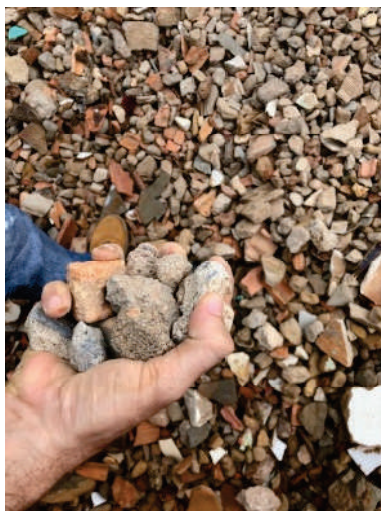
Figura 37. Usina de reciclagem em Porto Velho/RO.



(a) britador



(b) rebritador



(c) pedrisco reciclado



(d) areia reciclada

A usina possui licenciamento ambiental emitido pela Prefeitura Municipal de Porto Velho, estando apta a receber os resíduos da construção civil (exceto Classe D) gerados em obras do município e até mesmo de outros locais e emitir o certificado de recebimento e destinação adequada deles. Ela ainda produz mais dois subprodutos (Figura 38): tijolos feitos de material reciclado e vidro moído.

Figura 38. Tijolo de material reciclado e vidro moído produzidos na usina de reciclagem.



(a) tijolo reciclado



(b) pó de vidro

O vidro moído é obtido por meio de um processo de britagem. Todo o vidro recebido, oriundo de resíduos da construção civil, é separado inicialmente e depois passa por uma inspeção visual. Logo depois, é direcionado com auxílio de máquina (pá carregadeira) e lançado no britador, passa por uma peneira vibratória e segue

posteriormente para o rebitador (Figura 39). O preço médio de venda do vidro moído é de R\$ 15,00/m³.

Figura 39. Britador do vidro moído, na Usina de reciclagem em Porto Velho/RO.



4.1.3. Laboratório utilizado para os ensaios

Os ensaios foram realizados no laboratório (Figura 40) da empresa Betontech, na cidade Porto Velho/RO, empresa particular, que presta serviço de controle tecnológico de solo, concreto e asfalto, sondagens e investigação geotécnica.

Figura 40. Laboratório onde os ensaios foram realizados, em Porto Velho/RO.



Os ensaios de DRX (difratômetro de raio-X) e FRX (espectrômetro de fluorescência de raio-X) foram realizados ensaios em dois laboratórios da UFU – Universidade Federal de Uberlândia:

- LAMER – Laboratório Multiusuários em Energias Renováveis: para realização do ensaio de FRX, utilizando o equipamento marca Bruker modelo S8 Tiger;
- LAMIQ – Laboratório Multiusuários do Instituto de Química: para realização do ensaio de DRX, utilizando o equipamento marca Shimadzu, modelo XRD6000.

Para a realização das imagens microscópicas foi utilizado o aparelho Nikon SMZ25, instalado na Fiocruz Rondônia.

4.2. Fase 1: Caracterização dos resíduos reciclados da construção civil de Porto Velho

No dia 25 de novembro de 2020, foi realizada uma coleta de amostra do material reciclado proveniente de resíduos da construção civil na usina de reciclagem de Porto Velho, caracterizado como areia reciclada (passa no britador e no rebitador). De acordo com a Resolução CONAMA 307 (BRASIL, 2002), a sua classificação é de Classe A. O material fica armazenado a céu aberto na usina, após o seu processo de reciclagem.

De acordo com Richards e Hadley (2006), cerca de 34 kg de amostra do solo são suficientes para executar uma série completa de ensaios para solo cimento. Porém, a NBR 15.116 (ABNT, 2004), que normatiza os agregados reciclados para pavimentação ou concreto não estrutural, recomenda que amostra não seja inferior a 60 kg. A amostra de areia reciclada coletada na usina de reciclagem foi acondicionada em 10 sacos (Figura 41) que ao todo pesaram aproximadamente 400 kg bruto.

Figura 41. Amostra de material reciclado coletada para o estudo.



O material foi transportado e armazenado em local abrigado e seco no laboratório onde foram realizados os ensaios. Inicialmente foi realizada a preparação de uma amostra com secagem prévia, conforme determina a NBR 6457 (ABNT, 2024). Em seguida, no dia 30 de novembro de 2020, foram retiradas duas parcelas para a determinação do teor de umidade, conforme a metodologia do Anexo A da NBR 6547 (ABNT, 2024). Após permanecerem 24 horas na estufa a aproximadamente 105° C (Figura 42), realizou-se os ensaios de caracterização do material reciclado da construção civil, incluindo a sua curva granulométrica.

Em seguida iniciou-se, no dia 01 de dezembro de 2020, os ensaios para caracterização do material reciclado (areia reciclada), sendo eles:

- Absorção de água – NBR 16.916 (ABNT, 2021);
- Determinação de massa específica - NBR 6458 (ABNT, 2017);
- Determinação do limite de liquidez – NBR 6459 (ABNT, 2017);
- Determinação do limite de plasticidade – NBR 7180 (ABNT, 2016).

Figura 42. Material reciclado após 24h na estufa.



4.3. Fase 2: Compósito com cimento Portland

A composição ideal de cimento no compósito foi realizada com base na classificação do solo pela metodologia da AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials. Considerando a recomendação do Quadro 2, foram ensaiados 5 teores de cimento: o teor indicado por Richards e Hadley (2006) em função da classificação do solo (resíduo reciclado da construção civil), um teor 3% abaixo, um teor 5% abaixo, um teor 3% acima e outro teor 5% acima por peso de solo seco.

O cimento utilizado foi o Portland pozolânico CP-IV-32 (marca Itaú da Votorantim), atendendo-se a recomendação da ABCP (2002), como um dos tipos mais adequados para o uso como solo cimento. Realizou-se a homogeneização da mistura solo (RCCR – resíduo da construção civil reciclado) + cimento, como demonstra a Figura 43. O custo foi de R\$ 35,00 por saco de 50 kg, ou seja, R\$ 0,70/kg.

Figura 43. Cimento utilizado e homogeneização da mistura (solo + cimento).



(a) Cimento Portland CP-IV-32 utilizado



(b) Homogeneização da mistura (solo + cimento)

A água utilizada foi a água potável, disponível no laboratório. Uma água limpa, fresca e livre da presença de óleo, ácido, sal, álcali, matéria orgânica e outras substâncias deletérias para o endurecimento do solo cimento, conforme recomendado por Hansen e Avera Jr (1978).

O planejamento dos ensaios totalizou um programa com a moldagem de 90 corpos de prova, como demonstra o Quadro 10.

Quadro 10. Programa de ensaios realizados – quantidade de ensaios.

Ensaio	Teores de cimento					Total
	ideal - 5%	ideal - 3%	ideal	ideal + 3%	ideal + 5%	
Ensaio de compactação	1	1	1	1	1	5
Ensaio de durabilidade	1	1	1	1	1	5
Ensaio de resistência a compressão simples	16	16	16	16	16	80
Total	18	18	18	18	18	90

Os ensaios de compactação foram os primeiros a serem realizados e seguiram a metodologia do 172/2016-ME (DNIT, 2016), para determinação do ISC – Índice de Suporte Califórnia e a correspondente umidade ótima, conforme Figura 44. Os ensaios

foram iniciados em 05/04/2021. Foram moldados 1 corpo de prova para cada teor de cimento estudado, totalizando 5 unidades.

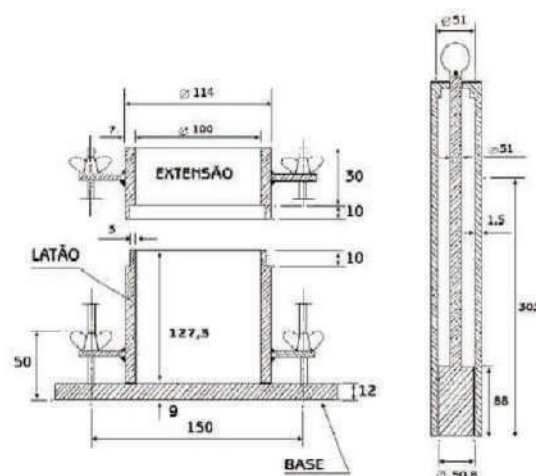
Figura 44. Ensaio de compactação realizado (fase de expansão).



Após a obtenção da umidade ótima, foram realizados os ensaios de durabilidade por molhagem e secagem, conforme a metodologia da ABCP-SC-3 (ABCP, 2004), onde determinou-se a perda de massa dos corpos de prova quando submetidos a 12 ciclos de molhagem e secagem. Foram ensaiados 5 corpos de prova, sendo 1 para cada teor de cimento estudado, moldados com a umidade ótima encontrada no ensaio de compactação para cada teor de cimento, iniciando em 19/04/2021.

Os corpos de prova foram moldados seguindo a metodologia da ABCP - SC-2 (ABCP, 2004), com diâmetro de 10,0cm, conforme a Figura 45.

Figura 45. Dimensões do molde para corpo de prova.



Fonte: ABCP (2004, p. 47).

Da mesma forma, foram moldados mais 80 corpos de prova para a realização dos ensaios de compressão simples, utilizando as respectivas umidades ótimas, sendo 4 unidades para cada teor de cimento para ensaios a 7, 14, 21 e 28 dias de cura, chegando-se aos 16 ensaios planejados para cada teor, totalizando os 80 ensaios de compressão simples desta Fase. Os primeiros corpos de prova foram moldados em 23/04/2021, como demonstra a Figura 46. O restante dos corpos de prova foi moldado em 26/04/2021.

Figura 46. Corpos de prova moldados para ensaio de compressão simples.



Para os ensaios de compressão simples (7, 14, 21 e 28 dias) foi seguida a metodologia da ABCP-SC-4 (ABCP, 2004), utilizando uma prensa eletro hidráulica digital (Figura 47), marca Solotest, com capacidade para 100 tf e certificados de calibração válidos (Anexo 1).

Figura 47. Prensa eletro hidráulica digital utilizada.



Portanto, considerando os parâmetros descritos anteriormente, cada compósito foi constituído com as quantidades de acordo com o Quadro 11.

Quadro 11. Montagem dos compósitos – Fase 2.

Compósito	Teor cimento	Solo A-1-b		Água		
		RCC Reciclado (g)	Cimento Portland (g)	total (g)	%	A/C
CP ideal-5	5%	2.850,0	150,0	367,7	12,9%	2,45
CP ideal - 3	7%	2.790,0	210,0	368,3	13,2%	1,75
CP ideal	10%	2.700,0	300,0	297,0	11,0%	0,99
CP ideal+3	13%	2.610,0	390,0	404,6	15,5%	1,04
CP ideal+5	15%	2.550,0	450,0	446,3	17,5%	0,99

Solo: A-1-b (Classificação AASHTO)

CP = Cimento Portland

A/C = relação água/cimento

4.4. Fase 3: Compósito de cimento alternativo

O vidro moído foi coletado no dia 15/06/2022 (Figura 48). Foram coletados 2 sacos com 30 kg cada um aproximadamente, totalizando 60 kg de vidro moído.

Figura 48. Vidro moído reciclado coletado na usina de reciclagem.



O material foi transportado e armazenado em local abrigado e seco no laboratório onde foram realizados os ensaios. Inicialmente foi realizada a preparação do material, deixando-o 24 horas na estufa a aproximadamente 105° C, depois fazendo uma moagem manual com pilão (Figura 49) do material e passando-o na peneira #150 (abertura 0,106 mm). Utilizou-se somente o material passante.

Figura 49. Pilão manual para moagem do vidro reciclado.



Para a caracterização do vidro reciclado foi realizado os ensaios para a construção da sua curva granulométrica AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials, realizados em 17/08/22, conforme Figura 50.

Figura 50. Caracterização granulométrica do vidro reciclado.



O pó de vidro foi caracterizado por meio de dois ensaios: DRX e FRX, realizados na UFU – Universidade Federal de Uberlândia, para a caracterização da composição mineralógica e química, respectivamente, deste material utilizado.

As amostras foram preparadas em Porto Velho: deixando o pó de vidro 24 horas na estufa a aproximadamente 105° C, depois fazendo uma moagem manual com pilão do material e passando-o na peneira #150 (abertura 0,106 mm).

Foram enviadas duas amostras com aproximadamente 100g cada.

Para o ensaio de DRX foi utilizado o equipamento marca Shimadzu, modelo XRD6000, realizando uma análise contínua scan, voltagem 40 Kv, corrente 30 mA, ângulo inicial (2 θ) de 5° e final de 70°, com velocidade de varredura de 1 passo por segundo e passo de 0,05°.

Para o ensaio de FRX foi utilizado o equipamento marca Bruker modelo S8 Tiger, com o método QuantExpress.

O precursor utilizado foi o **pó de vidro (PV)**, com suas características relatadas anteriormente no item 4.1.2. Para efeito de comparação com o estudo do cimento Portland, utilizou-se os mesmos teores indicados por Richards e Hadley (2006) em função da classificação do solo (resíduo reciclado da construção civil), o teor ideal, um teor 3% abaixo, um teor 5% abaixo, um teor 3% acima e outro teor 5% acima por peso de solo seco:

- pó de vidro (PV) com menos 5% do teor ideal e solo (RCCR);
- pó de vidro (PV) com menos 3% do teor ideal e solo (RCCR);
- pó de vidro (PV) com teor ideal e solo (RCCR);
- pó de vidro (PV) com mais 3% do teor ideal e solo (RCCR);
- pó de vidro (PV) com mais 5% do teor ideal e solo (RCCR).

Os ativadores utilizados foram:

- **Hidróxido de sódio (HS)**: soda caustica Vorel, marca Start Química, 96% a 99% pureza, em escamas, com preço: R\$ 270,00 por 50 kg;
- **Silicato de sódio (SS)**: líquido, marca QuimisulSC, Na₂O: 14,5% a 15,5%; SiO₂: 31,5% a 33%; relação Na₂O/SiO₂= 2,1 a 2,2; com preço: R\$ 906,75 para 250 kg.

Assim, conforme previsto na Figura 32, foram montadas as 10 variações descritas no Quadro 12.

Quadro 12. Variações estudadas de solo cimento alternativo.

Solo	Precursor	Ativador	Código da variação
RCCR	Pó de vidro – ideal – 5%	NaOH	PV-5HS
		NaOH + Na ₂ SO ₃	PV-5HSSS
RCCR	Pó de vidro – ideal – 3%	NaOH	PV-3HS
		NaOH + Na ₂ SO ₃	PV-3HSSS
RCCR	Pó de vidro – ideal	NaOH	PVidealHS
		NaOH + Na ₂ SO ₃	PVidealHSSS
RCCR	Pó de vidro – ideal + 3%	NaOH	PV+3HS
		NaOH + Na ₂ SO ₃	PV+3HSSS
RCCR	Pó de vidro – ideal + 5%	NaOH	PV+5HS
		NaOH + Na ₂ SO ₃	PV+5HSSS

A água utilizada foi a mesma dos ensaios com o cimento Portland, água de torneira.

O planejamento dos ensaios totalizou um programa com a moldagem de 130 corpos de prova para a Fase 3, como demonstra o Quadro 13. Os ensaios de compressão simples foram feitos com 7, 14, 21 e 28 dias, sendo que em cada data, foram ensaiados 3 corpos em cada tempo de cura para realização da média, totalizando os 12 ensaios de cada teor e 120 ensaios no total. A cura foi realizada em temperatura ambiente, simulando uma possível preparação do cimento alternativo nos locais de aplicação de taludes fluviais.

Quadro 13. Programa de ensaios realizados da Fase 3 – quantidade de ensaios (cimento alternativo).

Variações	Tipos de ensaios		
	Ensaio de durabilidade	Ensaio de resistência compressão simples	Total
PV-5HS	1	12	13
PV-5HSSS	1	12	13
PV-3HS	1	12	13
PV-3HSSS	1	12	13
PVidealHS	1	12	13
PVidealHSSS	1	12	13
PV+3HS	1	12	13
PV+3HSSS	1	12	13
PV+5HS	1	12	13
PV+5HSSS	1	12	13
Total	10	120	130

Foram realizados os ensaios de durabilidade por molhagem e secagem, conforme a metodologia da ABCP-SC-3 (ABCP, 2004), onde determinou-se a perda de massa dos

corpos de prova quando submetidos a 12 ciclos de molhagem e secagem. Foram ensaiados 10 corpos de prova, sendo 1 para cada variação do compósito com cimento alternativo estudado, moldados com a umidade ótima encontrada no ensaio de compactação do material.

Análogo ao cimento Portland, os corpos de prova foram moldados seguindo a metodologia da ABCP - SC-2 (ABCP, 2004), com diâmetro de 10,0cm.

Na sequência, foram moldados mais 120 corpos de prova para a realização dos ensaios de compressão simples, utilizando as respectivas umidades ótimas, sendo 3 unidades para cada variação nos ensaios a 7, 14, 21 e 28 dias de cura. Os primeiros corpos de prova foram moldados em 17/11/2022.

Para os ensaios de compressão simples (7, 14, 21 e 28 dias) foi seguida a metodologia da ABCP-SC-4 (ABCP, 2004). A cura foi realizada em temperatura ambiente.

4.4.1. Preparação da solução com Hidróxido de Sódio

Adotou-se uma razão molar de 12M para o hidróxido de sódio (HS), considerando os resultados dos estudos de Alonso e Palomo (2001), Granizo *et al* (2002), Patel e Shah (2018b) e Rangel (2022). Desta forma, considerando a massa molar do HS= 40 g/mol, para cada 100 ml de água adicionou-se 48,0g de HS (Figura 51), totalizando uma solução solubilizada com 125,9g em massa.

Figura 51. Preparo da solução de HS.



Os materiais (HS e água) foram medidos previamente e em seguida misturados para a obtenção da solução de hidróxido de sódio. Todos os cuidados de segurança recomendados na FISPQ – Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico para o seu manuseio foram seguidos.

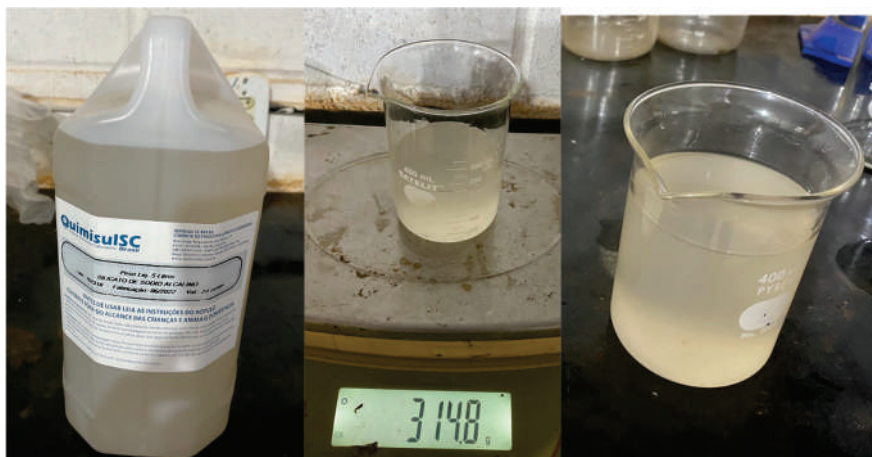
Após a mistura e homogeneização da solução, ela permaneceu por 24 horas em repouso, em temperatura ambiente, para garantir que todas as reações exotérmicas entre hidróxido e água tenha ocorrido antes do contato com o precursor.

4.4.2. Preparação da solução com a mistura de Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio

Para a mistura de hidróxido de sódio e silicato de sódio (HSSS) considerou-se a recomendação de Dolezal *et al* (2006) que a proporção de silicato de sódio/solução de hidróxido de sódio (em massa) deve ser ajustado para um valor aproximado de 2,5. Tal proporção também foi utilizada no estudo de Xiao *et al* (2020) e Patel e Shah (2018b).

Primeiro fez-se a mistura da solução de hidróxido de sódio (conforme item 4.4.1) e posteriormente **adicionou-se o silicato de sódio (1:2,5 em massa)**, obtendo-se a mistura HSSS, que permaneceu por mais 24 horas em repouso, em temperatura ambiente, similarmente à preparação da solução de HS. Ou seja, para cada 125,9g de solução de hidróxido de sódio adicionou-se 314,8g de silicato de sódio (Figura 52).

Figura 52. Preparo da solução de HSSS.



Os mesmos cuidados com segurança no manuseio foram adotados, seguindo as recomendações das respectivas FISPQ's (Fichas de Informação de Segurança de Produto Químico) dos produtos.

4.4.3. Preparação do cimento alternativo

O cimento alternativo foi preparado com duas composições diferentes:

- PV-HS - Pó de vidro (precursor) + solução hidróxido de sódio (ativador);
- PV-HSSS - Pó de vidro (precursor) + solução hidróxido de sódio e silicato de sódio (ativador).

O pó de vidro, conforme já relatado anteriormente, foi moído e peneirado (#150).

Após a preparação das duas soluções (itens 4.4.1e 4.4.2), preparou-se o cimento alternativo na seguinte proporção: **Ativador/Precursor = 0,45 (em massa)**, com base no estudo de Patel e Shah (2018a), ou seja: para cada 150,0g de pó de vidro acrescentou-se 67,5g de ativador (qualquer um deles), conforme Figura 53.

Figura 53. Preparo do cimento alternativo (pó de vidro + ativadores).



Em seguida foram moldados os corpos de prova, de acordo com a metodologia da ABCP - SC-2 (ABCP, 2004), com os teores de cimento estabelecidos no Quadro 12, como demonstra a Figura 54, duas das variações (PV-5HS e PV-5HSSS).

Figura 54. Moldagem dos corpos de prova.



4.4.4. Parâmetros de cada compósito (Fase 3)

Considerando todos os parâmetros descritos anteriormente, cada compósito foi constituído com as quantidades de acordo com o Quadro 14.

Quadro 14. Montagem dos corpos de prova – Fase 3.

Compósito	Teor ligante	Solo 1-a-b	Precursor	Ativadores		Água		
		RCC Reciclado (g)	Pó Vidro (g)	HS (g)	HSSS (g)	total (g)	%	W/L
PV-5HS	5%	4.132,5	150,0	67,5		533,1	12,9%	2,45
PV-5HSSS	5%	4.132,5	150,0		67,5	533,1	12,9%	2,45
PV-3HS	7%	4.045,5	210,0	94,5		534,0	13,2%	1,75
PV-3HSSS	7%	4.045,5	210,0		94,5	534,0	13,2%	1,75
PVidealHS	10%	3.915,0	300,0	135,0		430,7	11,0%	0,99
PVidealHSSS	10%	3.915,0	300,0		135,0	430,7	11,0%	0,99
PV+3HS	13%	3.784,5	390,0	175,5		586,6	15,5%	1,04
PV+3HSSS	13%	3.784,5	390,0		175,5	586,6	15,5%	1,04
PV+5HS	15%	3.697,5	450,0	202,5		647,1	17,5%	0,99
PV+5HSSS	15%	3.697,5	450,0		202,5	647,1	17,5%	0,99

Solo: A-1-b (Classificação AASHTO)

HS = Hidróxido de sódio (NaOH – 12M)

HSSS = Hidróxido de sódio + silicato de sódio (1:2,5)

W/L = relação água/ligante

Ligante (cimento alternativo) = Precursor + Ativador

Ativador/Precursor = 0,45

Precursor = pó de vidro (passante #150)

Água total = massa ativador (solução líquida) + massa água para moldagem

4.5. Fase 4: Compósito de cimento alternativo com adição de cal com resíduos da construção civil reciclado diferente

Nesta 4ª Fase adicionou-se uma cal hidratada ao cimento alternativo, funcionando como precursor (pó de vidro + cal hidratada) na tentativa de otimizar os resultados. Para isso, considerando que o melhor resultado de resistência a compressão simples de alguns estudos (ACOSTA, 2021; CAICEDO, 2021 e LOTERO *et al*, 2021) foi obtido com **relação cal/precursor de 0,3 (em massa)** do estudo de Caicedo (2021), adotou-se este parâmetro e utilizou-se a cal hidratada da marca Usical (CH-III), saco de 20 kg (Figura 55) com valor de R\$ 11,74.

Figura 55. Cal hidratada utilizada.



Assim, para cada 100g de precursor utilizado, 70g era de pó de vidro e 30g era da cal hidratada, estabelecendo uma relação: Pó de vidro/Precursor = 0,70 ou cal/precursor = 0,30. A Figura 56 demonstra esta mistura: 450g de pó de vidro + 192g de cal hidratada = 642g de precursor:

- $450\text{g} / 642\text{g} = 0,70$;
- $192\text{g} / 642\text{g} = 0,30$.

Figura 56. Preparo do precursor do cimento alternativo (pó de vidro + cal hidratada).



Com o objetivo de otimizar os resultados e observando diversos estudos anteriores em que o pó de vidro utilizado como precursor deve ser o mais fino possível, a partir desta Fase utilizou-se somente o passante na peneira #200, ao invés da peneira #150, tornando-o mais fino. Outra mudança foi no teor de pó de vidro adicionado ao compósito, passando a partir desta Fase a calcular o teor de cimento do compósito correspondente ao teor de pó de vidro. Assim, a massa de cimento alternativo utilizado no compósito será maior em relação à Fase anterior, que considerava a massa total do cimento alternativo (ativador + precursor) como definidor do teor.

Desta forma, os corpos de prova foram preparados mantendo-se os parâmetros da Fase 3, com as seguintes alterações:

- o pó de vidro utilizado foi o passante na peneira #200 (0,075 mm);
- no preparo do precursor, que agora passou a ser uma mistura de pó de vidro + cal hidratada (PVCH), na proporção citada anteriormente de 0,3 para a relação cal/precursor (em massa);
- Os teores estudados (% ideal, ideal – 3%, ideal + 3%, ideal – 5% e ideal + 5%) foram estabelecidos com relação somente à massa do pó de vidro.

Nesta Fase 4, houve uma variação do resíduo da construção civil reciclado utilizado como solo no compósito. Fato este devido à falta de material disponível na empresa de reciclagem neste momento da pesquisa, que ficou sem operar o britador por mais de 6 meses por alguns motivos: chuvas intensas, falta de matéria prima e quebra de algumas peças do britador.

Assim, o material coletado para servir como solo não era o mesmo utilizado nas primeiras fases da pesquisa. Mesmo assim, fez-se a coleta do material, caracterizou-o granulometricamente e realizou-se apenas a moldagem de um corpo de prova para cada teor e variação do ativador, para serem rompidos a 7 dias de cura, curados em temperatura ambiente, para a obtenção das respectivas resistências a compressão. Assim, foram moldados 10 compósitos, conforme o Quadro 15.

Quadro 15. Planejamento dos ensaios – Fase 4.

Compósito	Teor	Resistência a compressão simples (7 dias)
PVCH-5HS	5%	01
PVCH-5HSSS	5%	01

PVCH-3HS	7%	01
PVCH-3HSSS	7%	01
PVCHidealHS	10%	01
PVCHidealHSSS	10%	01
PVCH+3HS	13%	01
PVCH+3HSSS	13%	01
PVCH+5HS	15%	01
PVCH+5HSSS	15%	01
Total		10

A água utilizada foi a mesma dos ensaios das fases anteriores, água de torneira.

Para os ensaios de compressão simples (7 dias) foi seguida a metodologia da ABCP-SC-4 (ABCP, 2004). A cura foi realizada em temperatura ambiente.

Considerando todos os parâmetros descritos anteriormente desta Fase, cada compósito foi constituído com as quantidades de acordo com o Quadro 16.

Quadro 16. Montagem dos corpos de prova – Fase 4.

Compósito	Teor (pó vidro)	Solo – A-2-4	Precursores		Ativadores		Água		
		RCC Reciclado (g)	Pó Vidro (g)	Cal hidratada (g)	HS (g)	HSSS (g)	total (g)	%	W/L
PVCH-5HS	5%	2.850,0	150,0	64,3	96,4		367,7	12,9%	1,18
PVCH-5HSSS	5%	2.850,0	150,0	64,3		96,4	367,7	12,9%	1,18
PVCH-3HS	7%	2.790,0	210,0	90,0	135,0		368,3	13,2%	0,85
PVCH-3HSSS	7%	2.790,0	210,0	90,0		135,0	368,3	13,2%	0,85
PVCHidealHS	10%	2.700,0	300,0	128,6	192,9		297,0	11,0%	0,48
PVCHidealHSSS	10%	2.700,0	300,0	128,6		192,9	297,0	11,0%	0,48
PVCH+3HS	13%	2.610,0	390,0	167,1	250,7		404,6	15,5%	0,50
PVCH+3HSSS	13%	2.610,0	390,0	167,1		250,7	404,6	15,5%	0,50
PVCH+5HS	15%	2.550,0	450,0	192,9	289,3		446,3	17,5%	0,48
PVCH+5HSSS	15%	2.550,0	450,0	192,9		289,3	446,3	17,5%	0,48

Solo: A-2-4 (Classificação AASHTO)

PVCH = Pó de vidro (passante #200) + cal hidratada

HS = Hidróxido de sódio (NaOH – 12M)

HSSS = Hidróxido de sódio + silicato de sódio (1:2,5)

W/L = relação água/ligante

Ligante (cimento alternativo) = Precursor + Ativador

Ativador/Precursor = 0,45

Cal hidratada / Precursor = 0,30

Água total = massa ativador (solução líquida) + massa água para moldagem

4.6. Fase 5: Compósito de cimento alternativo com adição de cal com resíduos da construção civil reciclado semelhante à Fase 3

Mantendo-se as premissas da Fase 4, em relação ao cimento alternativo, realizou-se na Fase 5 as variações as mesmas variações estudadas na Fase 3, com a adição de cal hidratada, porém, com o resíduo da construção civil reciclado, utilizado como solo, semelhante ao utilizado nas Fases 1 e 2 da pesquisa, visto que, a empresa de reciclagem voltou a operar e havia material disponível semelhante ao inicial para a continuidade da pesquisa.

Assim, conforme previsto na Figura 33, foram montadas as 10 variações descritas no Quadro 17.

Quadro 17. Variações estudadas de solo cimento alternativo.

Solo	Precursor	Ativador	Código da variação
RCCR	Pó de vidro – ideal – 5% + cal	NaOH	PVCH-5HS
		NaOH + Na ₂ SO ₃	PVCH-5HSSS
RCCR	Pó de vidro – ideal – 3% + cal	NaOH	PVCH-3HS
		NaOH + Na ₂ SO ₃	PVCH-3HSSS
RCCR	Pó de vidro – ideal + cal	NaOH	PVCHidealHS
		NaOH + Na ₂ SO ₃	PVCHidealHSSS
RCCR	Pó de vidro – ideal + 3% + cal	NaOH	PVCH+3HS
		NaOH + Na ₂ SO ₃	PVCH+3HSSS
RCCR	Pó de vidro – ideal + 5% + cal	NaOH	PVCH+5HS
		NaOH + Na ₂ SO ₃	PVCH+5HSSS

A água utilizada foi a mesma dos ensaios das fases anteriores, água de torneira.

O planejamento dos ensaios totalizou um programa com a moldagem de 130 corpos de prova para a Fase 4, como demonstra o Quadro 18. Os ensaios de compressão simples foram feitos com 7 dias. A cura foi realizada em temperatura ambiente, simulando uma possível preparação do cimento alternativo nos locais de aplicação de taludes fluviais.

Quadro 18. Programa de ensaios realizados da Fase 4 – quantidade de ensaios (cimento alternativo com adição de cal).

Variações	Ensaio de resistência compressão simples	Total
PVCH-5HS	01	01
PVCH-5HSSS	01	01
PVCH-3HS	01	01
PVCH-3HSSS	01	01
PVCHidealHS	01	01

PVCHidealHSSS	01	01
PVCH+3HS	01	01
PVCH+3HSSS	01	01
PVCH+5HS	01	01
PVCH+5HSSS	01	01
Total	10	10

Análogo ao cimento Portland, os corpos de prova foram moldados seguindo a metodologia da ABCP - SC-2 (ABCP, 2004), com diâmetro de 10,0cm.

Para os ensaios de compressão simples (7 dias) foi seguida a metodologia da ABCP-SC-4 (ABCP, 2004). A cura foi realizada em temperatura ambiente.

Considerando as características citadas anteriormente, cada compósito foi constituído com as quantidades de acordo com o Quadro 19.

Quadro 19. Montagem dos corpos de prova – Fase 5.

Compósito	Teor (pó vidro)	Solo – A-1-b	Precursores		Ativadores		Água		
		RCC Reciclado (g)	Pó Vidro (g)	Cal hidratada (g)	HS (g)	HSSS (g)	total (g)	%	W/L
PVCH-5HS	5%	2.850,0	150,0	64,3	96,4		367,7	12,9%	1,18
PVCH-5HSSS	5%	2.850,0	150,0	64,3		96,4	367,7	12,9%	1,18
PVCH-3HS	7%	2.790,0	210,0	90,0	135,0		368,3	13,2%	0,85
PVCH-3HSSS	7%	2.790,0	210,0	90,0		135,0	368,3	13,2%	0,85
PVCHidealHS	10%	2.700,0	300,0	128,6	192,9		297,0	11,0%	0,48
PVCHidealHSSS	10%	2.700,0	300,0	128,6		192,9	297,0	11,0%	0,48
PVCH+3HS	13%	2.610,0	390,0	167,1	250,7		404,6	15,5%	0,50
PVCH+3HSSS	13%	2.610,0	390,0	167,1		250,7	404,6	15,5%	0,50
PVCH+5HS	15%	2.550,0	450,0	192,9	289,3		446,3	17,5%	0,48
PVCH+5HSSS	15%	2.550,0	450,0	192,9		289,3	446,3	17,5%	0,48

Solo: A-1-b (Classificação AASHTO)

PVCH = Pó de vidro (passante #200) + cal hidratada

HS = Hidróxido de sódio (NaOH – 12M)

HSSS = Hidróxido de sódio + silicato de sódio (1:2,5)

W/L = relação água/ligante

Ligante (cimento alternativo) = Precursor + Ativador

Ativador/Precursor = 0,45

Cal hidratada / Precursor = 0,30

Água total = massa ativador (solução líquida) + massa água para moldagem

Nesta Fase, foi realizada uma quantificação dos poros das amostras, semelhante ao estudo realizado por Siddika *et al* (2023). O objetivo era demonstrar a diferença da porosidade entre a variação dos compósitos estudados. Foi retirada uma amostra transversal ao corpo de prova, aos 7 dias de cura, e realizada uma imagem com auxílio

do microscópio Nikon SMZ25. Em seguida, foi utilizado o software ImageJ para quantificar o tamanho dos poros. Os resultados foram analisados no software StatsCharts.com e gerados os histogramas.

4.7. Fase 6: Compósito de cimento alternativo com adição de cal com resíduos da construção civil reciclado semelhante à Fase 3, com alteração na concentração do HS e fixação da relação água/ligante

Mantendo-se as premissas da Fase 5, em relação ao cimento alternativo, realizou-se na Fase 6 duas mudanças principais:

- Alterou-se a concentração do hidróxido de sódio (HS);
- Fixou-se a relação água/ligante.

O planejamento dos ensaios totalizou um programa com a moldagem de 130 corpos de prova para a Fase 6, como demonstra o Quadro 20. Os ensaios de compressão simples foram feitos com 7, 14, 21 e 28 dias, sendo que em cada data, foram ensaiados 3 corpos para realização da média. A cura foi realizada em temperatura ambiente, simulando uma possível preparação do cimento alternativo nos locais de aplicação de taludes fluviais.

Quadro 20. Programa de ensaios realizados da Fase 6 – quantidade de ensaios (cimento alternativo).

Variações	Tipos de ensaios		
	Ensaio de durabilidade	Ensaio de resistência compressão simples	Total
PV-5HS	1	12	13
PV-5HSSS	1	12	13
PV-3HS	1	12	13
PV-3HSSS	1	12	13
PVidealHS	1	12	13
PVidealHSSS	1	12	13
PV+3HS	1	12	13
PV+3HSSS	1	12	13
PV+5HS	1	12	13
PV+5HSSS	1	12	13
Total	10	120	130

Foram realizados os ensaios de durabilidade por molhagem e secagem, conforme a metodologia da ABCP-SC-3 (ABCP, 2004), onde determinou-se a perda de massa dos corpos de prova quando submetidos a 12 ciclos de molhagem e secagem. Foram ensaiados 10 corpos de prova, sendo 1 para cada variação do compósito com cimento alternativo estudado, moldados com a umidade ótima encontrada no ensaio de compactação do material.

Análogo ao cimento Portland, os corpos de prova foram moldados seguindo a metodologia da ABCP - SC-2 (ABCP, 2004), com diâmetro de 10,0cm.

Na sequência, foram moldados mais 120 corpos de prova para a realização dos ensaios de compressão simples, utilizando as respectivas umidades ótimas, sendo 3 unidades para cada variação nos ensaios a 7, 14, 21 e 28 dias de cura. Os primeiros corpos de prova foram moldados em 07/10/2023.

Para os ensaios de compressão simples (7, 14, 21 e 28 dias) foi seguida a metodologia da ABCP-SC-4 (ABCP, 2004). A cura foi realizada em temperatura ambiente.

Análogo ao realizado na Fase anterior, utilizando o mesmo método, nesta Fase também se realizou a quantificação dos poros das amostras para demonstrar a diferença da porosidade entre a variação dos compósitos estudados.

4.7.1. Preparação da solução com Hidróxido de Sódio

Adotou-se um percentual de 5% de Na₂O (óxido de sódio) ou 3,75M de NaOH, ao invés da concentração de 12M que vinha sendo utilizada. Desta forma, para cada 100g de precursor (30g de cal hidratada + 70g de pó de vidro), deve-se ter 5g de Na₂O, que corresponde a 77,5% NaOH. Para 100% de NaOH, chega-se a uma massa de 6,15g de NaOH (hidróxido de sódio) para cada 100g de precursor.

Com esta alteração, a relação ativador/precursor deixou de ser 0,45, como utilizado nas fases anteriores e passou a ser igual a: **ativador/precursor = 0,0615.**

4.7.2. Fixação da relação água/ligante (W/L)

Considerando os estudos de Bernal, Provis e Devender (2018), Pham *et al.* (2023) e Yusslee e Beskhuroun (2023), **fixou-se a relação água/ligante - W/L = 0,40.**

Nas fases anteriores, utilizava-se a quantidade de água total conforme a umidade ótima obtida, sendo que, a massa total de água era correspondente à massa do ativador (solução líquida) somada à massa de água utilizada para a moldagem dos corpos de prova.

4.7.3. Parâmetros de cada compósito (Fase 6)

Com as alterações realizadas descritas anteriormente para esta Fase, cada compósito foi constituído com as quantidades de acordo com o Quadro 21.

Quadro 21. Montagem dos corpos de prova – Fase 6.

Compósito	Teor (pó vidro)	Solo A-1-b	Precusores		Ativadores		Água	
		RCC Reciclado (g)	Pó Vidro (g)	Cal hidratada (g)	HS (g)	HSSS (g)	total (g)	Relação W/L
PVCH-5HS	5%	3.150,0	165,8	71,1	14,6		100,6	0,40
PVCH-5HSSS	5%	3.150,0	165,8	71,1		14,6	100,6	0,40
PVCH-3HS	7%	3.100,0	233,3	100,0	20,5		141,5	0,40
PVCH-3HSSS	7%	3.100,0	233,3	100,0		20,5	141,5	0,40
PVCHidealHS	10%	3.000,0	333,3	142,9	29,3		202,2	0,40
PVCHidealHSSS	10%	3.000,0	333,3	142,9		29,3	202,2	0,40
PVCH+3HS	13%	2.900,0	433,3	185,7	38,1		262,8	0,40
PVCH+3HSSS	13%	2.900,0	433,3	185,7		38,1	262,8	0,40
PVCH+5HS	15%	2.800,0	494,1	211,8	43,4		299,7	0,40
PVCH+5HSSS	15%	2.800,0	494,1	211,8		43,4	299,7	0,40

Solo: A-1-b (Classificação AASHTO)

PVCH = Pó de vidro (passante #200) + cal hidratada

HS = Hidróxido de sódio (5% Na₂O ou 3,75M)

HSSS = Hidróxido de sódio + silicato de sódio (1:2,5)

Relação Ativador/Precursor = 0,0615

W/L = relação água/ligante = 0,40

Ligante (cimento alternativo) = Precursor + Ativador

Cal hidratada / Precursor = 0,30

Água total = massa ativador (solução líquida) + massa água para moldagem

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Fase 1: Caracterização dos resíduos reciclados da construção civil

5.1.1. Granulometria

Na amostra inicial, o resultado do teor de umidade foi: recipiente 1 = 1,7% e recipiente 2 = 2,6%; com média = 2,2%. Resultado dentro da faixa de 0,5% a 8% descrita por Hansen e Avera Jr. (1978).

A Figura 57 apresenta o resultado do material retido nas peneiras após a lavagem. O material possui: 37,1% de pedregulho, 33,0% de areia grossa, 16,9% de areia fina e 13,0% de silte + argila. Não foi possível calcular o limite de liquidez e nem de plasticidade, caracterizando-o como não plástico e sem liquidez. Este resultado se aproxima das características do material reciclado da construção civil avaliado por Segantini e Wada (2011). E ainda, é favorável para a aplicação em recursos hídricos, conforme descrito por Richards e Hadley (2006): quanto mais baixo o IP – Índice de Plasticidade, menos sensível é o solo às variações no conteúdo de água.

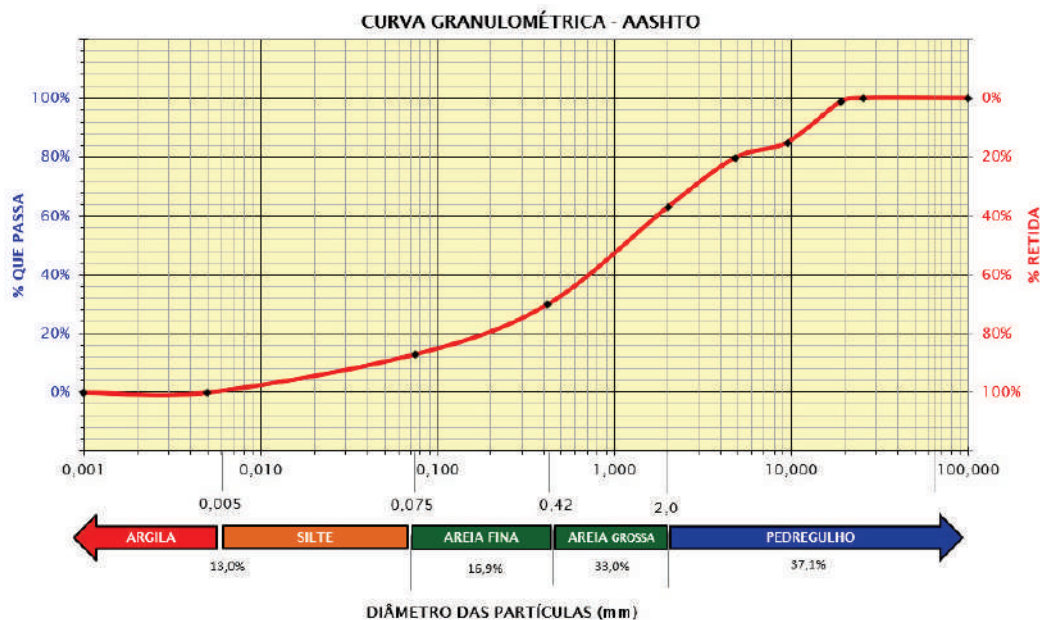
A curva granulométrica AASHTO está representada na Figura 58. Importante lembrar que, a PCA (1969) recomenda que o solo utilizado como matéria prima deve conter no mínimo 20% de pedregulhos para a utilização em recursos hídricos. Assim, como o resultado obtido foi de 37,1% de pedregulhos, o resíduo reciclado atende à esta recomendação.

Figura 57. Material retido após a lavagem.



Com base nos resultados obtidos, pode-se caracterizar o material reciclado, conforme a metodologia AASHTO (M 145), como: **A-1-b**, pois, 29,9% do material reciclado analisado passou na peneira #40 (0,42mm) e 13,0% passou na peneira #200 (0,075mm) e $IP=0$. De acordo com esta classificação, o solo tipo A-1-b: passa no máximo 50% na peneira #40 e no máximo 25% na peneira #200m e $IP < 6$. Caracteriza-se por fragmentos de pedra, pedregulhos e areia, com Índice de Grupo - $IG = 0$ e classificado de excelente a bom para o uso como subleito na pavimentação. Já no sistema unificado de classificação de solo (Unified Soil Classification System - SUCS), o material reciclado foi classificado como: areia siltosa com pedregulhos (SM com $> 15\%$ de pedregulho).

Figura 58. Curva granulométrica AASHTO da areia reciclada da construção civil de Porto Velho.



Richards e Hadley (2006) descreveu algumas características para um solo poder ser utilizado como solo cimento. Conforme os resultados obtidos, o material reciclado analisado atendeu à estas características, como demonstra o Quadro 22, sem a necessidade de nenhuma correção granulométrica.

Quadro 22. Comparação das características e os resultados obtidos para uso do solo como solo cimento.

Características (Richards e Hadley, 2006)	Resultado	Atende
Solo contenha nenhum material retido em uma peneira 2" (50 mm)	Material retido peneira 2" = 0	Sim
Pelo menos 55% do material passa pela peneira nº 4 (4,75 mm)	Material passado na peneira nº 4 = 79,6%	Sim
Entre 5% e 35% passem na peneira nº 200 (0,075 mm)	Material passado na peneira nº 200 (0,075 mm) = 13,0%	Sim
Índice de plasticidade (IP) não deve ser maior que 8	Índice de plasticidade (IP) = 0 - não plástico	Sim

As recomendações do antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1971) para o uso de solo cimento para o tratamento de taludes de estradas, também foram atendidas, apesar da aplicação do estudo ser para taludes fluviais:

- O solo não deveria ter material retido na peneira 1": não houve material retido na peneira 1";
- No máximo 30% de material retido na peneira de 4,8mm: passaram 79,6%, ficando retidos 20,4% na peneira 4".

5.1.2. Absorção de água

Os ensaios de absorção de água, realizado seguindo a NBR 16.916 (ABNT, 2021), com três amostras do material reciclado, resultaram na média = 5,1%. Observou-se que essa média foi baixa, explicada pelo fato do material (classificado como A-1-b) ser uma areia siltosa com pedregulhos e assim, possuir características de baixa retenção de água, baixa coesão entre partículas, baixa capacidade de troca catiônica e menor porosidade total.

Os resultados ficaram bem abaixo dos obtidos por Silveira (2005), cuja absorção de água dos resíduos da construção civil reciclados foi de 15,86%. No estudo de Lopes (2017), o resultado obtido foi de 11,96% para os resíduos da construção civil reciclados.

5.1.3. Massa específica

A massa específica obtida foi seguindo a metodologia da NBR 6458 (ABNT, 2017) - método picnômetro, com o resultado médio = 2,69 g/cm³.

A massa específica = 2,69 g/cm³ obtida foi próximo do resultado encontrado no estudo de Lopes (2017, p. 69) de 2,56 g/cm³ para agregado miúdo de resíduos reciclados da construção civil e de 2,55 g/cm³ para agregado graúdo, que avaliou a aplicação de resíduos da construção civil reciclados para a fabricação de blocos de concreto. E praticamente igual ao resultado obtido no estudo de Silveira (2005, p. 61) de 2,71 g/cm³ que avaliou o uso de resíduos da construção civil reciclados para o compósito de solo cimento.

5.1.4. Discussão dos resultados da Fase 1

O solo possui uma massa específica média de 2,69 g/cm³, semelhante aos estudos de Lopes (2017) e Silveira (2005). E uma baixa absorção de água (5,1%) em comparação com os resultados destes mesmos estudos.

Considerando a **classificação do solo como A-1-b, segundo a AASHTO**; a recomendação do teor de cimento, de acordo com Richards e Hadley (2006); e as recomendações de Nussbaum e Colley (1971), conforme resumo do Quadro 23, o teor de cimento ideal adotado foi de 10% de cimento por peso de solo. Este teor já considera 2% a mais do recomendado para o uso em pavimentação, atendendo as recomendações dos autores (RICHARDS e HADLEY, 2006; NUSSBAUM e COLLEY, 1971), e como não houve mais do que 50% de partículas finas (material apresentou apenas 13,0% de silte + argila), não houve necessidade de aumentar para 4% a mais, conforme a recomendação de Nussbaum e Colley (1971).

Quadro 23. Recomendações para definição do teor de cimento.

Referências	Recomendações
Richards e Hadley (2006)	Solo A-1-b – faixa de 7% a 10% de teor de cimento por peso de solo, já considerando 2% a mais pelo uso em taludes fluviais.
Nussbaum e Colley (1971)	<ul style="list-style-type: none"> Solo cimento utilizado para revestir regiões acima de 1,5m do nível mínimo d'água deve conter 2% a mais Caso o solo possua mais do que 50% de partículas finas, aumento de 4% a mais
Teor de cimento adotado, por massa de solo	
10%	

Considerando que o teor ideal recomendado por Richards e Hadley (2006) e Nussbaum e Colley (1971), é o teor = 10%, foram estudados os seguintes teores:

- **Teor de 5%** - equivalente a 5% abaixo do teor ideal;

- **Teor de 7%** - equivalente a 3% abaixo do teor ideal;
- **Teor de 10%** - teor ideal recomendado;
- **Teor de 13%** - equivalente a 3% acima do teor ideal;
- **Teor de 15%** - equivalente a 5% acima do teor ideal.

5.2. Fase 2: Resultados do compósito com cimento Portland

5.2.1. Umidade ótima

A umidade ótima e a densidade aparente máxima seca foram obtidas por meio do ensaio de ISC – Índice de Suporte Califórnia, com os corpos de prova ensaiados de cada teor de cimento estudado. O resumo dos resultados obtidos consta no Quadro 24. A massa específica aparente máxima seca tendeu a aumentar com o aumento do teor de cimento. Porém, os teores de cimento de 10% e 13% obtiveram resultados inferiores aos teores de 5% e 7%. Tendência diferente da observada no estudo de Kolling *et al.* (2012), que avaliou a resistência mecânica de diferentes traços de solo cimento estabilizados com areia, classificado como A-2-4 (areia siltosa/argilosa), onde a densidade aparente seca tendeu a diminuir com o aumento do teor de cimento.

Quadro 24. Resumo dos resultados obtidos para cada teor de cimento estudado.

Teor de cimento	Massa específica aparente máxima seca (g/cm ³)	Umidade ótima (%)	ISC (%)	Expansão (%)
5%	1,83	12,9	134,9	0,95
7%	1,88	13,2	167,5	0,14
10%	1,80	11,0	175,9	0,10
13%	1,81	15,5	190,5	0,07
15%	1,90	17,8	196,1	0,04

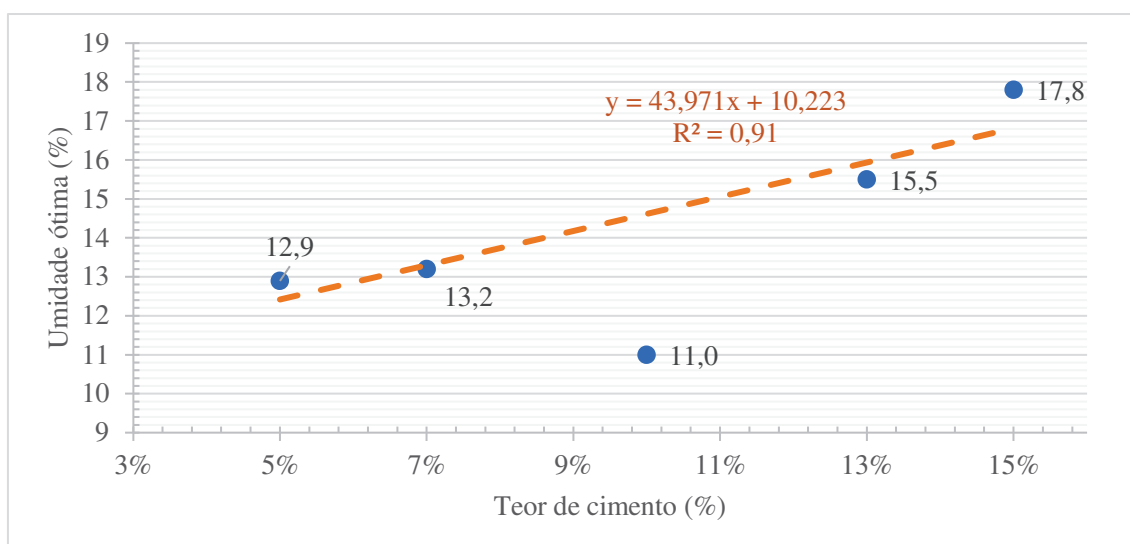
Os resultados obtidos demonstram que: o ISC (Índice de Suporte Califórnia) aumenta proporcionalmente ao aumento do teor de cimento. Enquanto, a expansão diminui. Tais resultados convergem para o estudo realizado por Pita (1984) que concluiu que: o aumento do valor do ISC é proporcional ao teor de aglomerante, sendo mais notável em solos finos.

Os resultados se aproximaram dos obtidos no estudo de Silveira (2005), que avaliou o uso de resíduos da construção civil reciclados como compósito de solo cimento:

- teor de cimento 7%: massa específica aparente máxima = 1,78 g/cm³ e umidade ótima = 16,45%;
- teor de cimento 9%: massa específica aparente máxima = 1,77 g/cm³ e umidade ótima = 16,60%;
- teor de cimento 11%: massa específica aparente máxima = 1,77 g/cm³ e umidade ótima = 17,00%.

A regressão linear entre as variáveis: umidade ótima e teor de cimento, conforme Figura 59, demonstra uma relação diretamente proporcional: aumento da umidade ótima proporcional do aumento do teor de cimento. Tal fato pode ser explicado pela diminuição da porosidade da mistura e aumento da cimentação, pois, ao adicionar cimento na mistura, aumenta-se a quantidade de finos e assim a superfície específica a ser hidratada, necessitando de mais água. Tal situação também foi observada no estudo realizado por Kolling *et al.* (2012), bem como no estudo de Cancian *et al.* (2017), que avaliou a influência do teor de umidade, da porosidade e do intervalo de tempo até a aplicação, sobre a resistência à compressão simples de misturas de solo cimento como uso em pavimento rodoviário.

Figura 59. Regressão linear – umidade ótima x teor cimento.

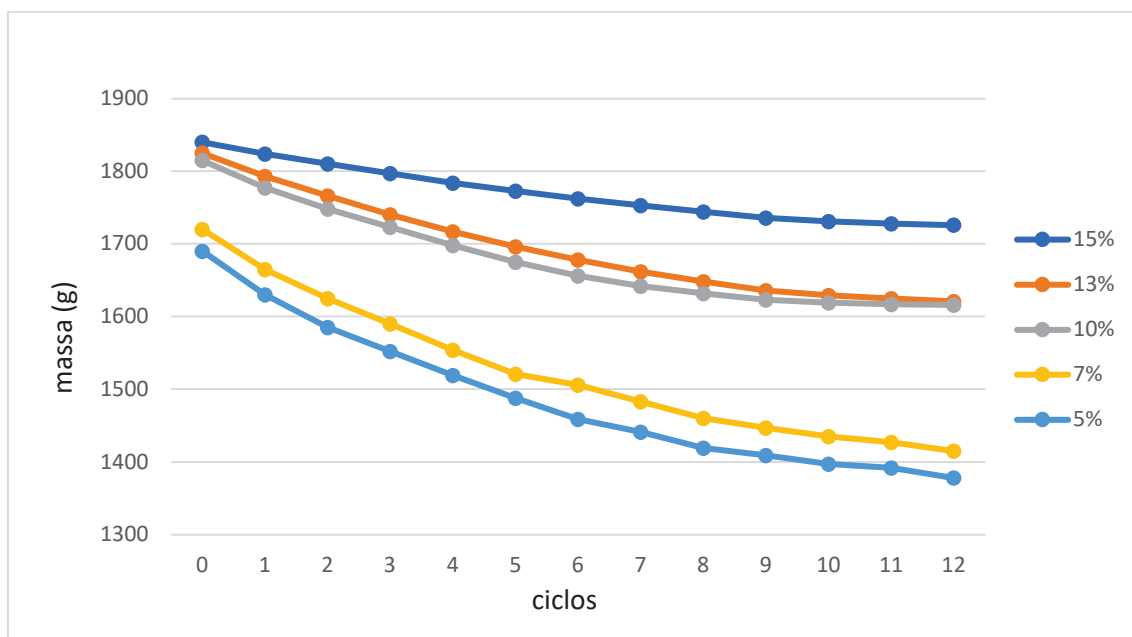


5.2.2. Durabilidade – perda de massa

Os ensaios foram realizados, seguindo a metodologia da ABCP-SC-3 (ABCP, 2004), para cada corpo de prova com os teores de cimento estudados (5%, 7%, 10%, 13% e 15%) demonstradas na Figura 60, moldados com a umidade ótima identificada nos ensaios de compactação para cada um deles.

Figura 60. Corpos de prova ensaiados.

Para cada teor de cimento, os resultados de cada ciclo geraram um gráfico de perda de massa após cada ciclo de molhagem e secagem com escovação, como demonstrado na Figura 61, onde o zero corresponde à massa inicial seca, e posteriormente a massa seca final de cada ciclo (1 a 12).

Figura 61. Perda de massa após cada ciclo de molhagem e secagem.

Conforme a metodologia da ABCP-SC-3 (ABCP, 2004), para a correção da massa seca final do corpo de prova, deve-se descontar um percentual de 1,5% para um solo classificado como A-1 (AASHTO), como massa da água retida no corpo de prova.

De acordo com a PCA (1969), para um solo classificado como A-1-b (AASHTO), a perda de massa máxima seria de 14%.

Os ensaios de durabilidade por molhagem e secagem obtiveram os resultados demonstrados no Quadro 25.

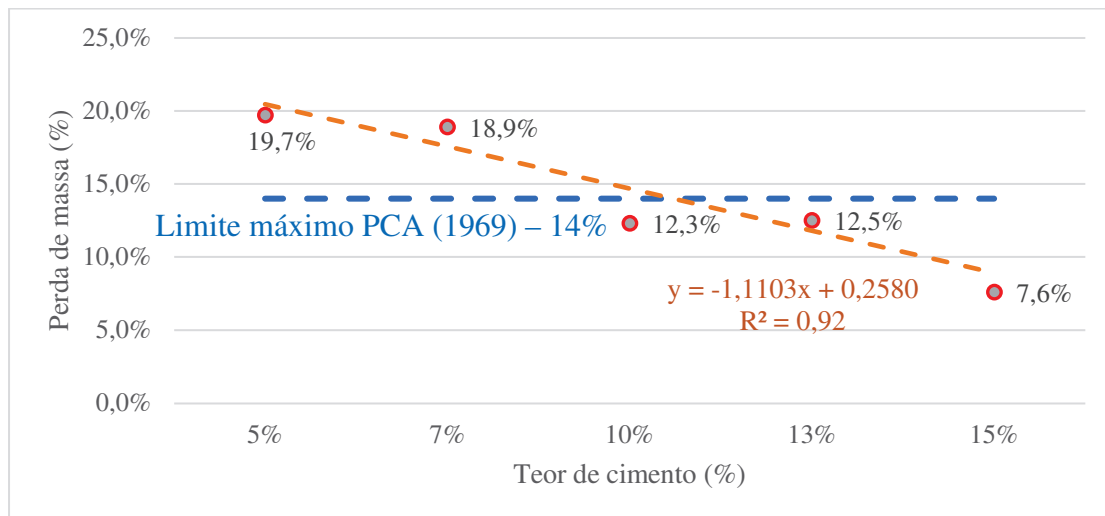
Quadro 25. Resultados dos ensaios de durabilidade realizados.

teor de cimento	5%	7%	10%	13%	15%
Massa seca inicial (g)	1690	1720	1815	1825	1840
massa seca final (g)	1378	1415	1616	1621	1726
1,5% água retida no cp (g)	20	21	24	24	26
massa seca final corrigida (g)	1358	1394	1592	1597	1700
perda massa (%)	19,7%	18,9%	12,3%	12,5%	7,6%
Atende PCA (1969)	não	não	sim	sim	sim

Observou-se que, os ensaios realizados nos corpos de prova com os teores de cimento de 5% e 7% registraram uma perda de massa maior do que 14% (limite estabelecido pelo Associação de Cimento Portland Americana), com 19,7% e 18,9% respectivamente e, portanto, não atendem a este requisito para o uso como solo cimento. Os demais teores (10%, 13% e 15%) registraram perda de massa inferiores a 14%, atendendo a este requisito, com 12,3%, 12,5% e 7,6% respectivamente.

Os resultados obtidos foram superiores ao do estudo de Silveira (2005), que resultou numa perda de massa = 3,67% para os resíduos sólidos da construção reciclados com 11% de teor de cimento, com solo classificado como A-2-4 (ASTM D-3282). Considerando o teor de 10% desta pesquisa (teor mais próximo do estudo citado), com perda de massa de 12,3%, tal fato pode ser explicado por este solo ser A-1-b, ou seja, bem mais arenoso, com maior índice de vazios e conseqüentemente, mais susceptível a perda de massa quando submetido a condições de desgastes.

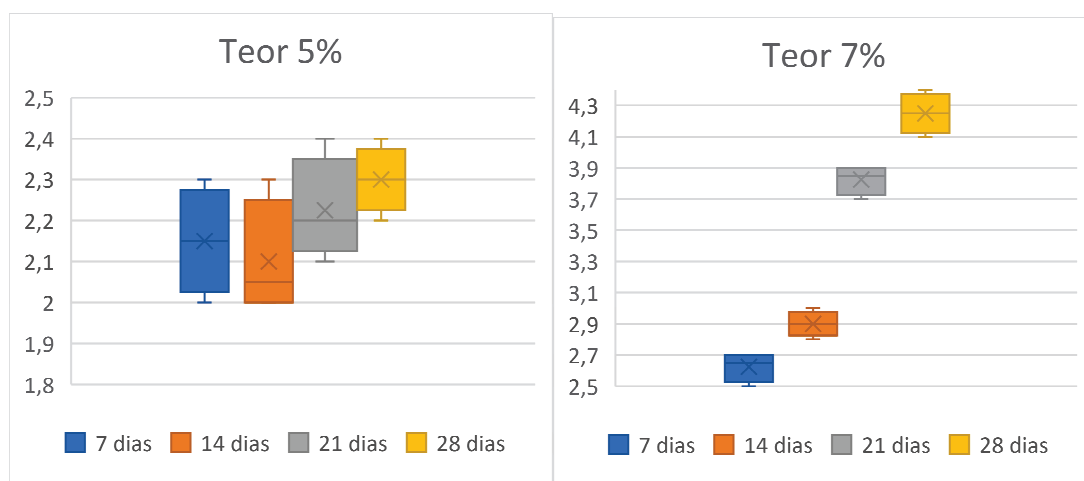
A regressão linear entre as variáveis: perda de massa e teor de cimento, conforme Figura 62, demonstra uma relação inversamente proporcional: diminuição da perda de massa proporcional ao aumento do teor de cimento. Fato já esperado, pois, com o aumento do teor de cimento, diminui-se o índice de vazios, enrijecendo a estrutura e diminuindo a perda de massa, semelhante às avaliações realizadas por Velázquez (2016) no estudo da influência da umidade de compactação na durabilidade, rigidez e resistência de um solo fino artificialmente cimentado.

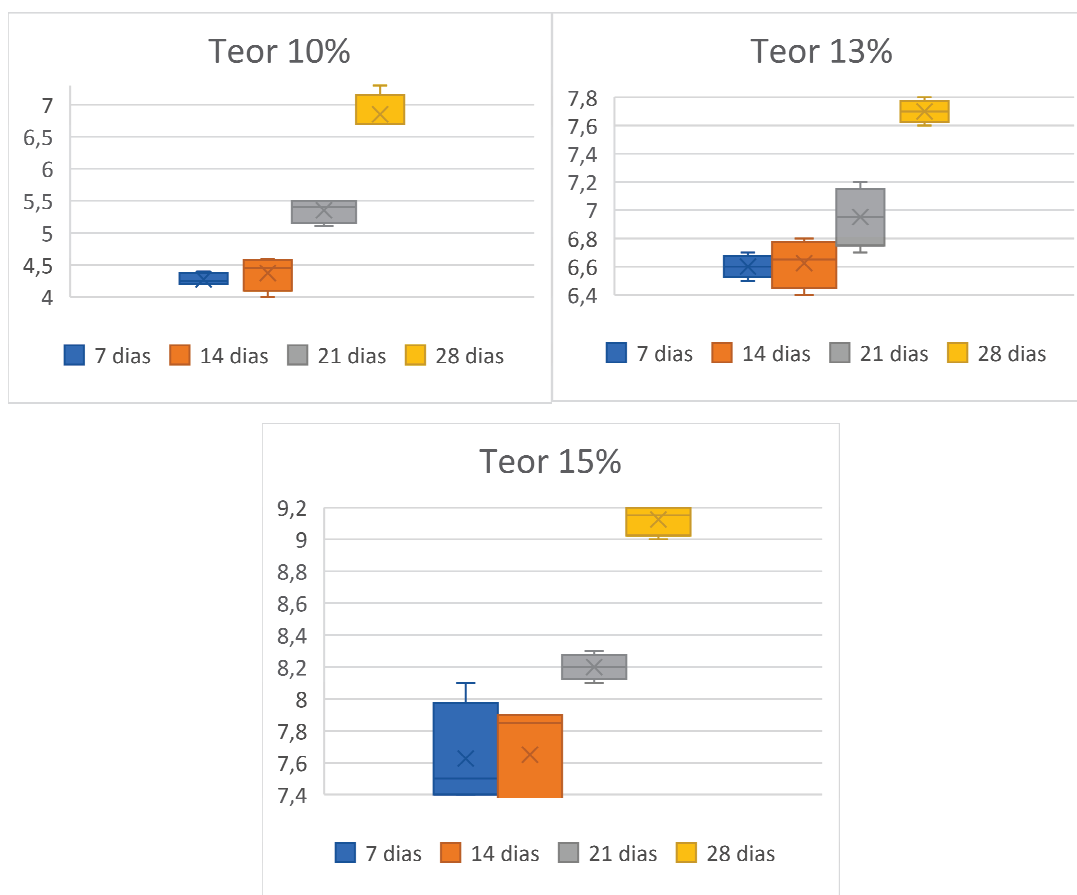
Figura 62. Regressão linear - perda de massa x teor de cimento.

5.2.3. Resistência a compressão simples

Os ensaios de resistência a compressão simples foram realizados com 7, 14, 21 e 28 dias, para cada teor de cimento estudado, moldados na umidade ótima identificada de cada respectivo teor.

A Figura 63 apresenta os resultados obtidos. Nenhum resultado teve um desvio igual ou maior à 10% em relação à resistência média e, portanto, conforme determina a metodologia da ABCP-SC-4 (ABCP, 2004), nenhum resultado foi desprezado.

Figura 63. Resultados dos ensaios de resistência a compressão simples (MPa).



De acordo com Richards e Hadley (2006), para solo cimento aplicados em recursos hídricos, a resistência a compressão simples em 7 dias de cura deve ser, no mínimo, de 4,2 MPa. O Quadro 26 apresenta a avaliação dos resultados (média obtida em cada teor de cimento) em relação a este requisito.

Quadro 26. Resultados dos ensaios a compressão simples, em MPa.

Teor de cimento	Dias de cura	
	7 dias	
	resultado	Atende*
5%	2,2	Não
7%	2,6	Não
10%	4,3	Sim
13%	6,6	Sim
15%	7,6	Sim

* Critério de Richards e Hadley (2006)

Observando-se as médias obtidas, a tendência de aumento na resistência ao longo do tempo foi confirmada nos resultados, com exceção do teor de cimento com 5% que

praticamente permaneceu constante. Os demais teores (7%, 10%, 13% e 15%) aumentaram, em média 39% o valor inicial de 7 dias em relação ao resultado com 28 dias. Com destaque para o teor de 10% que aumentou de 4,3 MPa para 6,9 MPa (aumento de 60%) e para o teor de 7% que aumentou de 2,6 MPa para 4,3 MPa (aumento de 62%).

O resultado obtido, do teor de cimento de 7% ($f_{ck7} = 2,6$ MPa) ficou próximo do resultado do estudo realizado por Silveira (2005), que obteve uma resistência de 2,42 MPa, com cura de 7 dias, para solo cimento de 100% de resíduos da construção civil reciclados com teor de cimento de 8%. Este mesmo resultado ficou 22% abaixo do resultado do estudo de Segantini e Wada (2011), com o teor de cimento de 6%, cuja resistência com 7 dias foi de 3,3 MPa. Porém, acima para o resultado de 28 dias: Silveira (2015) obteve resultado de 3,24 MPa enquanto, o resultado obtido foi de 4,3 MPa (33% superior).

Portanto, analisando os resultados obtidos, somente os teores de cimento de 10%, 13% e 15%, com resultados de 4,3 MPa, 6,6 MPa e 7,6 MPa aos 7 dias de cura respectivamente, atendem aos critérios recomendados por Richards e Hadley (2006). Os demais teores de cimento (5% e 7%) não obtiveram resultados superiores a 4,2 MPa aos 7 dias de cura e não são indicados para o uso como solo cimento em tratamento de taludes de recursos hídricos, pois, não terão resistência suficiente para evitar a erosão provocada pelo fluxo da água.

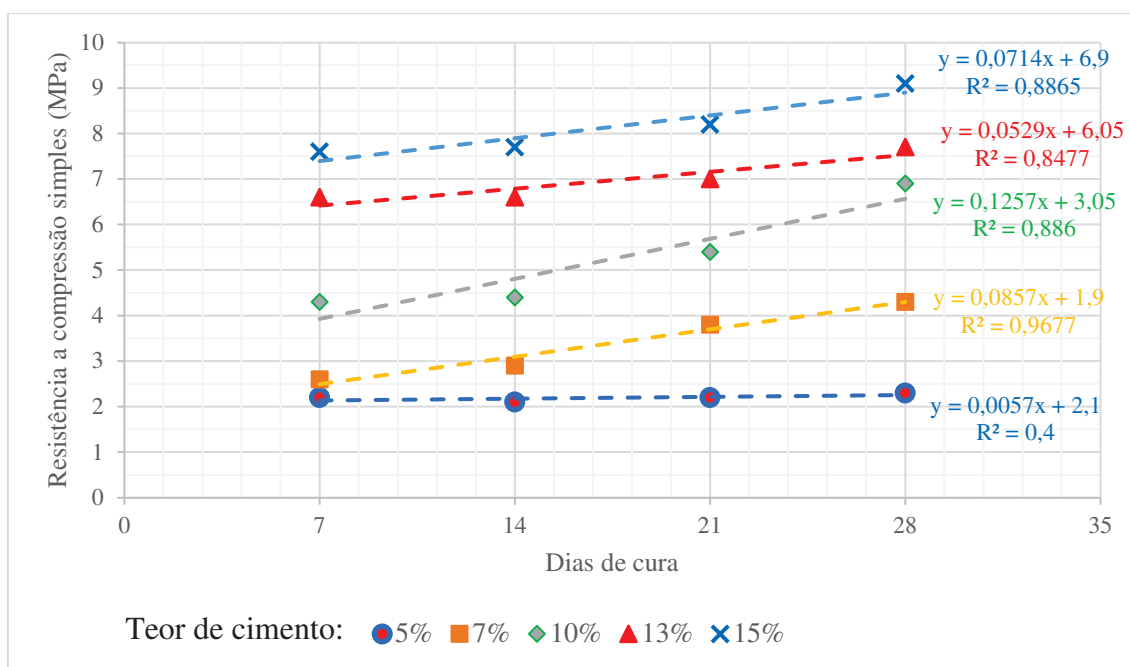
Porém, para aplicação como solo cimento em blocos (tijolos ou bloquetes) ou ainda para pavimentos, as resistências mínimas de 1,4 MPa e 2,1 MPa respectivamente (de acordo com os critérios recomendados pelas normas técnicas brasileiras), foram atendidas para todos os teores de cimento. Logo, todos os teores poderiam ser utilizados nestas aplicações, analisando somente este critério de resistência a compressão simples. Estes resultados corroboram com os resultados obtidos por Queiroz (2017), onde os teores de cimento de 9% e 10% atenderam o requisito mínimo de 2,1 MPa a 7 dias.

5.2.4. Discussão dos resultados da Fase 2

A Figura 64 apresenta graficamente a evolução dos resultados (média dos 4 resultados por teor de cimento) e a regressão linear simples para cada teor de cimento em função da resistência a compressão simples obtida nos ensaios. Observa-se que quase não teve nenhum aumento no teor de 5% chegando apenas a 2,3 MPa, enquanto, nos teores

de 7%, 10%, 13% e 15% houve aumento ao longo do tempo, chegando aos 28 dias com 4,3 Mpa, 6,9 Mpa, 7,7 MPa e 9,1 MPa respectivamente. Mesmo com as altas relações água/cimento (a/c) empregadas (0,99; 1,04; 0,99), decorrentes da moldagem utilizando a umidade ótima de cada compósito, os resultados foram considerados satisfatórios para os teores de 10%, 13% e 15% respectivamente. Já os teores de 5% e 7% com a/c de 2,45 e 1,75 respectivamente, não obtiveram resultados satisfatórios, estando abaixo de 4,2 MPa aos 7 dias de cura.

Figura 64. Resultados das médias dos ensaios a compressão simples e regressão linear.



Considerando que, a caracterização do resíduo reciclado da construção civil estudado atendeu aos diversos requisitos (PCA, 1969; RICHARDS e HADLEY, 2006; DNER, 1971) para a sua utilização como solo cimento, a dosagem de solo cimento foi obtida seguindo as operações descritas da Norma Geral de Dosagem de Solo Cimento citadas por Pitta (2004), observando diversos requisitos encontrados na literatura para o uso do resíduo reciclado da construção civil com adição de cimento para o tratamento de taludes fluviais. Obviamente que, o teor de cimento com a menor porcentagem (mais econômico) e que atenda a todos estes requisitos será definido como a melhor dosagem de solo cimento a ser utilizado.

O Quadro 27, traz o resumo dos requisitos observados na literatura, já citados e analisados anteriormente, em relação aos resultados obtidos nos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem e de compressão simples a 7 dias do solo cimento estudado.

Quadro 267. Avaliação de atendimento aos critérios para cada teor de cimento.

Teor de cimento	Durabilidade	Compressão simples a 7 dias	Resultado
5%	Não	Não	Não
7%	Não	Não	Não
10%	Sim	Sim	Sim
13%	Sim	Sim	Sim
15%	Sim	Sim	Sim

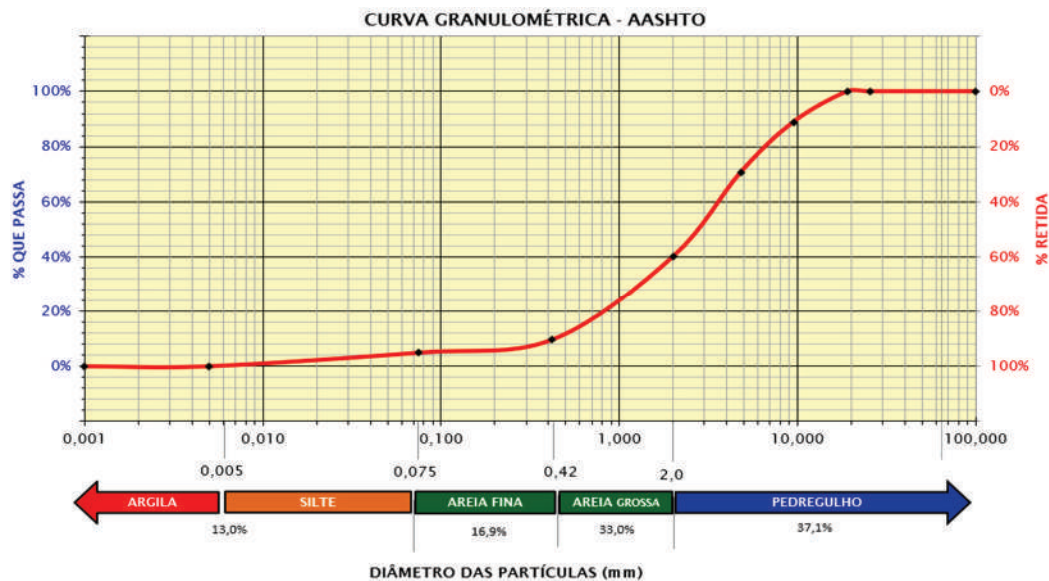
Portanto, a melhor dosagem a ser utilizada é com o **teor de cimento de 10% (em massa)**, pois, é o menor teor de cimento que atende aos dois requisitos estudados neste trabalho (durabilidade e compressão simples a 7 dias), tornando-se o mais econômico e adequado tecnicamente. Tal escolha confirma as recomendações de Richards e Hadley (2006) e da PCA (1969), que seriam exatamente de um teor de 10% em função da caracterização do resíduo reciclado da construção civil utilizado como solo de origem, classificado como A-1-b (ASSHTO), para aplicação em tratamento de taludes fluviais erodidos.

5.3. Fase 3: Resultados do compósito com cimento alternativo

5.3.1. Caracterização granulométrica do vidro reciclado

Na amostra inicial, o resultado do teor de umidade foi em média = 0,2%. A curva granulométrica AASHTO está apresentada na Figura 65.

Figura 65. Curva granulométrica AASHTO do pó de vidro reciclado de Porto Velho.

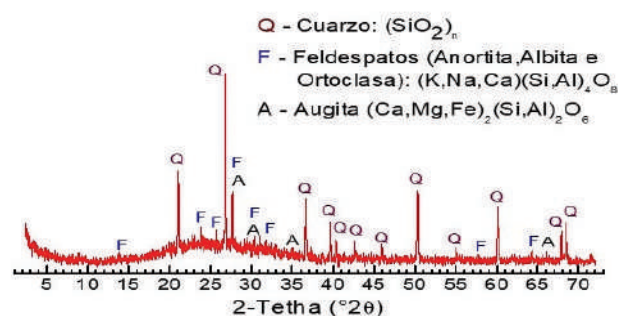


A massa específica do pó de vidro foi obtida seguindo a metodologia da NBR 6458 (ABNT, 2017) - método picnômetro, com o resultado médio = 2,423 g/cm³.

5.3.2. Caracterização mineralógica e química do pó de vidro

O resultado da avaliação mineralógica (ensaio de DRX), analisada pelo software X'Pert Highscore Plus 5.1, demonstrou que o pó de vidro possui predominantemente traços de sílica (SiO₂) na sua composição, como visto na Figura 66.

Figura 66. Resultado da análise do ensaio DRX – pó de vidro.



Já o resultado da avaliação química (ensaio FRX – Quadro 28 **Quadro 27**) confirmou que a concentração de SiO_2 é maior que 70% e a soma dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 totaliza 77,67%, caracterizando-se, conforme a definição da NBR 12.653 (ABNT, 2015), como material pozzolânico.

Quadro 278. Resultado da avaliação química (ensaio FRX) do pó de vidro.

Substância	Concentração
SiO_2	70,73%
Na_2O	10,61%
CaO	9,80%
Al_2O_3	4,08%
Fe_2O_3	2,86%
K_2O	0,61%
TiO_2	0,53%
MgO	0,39%
PbO	0,13%
ZrO_2	0,09%
P_2O_5	0,07%
SO_3	0,07%
SrO	0,04%
ZnO	0,04%
MnO	0,02%
CuO	0,02%

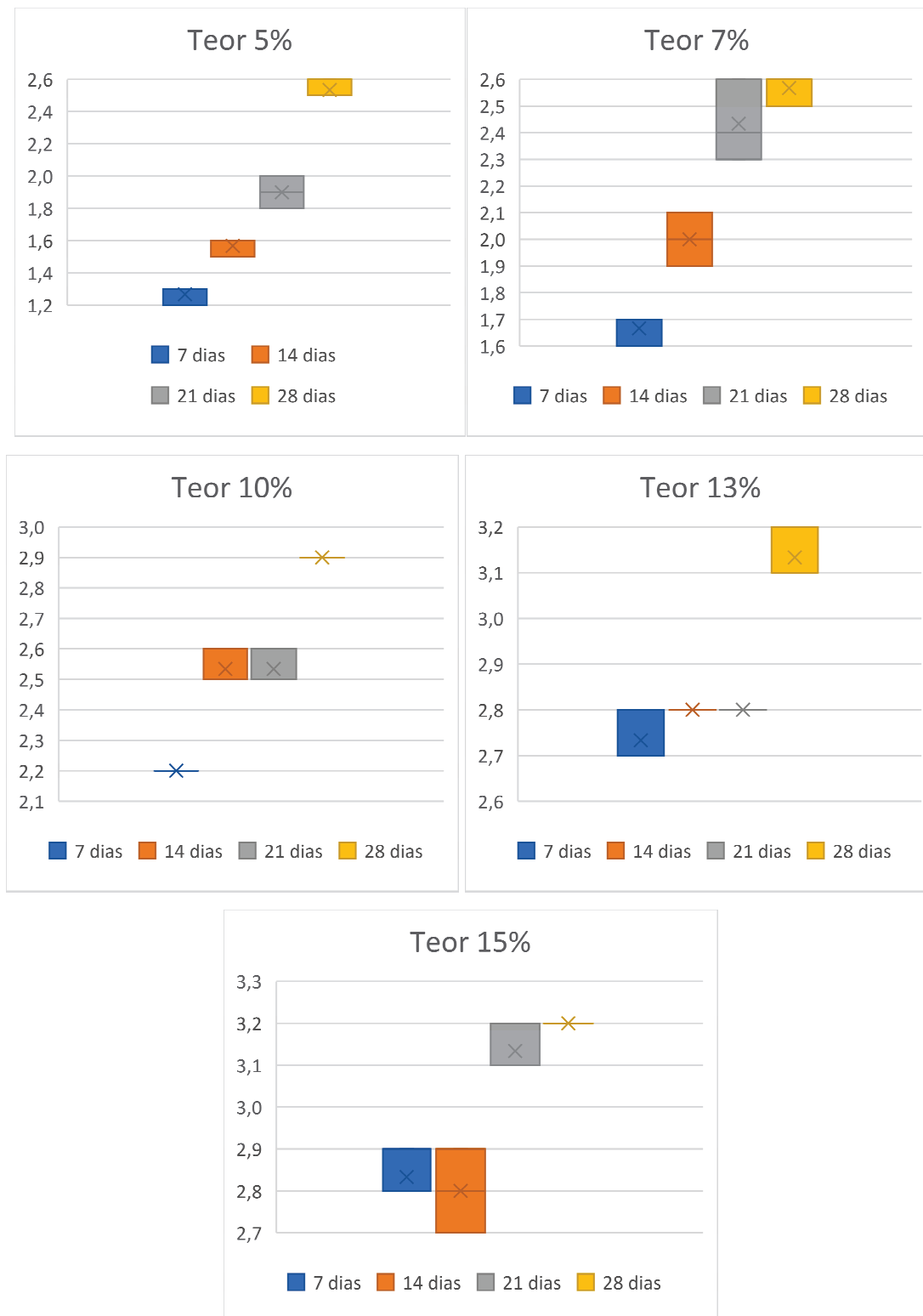
5.3.3. Resistência a compressão simples

5.3.3.1. Ativador Hidróxido de sódio

Os ensaios de resistência a compressão simples foram realizados com 7, 14, 21 e 28 dias, para cada variação e teor de cimento alternativo estudado, moldados na umidade ótima.

A Figura 67 apresenta os resultados obtidos. Nenhum resultado teve um desvio igual ou maior à 10% em relação à resistência média e, portanto, conforme determina a metodologia da ABCP-SC-4 (ABCP, 2004), nenhum resultado foi desprezado.

Figura 67. Resultados de resistência a compressão simples – ativador HS.



De acordo com Richards e Hadley (2006), para solo cimento aplicados em recursos hídricos, a resistência a compressão simples em 7 dias de cura deve ser, no

mínimo, de 4,2 MPa. O Quadro 29 apresenta a avaliação dos resultados (média obtida em cada teor de cimento) em relação a este requisito.

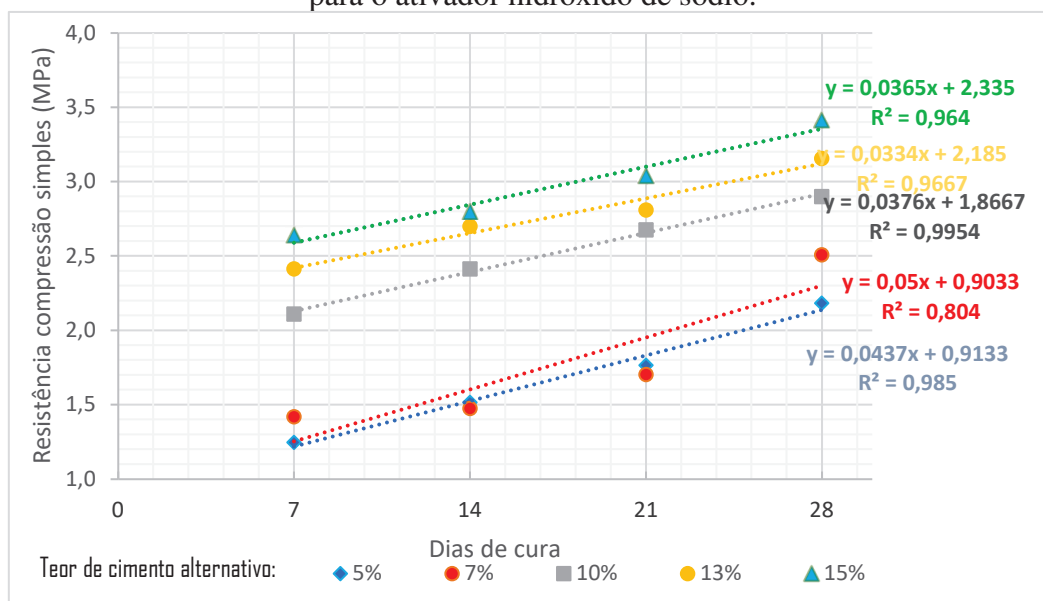
Quadro 29. Resultados dos ensaios a compressão simples, em Mpa, para ativador hidróxido de sódio.

Teor de cimento	Dias de cura	
	7 dias	
	Resultado	Atende*
5%	1,3	Não
7%	1,7	Não
10%	2,2	Não
13%	2,7	Não
15%	2,8	Não

* Critério de Richards e Hadley (2006)

A Figura 68 apresenta graficamente a evolução dos resultados (média dos 3 resultados por teor de cimento) e a regressão linear simples para cada teor de cimento em função da resistência a compressão simples obtida nos ensaios com o ativador hidróxido de sódio.

Figura 68. Resultados das médias dos ensaios a compressão simples e regressão linear, para o ativador hidróxido de sódio.

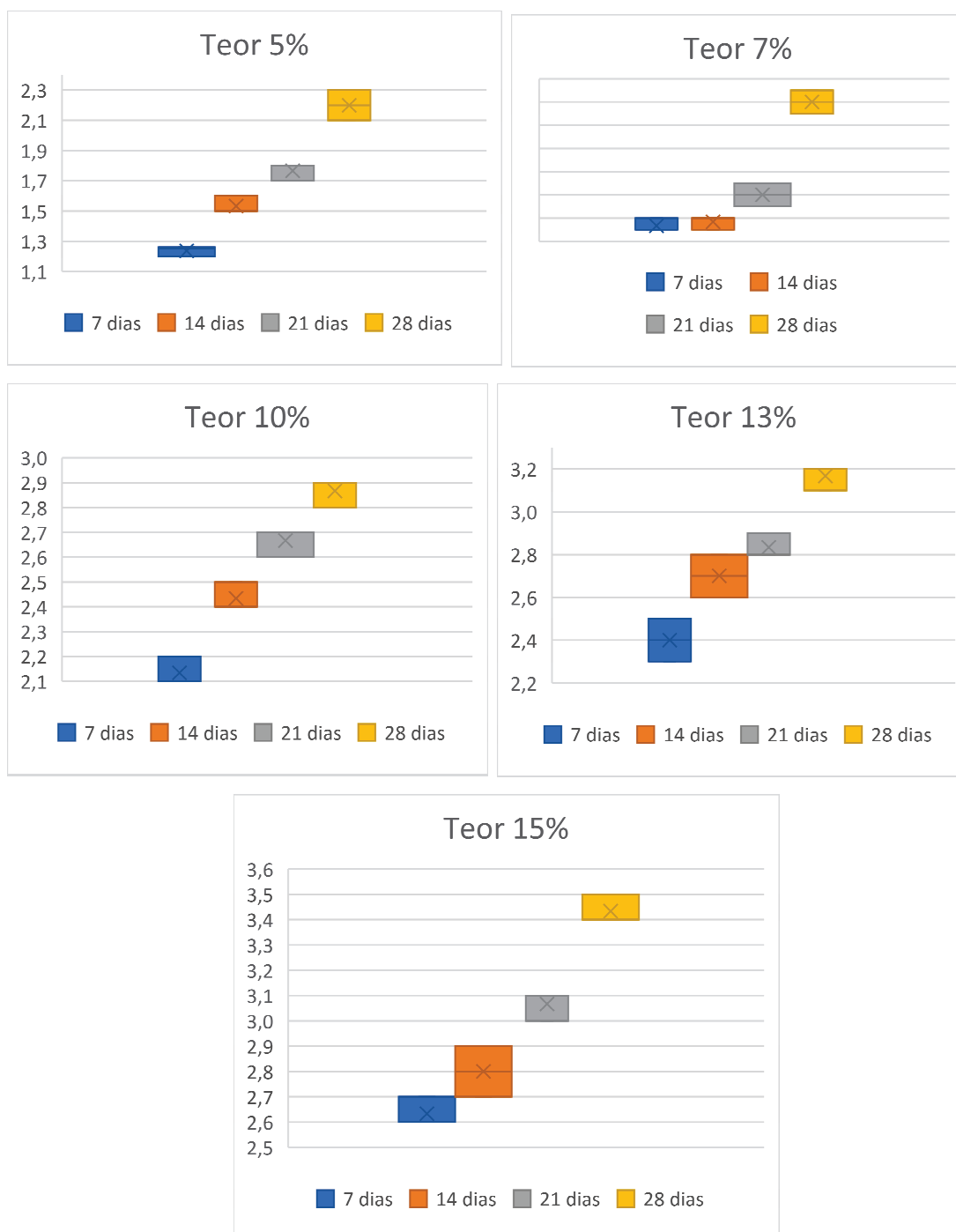


5.3.3.2. Ativador Hidróxido de sódio + silicato de sódio

Os ensaios de compressão simples foram realizados com 7, 14, 21 e 28 dias, para cada variação e teor de cimento alternativo estudado, moldados na umidade ótima.

A Figura 69 apresentam os resultados obtidos. Nenhum resultado teve um desvio igual ou maior à 10% em relação à resistência média e, portanto, conforme determina a metodologia da ABCP-SC-4 (ABCP, 2004), nenhum resultado foi desprezado.

Figura 69. Resultados de compressão simples – ativador HSSS.



De acordo com Richards e Hadley (2006), para solo cimento aplicados em recursos hídricos, a resistência a compressão simples em 7 dias de cura deve ser, no mínimo, de 4,2 MPa. O Quadro 30 apresenta a avaliação dos resultados (média obtida em cada teor de cimento) em relação a este requisito.

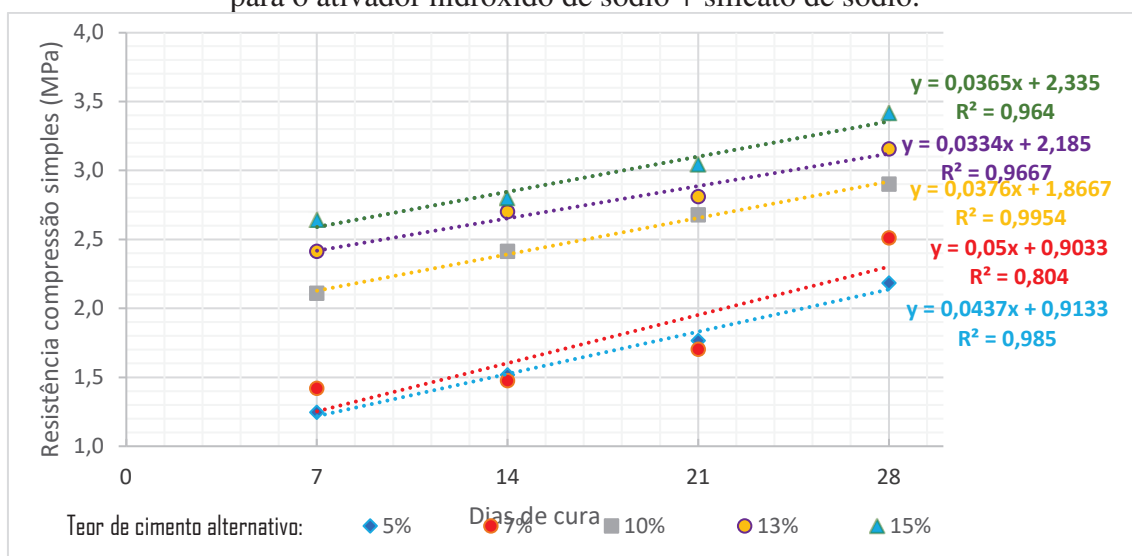
Quadro 30. Resultados dos ensaios a compressão simples, em Mpa, para ativador hidróxido de sódio + silicato de sódio.

Teor de cimento	Dias de cura	
	7 dias	
	resultado	Atende *
5%	1,2	Não
7%	1,4	Não
10%	2,1	Não
13%	2,4	Não
15%	2,6	Não

* Critério de Richards e Hadley (2006)

A Figura 70 apresenta graficamente a evolução dos resultados (média dos 3 resultados por teor de cimento) e a regressão linear simples para cada teor de cimento em função da resistência a compressão simples obtida nos ensaios com o ativador hidróxido de sódio + silicato de sódio.

Figura 70. Resultados das médias dos ensaios a compressão simples e regressão linear, para o ativador hidróxido de sódio + silicato de sódio.



5.3.4. Durabilidade – perda de massa

5.3.4.1. Ativador Hidróxido de sódio

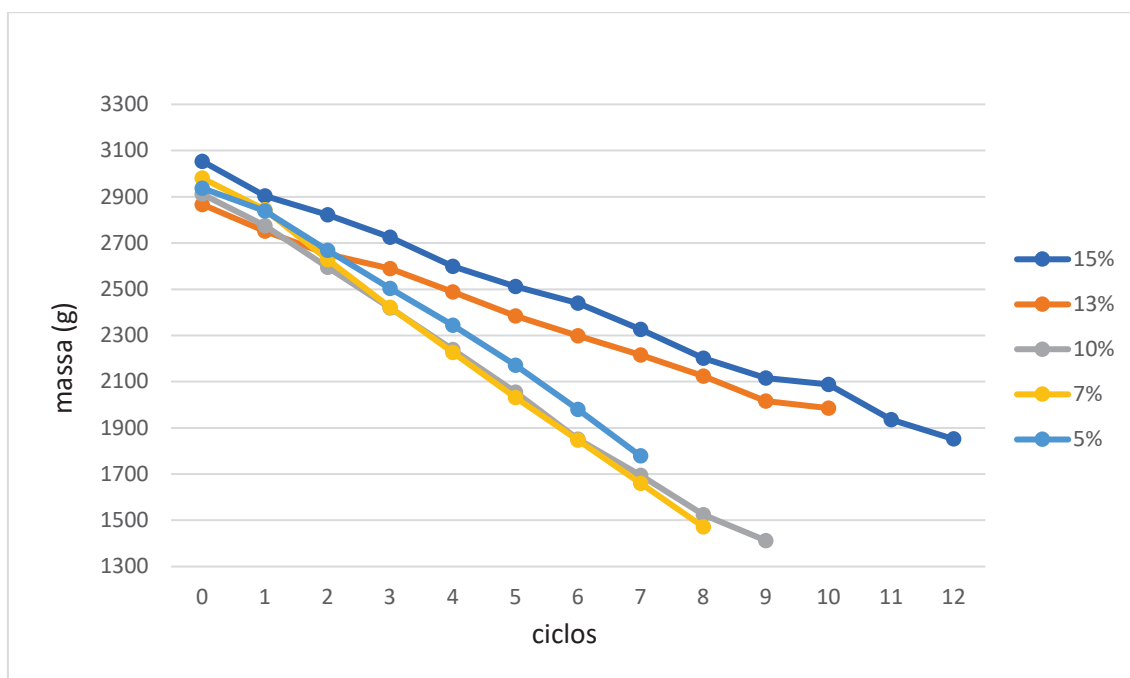
Os ensaios foram realizados, seguindo a metodologia da ABCP-SC-3 (ABCP, 2004), para cada corpo de prova do compósito com os teores de cimento alternativo estudados (5%, 7%, 10%, 13% e 15%) demonstradas na Figura 71, moldados com a sua umidade ótima.

Figura 71. Corpos de prova ensaiados, ativador HS.



Para cada compósito com cimento alternativo com ativador de hidróxido de sódio, os resultados de cada ciclo geraram um gráfico de perda de massa após cada ciclo de molhagem e secagem com escovação, como demonstrado na Figura 72 onde o zero corresponde à massa inicial seca, e posteriormente a massa seca final de cada ciclo (1 a 12). Ressalta-se que, somente o corpo de prova do teor de 15% foi possível concluir todos os 12 ciclos do ensaio. Os demais corpos de prova se desintegravam, conforme abaixo, e não foi possível concluir o ensaio com os 12 ciclos:

- Teor 5%: desintegrou no 8º ciclo:
- Teor 7%: desintegrou no 9º ciclo:
- Teor 10%: desintegrou no 10º ciclo:
- Teor 13%: desintegrou no 11º ciclo.

Figura 72. Perda de massa após cada ciclo de molhagem e secagem, ativador HS.

Conforme a metodologia da ABCP-SC-3 (ABCP, 2004), para a correção da massa seca final do corpo de prova, deve-se descontar um percentual de 1,5% para um solo classificado como A-1 (AASHTO), como massa da água retida no corpo de prova.

De acordo com a PCA (1969), para um solo classificado como A-1-b (AASHTO), a perda de massa máxima seria de 14%.

Os ensaios de durabilidade por molhagem e secagem obtiveram os resultados demonstrados no Quadro 31, para o compósito com o ativador de hidróxido de sódio (HS).

Quadro 31. Resultados dos ensaios de durabilidade realizados, ativador HS.

teor de cimento	5%	7%	10%	13%	15%
Massa seca inicial (g)	2937	2981	2912	2867	3054
massa seca final (g)	1779 ⁽¹⁾	1472 ⁽²⁾	1412 ⁽³⁾	1986 ⁽⁴⁾	1852
1,5% água retida no cp (g)	27	22	21	30	28
massa seca final corrigida (g)	1752	1450	1391	1956	1825
perda massa (%)	40,35%	51,35%	52,23%	31,79%	40,26%
Atende PCA (1969)	não	não	não	não	não

Observações: (1) massa final do 7º ciclo; (2) massa final do 8º ciclo; (3) massa final do 9º ciclo; (4) massa final do 10º ciclo.

5.3.4.2. Ativador Hidróxido de sódio + silicato de sódio

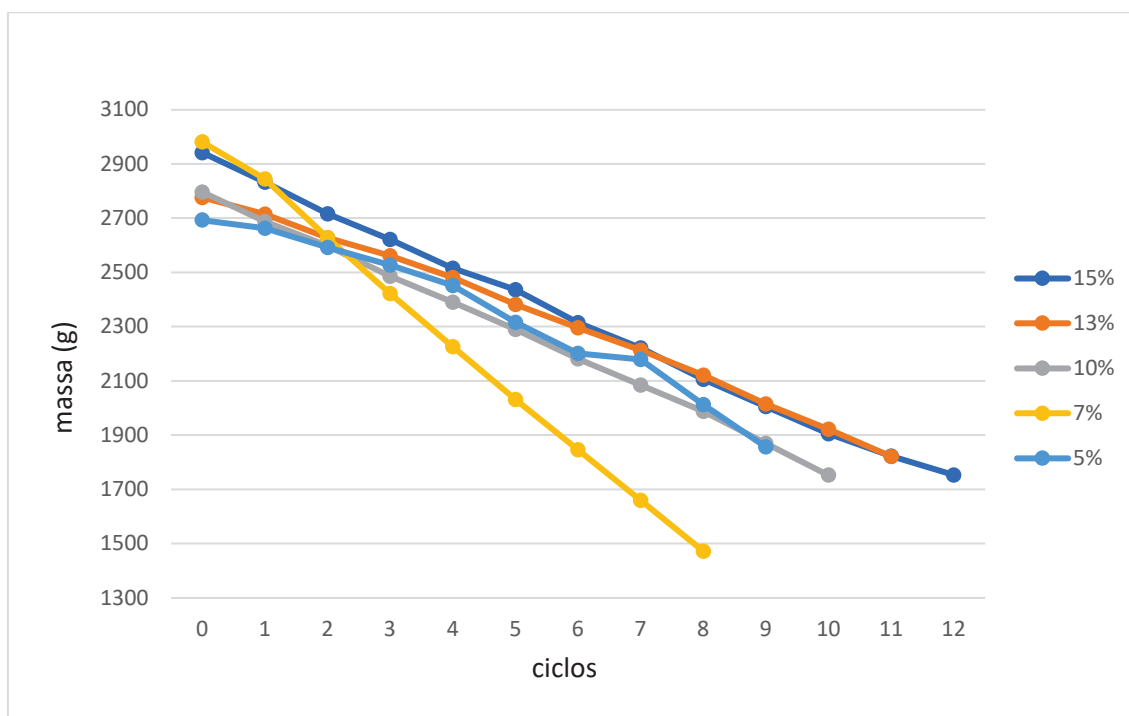
Os ensaios foram realizados, seguindo a metodologia da ABCP-SC-3 (ABCP, 2004), para cada corpo de prova do compósito com os teores de cimento alternativo estudados (5%, 7%, 10%, 13% e 15%) demonstradas na Figura 73, moldados com a sua umidade ótima.

Figura 73. Corpos de prova ensaiados (ativador HSSS).



Para cada compósito com cimento alternativo com o ativador de hidróxido de sódio + silicato de sódio, os resultados de cada ciclo geraram um gráfico de perda de massa após cada ciclo de molhagem e secagem com escovação, como demonstrado na Figura 74, onde o zero corresponde à massa inicial seca, e posteriormente a massa seca final de cada ciclo (1 a 12). Ressalta-se que, somente o corpo de prova do teor de 15% foi possível concluir todos os 12 ciclos do ensaio. Os demais corpos de prova se desintegravam, conforme abaixo, e não foi possível concluir o ensaio com os 12 ciclos:

- Teor 5%: desintegrou no 10º ciclo:
- Teor 7%: desintegrou no 9º ciclo:
- Teor 10%: desintegrou no 11º ciclo:
- Teor 13%: desintegrou no 12º ciclo.

Figura 74. Perda de massa após cada ciclo de molhagem e secagem, ativador HSSS.

Conforme a metodologia da ABCP-SC-3 (ABCP, 2004), para a correção da massa seca final do corpo de prova, deve-se descontar um percentual de 1,5% para um solo classificado como A-1 (AASHTO), como massa da água retida no corpo de prova.

De acordo com a PCA (1969), para um solo classificado como A-1-b (AASHTO), a perda de massa máxima seria de 14%.

Os ensaios de durabilidade por molhagem e secagem obtiveram os resultados demonstrados no Quadro 32, para o compósito com o ativador de hidróxido de sódio + silicato de sódio (HSSS).

Quadro 32. Resultados dos ensaios de durabilidade realizados, ativador HSSS.

teor de cimento	5%	7%	10%	13%	15%
Massa seca inicial (g)	2693	2981	2796	2776	2941
massa seca final (g)	1856 ⁽¹⁾	1472 ⁽²⁾	1752 ⁽³⁾	1821 ⁽⁴⁾	1753
1,5% água retida no cp (g)	28	22	26	27	26
massa seca final corrigida (g)	1828	1450	1726	1794	1726
perda massa (%)	32,1%	51,4%	38,3%	35,4%	41,3%
Atende PCA (1969)	não	não	não	não	não

Observações: (1) massa final do 9º ciclo; (2) massa final do 8º ciclo; (3) massa final do 10º ciclo; (4) massa final do 11º ciclo.

5.3.5. Discussão dos resultados da Fase 3

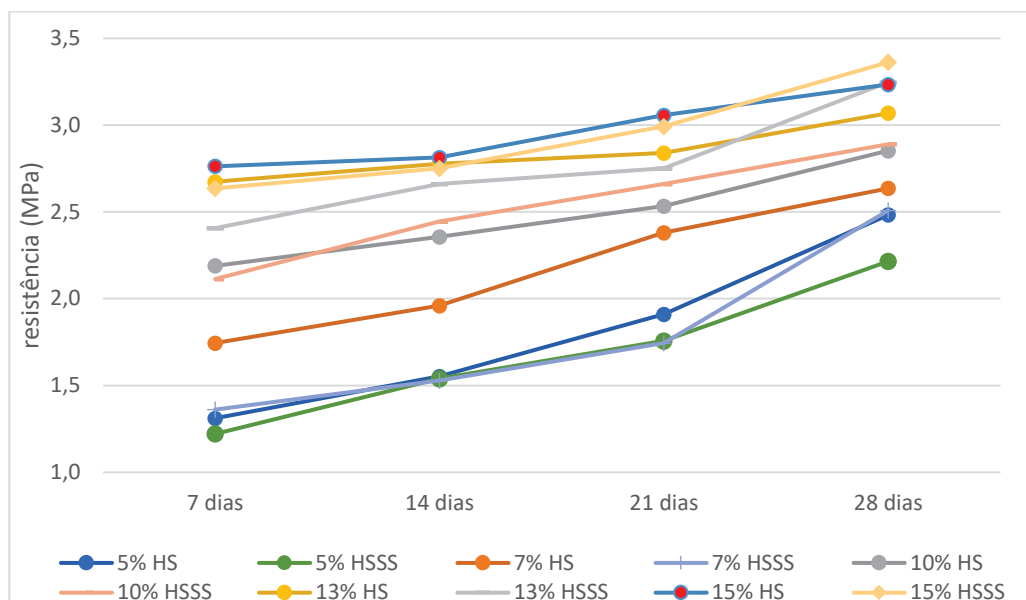
O pó de vidro utilizado possui $2,423 \text{ g/cm}^3$ de massa específica e 0,2% de teor de umidade. Com relação aos resultados obtidos de caracterização do pó de vidro, a avaliação mineralógica e química foi semelhante ao pó de vidro estudado por Torres Carrasco (2015).

Considerando os resultados obtidos da caracterização química do pó de vidro utilizado, a composição química do silicato de sódio e a concentração utilizada de 12M para a elaboração da solução de hidróxido de sódio, calcula-se a razão $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2,50$ para esta fase, para o ativador HS e $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 3,77$ para o ativador HSSS.

Os resultados obtidos com o cimento alternativo não foram satisfatórios para nenhuma das variações estudadas, tanto para o ativador utilizando somente o hidróxido de sódio (NaOH) quanto para o ativador usando a mistura de hidróxido de sódio e silicato de sódio (NaOH e Na_2SO_3), corroborando com os estudos de ZUDA *et al* (2006), que recomendam uma relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de no máximo = 2,0.

Com relação à compressão simples, todos os compósitos obtiveram algum ganho na resistência ao longo do tempo, variando de 1,2 MPa a 2,8 MPa aos 7 dias até 2,2 MPa a 3,4 MPa aos 28 dias, conforme a Figura 75.

Figura 75. Resistência a compressão simples (Fase 3).



Em comparação ao compósito de cimento Portland, todos os resultados de resistência obtidos com o cimento alternativo foram inferiores (destacados em vermelho), conforme demonstrado no Quadro 33, tanto para o ativador de HS quanto para o HSSS.

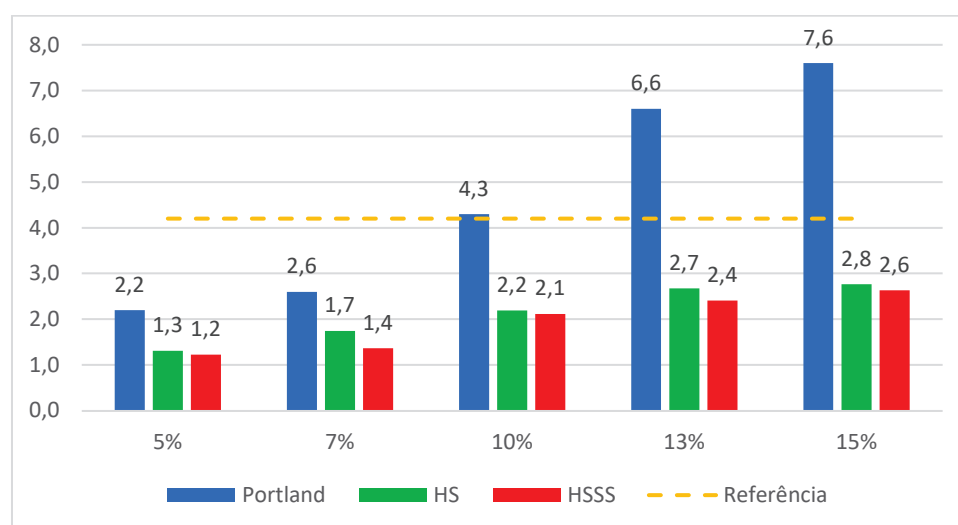
Quadro 33. Resultados dos ensaios de compressão simples, em MPa.

Teor de cimento	7 dias			14 dias			21 dias			28 dias		
	CP	HS	HSSS	CP	HS	HSSS	CP	HS	HSSS	CP	HS	HSSS
5%	2,2	1,3	1,2	2,1	1,6	1,5	2,2	1,9	1,8	2,3	2,5	2,2
7%	2,6	1,7	1,4	2,9	2,0	1,5	3,8	2,4	1,7	4,3	2,6	2,5
10%	4,3	2,2	2,1	4,4	2,4	2,4	5,4	2,5	2,7	6,9	2,9	2,9
13%	6,6	2,7	2,4	6,6	2,8	2,7	7,0	2,8	2,8	7,7	3,1	3,2
15%	7,6	2,8	2,6	7,7	2,8	2,8	8,2	3,1	3,0	9,1	3,2	3,4

CP = Cimento Portland; HS = hidróxido de sódio; HSSS = hidróxido de sódio + silicato de sódio

Considerando o critério de Richards e Hadley (2006), para um solo cimento aplicado em recursos hídricos, a resistência a compressão simples em 7 dias de cura deve ser, no mínimo, de 4,2 MPa, nenhum compósito com cimento alternativo atendeu a este critério, como demonstra a Figura 76. Destaca-se que a utilização do ativador somente com hidróxido de sódio obteve resultados de resistência a compressão simples pouco maiores do que a combinação dele com o silicato de sódio, nas condições estudadas. Fato este que contraria os resultados dos estudos de Dolezal *et al* (2006) e de Phoo-ngernkham *et al* (2015), ressaltando-se que não se trata dos mesmos materiais utilizados nestas pesquisas.

Figura 76. Resultados de compressão simples (em MPa) para cura a 7 dias.



HS = hidróxido de sódio; HSSS = hidróxido de sódio + silicato de sódio

Com relação à durabilidade, todos os resultados de perda de massa obtidos com o cimento alternativo foram superiores ao do compósito com cimento Portland, conforme demonstrado no Quadro 34.

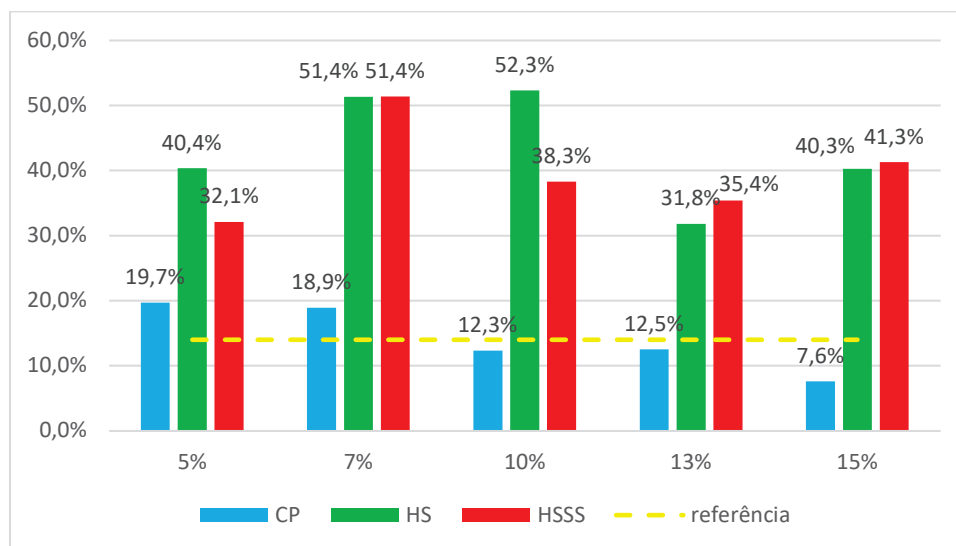
Quadro 34. Resultados dos ensaios de durabilidade (perda de massa em %).

Teor	CP	HS	HSSS
5%	19,7%	40,4%	32,1%
7%	18,9%	51,4%	51,4%
10%	12,3%	52,3%	38,3%
13%	12,5%	31,8%	35,4%
15%	7,6%	40,3%	41,3%

CP = Cimento Portland; HS = hidróxido de sódio; HSSS = hidróxido de sódio + silicato de sódio

Observou-se que, os ensaios realizados nos corpos de prova dos compósitos com cimento alternativo registraram uma perda de massa muito maior do que 14% (limite estabelecido pelo Associação de Cimento Portland Americana) e, portanto, não atendem a este requisito para o uso como solo cimento, como pode ser observado na Figura 77.

Figura 77. Resultados de durabilidade (perda de massa em %).



Um dos fatores que pode ter contribuído para a baixa resistência obtida nesta fase foi o tamanho do pó de vidro utilizado (maiores que 0,106mm). O pó de vidro é menos reativo do que os principais materiais cimentícios suplementares, porém, o uso mais fino

das partículas (menores que 0,075mm), a adição de ativadores e técnicas de cura adequadas foram relatados para ser capaz de compensar tal deficiência (NODEHI e TAGHVAAE, 2021).

Uma concentração alcalina mais alta aumenta o tempo de pega e atrasa as formações de polímero uma vez que a presença excessiva de íons limita sua mobilidade e potencial para interagir com os reagentes disponíveis, o que aparentemente ocorreu nesta fase estudada, utilizando uma concentração molar alta de 12M para o hidróxido de sódio.

Outro fator, que não foi avaliado neste estudo, mas que segundo Torres Carrasco e Puertas (2017), tem efeito significativo na resistência de pastas de vidro ativadas por álcalis é a temperatura de cura e a umidade relativa. Curas térmicas por 20h em torno de 85 ± 2 °C e 6,5% de umidade relativa produzem pastas com resistências maiores de 50% a 75%, em comparação ao mesmo tempo e temperatura de cura, mas, com 99% de umidade relativa. Neste estudo, a cura ocorre em temperatura ambiente e a umidade relativa de Porto Velho/RO, de acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2023), varia de 40% a 100%, com média de 70%.

Logo, nas condições estudadas desta Fase, não seria viável tecnicamente a aplicação do compósito com cimento alternativo para tratamento de taludes, com nenhuma das variações estudadas por não atenderem ao critério mínimo de resistência a compressão a 7 dias e nem o critério máximo de perda de massa.

5.4. Fase 4: Resultados do compósito com cimento alternativo com adição de cal, com solo RCCR diferente

5.4.1. Caracterização dos novos resíduos reciclados

Para o início da Fase 4, foi necessário obter mais resíduos da construção civil reciclados, que funciona com solo neste estudo. Porém, a única empresa recicladora de resíduos de Porto Velho suspendeu as suas operações de britagem dos resíduos em meados de março/23 devido a problemas no britador, falta de matéria prima e período de chuvas.

Para continuar a pesquisa, recolheu-se os restos do material que ainda estavam disponíveis, porém, conforme análise granulométrica apresentada a seguir, o material era diferente daquele utilizado das fases anteriores desta pesquisa, em função da dinâmica do recebimento de resíduos na usina de reciclagem.

A Figura 78 apresenta o resultado do material retido nas peneiras após a lavagem. Este novo material possui: 6,2% de pedregulho, 8,0% de areia grossa, 83,9% de areia média; 1,6% de areia fina e 0,4% de silte + argila.

A curva granulométrica AASHTO está representada na Figura 79. Importante lembrar que, a PCA (1969) recomenda que o solo utilizado como matéria prima deve conter no mínimo 20% de pedregulhos para a utilização em recursos hídricos. Assim, como o resultado obtido foi de apenas 6,2% de pedregulhos, o resíduo reciclado não atende à esta recomendação.

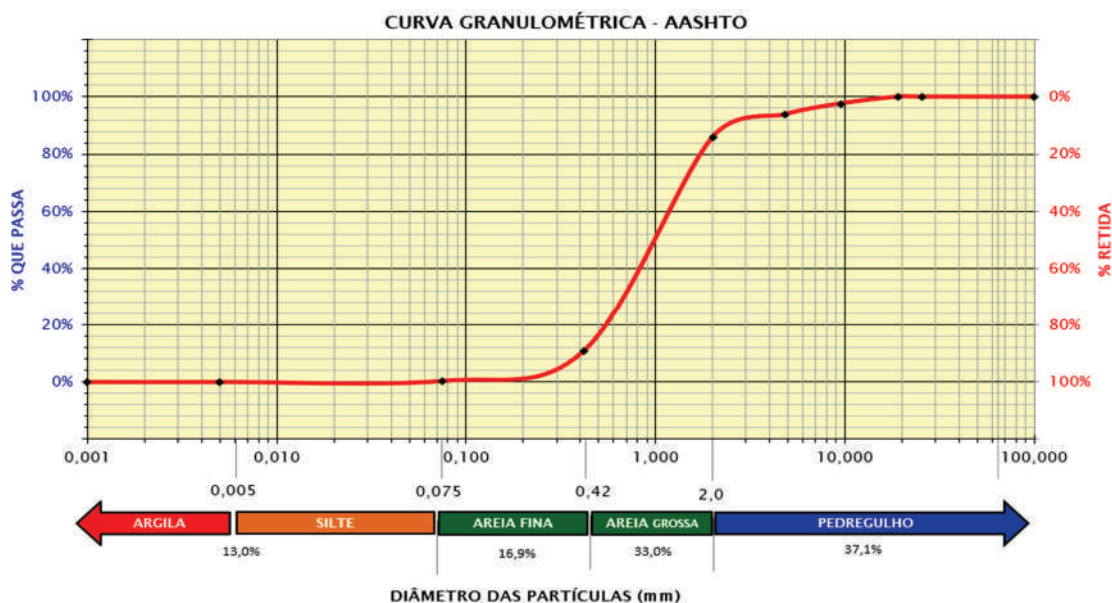
Figura 78. Material retido após a lavagem nas diferentes peneiras.



Com base nos resultados obtidos, pode-se caracterizar o material reciclado, conforme a metodologia AASHTO (M 145), como: **A-2-4**, pois, apenas 0,35% passaram na peneira #200 (0,075mm), $LL_{\text{máximo}} = 40$ e $IP_{\text{máximo}} = 10$. Caracteriza-se por predominância de areia e areia siltosa, com Índice de Grupo - $IG = 0$ e classificado de

excelente a bom para o uso como subleito na pavimentação. Já no sistema unificado de classificação de solo (Unified Soil Classification System - SUCS), o material reciclado foi classificado como: SP - areia mal graduada com pouco fino.

Figura 79. Curva granulométrica AASHTO da areia reciclada utilizada na Fase 4.



Richards e Hadley (2006) descreveu algumas características para um solo poder ser utilizado como solo cimento para o tratamento de taludes fluviais. Conforme os resultados obtidos, o material reciclado analisado **não atendeu à estas características**, como demonstra o Quadro 35.

Quadro 35. Comparação das características e os resultados obtidos para uso do solo utilizado na Fase 4.

Características (Richards e Hadley, 2006)	Resultado	Atende
Solo contenha nenhum material retido em uma peneira 2" (50 mm)	Material retido peneira 2" = 0	Sim
Pelo menos 55% do material passa pela peneira nº 4 (4,75 mm)	Material passado na peneira nº 4 = 93,8%	Sim
Entre 5% e 35% passem na peneira nº 200 (0,075 mm)	Material passado na peneira nº 200 (0,075 mm) = 0,35%	Não

Já as recomendações do antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1971), para o uso de solo cimento para o tratamento de taludes de estradas, foram atendidas, apesar da aplicação do estudo ser para taludes fluviais:

- O solo não deveria ter material retido na peneira 1”': não houve material retido na peneira 1”';
- No máximo 30% de material retido na peneira de 4,8mm: passaram 93,8%, ficando retidos 6,2% na peneira 4”'.

Apesar do material não atender às especificações de Richards e Hadley (2006), foram moldados 10 corpos de prova (1 para cada teor e variação do ativador), com as quantidades (em massa) conforme o Quadro 36, para a realização apenas os ensaios de compressão simples a 7 dias. A Figura 80 demonstra a pesagem dos materiais para a confecção do corpo de prova PVCHidealHS.

Quadro 36. Composição dos corpos de prova (4ª Fase), em massa (g).

Compósito	Teor (pó vidro)	Solo	Precusores		Ativadores		Água	
		RCC Reciclado	Pó Vidro	Cal hidratada	Hid. Sódio	Hid. Sódio + Silicato		
PVCH-5HS	5%	2.850,0	150,0	64,3	96,4		367,6	12,9%
PVCH-5HSSS	5%	2.850,0	150,0	64,3		96,4	367,6	12,9%
PVCH-3HS	7%	2.790,0	210,0	90,0	135,0		368,0	13,2%
PVCH-3HSSS	7%	2.790,0	210,0	90,0		135,0	368,0	13,2%
PVCHidealHS	10%	2.700,0	300,0	128,6	192,8		297,0	11,0%
PVCHidealHSSS	10%	2.700,0	300,0	128,6		192,8	297,0	11,0%
PVCH+3HS	13%	2.610,0	390,0	175,5	254,5		404,6	15,5%
PVCH+3HSSS	13%	2.610,0	390,0	175,5		254,5	404,6	15,5%
PVCH+5HS	15%	2.550,0	450,0	192,8	289,3		437,5	17,5%
PVCH+5HSSS	15%	2.550,0	450,0	192,8		289,3	437,5	17,5%

Figura 80. Pesagem material para confecção do corpo de prova PVCHidealHS.



(a) Pó de vidro

(b) cal hidratada

(c) solução hidróxido de sódio

5.4.2. Resistência a compressão simples

Os ensaios de resistência a compressão simples foram realizados com 7 dias, para cada teor de cimento estudado e variação do ativador. O corpo de prova PVCH+5HSSS quebrou-se (Figura 81) durante o processo de desmoldagem e não se obteve o seu resultado.

Figura 81. Corpo de prova PVCH+5HSSS (15%), que se quebrou ao ser desmoldado.



O Quadro 37 apresenta os resultados obtidos de compressão simples a 7 dias.

Quadro 37. Resultados dos ensaios de resistência a compressão simples a 7 dias – Fase 4.

Compósito	Teor	Resultado (MPa)
PVCH-5HS	5%	0,8
PVCH-5HSSS	5%	1,0
PVCH-3HS	7%	0,9
PVCH-3HSSS	7%	0,8
PVCHidealHS	10%	1,0
PVCHidealHSSS	10%	1,6
PVCH+3HS	13%	0,9
PVCH+3HSSS	13%	1,1
PVCH+5HS	15%	0,8
PVCH+5HSSS	15%	--

5.4.3. Discussão dos resultados da Fase 4

Os resultados desta Fase serviram para comprovar que o solo utilizado deve estar dentro das características propostas por Richards e Hadley (2006) para ser utilizado como solo cimento.

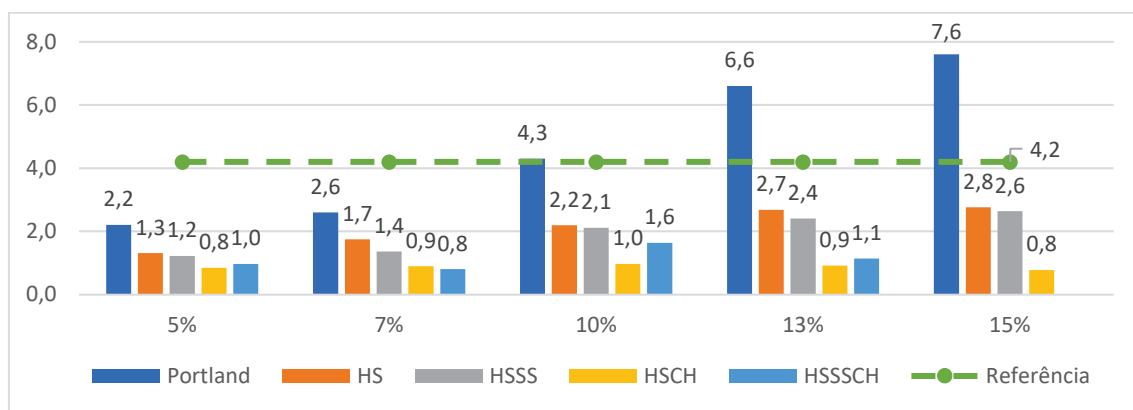
O solo utilizado na Fase 4, resíduo da construção civil reciclado diferente das fases anteriores, foi classificado na metodologia AASHTO (M 145), como **A-2-4**, e como recomendado, não poderia ser utilizado como solo cimento. Este fato se deve, de forma geral, devido à falta de agregados graúdos em sua granulometria bem como material fino e conseqüentemente reduzindo a resistência a compressão.

Os resultados obtidos foram os piores até o momento, em relação a resistência a compressão simples. Todos muito abaixo do que se exige, que seria 4,2 MPa com 7 dias. O melhor desempenho foi do compósito PVCH+3HSSS (13%) que atingiu 1,63 MPa (menos da metade exigida). De modo geral, os compósitos com ativadores com solução de hidróxido de sódio + silicato de sódio teve maiores resistências (comparando os mesmos teores) em relação ao ativador somente de hidróxido de sódio.

A

Figura 82 demonstra o comparativo com os resultados anteriores. Observa-se que as resistências alcançadas na 4ª. Fase foram bem menores das obtidas na 3ª. Fase, apesar das alterações realizadas: pó de vidro mais fino (passante na peneira #200), aumento de massa do pó de vidro proporcional em cada corpo de prova e acréscimo da cal hidratada. Para o ativador hidróxido de sódio, em média, as resistências foram 45% menores, enquanto, para o ativador hidróxido de sódio e silicato de sódio, em média, as resistências foram 63% menores.

Figura 82. Comparação dos resultados obtidos (Fase 4). Compressão simples a 7 dias.



HS = hidróxido de sódio; HSSS = hidróxido de sódio + silicato de sódio

HSCH = hidróxido de sódio + cal hidratada

HSSSCH = hidróxido de sódio + silicato de sódio + cal hidratada

Pode-se concluir com o estudo desta Fase que a granulometria do solo utilizado para a formação do compósito influencia diretamente na sua resistência, sendo que o solo A-2-4 não seria adequado para o tratamento de taludes fluviais, pois, não apresentou a resistência a compressão (7 dias) mínima recomendada de 4,2 MPa.

5.5. Fase 5: Resultados do compósito com cimento alternativo com adição de cal

5.5.1. Caracterização dos novos materiais reciclados, após reinício da operação da recicladora

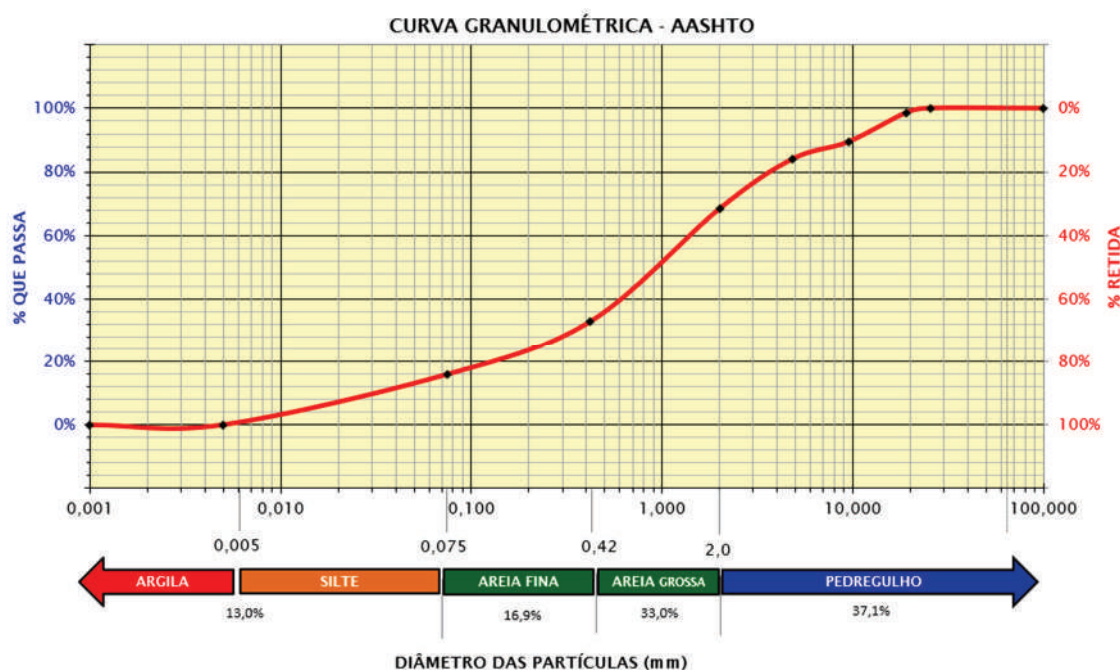
Para o início da Fase 5, obteve-se mais resíduos da construção civil reciclado, que funciona com solo neste estudo. Após a volta da operação da empresa recicladora de resíduos de Porto Velho, realizou-se a análise granulométrica apresentada a seguir, com material semelhante ao utilizado das primeiras três fases da pesquisa.

O material possui: 31,7% de pedregulho, 33,0% de areia grossa, 16,9% de areia fina e 13,0% de silte + argila.

A curva granulométrica AASHTO está representada na Figura 83. Importante lembrar que, a PCA (1969) recomenda que o solo utilizado como matéria prima deve conter no mínimo 20% de pedregulhos para a utilização em recursos hídricos. Assim, como o resultado obtido foi de 37,1% de pedregulhos, o resíduo reciclado atende à esta recomendação.

Com base nos resultados obtidos, pode-se caracterizar o material reciclado, conforme a metodologia AASHTO (M 145), como: **A-1-b**, pois, 32,8% do material reciclado analisado passou na peneira #40 (0,42mm) e 15,9% passou na peneira #200 (0,075mm) e $IP=0$. De acordo com esta classificação, o solo tipo A-1-b: passa no máximo 50% na peneira #40 e no máximo 25% na peneira #200m e $IP<6$. Caracteriza-se por fragmentos de pedra, pedregulhos e areia, com Índice de Grupo - $IG = 0$ e classificado de excelente a bom para o uso como subleito na pavimentação. Já no sistema unificado de classificação de solo (Unified Soil Classification System - SUCS), o material reciclado foi classificado como: areia siltosa com pedregulhos (SM com $>15\%$ de pedregulho), semelhante ao material utilizado nas 3 primeiras fases desta pesquisa.

Figura 83. Curva granulométrica AASHTO da areia reciclada utilizada na Fase 5.



Richards e Hadley (2006) descreveu algumas características para um solo poder ser utilizado como solo cimento. Conforme os resultados obtidos, o material reciclado analisado **atendeu à estas características**, como demonstra o Quadro 38.

Quadro 38. Comparação das características e os resultados obtidos para uso do solo utilizado na Fase 5.

Características (Richards e Hadley, 2006)	Resultado	Atende
Solo contenha nenhum material retido em uma peneira 2" (50 mm)	Material retido peneira 2" = 0	Sim
Pelo menos 55% do material passa pela peneira nº 4 (4,75 mm)	Material passado na peneira nº 4 = 93,8%	Sim
Entre 5% e 35% passem na peneira nº 200 (0,075 mm)	Material passado na peneira nº 200 (0,075 mm) = 15,9%	Sim

As recomendações do antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1971) para o uso de solo cimento para o tratamento de taludes de estradas, também **foram atendidas**, apesar da aplicação do estudo ser para taludes fluviais:

- O solo não deveria ter material retido na peneira 1": não houve material retido na peneira 1";
- No máximo 30% de material retido na peneira de 4,8mm: passaram 83,9%, ficando retidos 16,1% na peneira 4".

5.5.2. Resistência a compressão simples

Os ensaios de resistência a compressão simples foram realizados com 7 dias, para cada variação e teor de cimento alternativo estudado desta fase, moldados na umidade ótima, conforme demonstra a Figura 84. Observou-se o surgimento de eflorescências nos corpos de prova, de forma que, quanto maior o teor, mais nítida esta observação.

Figura 84. Corpos de prova ensaiados a 7 dias.



(a) HSSSCH 5% (b) HSSSCH 7% (c) HSSSCH 10% (d) HSSSCH 13% (e) HSSSCH 15%



(f) HSCH 5% (g) HSCH 7% (h) HSCH 10% (i) HSCH 13% (j) HSCH 15%

O Quadro 39 apresenta os resultados obtidos dos ensaios de compressão simples a 7 dias.

Quadro 39. Resultados dos ensaios de compressão simples a 7 dias – Fase 5.

Compósito	Teor	Resultado (MPa)
PVCH-5HS	5%	0,5
PVCH-5HSSS	5%	0,5
PVCH-3HS	7%	0,5
PVCH-3HSSS	7%	0,4
PVCHidealHS	10%	1,0
PVCHidealHSSS	10%	1,3
PVCH+3HS	13%	1,1
PVCH+3HSSS	13%	1,0
PVCH+5HS	15%	1,0
PVCH+5HSSS	15%	1,1

De acordo com Richards e Hadley (2006), para solo cimento aplicados em recursos hídricos, a resistência a compressão simples em 7 dias de cura deve ser, no mínimo, de 4,2 MPa. O Quadro 40 apresenta a avaliação dos resultados em relação a este requisito.

Quadro 40. Resultados dos ensaios a compressão simples, em Mpa (fase 5).

Compósito	Teor	Dias de cura	
		7 dias	
		Resultado	Atende *
PVCH-5HS	5%	0,5	Não
PVCH-5HSSS	5%	0,5	Não
PVCH-3HS	7%	0,5	Não
PVCH-3HSSS	7%	0,4	Não
PVCHidealHS	10%	1,0	Não
PVCHidealHSSS	10%	1,3	Não
PVCH+3HS	13%	1,1	Não
PVCH+3HSSS	13%	1,0	Não
PVCH+5HS	15%	1,0	Não
PVCH+5HSSS	15%	1,1	Não

* Critério de Richards e Hadley (2006)

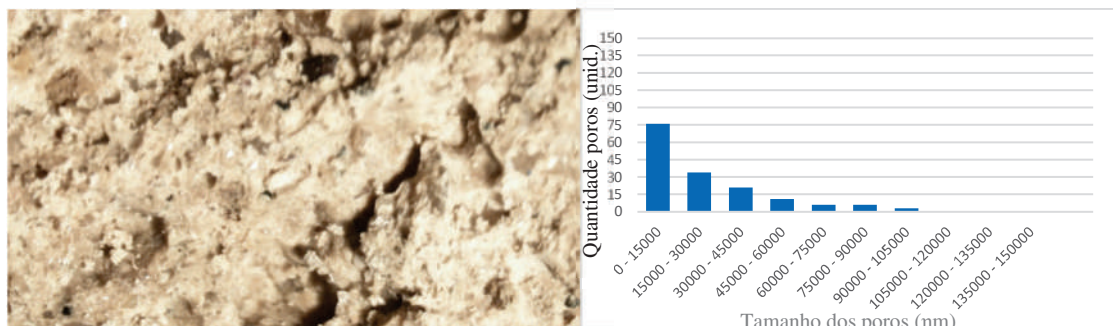
5.5.3. Discussão dos Resultados – Fase 5

Os resultados desta Fase serviram para comprovar que, apesar do solo utilizado estar dentro das características propostas por Richards e Hadley (2006) para ser utilizado

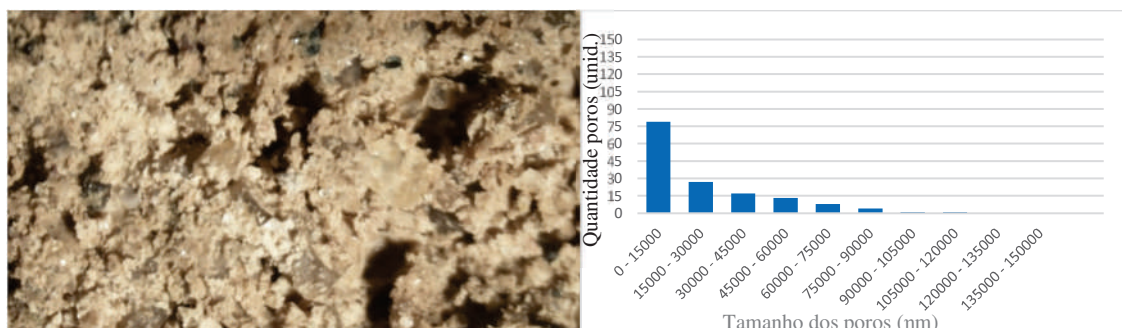
como solo cimento, os resultados não atenderam ao objetivo proposto, pelos motivos abaixo.

A alta concentração utilizada do hidróxido de sódio, adotado como 12M, gera um ambiente altamente alcalino ocasionando baixas resistências a compressão, provavelmente com o aumento da concentração de Al^{3+} e Na^+ nas regiões esponjosas, sugerindo, dessa forma, que a desestabilização estaria ocorrendo nas cadeias aluminossilicatadas, como concluiu o estudo de Vargas *et al.* (2009). Fato também observado no estudo de Redden e Neithalath (2014), que concluíram que a resistência diminui quando maior alcalinidade foi utilizada no processo de ativação utilizando o pó de vidro como precursor e hidróxido de sódio como ativador (4M, 6M e 8M), demonstrada por uma microestrutura porosa e desconectada. Fato este demonstrado na Figura 85 das imagens microscópicas realizadas do material com 7 dias de cura desta Fase 5 e quantificando-se os tamanhos dos poros. Observa-se que, quanto maior o teor de cimento alternativo, aumenta-se a quantidade de poros inferiores a 15.000 ηm , diminuindo-se a quantidade de poros acima de 45.000 ηm .

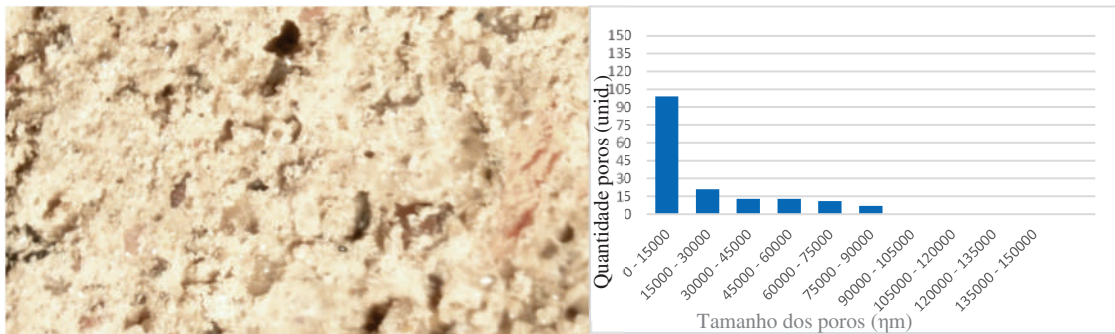
Figura 85. Imagens microscópicas e quantificação dos poros – material Fase 5.



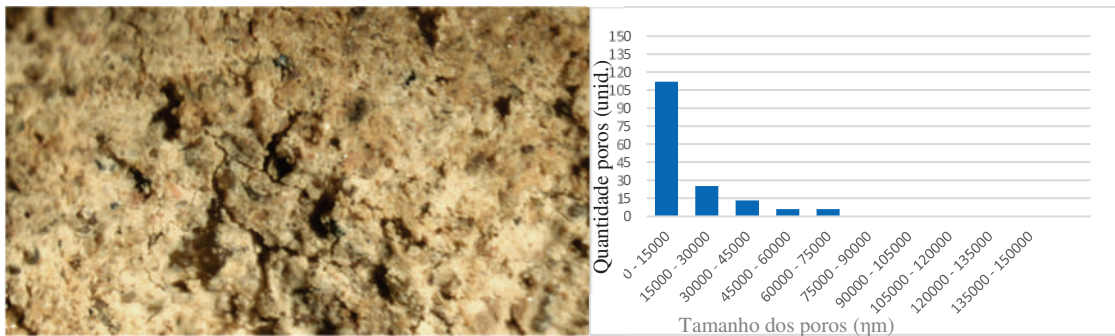
(a) HS – 5%



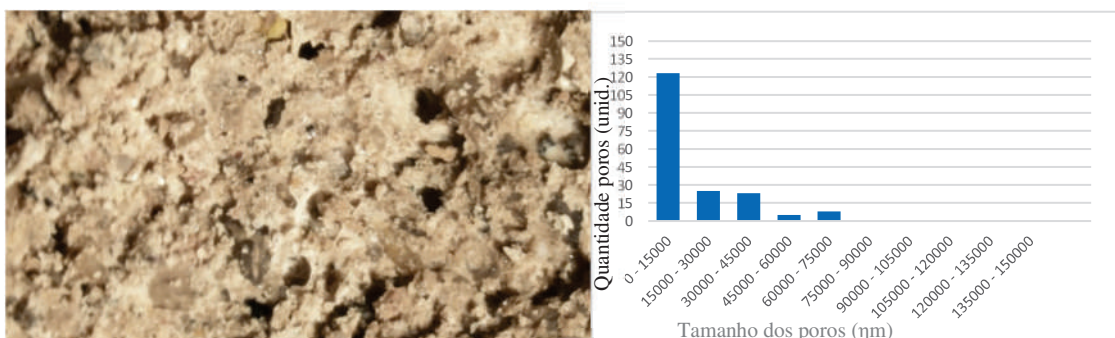
(b) HS – 7%



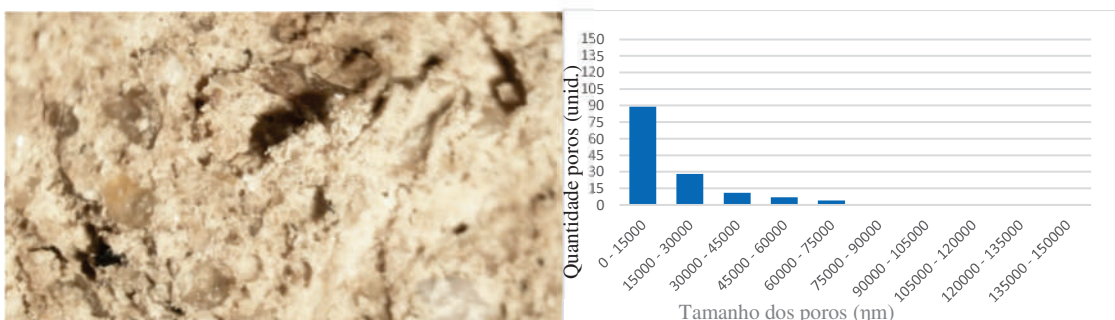
(c) HS – 10%



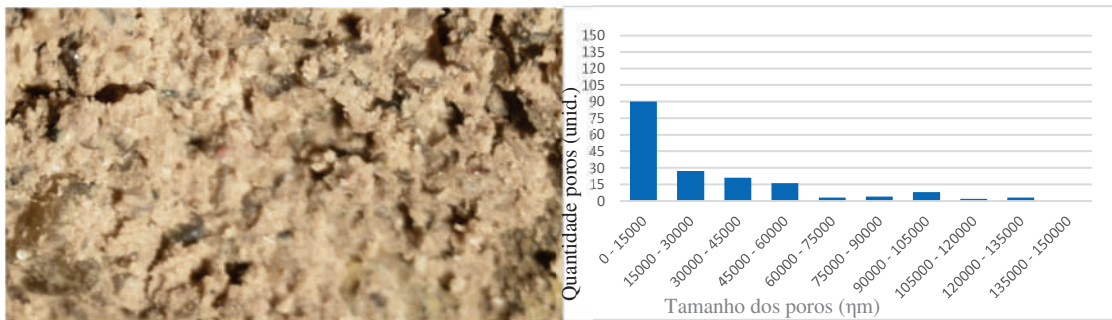
(d) HS - 13%



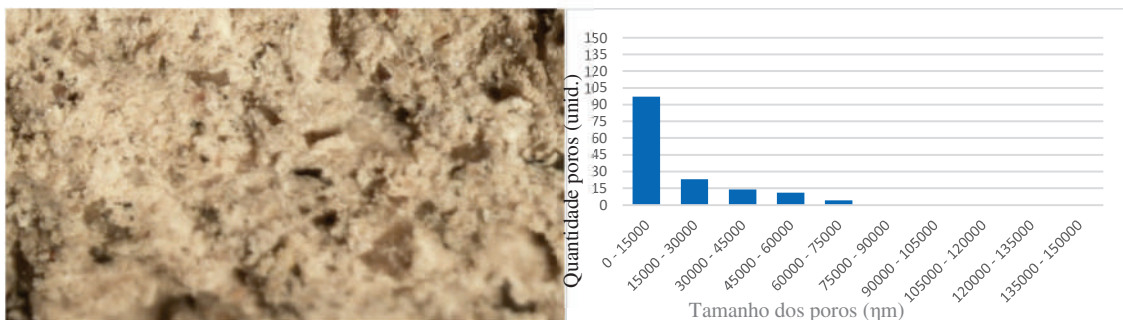
(e) HS – 15%



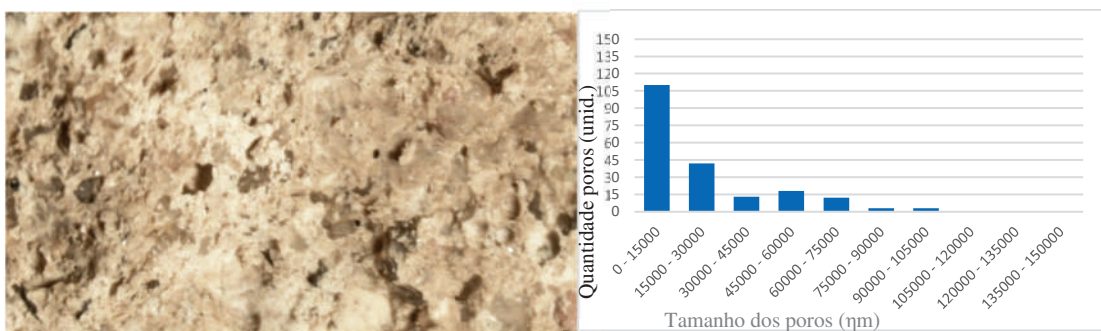
(f) HSSS – 5%



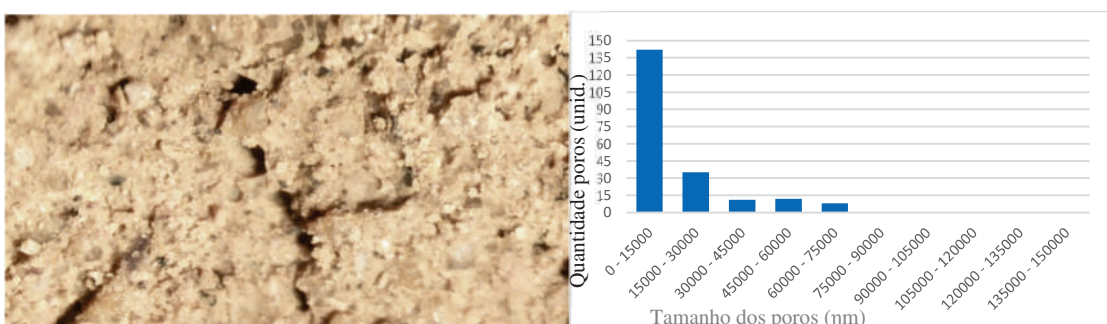
(g) HSSS – 7%



(h) HSSS – 10%



(i) HSSS – 13%



(j) HSSS – 15%

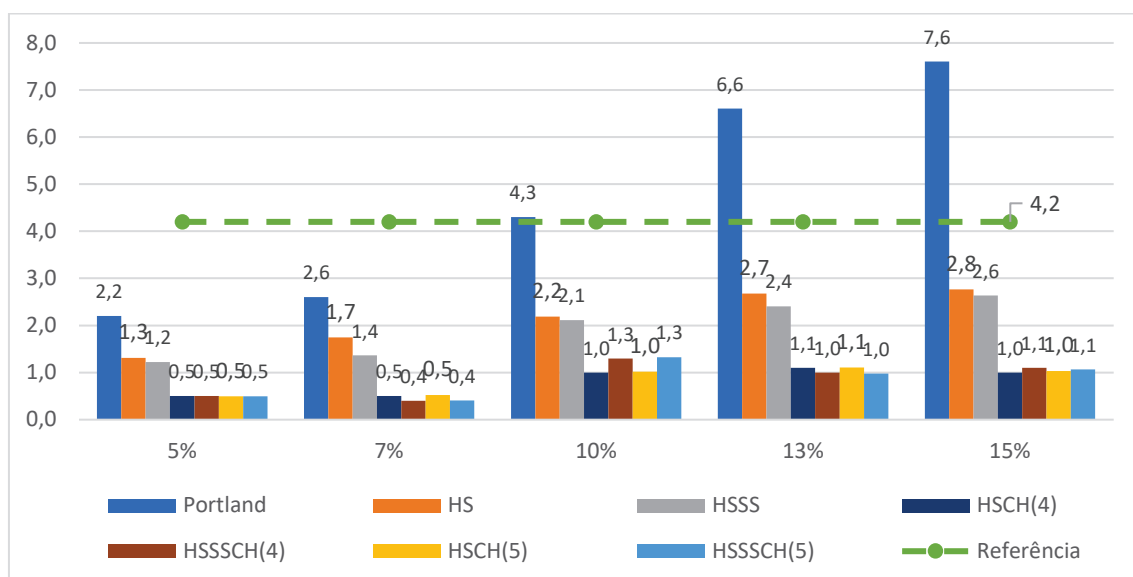
Outro indício que justifica as baixas resistências obtidas nos ensaios de compressão simples foi o surgimento de eflorescências nos corpos de prova, como visto

na Figura 84, indicando um ambiente altamente alcalino, corroborando com as afirmações de vários autores (PROVIS, 2009; FERNANDEZ JIMENEZ, PALOMO E PUERTAS, 1999; VELAZQUEZ *et al*, 2016; MAAZE e SHRIVASTAVA, 2023).

Em relação a resistência a compressão simples, todos os resultados ficaram muito abaixo do que se exige, que seria 4,2 MPa com 7 dias. O melhor desempenho foi do compósito PVCHidealHSSS (10%) que atingiu 1,3 MPa (menos da metade exigida).

A Figura 86 demonstra o comparativo com os resultados anteriores. Observa-se que as resistências alcançadas na 5ª. Fase foram praticamente iguais às obtidas na 4ª. Fase.

Figura 86. Comparação dos resultados obtidos (Fase 5). Compressão simples a 7 dias.



HS = hidróxido de sódio; HSSS = hidróxido de sódio + silicato de sódio

HSCH(4) = hidróxido de sódio + cal hidratada (fase 4)

HSSSCH(4) = hidróxido de sódio + silicato de sódio + cal hidratada (fase 4)

HSCH(5) = hidróxido de sódio + cal hidratada (fase 5)

HSSSCH(5) = hidróxido de sódio + silicato de sódio + cal hidratada (fase 5)

Pode-se concluir com o estudo desta Fase que, mesmo com o solo adequado, as reações álcalis ativadas do cimento alternativo devem ter as condições adequadas em relação a quantidade de substâncias alcalinas, influenciando diretamente na sua resistência, não sendo nenhum dos compósitos, estudados nesta Fase, adequados para o tratamento de taludes fluviais, pois, não apresentou a resistência a compressão (7 dias) mínima recomendada de 4,2 MPa.

5.6. Fase 6: Resultados do compósito com cimento alternativo com adição de cal, concentração de 5% de Na₂O ou 3,75M NaOH

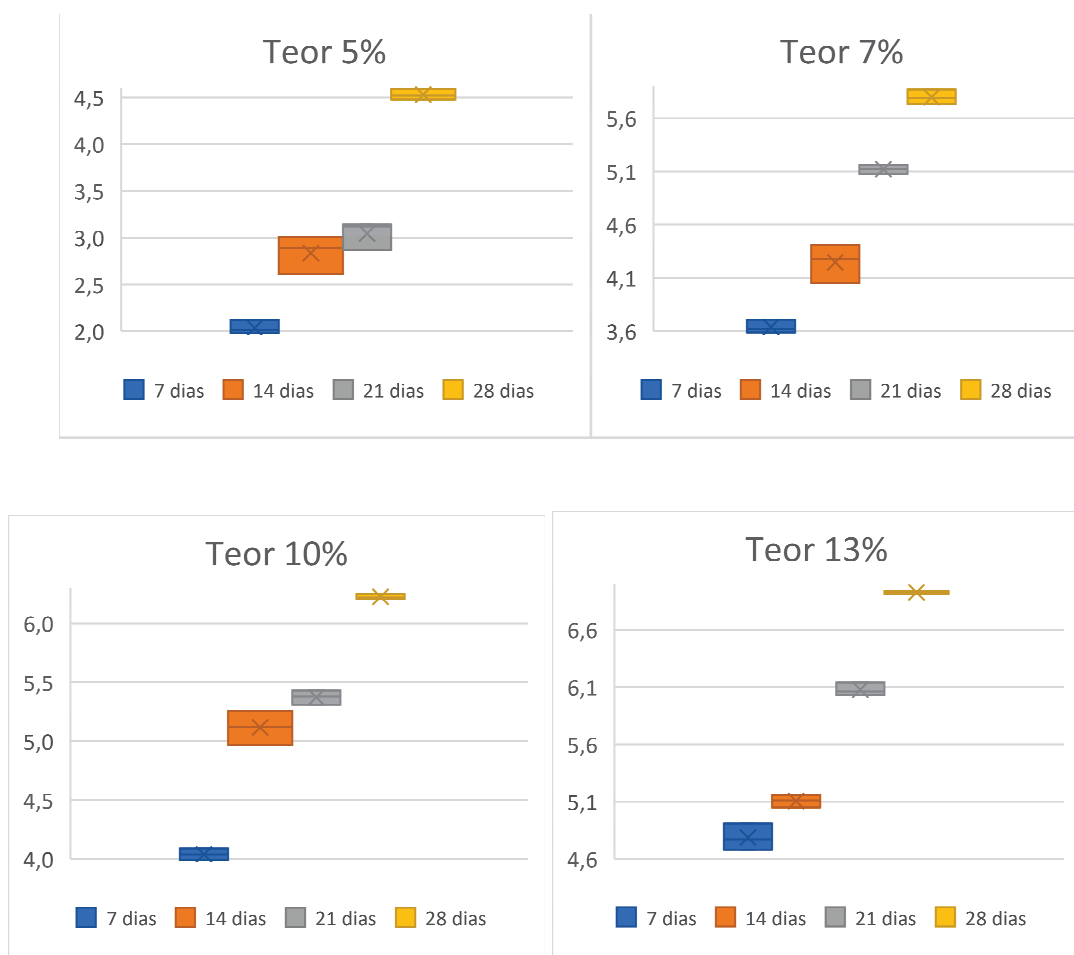
5.6.1. Resistência a compressão simples

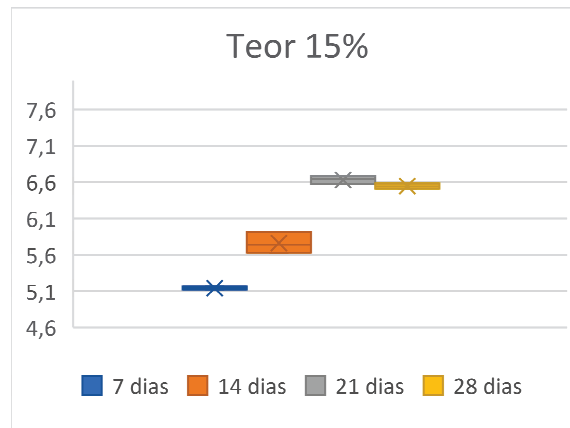
5.6.1.1. Ativador Hidróxido de sódio

Os ensaios de resistência a compressão simples foram realizados com 7, 14, 21 e 28 dias, para cada variação e teor de cimento alternativo estudado, moldados na umidade ótima.

A Figura 87 apresentam os resultados obtidos. Nenhum resultado teve um desvio igual ou maior à 10% em relação à resistência média e, portanto, conforme determina a metodologia da ABCP-SC-4 (ABCP, 2004), nenhum resultado foi desprezado.

Figura 87. Resultados de resistência a compressão simples – ativador HS (fase 6).





De acordo com Richards e Hadley (2006), para solo cimento aplicados em recursos hídricos, a resistência a compressão simples em 7 dias de cura deve ser, no mínimo, de 4,2 MPa. O Quadro 41 apresenta a avaliação dos resultados (média obtida em cada teor de cimento) em relação a este requisito.

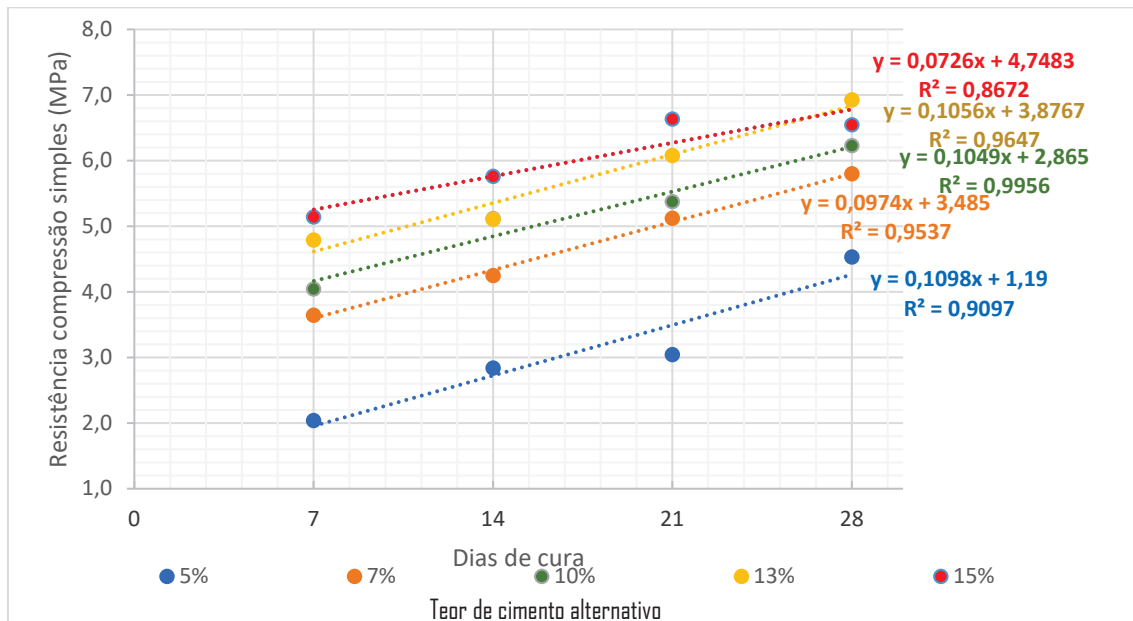
Quadro 41. Resultados dos ensaios a compressão simples, em Mpa, para ativador hidróxido de sódio (fase 6).

Teor de cimento	Dias de cura	
	7 dias	
	resultado	Atende *
5%	2,0	Não
7%	3,6	Não
10%	4,0	Não
13%	4,8	Sim
15%	5,1	Sim

* Critério de Richards e Hadley (2006)

A Figura 88 apresenta graficamente a evolução dos resultados (média dos 3 resultados por teor de cimento) e a regressão linear simples para cada teor de cimento em função da resistência a compressão simples obtida nos ensaios com o ativador hidróxido de sódio.

Figura 88. Resultados das médias dos ensaios a compressão simples e regressão linear, para o ativador hidróxido de sódio (fase 6).

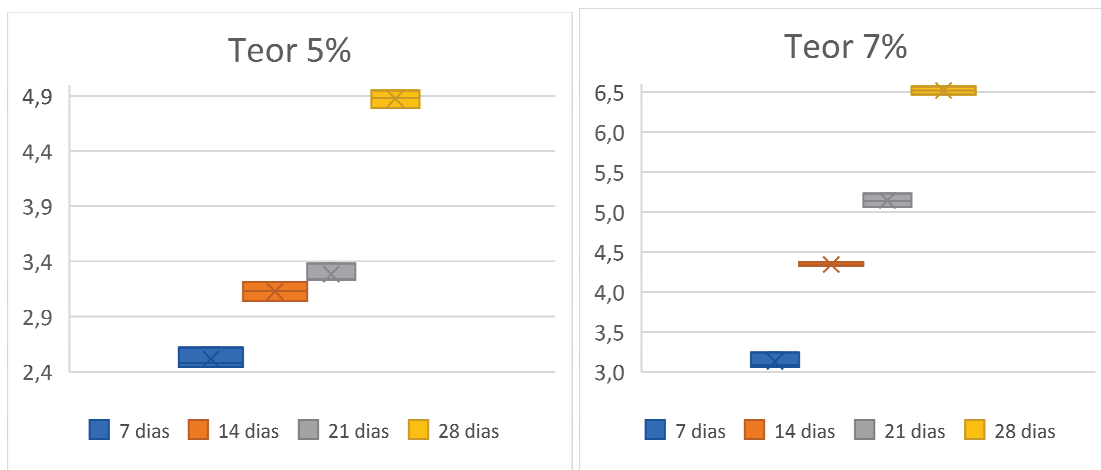


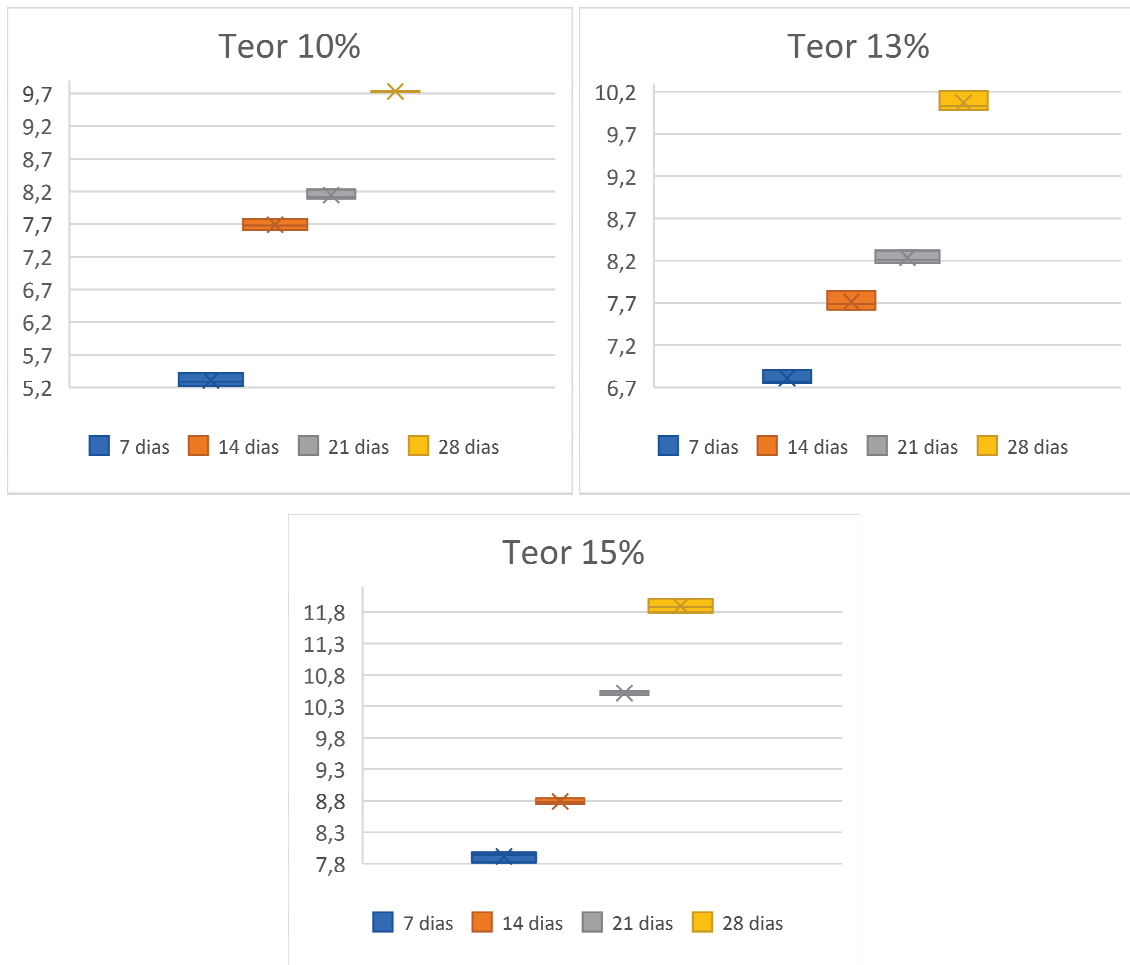
5.6.1.2. Ativador Hidróxido de sódio + silicato de sódio

Os ensaios de resistência a compressão simples foram realizados com 7, 14, 21 e 28 dias, para cada variação e teor de cimento alternativo estudado, moldados na umidade ótima.

A Figura 89 apresentam os resultados obtidos. Nenhum resultado teve um desvio igual ou maior à 10% em relação à resistência média e, portanto, conforme determina a metodologia da ABCP-SC-4 (ABCP, 2004), nenhum resultado foi desprezado.

Figura 89. Resultados de resistência a compressão simples – ativador HSSS (fase 6).





De acordo com Richards e Hadley (2006), para solo cimento aplicados em recursos hídricos, a resistência a compressão simples em 7 dias de cura deve ser, no mínimo, de 4,2 MPa. O Quadro 42 apresenta a avaliação dos resultados (média obtida em cada teor de cimento) em relação a este requisito.

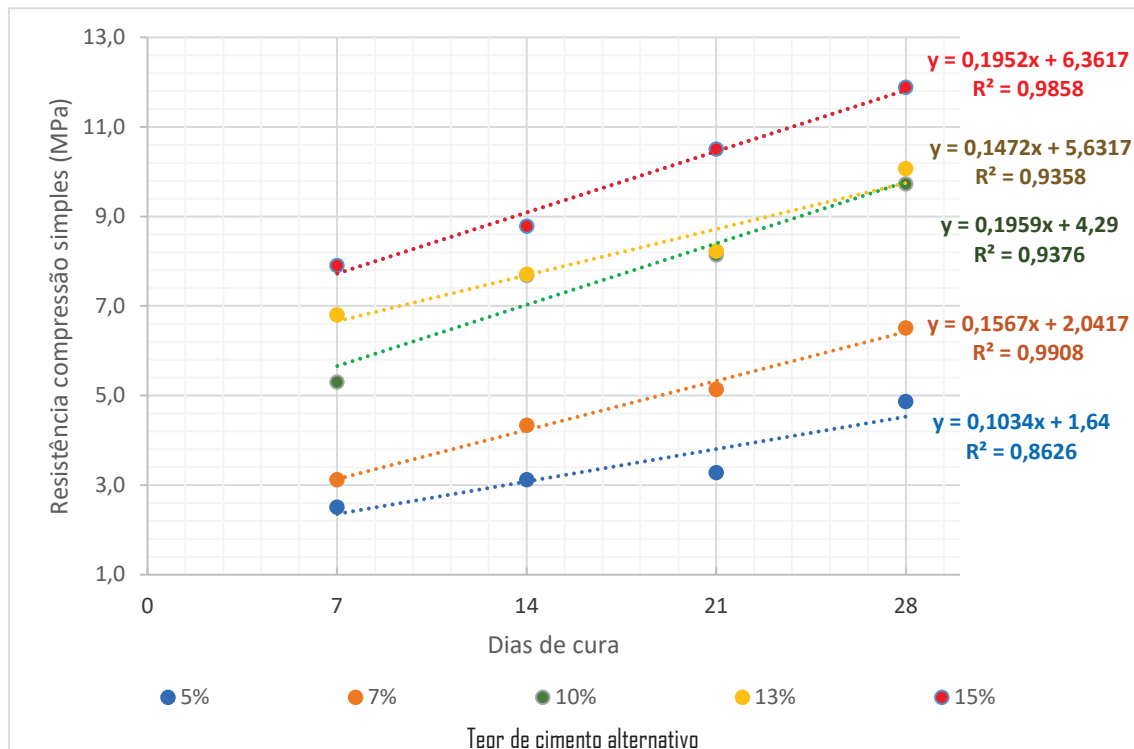
Quadro 42. Resultados dos ensaios de resistência a compressão simples, em Mpa, para ativador hidróxido de sódio + silicato de sódio (fase 6).

Teor de cimento	Dias de cura	
	7 dias	
	resultado	Atende *
5%	2,5	Não
7%	3,1	Não
10%	5,3	Sim
13%	6,8	Sim
15%	7,9	Sim

* Critério de Richards e Hadley (2006)

A Figura 90 apresenta graficamente a evolução dos resultados (média dos 3 resultados por teor de cimento) e a regressão linear simples para cada teor de cimento em função da resistência a compressão simples obtida nos ensaios com o ativador hidróxido de sódio + silicato de sódio.

Figura 90. Resultados das médias dos ensaios de resistência a compressão simples e regressão linear, para o ativador hidróxido de sódio + silicato de sódio (fase 6).



5.6.2. Durabilidade – perda de massa

5.6.2.1. Ativador Hidróxido de sódio

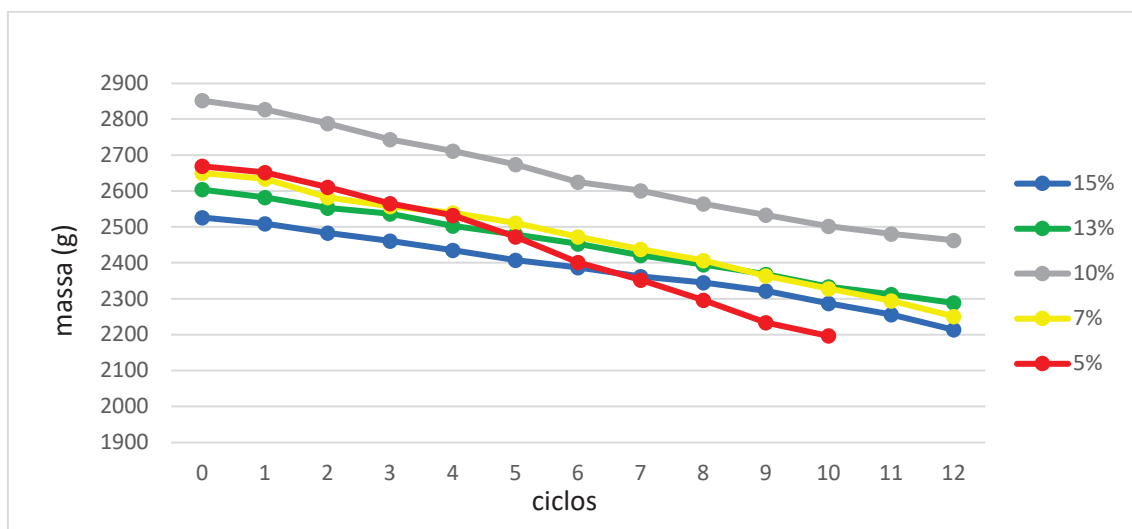
Os ensaios foram realizados, seguindo a metodologia da ABCP-SC-3 (ABCP, 2004), para cada corpo de prova do compósito com os teores de cimento alternativo estudados (5%, 7%, 10%, 13% e 15%) demonstradas na Figura 91, moldados com a sua umidade ótima.

Figura 91. Corpos de prova ensaiados, ativador HS.



Para cada compósito com cimento alternativo com ativador de hidróxido de sódio, os resultados de cada ciclo geraram um gráfico de perda de massa após cada ciclo de molhagem e secagem com escovação, como demonstrado na Figura 92, onde o zero corresponde à massa inicial seca, e posteriormente a massa seca final de cada ciclo (1 a 12). Ressalta-se que, somente o corpo de prova do teor de 5% não foi possível concluir todos os 12 ciclos do ensaio, pois, desintegrou-se no 10º ciclo.

Figura 92. Perda de massa, ativador HS (fase 6).



Conforme a metodologia da ABCP-SC-3 (ABCP, 2004), para a correção da massa seca final do corpo de prova, deve-se descontar um percentual de 1,5% para um solo classificado como A-1 (AASHTO), como massa da água retida no corpo de prova.

De acordo com a PCA (1969), para um solo classificado como A-1-b (AASHTO), a perda de massa máxima seria de 14%.

Os ensaios de durabilidade por molhagem e secagem obtiveram os resultados demonstrados no Quadro 43, para o compósito com o ativador de hidróxido de sódio (HS).

Quadro 43. Resultados dos ensaios de durabilidade realizados, ativador HS.

teor de cimento	5%	7%	10%	13%	15%
Massa seca inicial (g)	2669	2650	2852	2604	2526
massa seca final (g)	2197 ⁽¹⁾	2251	2463	2289	2214
1,5% água retida no cp (g)	33	34	37	34	33
massa seca final corrigida (g)	2164	2217	2426	2255	2181
perda massa (%)	18,93%	16,33%	14,93%	13,43%	13,67%
Atende PCA (1969)	não	não	não	sim	sim

Observação: (1) massa final do 10º ciclo.

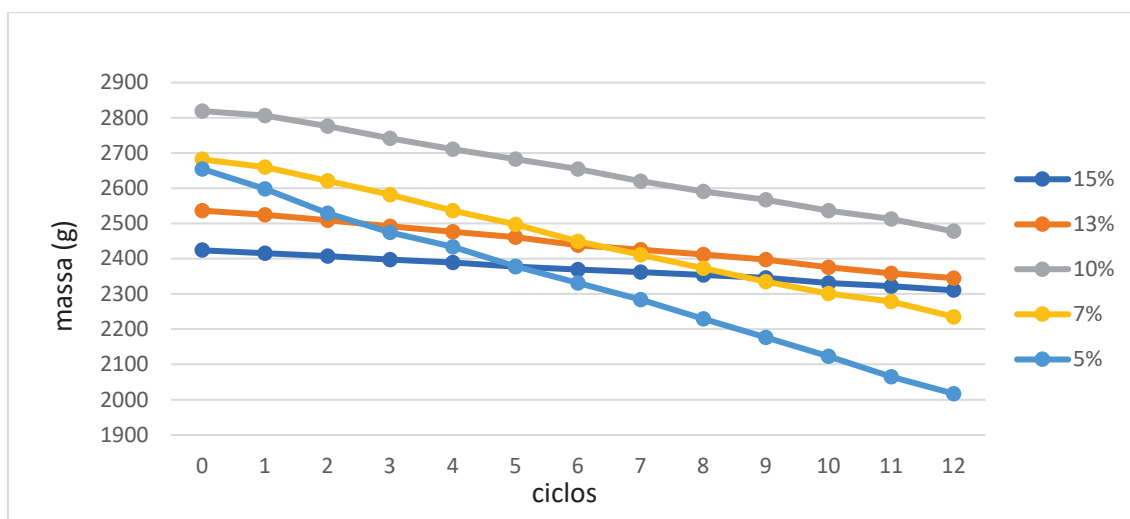
5.6.2.2. Ativador Hidróxido de sódio + silicato de sódio

Os ensaios foram realizados, seguindo a metodologia da ABCP-SC-3 (ABCP, 2004), para cada corpo de prova do compósito com os teores de cimento alternativo estudados (5%, 7%, 10%, 13% e 15%) demonstradas na Figura 93, moldados com a sua umidade ótima.

Figura 93. Corpos de prova ensaiados (ativador HSSS).



Para cada compósito com cimento alternativo com o ativador de hidróxido de sódio + silicato de sódio, os resultados de cada ciclo geraram um gráfico de perda de massa após cada ciclo de molhagem e secagem com escovação, como demonstrado na Figura 94, onde o zero corresponde à massa inicial seca, e posteriormente a massa seca final de cada ciclo (1 a 12).

Figura 94. Perda de massa, ativador HSSS - fase 6.

Conforme a metodologia da ABCP-SC-3 (ABCP, 2004), para a correção da massa seca final do corpo de prova, deve-se descontar um percentual de 1,5% para um solo classificado como A-1 (AASHTO), como massa da água retida no corpo de prova.

De acordo com a PCA (1969), para um solo classificado como A-1-b (AASHTO), a perda de massa máxima seria de 14%.

Os ensaios de durabilidade por molhagem e secagem obtiveram os resultados demonstrados no Quadro 44, para o compósito com o ativador de hidróxido de sódio + silicato de sódio (HSSS).

Quadro 44. Resultados dos ensaios de durabilidade realizados, ativador HSSS.

teor de cimento	5%	7%	10%	13%	15%
Massa seca inicial (g)	2655	2683	2819	2537	2424
massa seca final (g)	2107	2235	2478	2345	2311
1,5% água retida no cp (g)	32	34	37	35	35
massa seca final corrigida (g)	2075	2201	2441	2310	2276
perda massa (%)	21,84%	17,93%	13,42%	8,94%	6,11%
Atende PCA (1969)	não	não	sim	sim	sim

5.6.3. Discussão dos resultados da Fase 6

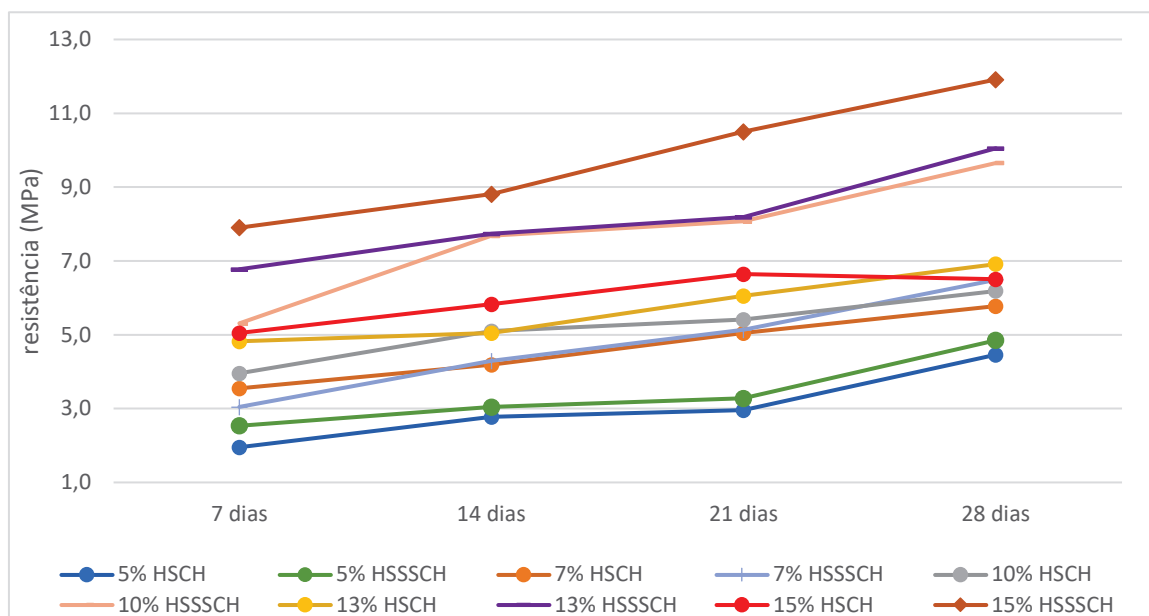
Considerando os resultados obtidos da caracterização química do pó de vidro utilizado, a composição química do silicato de sódio, as características químicas da composição da cal hidratada descritas no estudo de Batista *et al.* (2016) e a concentração utilizada de 3,75M para a elaboração da solução de hidróxido de sódio, calcula-se a razão

$\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2,30$ para esta fase para o ativador HS e $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2,91$ para o ativador HSSS.

Os resultados obtidos com o cimento alternativo foram satisfatórios para todos os compósitos com o ativador usando hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (NaOH + Na_2SO_3), com razão 1:2,5 (em massa).

Com relação à resistência a compressão simples, todos os compósitos obtiveram algum ganho na resistência ao longo do tempo, variando de 2,0 MPa a 7,9 MPa aos 7 dias até 4,5 MPa a 11,9 MPa aos 28 dias, conforme a Figura 95.

Figura 95. Resistência a compressão simples (Fase 6).



Para o ativador utilizando somente o hidróxido de sódio (HS), alguns resultados obtiveram resistência à compressão simples superior (destacados em verde) aos resultados correspondentes do cimento Portland (Fase 2), enquanto para o ativador hidróxido de sódio + silicato de sódio (HSSS), todos os resultados foram superiores, conforme demonstrado no Quadro 45. Os resultados inferiores estão destacados em vermelho.

Quadro 45. Resultados dos ensaios de resistência a compressão simples, em MPa.

Teor de cimento	7 dias			14 dias			21 dias			28 dias		
	CP	HSPV CH(6)	HSSSPV CH(6)	CP	HSPV CH(6)	HSSSPV CH(6)	CP	HSPV CH(6)	HSSSP VCH(6)	CP	HSPV CH(6)	HSSSP VCH(6)
5%	2,2	2,0	2,5	2,1	2,8	3,1	2,2	3,0	3,3	2,3	4,5	4,9
7%	2,6	3,6	3,1	2,9	4,2	4,3	3,8	5,1	5,1	4,3	5,8	6,5
10%	4,3	4,0	5,3	4,4	5,1	7,7	5,4	5,4	8,1	6,9	6,2	9,7
13%	6,6	4,8	6,8	6,6	5,1	7,7	7,0	6,1	8,2	7,7	6,9	10,1
15%	7,6	5,1	7,9	7,7	5,8	8,8	8,2	6,6	10,5	9,1	6,5	11,9

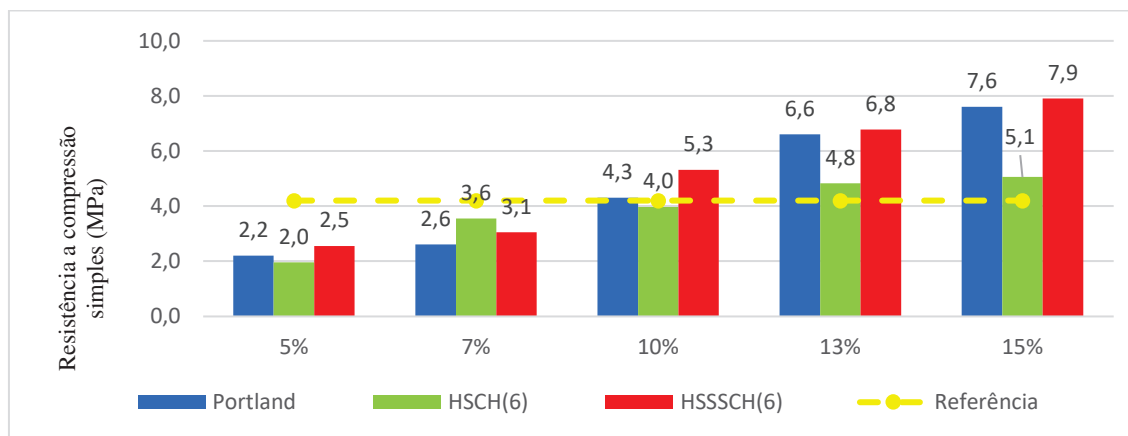
CP = Cimento Portland;

HSCH (6) = hidróxido de sódio + pó de vidro + cal hidratada (fase 6);

HSSSCH (6) = hidróxido de sódio + silicato de sódio + pó de vidro + cal hidratada (fase 6).

Analisando-se o Quadro 45, observa-se que praticamente todos os resultados com o ativador somente com hidróxido de sódio foram inferiores aos correspondentes da mistura do ativador com a mistura de NaOH + Na₂SO₃, demonstrando que, para este compósito uma relação SiO₂/Na₂O = 2,91 foi adequada. Estes resultados corroboram com os estudos de Salazar *et al* (2017) e Phoo-ngernkham *et al* (2015), em que houve a comparação entre os dois tipos de ativadores e o ativador HSSS obteve resultados maiores do que HS.

Considerando o critério de Richards e Hadley (2006), para um solo cimento aplicado em recursos hídricos, a resistência a compressão simples em 7 dias de cura deve ser, no mínimo, de 4,2 MPa, os compósitos com cimento alternativo com ativadores de hidróxido de sódio e silicato de sódio (teores de 10%, 13% e 15%) atenderam a este critério, como demonstra a Figura 96, bem como os compósitos com cimento alternativo com ativadores de hidróxido de sódio (teores de 13% e 15%).

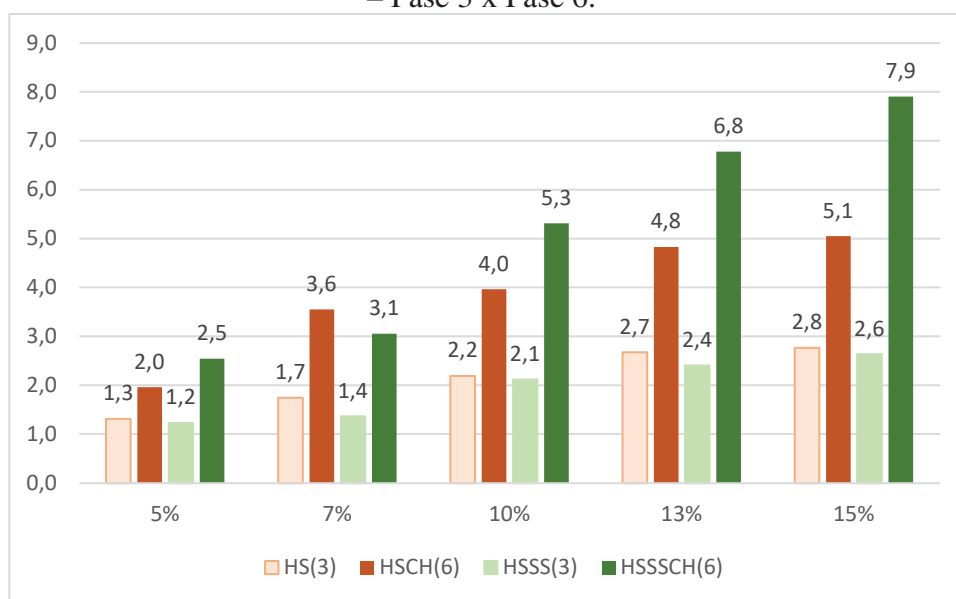
Figura 96. Resultados de resistência a compressão simples (em MPa) para cura a 7 dias.

HSCH (6) = hidróxido de sódio + pó de vidro + cal hidratada (fase 6);

HSSSCH (6) = hidróxido de sódio + silicato de sódio + pó de vidro + cal hidratada (fase 6).

As cinco alterações realizadas, em relação à Fase 3: (1) usando pó de vidro mais fino, passante na peneira #200, conforme recomendado por Nodehi e Taghvaei (2021); (2) adição de cal hidratada para otimizar o precursor, conforme já demonstrado no estudo de Lotero *et al.* (2021); (3) redução da concentração de hidróxido de sódio de 12M para 3,75M, justificado pelos estudos de Velazquez *et al.* (2016), Wang, Scrivener e Pratt (1994), Burciaga-Diaz *et al.* (2010), Lima *et al.* (2022) e Daassi-Gli (2020); (4) redução da quantidade de água utilizada, com base nos estudos de Bernal, Provis e Devender (2018), Pham *et al.* (2023), Yusslee e Beskhuroun (2023) e Nugyen *et al.* (2020), fixando a relação água/ligante em 0,40 ; (5) fixação do teor de cimento em relação à massa do pó de vidro, conforme utilizado no estudo de Islam *et al.* (2017); resultaram num aumento considerável da resistência a compressão dos compósitos da Fase 6 em relação aos resultados obtidos na Fase 3 desta pesquisa, como se observa na Figura 97. Em média, os resultados com HSCH(6) foram 179% maiores do que com HS(3) e HSSSCH(6) foram 253% maiores do que HSSS(3). Também foi superior aos estudos, comparados com os materiais semelhantes e cura na temperatura ambiente, de Velazquez *et al.* (2016) e Salazar *et al.* (2017), que obtiveram 7,0 MPa (28 dias), ou seja, 138% maior; de Pyngrope *et al.* (2021) que obteve 7,2 MPa (28 dias), ou seja, 134% maior. Porém, ficaram abaixo de alguns estudos: Reis *et al.* (2023) obteve 14,7 MPa (7 dias), ou seja, apenas 36%; de Salazar *et al.* (2022) que obteve 7,0 MPa (7 dias), ou seja, 76%.

Figura 97. Resultados de resistência a compressão simples (em MPa) para cura a 7 dias – Fase 3 x Fase 6.



Com relação à durabilidade, alguns resultados de perda de massa obtidos com o cimento alternativo foram melhores do que os compósitos com cimento Portland, conforme demonstrado no Quadro 46 (destacados em verde).

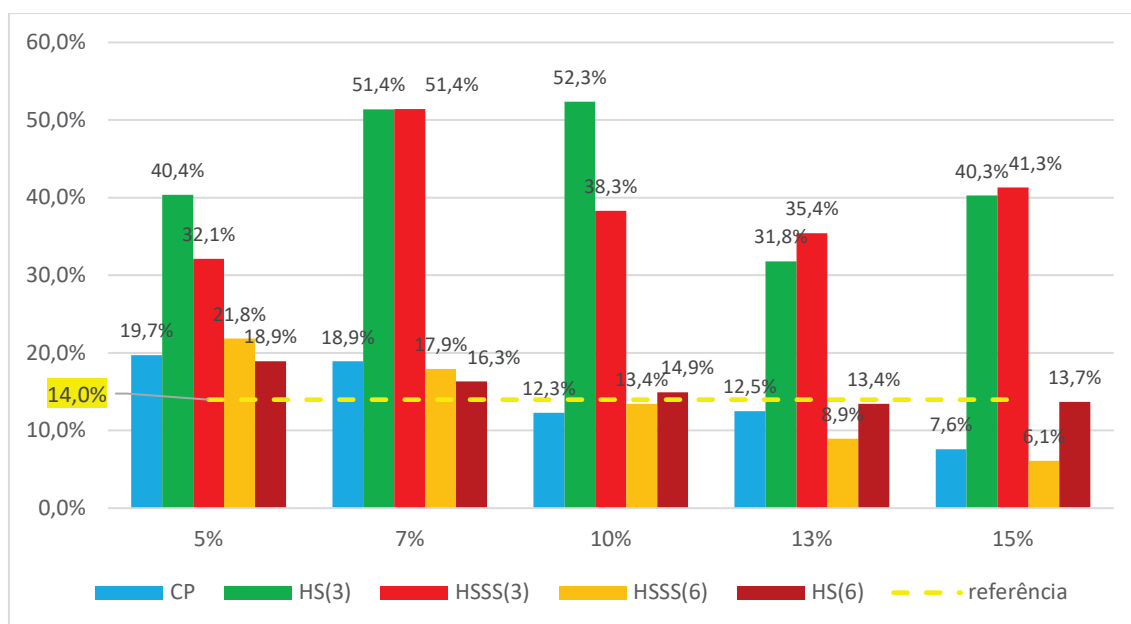
Quadro 46. Resultados dos ensaios de durabilidade (perda de massa em %) – Fase 6.

Teor	CP	HSCH(6)	HSSSCH(6)
5%	19,7%	18,9%	21,8%
7%	18,9%	16,3%	17,9%
10%	12,3%	14,9%	13,4%
13%	12,5%	13,4%	8,9%
15%	7,6%	13,7%	6,1%

CP = Cimento Portland; HSCH (6) = hidróxido de sódio + pó de vidro + cal hidratada (fase 6); HSSSCH (6) = hidróxido de sódio + silicato de sódio + pó de vidro + cal hidratada (fase 6).

Observou-se que, os ensaios realizados nos corpos de prova dos compósitos com cimento alternativo ativados por HS (teores 13% e 15%) e ativados por HSSS (teores 10%, 13% e 15%) registraram uma perda de massa menor do que 14% (limite estabelecido pelo Associação de Cimento Portland Americana) e, portanto, atendem a este requisito para o uso como solo cimento, como pode ser observado na Figura 98. Os demais teores tiveram perda de massa acima de 14% e não atenderam a este critério.

Figura 98. Comparação dos resultados de durabilidade (perda de massa em %).



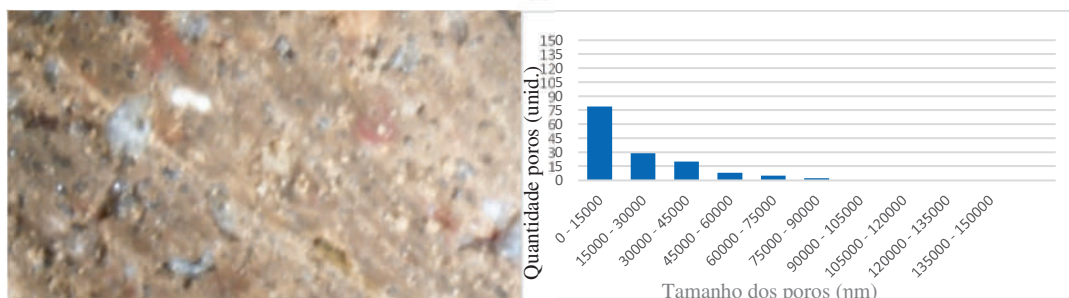
Considerando que o teor de cimento alternativo com a menor porcentagem (mais econômico) e que atenda aos dois requisitos (resistência a compressão a 7 dias e durabilidade) será definido como a melhor dosagem de solo cimento alternativo a ser utilizado. O Quadro 47, traz o resumo dos compósitos avaliados na fase 6.

Quadro 47. Avaliação de atendimento aos critérios para cada teor de cimento (fase 6).

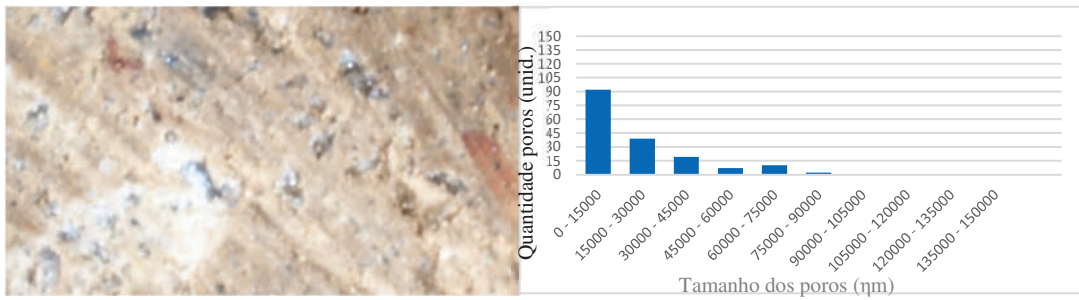
Teor de cimento	Durabilidade	Compressão simples a 7 dias	Resultado
HS - 5%	Não	Não	Não
HSSS - 5%	Não	Não	Não
HS - 7%	Não	Não	Não
HSSS - 7%	Não	Não	Não
HS - 10%	Não	Não	Não
HSSS - 10%	Sim	Sim	Sim
HS - 13%	Sim	Sim	Sim
HSSS - 13%	Sim	Sim	Sim
HS - 15%	Sim	Sim	Sim
HSSS - 15%	Sim	Sim	Sim

Analisando-se as imagens utilizando microscópio e quantificando os tamanhos dos poros, observa-se que há uma relação diretamente proporcional entre a quantidade de poros menores e o aumento do teor de cimento. Tanto nos compósitos ativados por HS quanto HSSS, sendo os ativados por HSSS com a maior quantidade de poros menores, como demonstrado na Figura 99. Resultados estes coerentes com os estudos de Siddika *et al* (2023). Novamente, análogo ao observado na Fase 5, quanto maior o teor de cimento alternativo, aumenta-se a quantidade de poros inferiores a 15.000 ηm , diminuindo-se a quantidade de poros acima de 45.000 ηm .

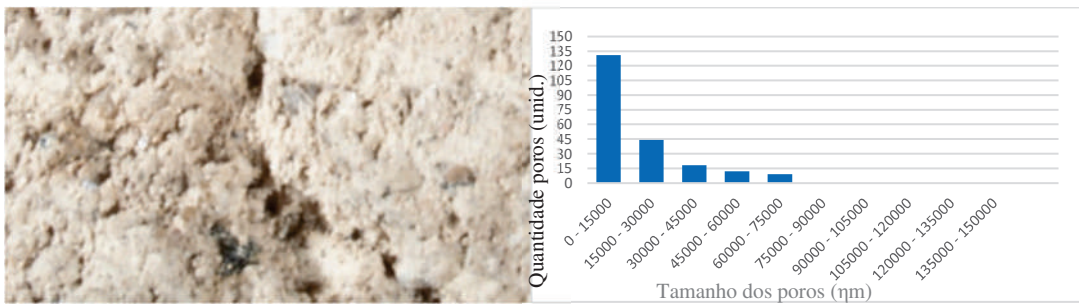
Figura 99. Quantificação dos poros (compósitos – fase 6, a 7 dias).



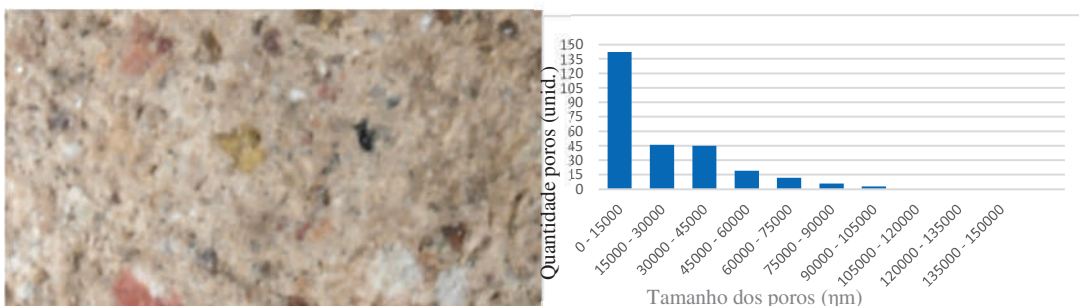
(a) HS – 5%



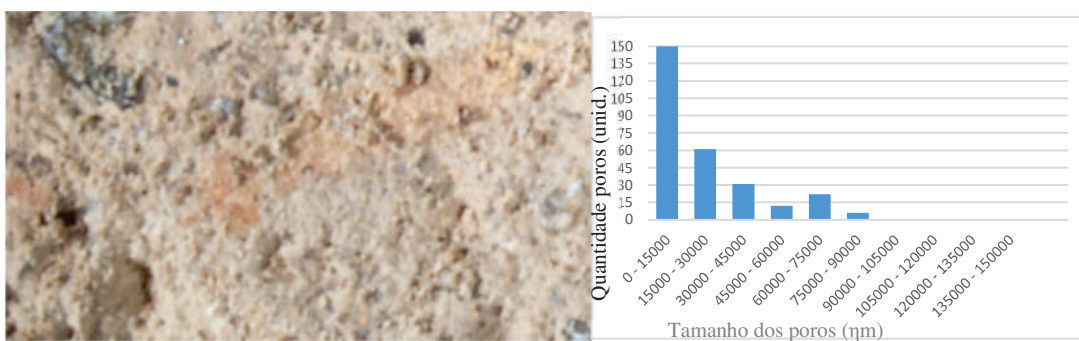
(b) HS – 7%



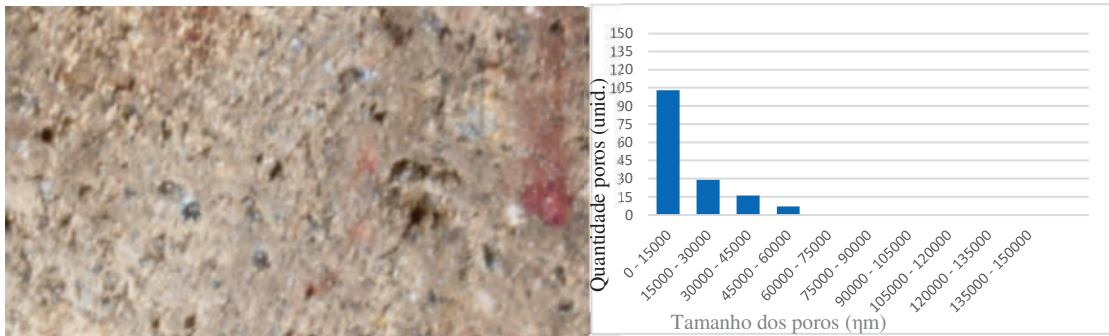
(c) HS – 10%



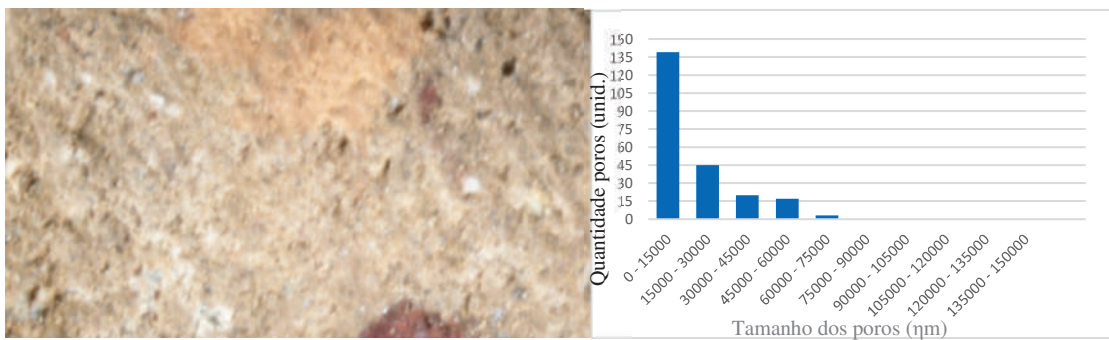
(d) HS - 13%



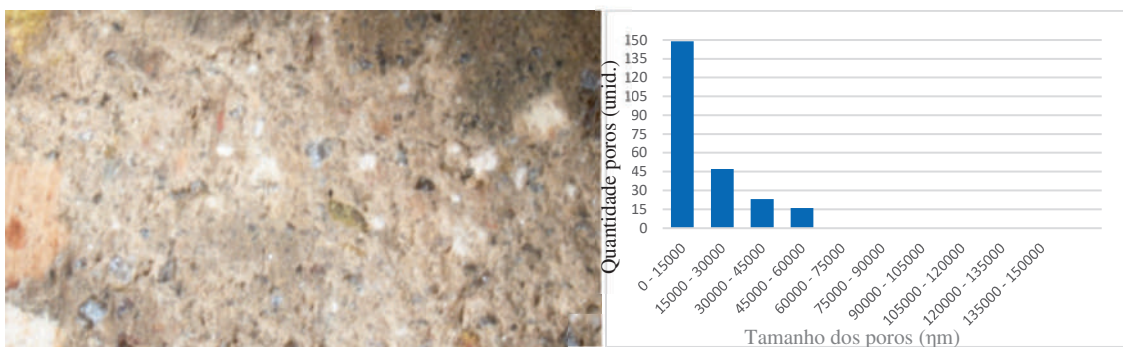
(e) HS – 15%



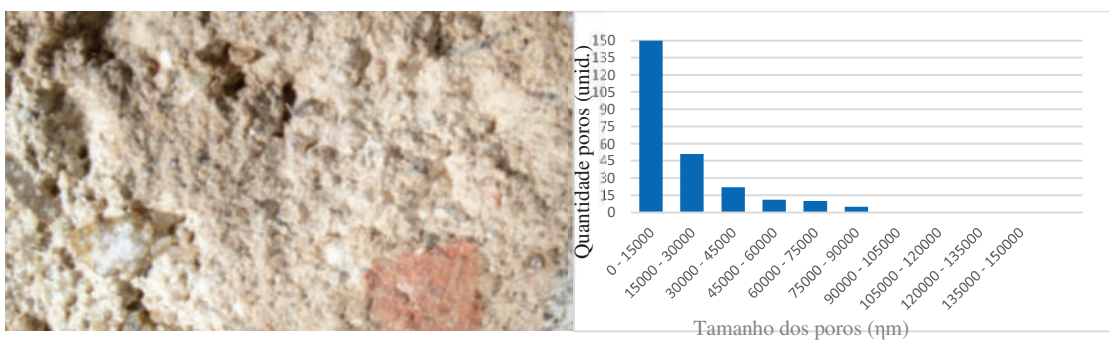
(f) HSSS – 5%



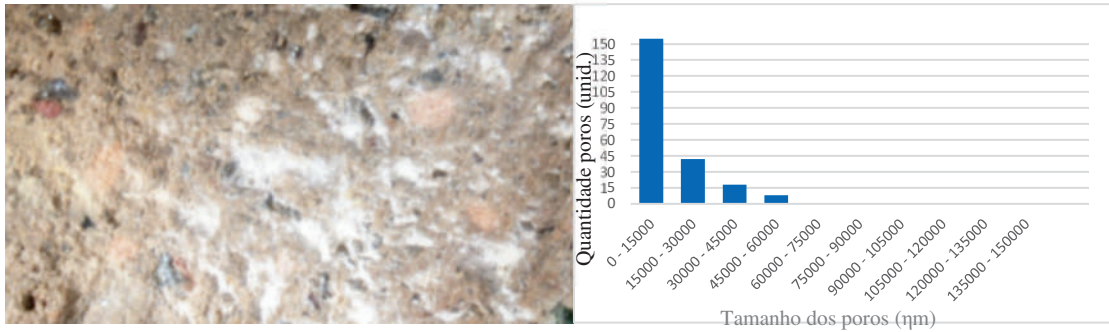
(g) HSSS – 7%



(h) HSSS – 10%



(i) HSSS – 13%



(j) HSSS – 15%

Portanto, **o compósito de solo de resíduos de construção civil reciclado com o cimento alternativo, composto pela mistura do PVCH - pó de vidro e cal hidratada (precursores) ativados pela solução de hidróxido de sódio e silicato de sódio (HSSS), com teor de 10%, foi considerada a composição com a melhor dosagem a ser utilizada**, pois, é o menor teor de cimento alternativo que atende aos dois requisitos estudados neste trabalho (durabilidade e compressão simples a 7 dias), tornando-se o mais econômico e adequado tecnicamente para o tratamento de taludes fluviais.

5.7. Análise estatística dos resultados

A análise estatística foi realizada considerando os resultados das Fases 2, 3 e 6, conforme resumo dos dados no Apêndice 2.

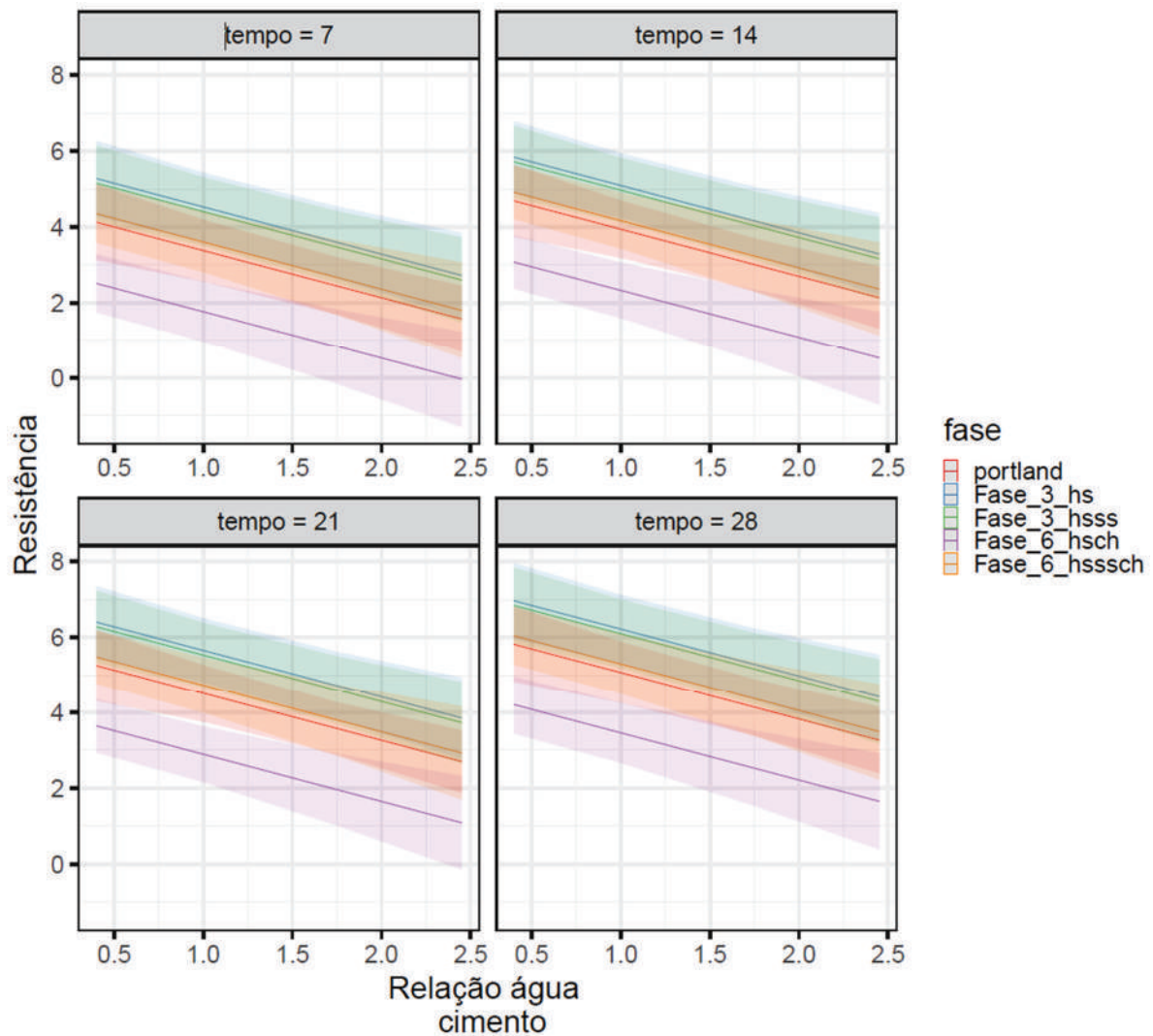
O Quadro 48 demonstra os resultados do modelo multivariado ajustado a distribuição normal das variáveis analisadas (resistência a compressão simples, relação água/cimento, tempo, tipo de compósito, perda de massa e massa seca inicial).

Quadro 48. Resultados da análise estatística realizada.

<i>Predictors</i>	cp			pm		
	<i>Estimates</i>	<i>CI</i>	<i>p</i>	<i>Estimates</i>	<i>CI</i>	<i>p</i>
(Intercept)	7.46	6.34–8.58	<0.001	-125.67	-198.33–53.01	0.001
ac	-1.24	-1.78–0.71	<0.001	10.72	3.71–17.73	0.003
pm	-0.13	-0.17–0.10	<0.001			
fase [Fase_3_hs]	1.15	-0.16–2.46	0.086			
fase [Fase_3_hsss]	1.03	-0.29–2.34	0.125			
fase [Fase_6_hsch]	-1.61	-2.54–0.69	0.001			
fase [Fase_6_hsss]	0.23	-0.70–1.15	0.632			
tempo	0.08	0.05–0.11	<0.001			
massa seca				0.05	0.02–0.08	<0.001
Observations	100			20		
R ²	0.775			0.742		

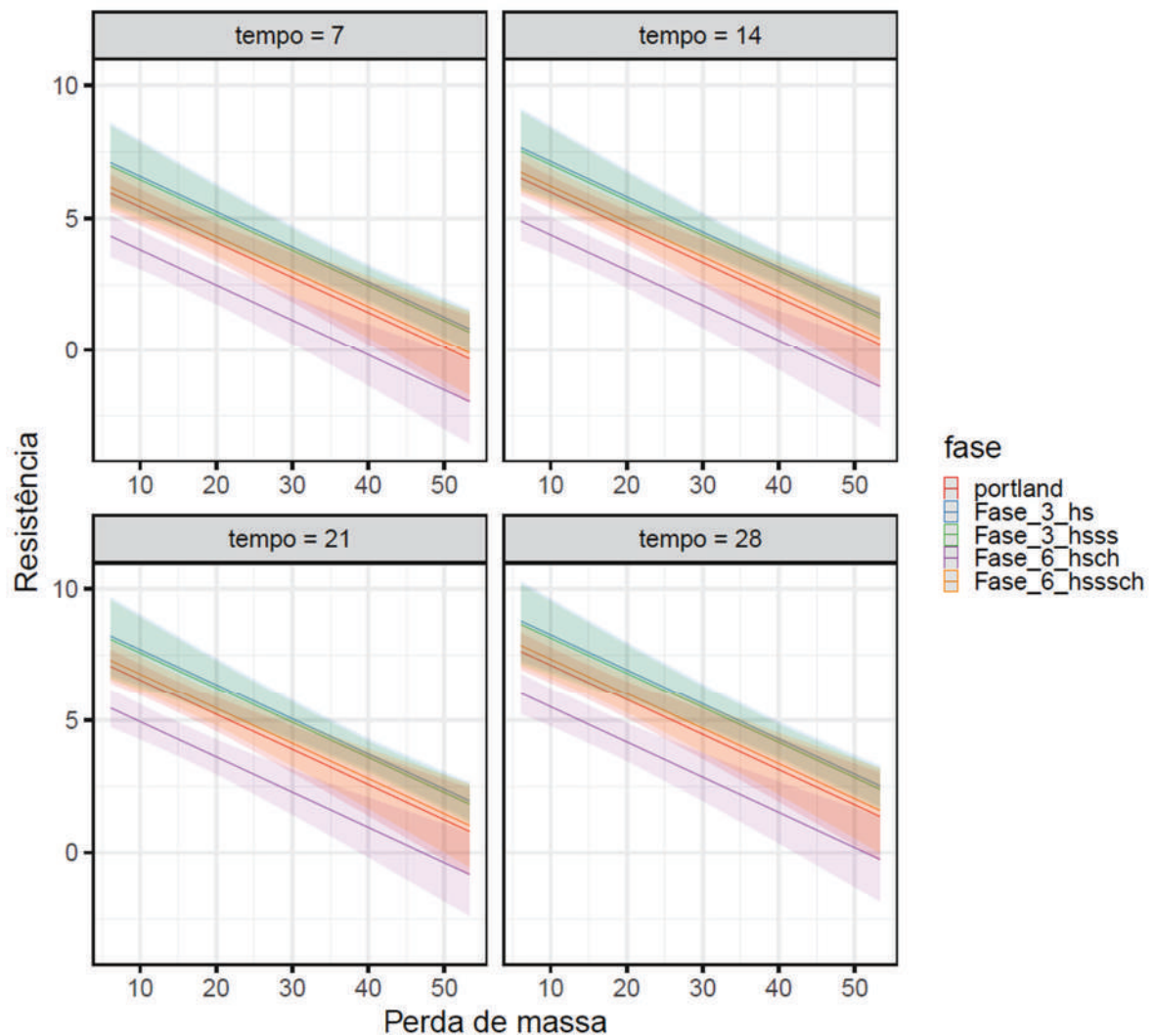
Observando-se os resultados, independentemente do tempo (dias), o aumento de 1 unidade na relação água/cimento está associado a uma redução média de 1,24 MPa (95% - 1,78 a 0,71) na resistência à compressão simples dos compósitos (Figura 100).

Figura 100. Análise da relação água/cimento x resistência a compressão simples (MPa) dos compósitos.



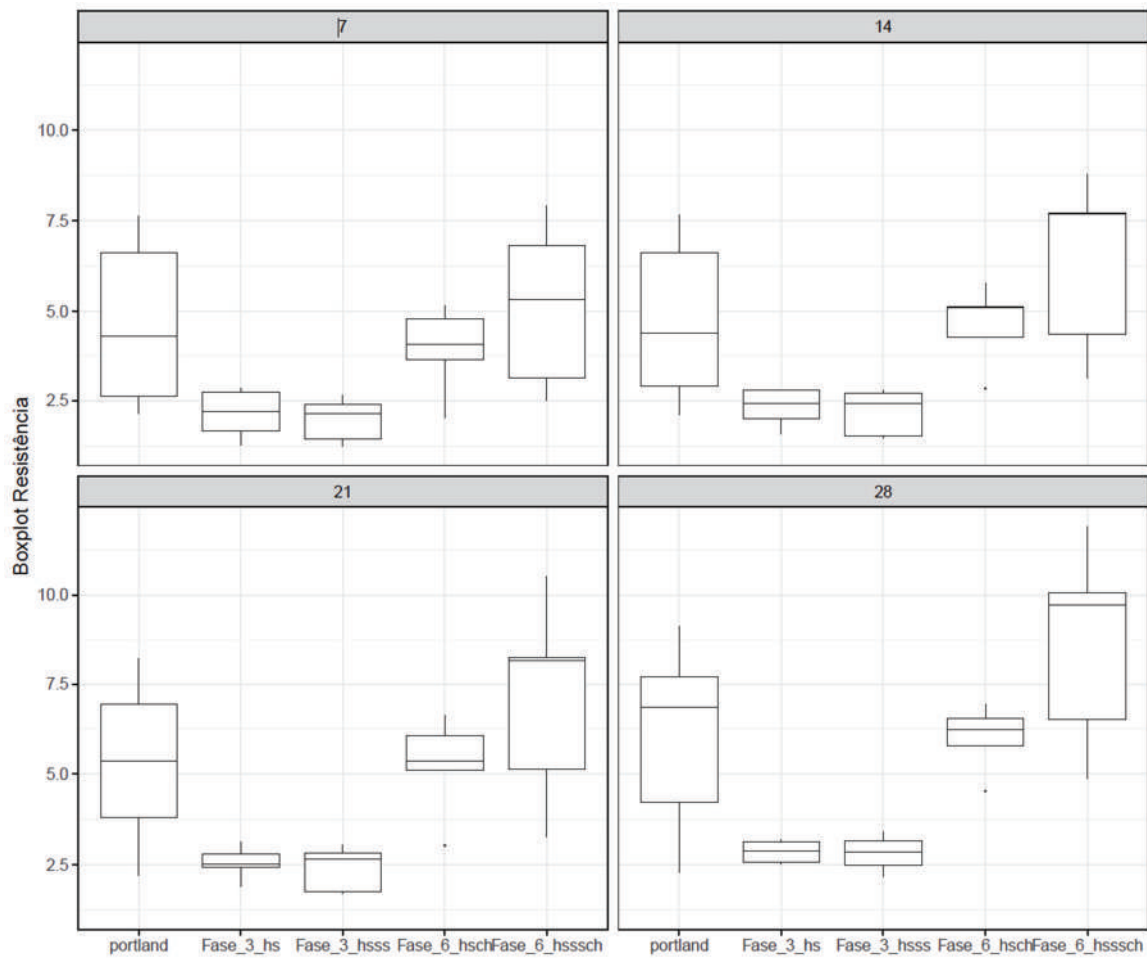
Resultado similar foi observado quando se analisou a perda de massa. Nesse caso, independentemente do tempo, o aumento de 1% na perda de massa leva a uma redução de 0,13 MPa (95% - 0,17 a 0,10) na resistência a compressão simples dos compósitos (Figura 101).

Figura 101. Análise da relação perda de massa (%) x resistência a compressão simples (MPa) dos compósitos.



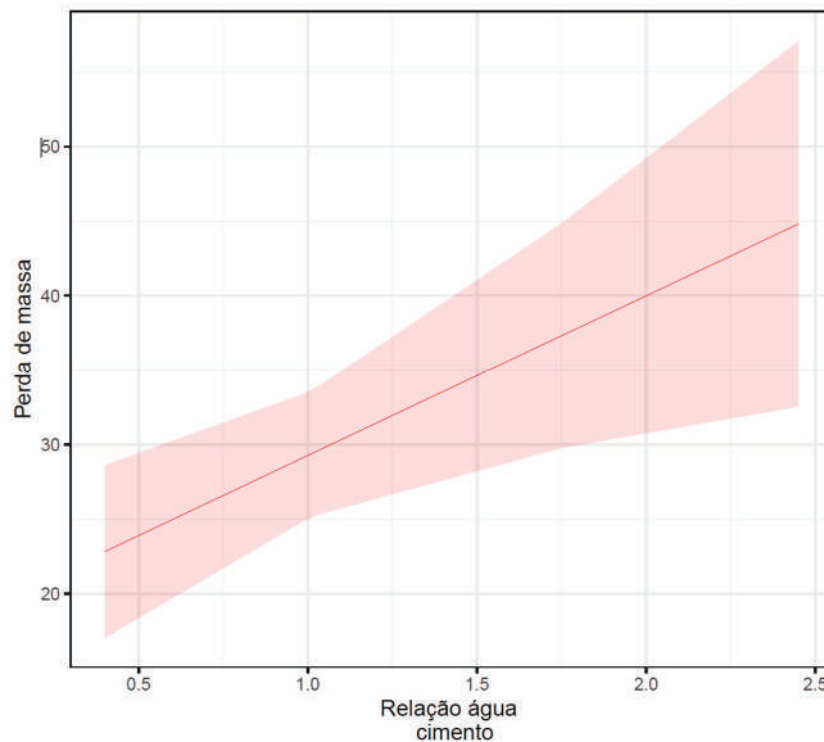
Quando se analisou somente os compósitos com cimento alternativo das Fases 3 e 6, observou-se que os compósitos da Fase 3 apresentaram uma resistência menor do que o compósito com Portland, entretanto, essa diferença não foi considerada significativa ($p = 0,08$; $p = 0,12$). Resultado diferente dos compósitos com cimento alternativo da Fase 6, que neste caso, com as alterações realizadas e a adição de cal hidratada na composição do precursor com o pó de vidro, apresentaram uma resistência a compressão simples significativamente maior quando comparado ao Portland ($p < 0,05$), como ilustra a Figura 102.

Figura 102. Bloxplot da resistência a compressão simples (MPa) x tipo de compósito estudado, ao longo do tempo (dias).



Quando se analisou a perda de massa verificou-se uma associação positiva entre elas. Assim, o aumento de 1 unidade na relação água/cimento está associado a um aumento de 10,72% (95% - CI 3,71 a 17,73) na perda de massa (Figura 103).

Figura 103. Análise da relação água/cimento x perda de massa (%).



Portanto, estatisticamente falando, conclui-se que:

- as alterações realizadas, para a composição do cimento alternativo da Fase 6 em relação à Fase 3, aumentaram a resistência à compressão simples do compósito de forma significativa;
- quanto maior a relação água/cimento, menor a resistência a compressão simples do compósito;
- quanto maior a perda de massa, menor a resistência a compressão simples do compósito;
- quanto maior a relação água/cimento, maior a perda de massa do compósito.

5.8. Resposta da hipótese da pesquisa

Considerando os resultados obtidos na fase 6, o melhor compósito com cimento alternativo é outra solução viável tecnicamente em relação ao melhor compósito utilizando cimento Portland, conforme demonstra o Quadro 49, ambos curados em temperatura ambiente. Observa-se que tanto no critério de resistência a compressão quanto da durabilidade, o compósito com cimento alternativo obteve resultados melhores do que com cimento Portland, ratificando os resultados de Consoli *et al* (2018), que concluíram que os ligantes formados por resíduos de vidro finamente moídos e cal carboneto têm uma tendência comportamental semelhante à do cimento Portland.

Quadro 49. Comparação dos melhores compósitos estudados.

Tipo Cimento do compósito	Melhor Composição	Resist. Compressão simples (MPa)		Perda de massa (%)
		7 dias	28 dias	
cimento Portland	solo RCCR (A-1-b) + 10% cimento Portland moldado com umidade ótima (11%)	4,3 MPa	6,9 MPa	12,3%
cimento alternativo	solo RCCR (A-1-b) + 10% pó de vidro + cal hidratada, ativado com HSSS com relação água/ligante = 0,40; relação cal/precursor = 0,30; concentração molar de NaOH = 3,75M; relação ativador/precursor = 0,0615; relação 1:2,5 da mistura de HS:SS; pó de vidro passante #200	5,3 MPa	9,7 MPa	13,4 %

Analisando o Quadro, verifica-se que a resistência do cimento alternativo foi 123% maior do que do cimento Portland aos 7 dias e 141% maior aos 28 dias de cura. E ainda, que no ensaio de durabilidade, a sua perda de massa foi de 13,4% contra 12,3% do cimento Portland. Justificando-se tecnicamente a sua opção para o tratamento de taludes fluviais erodidos.

De acordo com Payá *et al* (2022) e Bignozzi (2011), ambientalmente falando, o uso de cimento ativado por álcalis é mais vantajoso do que com cimento Portland. Segura *et al* (2023) demonstraram que a análise do ciclo de vida da fabricação de 1 m³ de concreto utilizando cimentos alternativos ativados por álcalis gera uma emissão de 66 kg e 86 kg de CO₂ (dependendo do precursor utilizado: cinzas volantes e metacaulim,

respectivamente), enquanto com cimento Portland gera uma emissão de 271 kg de CO₂. Além do que, o uso de solo cimento, ainda mais com o reuso de resíduos da construção civil reciclados, diminuem o uso de recursos naturais e evita-se também toda a operação de extração e transporte, reduzindo a emissão de CO₂, de outros contaminantes e o consumo de combustíveis, como já apontado pelo IECA (2015). Logo, o uso do compósito proposto possui mais vantagens ambientais em relação ao compósito com cimento Portland e em relação às outras soluções técnicas utilizadas para o tratamento de taludes fluviais erodidos, como o enrocamento (rip-rap), bioengenharia de solos, gabião, entre outros.

O compósito proposto é pouco mais econômico do que o mesmo compósito utilizando o cimento Portland, conforme o Quadro 50 abaixo, que comparou os custos para fabricação de 1 m³ de cada um deles. O custo do compósito com cimento Portland chegou a US\$ 36,42/m³ enquanto com o cimento alternativo, proposto nesta pesquisa, foi de US\$ 31,09/m³. Ou seja, 15% mais barato do que com cimento Portland, se justificando economicamente também a sua opção. Considerou-se uma cotação média do dólar igual a: US\$ 1,00 = R\$ 5,00; preço do RCCR de R\$ 12,00/m³; preço do cimento Portland de R\$ 35,00 por saco de 50 kg; preço do pó de vidro de R\$ 15,00/m³; preço da cal hidratada de R\$ 11,74 por saco de 20 kg; preço do hidróxido de sódio de R\$ 270,00 por saco de 50 kg; preço do silicato de sódio de R\$ 906,75 para 250 kg; massa específica do RCCR = 2,69 g/cm³.

Quadro 50. Comparação econômica dos melhores compósitos estudados.

Materiais	Quant.	Unid.	Unit (US\$/kg)	Valor (US\$)
1 m³ de compósito com cimento Portland				
solo RCCR	2.445,45	kg	0,001	2,18
Cimento Portland	244,55	kg	0,14	34,24
total	2.690,00	kg		
	valor US\$/m³			36,42
1 m³ de compósito com cimento alternativo				
solo RCCR	2.335,79	kg	0,001	2,08
pó de vidro	233,58	kg	0,001	0,29
cal hidratada	100,11	kg	0,12	11,75
hidróxido de sódio	5,86	kg	1,08	6,33
silicato de sódio	14,66	kg	0,73	10,63
total	2.690,00	kg		
	valor US\$/m³			31,09

Analisando o Quadro, observa-se que o valor da cal hidratada e dos ativadores são responsáveis por 92% do custo total do compósito com cimento alternativo e elevam o custo do cimento alternativo estudado.

Em comparação a outras referências, o compósito também demonstrou ser mais barato. Richards e Handley (2006), em um estudo das licitações realizadas em 30 projetos entre 1995 e 2002 nos Estados Unidos, encontraram o custo unitário do solo cimento, incluindo cimento, variando de US\$ 25,96 a US\$ 127,32 /m³ (valor médio = US\$ 76,64/m³), ou seja, o valor do compósito desta pesquisa equivale apenas a 41% do valor médio. É apenas 27% do custo médio do concreto com cimento Portland em Porto Velho/RO (fck = 15 MPa), que foi cotado em US\$ 113,24/m³ (FIOCRUZ, 2021). E ainda, de acordo com os custos apresentados por Segura *et al* (2023) e considerando uma cotação do dólar (US\$ 1,00 = 0,92 €), o compósito com cimento alternativo desta pesquisa (custo de US\$ 11,56/ton), é apenas 21% do custo do concreto ativado por álcalis utilizando metacaulim (US\$ 146,39/ton) ou 30% do custo utilizando cinzas volantes de carvão (US\$ 102,91/ton) ou 38% do custo utilizando escória granulada moída de alto forno (US\$ 116,45/ton) ou ainda 57% do custo do concreto utilizando cimento Portland (US\$ 54,43/ton).

Portanto, a hipótese desta pesquisa, descrita no item 1.3, foi confirmada, pois, o compósito proposto é tecnicamente viável, tem mais vantagens ambientais e é mais barato do que o mesmo compósito preparado com cimento Portland, além de ser mais barato do que outros materiais semelhantes citados pelos autores Richards e Handley (2006), Fiocruz (2021) e Segura *et al* (2023).

6. CONCLUSÕES

A utilização de resíduos de construção civil reciclados (RCCR) para a composição de solo cimento (com cimento Portland ou alternativo) foi comprovadamente aprovada, desde que, a sua classificação atenda às recomendações de Richards e Hadley (2006) e de Nussbaum e Colley (1971), ambos da PCA – Associação de Cimento Portland dos Estados Unidos, demonstrando-se como uma alternativa para a destinação adequada destes resíduos em atendimento à resolução CONAMA 307 (BRASIL, 2002) e à lei federal 12.305 (BRASIL, 2010), que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Com relação ao uso do cimento Portland, o melhor teor indicado é de 10% em relação à massa, compactado na umidade ótima do material (RCCR), que atingiu 4,3 MPa a 7 dias de resistência a compressão simples e perda de massa igual a 12,3%, atendendo aos critérios de resistência mínima de 4,2 MPa e perda de massa máximo de 14%, considerando a finalidade deste estudo.

O melhor cimento alternativo para o compósito proposto neste trabalho possui as seguintes características:

- Pó de vidro utilizado passante na peneira #200;
- Precursor composto de pó de vidro (70%) e cal hidratada (30%);
- Ativador: mistura de hidróxido de sódio (concentração a 5% de Na₂O ou 3,75M NaOH) e silicato de sódio (razão 1:2,5);
- Teor de cimento alternativo com 10% (em relação à massa do pó de vidro);
- Relação ativador/precursor = 0,0615;
- Relação água/ligante = 0,40;
- Cura em temperatura ambiente.

Este melhor compósito de resíduos da construção civil reciclados com adição de cimento alternativo, funciona como um solo cimento para o tratamento de taludes fluviais obtendo-se resultados superiores em comparação ao uso do cimento Portland (em relação a compressão simples e durabilidade). O melhor teor indicado também foi de 10% em relação à massa do pó de vidro, que atingiu 5,3 MPa a 7 dias de resistência a compressão simples e perda de massa igual a 13,4%, também atendendo aos critérios deste estudo, tornando-se outra solução técnica adequada para o tratamento de taludes fluviais erodidos (problema ambiental presente em diversos locais).

Com relação aos estudos do cimento alternativo, pode-se tirar algumas conclusões, com base nos resultados obtidos e da análise estatística realizada:

- O pó de vidro pode ser utilizado com principal precursor, porém, deve ser o mais fino possível, sendo no mínimo o passante na peneira #200 (partículas < 0,075 mm);
- A adição de cal hidratada ao pó de vidro, como parte do precursor, favoreceu as reações de formação do cimento alternativo obtendo-se resistências a compressão mais altas;
- Uma concentração molar alta de hidróxido de sódio (NaOH), neste caso de 12M, não favoreceu as reações de formação do cimento alternativo, acarretando baixas resistências a compressão. Já uma baixa concentração, com 5% de Na₂O ou 3,75M NaOH, demonstrou-se adequada para os resultados esperados deste estudo, tanto para a compressão simples quanto para a durabilidade;
- O uso do ativador composto da solução de hidróxido de sódio mais silicato de sódio, na proporção de 1:2,5, obteve-se os melhores resultados do que somente com hidróxido de sódio.

Por fim, o compósito proposto com cimento alternativo é mais viável tecnicamente (obteve resistências a compressão simples maiores e perda de massa menor) e economicamente. É 15% mais barato do que o mesmo compósito preparado com cimento Portland (US\$ 31,09/m³ contra US\$ 36,42/m³ para o cimento alternativo). Os custos da cal hidratada e dos ativadores representam 92% do valor total. Portanto, o compósito proposto tornou-se mais uma opção para o tratamento de taludes fluviais erodidos.

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para o aprofundamento sobre o tema estudado, recomenda-se as seguintes ações:

- Realizar novos estudos para encontrar processos visando reduzir os custos da cal hidratada e dos ativadores ou encontrar outros materiais que possam substituí-los para baratear ainda mais o custo do cimento alternativo;
- Avaliar o ciclo de vida do compósito desenvolvido para verificar se benefícios ambientais oferecidos em relação ao fabricado com cimento Portland são maiores;
- Verificar se o compósito desenvolvido pode ser utilizado para outras finalidades, além do tratamento de taludes fluviais.

REFERÊNCIAS

- ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Fabricação de tijolos de solo cimento com utilização de prensas manuais**. Revisão 3. São Paulo, 2000.
- _____. **Dosagem das misturas de solo cimento: normas de dosagem e métodos de ensaios**. 2ª. Edição, São Paulo, 2004.
- _____. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7.ed. São Paulo, 2002.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.116 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos**. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 12.653 – Materiais pozolânicos — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 16.916 – Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **NBR 6136 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 6457 – Solos – preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade**. Rio de Janeiro, 2024.
- _____. **NBR 6458 – Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2017.
- _____. **NBR 6459 – Solo - Determinação do limite de liquidez** Rio de Janeiro, 2017.
- _____. **NBR 7175 – Cal hidratada para argamassas - requisitos**. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 7180 – Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.
- ABRECON – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. **Mercado do entulho**. Disponível em: <https://abrecon.org.br/entulho/mercado/>, publicado em 2020, acessado em 10/11/2020.
- _____. **Relatório de pesquisa setorial 2017/2018**. Disponível em: https://abrecon.org.br/pesquisa_setorial/, publicado em 2019 e acessado em 10/01/2020.
- ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo, 2020.
- ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Report on Soil Cement**. ACI 230.1R-09, publicado em 2009.
- ACOSTA, C. J. M. **Melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de vidro e cal de casca de ovo**. Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2021. 202 p.
- ADESANYA, E. *et al.* **Opportunities to improve sustainability of alkali-activated materials: a review of side-stream based activators**. Journal of Cleaner Production, v. 286, 2021.

- ALONSO, S.; PALOMO, A. **Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxide metakaolin solid mixtures**. Cement and Concrete Research 31, 2001. pp.25-30.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Planejamento Estratégico de Recursos Hídricos dos afluentes da margem direita do Rio Amazonas**. Ministério de Meio Ambiente. Volume 1 – Diagnóstico. Brasília, 2012.
- ARULRAJAH, A. *et al.* **Strength and microstructure evaluation of recycled glass-fly ash geopolymer as low-carbon masonry units**. Construction and Building Materials, v. 114, p. 400–406, 2016.
- BASSANI, M. *et al.* **Alkali-activation of recycled construction and demolition waste aggregate with no added binder**. Construction and Building Materials, n. 205. 2019, p. 398–413.
- BASTOS, F. de H. *et al.* **Geomorfologia**. Fortaleza: EdUECE, 2015.
- BATISTA, W. R. R. F. *et al.* **Determinação das propriedades físicas, químicas e mineralógicas da cal hidratada visando uso na construção civil**. Anais do I CONAPESC - Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências. Editora Realize, 2016.
- BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; DEVENTER, J. S. J. V. **Impact of water content on the performance of alkali-activated slag concretes**. In: Basheer, PAM, (ed.) Durability of Concrete Structures. ICDCS2018: 6th International Conference on Durability of Concrete Structures, 18-20 Jul 2018, Leeds, UK. Whittles Publishing, pp. 143-148.
- BEZERRA, I. M. T. *et al.* **Influência da proporção do ativador alcalino nas propriedades mecânicas de materiais ativados alcalinamente**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.8.2, 2013. p. 101 –105.
- BIGNOZZI, M. C. **Sustainable cements for green buildings construction**. Engineering, Nro 21. 2011, p. 915 – 921.
- BORRACHERO, M. V. *et al.* **Reusing Construction and Demolition Waste to Prepare Alkali-Activated Cement**. Cement. Materials (Basel). 2022.
- BRASIL. **Lei Federal 11.305 – Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2010.
- _____. **Resolução CONAMA 307**. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>, publicada em 2002, acessado em 10/01/2019.
- BRIGHETTI, G; MARTINS, J. R. S. **Estabilização e proteção de margens**. Escola Politécnica/Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 2001.
- BURCIAGA-DIAZ, O. *et al.* **Statistical analysis of strength development as a function of various parameters on activated metakaolin/slag Cements**. Journal of the American Ceramic Society. Vol. 93, N. 2, 2010. p. 541 – 547.
- CAICEDO, A. M. L. **Melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de cerâmica vermelha e cal de carbureto**. Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2020. 262 p.
- CANCIAN, M. A. *et al.* **Influência do teor de umidade, da porosidade e do intervalo de tempo até a aplicação da mistura solo-cimento em pavimento rodoviário**. Revista Transportes. v. 25, n. 1, 2017. p. 41-50.
- CARASEK, H. *et al.* **Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento**. Revista Cerâmica. Vol 64, 2018. 288 – 300 p.

- CARDOSO, R. *et al.* **Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review.** Elsevier, v. 49, 2016. 131 -145 p.
- CHARITHA, V. *et al.* **Carbonation of alkali activated Binder and comparison with the performance of ordinary Portland cement and blended cement binders.** Journal of Building Engineering. V. 53, 2022.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia.** São Paulo: Edgard Blücher, 1980.
- CINCOTTO, M. A.; *et al.* **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio.** Boletim 68 IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo. 1995.
- CONSOLI, N. C. *et al.* **Durability, strength and stiffness of green stabilized sand.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 144(9), 2018.
- CONSOLI, N. C. *et al.* **Ground waste glass–carbide lime as a sustainable binder stabilising three different silica sands.** Géotechnique 71, No. 6, 2021, p. 480–493.
- CONSOLI, N. C., *et al.* **Key parameters for strength control of artificially cemented soils.** J. Geotech. Geoenviron. Engng 133, No. 2, 2007, p. 197–205.
- COUTINHO, J. S. **Ligantes e Caldas.** Materiais de Construção 2. Departamento de engenharia civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2006.
- DAASSI-GLI, C. A. P. **Estabilização de um solo granular com misturas de pó de vidro – cal de carbureto – hidróxido de sódio (NaOH).** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2020.
- DAVIDOVITS, J. **Geopolymers: ceramic-like inorganic polymers.** Journal of Ceramic Science and Technology, v. 8, n. 3, 2017, p. 335–350.
- DELGADO, J. O. A. *et al.* **Uso de material reciclado en la fabricación de concreto.** Caxamarca. Vol. 16, 2017. 37 – 43 p.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Especificação de Serviço DNER/ES/CE 044/71.** Publicado em 1971.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 172/2016-ME: Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio.** Brasília, 2016.
- DOLEZAL, J. *et al.* **Concrete based on fly ash geopolymers.** Publicado em 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/266568967_Concrete_based_on_fly_ash_geopolymers , acessado em 05/02/2022.
- ESPARHAM; A. *et al.* **Effect of various alkaline activator solutions on compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete.** Journal of Civil Engineering and Materials Application, v. 4, 2020, p. 115–123.
- FALCÃO, H. B. de A. **Aplicação de geossintéticos como proposta de solução na estabilização de talude em João Pessoa/PB.** UFPB – Universidade Federal da Paraíba. Departamento de Engenharia civil. João Pessoa, 2019.
- FERNANDEZ JIMÉNEZ, A.; PALOMO, J. G.; PUERTAS, F. **Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour.** Cement and Concrete Research, v. 29, n. 8. 1999. P. 1313–1321.
- FERRAZZO, S. T., *et al.* **Which solution is more sustainable: Waste foundry sand stabilized with alkali-activated binder or Portland cement?** Journal of Building Engineering. V. 84, 2024.

- FILHO, F. J. T. **O solo-cimento e suas aplicações rurais**. Boletim Técnico 117. 2ª. Edição. ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 1996.
- FILHO, J. A. P. *et al.* **Viabilidade Econômica da Utilização de Resíduos de Demolição Reciclados na Execução do Contrapiso de um Edifício Localizado na Zona Leste da cidade de São Paulo**. Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas - UFSM, Santa Maria. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET. V. 18 n. 2, 2014. p.928-944.
- FILHO, N. M. **Resíduos da construção civil na cidade de Londrina: análise da política de gerenciamento de resíduos da construção civil adotada pelo município e estudo de caso utilizando uma proposta de reciclagem baseada na técnica de estabilização por solidificação à base de cimento Portland**. Tese de doutorado. Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.
- FILHO, P. *et al.* **Use of construction and demolition solid wastes for basket gabion filling**. The Journal for a Sustainable Circular Economy, Vol. 38, 2020. 1321-1330 p.
- FIOCRUZ – FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ. **Processo de Licitação Nro 25389.000236/2021-01. para construção da sede da Fiocruz Rondônia**. Rio de Janeiro, 2021.
- FIORI, P. F. **Fundamentos de mecânica dos Solos e das Rochas: aplicações a estabilidade de taludes**. 3. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 576 p.
- FISCHENICH, J. C. **Channel Erosion Analysis and Control**. In: Woessner, W. and D.F. Potts, eds. Proceedings Headwaters Hydrology. American Water Resources Association. Bethesda, Md, 1989.
- FORT, J.; CERNY, R. **Transition to circular economy in the construction industry: Environmental aspects of waste brick recycling scenarios**. Waste Management. Vol. 118, 2020. 510 – 520 p.
- GARCIA-LODEIRO, I. *et al.* **An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders**. Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes, 2015, p. 19–47.
- GOMES, P. C. C. *et al.* **Obtenção de blocos de concreto com utilização de resíduos reciclados da própria fabricação dos blocos**. Ambiente Construído. Vol. 17, N. 3, 2017. 267 – 280 p.
- GOOGLE MAPS. **Porto Velho, RO**. Site: <https://www.google.com.br/maps/place/Porto+Velho+-+RO/@-8.7759236,-63.9037083,12z/data=!4m5!3m4!1s0x922d328ca4a88c47:0x4380950ed6230760!8m2!3d-8.7611933!4d-63.9004398>, Acessado em: 16/01/2021.
- GRANIZO, M., *et al.* **Alkaline activation of metakaolin: Effect of calcium hydroxide in the products of reaction**. Journal of the American Ceramic Society, 2002. v. 85, p. 225-231.
- GUALBERTO, A. B. *et al.* **Avaliação do uso de resíduos da construção civil reciclados como agregados do concreto em um pátio de compostagem**. Revista eletrônica de engenharia civil. UFG – Universidade Federal de Goiás. Vol. 15, 2019. 31 – 51 p.
- GÜLLÜ, H. *et al.* **Use of cement based grout with glass powder for deep mixing**. Constr. Build. Mater. 137, 2017, p.12–20.
- HANSEN, K. D. P. E.; AVERA JR., J. K. **Dams that never end, water power and dam construction**, March 1978.
- HANSEN, K. D. P. E. *et al.* **Performance of flood tested soil cement protected levees**. Disponível em: <http://30zz0j1ewgra3qf6cz317ytj.wpengine.netdna-cdn.com/wp->

- [content/uploads/2011/11/Performance-of-Flood-Tested-Soil-Cement-Protected-Levees-10-12-2010revised.pdf](#), publicado em 1983, acessado em 13/12/2020.
- HANSEN, K. D. P. E.; SCHEXNAYDER, C. **Construction of Stair-Stepped Soil-Cement Bank Protection**. ASCE - American Society of Civil Engineers, 2000.
- HASSAN, U. *et al.* **Life cycle assessment of roadworks in United Arab Emirates: Recycled construction waste, reclaimed asphalt pavement, warm-mix asphalt and blast furnace slag use against traditional approach**. Journal of Cleaner Production. Vol. 257, 2020.
- HEWLETT P.C. **Lea's chemistry of cement and concrete**. 4th Ed., Oxford, UK, Elsevier, 1998.
- HJELMAR, O. *et al.* **End-of-Waste Criteria for Construction & Demolition Waste**. Modern Language: 8ª. Edição. Nordic Council of Ministers, 2016.
- HOLANDA, F. S. R. *et al.* **Controle da erosão em margens de cursos d'água: das soluções empíricas à técnica da bioengenharia de solos**. R. RAÍGA, Curitiba, n. 17, p. 93-101, 2009. Editora UFPR.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Portal Cidades**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ro/porto-velho/panorama>, publicado em 2021 e acessado em 15/01/2021.
- IDIR, R.; CYR, M.; PAVOINE, A. **Investigations on the durability of alkali-activated recycled glass**. Construction and Building Materials, v. 236, p. 117477, 2020.
- IECA – INSTITUTO ESPANHOL DE CIMENTO E SUAS APLICAÇÕES. **Estabilización de suelos con cemento**. Madrid, 2015. Disponível em: <https://www.ieca.es/producto/estabilizacion-de-suelos-con-cemento-sample/>, acessado em 18/01/2021.
- ILLER, R. K. **The chemistry of sílica: solubility, polymerization, colloid and surface properties, and biochemistry**. Ed. J. Wiley & Sons. New York, 1979.
- INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Meteograma da umidade relativa de Porto Velho/RO**. Disponível em: [Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - INPE - Previsão Numérica](#), acessado em 09/11/2023.
- ISLAM, G. M. S., *et al.* **Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice**. Int. J. Sustain. Built Environ. 6, No. 1, 2017, p. 37–44.
- JOHNSON, A. W.; STYPULA, J. M. **Guidelines for bank stabilization projects**. Disponível em: <https://www.kingcounty.gov/depts/dnrp/wlr/sections-programs/river-floodplain-section/documents/guidelines-bank-stabilization.aspx>, publicado em 1993 e acessado em 12/11/2020. County Department of Public Works, Surface Water Management Division. Seattle, Washington, 1993.
- KHAIR, A. *et al.* **Soil-cement tiles for lining irrigation canals**. Irrigation and Drainage Systems 5: 151-163, 1991.
- KHALE, D.; CHAUDHARY, R. **Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing Its Development: A Review**. J Mater Sci, N. 42, 2007. p.729-746.
- KOLLING, E. M. *et al.* **Avaliação da resistência mecânica de diferentes traços de solo-cimento estabilizados com areia**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.7.3, 2012. p. 185 –191.
- LIMA, V. M. E. *et al.* **Optimizing the concentration of Na₂O in alkaline activators to improve mechanical properties and reduce costs and CO₂ emissions in alkali-activated mixtures**. Construction and Building Materials. V. 344, 2022.
- LOPES. I. R. de M. B. **Estudo dos resíduos de construção e demolição e suas aplicações na produção de blocos de concreto**. Dissertação de mestrado.

- Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu – Mestrado Acadêmico Multidisciplinar em Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente do Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Anápolis, 2017. 95 p.
- LOTERO, A. *et al.* **Mechanical Properties of Alkali-Activated Ground Waste Glass–Carbide Lime Blends for Geotechnical Uses.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 33, n. 10, 2021.
- MAAZE, M. R.; SHRIVASTAVA, S. **Design optimization of a recycled concrete waste-based brick through alkali activation using Box- Behnken design methodology.** Journal of Building Engineering, n. 75. 2023.
- MANFRINATO, J. W. de S. *et al.* **Implementação de usina para reciclagem de resíduos da construção civil (RCC) como ação para o desenvolvimento sustentável - estudo de caso.** XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro, 2008.
- MEDINA, S. C. *et al.* **Reciclaje de residuos de construcción y demolición (RC&D) generados en la Universidad del Valle Sede Meléndez para la fabricación de adoquines.** Revista Ion. Vol. 34, 2021. 27 – 35 p.
- MELO, J. R. de S.; FROTA, C. A. da. **A situação dos resíduos sólidos oriundos de construção civil vertical na cidade Manaus.** V Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica. Maceió, 2010.
- MILLET, D. **A study based on bathymetric data and general limit equilibrium slope stability analysis.** Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Geotécnica e Hidráulica. Chalmers University Of Technology. Suécia, 2011.
- NASSAR, R. U.; SOROUSHAN, P. **Green and durable mortar produced with milled waste glass.** Mag. Concrete Res. 64, No. 7, 2012, p. 605–615.
- NATIONAL LIME ASSOCIATION - NLA. **Lime-treated soil construction manual – lime stabilization & lime modification.** Bulletin 326, 2004.
- NODEHI, M; TAGHVAEE, V. M. **Alkali-Activated Materials and Geopolymer: a Review of Common Precursors and Activators Addressing Circular Economy.** Circular Economy and Sustainability. Engineering, 2021.
- NUGYEN, T. N. *et al.* **Effect of precursors and water to binder ratios on the water permeability of alkali-activated mortars.** 4th International RILEM conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, 2020.
- NUSSBAUM, P. J.; COLLEY, B. E. **Dam construction and facing with soil-cement.** Skokie, PCA - Portland Cement Association, 1971.
- OSSA, A. *et al.* **Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry.** Journal of Cleaner Production. Vol. 135, 2016, 379-386 p.
- PACHECO-TORGAL, F. *et al.* **Alkali-activated binders: A review. Part 2.** About materials and binders manufacture. Construction and Building Materials, v. 22, n. 7, 2008, p. 1315–1322.
- PALOMO, A. *et al.* **Alkali-activated fly ashes: A cement for the future.** Cement and Concrete Research, v. 29, n. 8, 1999, p. 1323–1329.
- PATEL, Y. J.; SHAH, N. **Development of self-compacting geopolymer concrete as a sustainable construction material.** Sustainable Environment Research. Volume 28, Número 6, 2018a, p. 412-421;
- PATEL, Y. J.; SHAH, N. **Study on workability and hardened properties of self compacted geopolymer concrete cured at ambient temperature.** Indian Journal of Science and Technology, Vol 11, 2018b.

- PAYÁ, J. *et al.* **Ativadores alternativos para cimentos ativados por alcalinos**. Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción. Volume 12, Número 1, 2022. p. 16 – 31.
- PCA - PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Soil-cement construction handbook**. Illinois: PCA, 1969.
- PENTEADO, M. M. **Fundamentos de Geomorfologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 1983.
- PETERMAN, J. *et al.* **Alkali-activated geopolymers: a literature review**. Final Technical Report. Air Force Research Laboratory Materials and Manufacturing Directorate Airbase Technologies Division, Applied Research Associates Inc Panama City, Fla., 2010.
- PETRY, S. **Alternatives for bank stabilization – Literature review**. Streambank Erosion BMP Steering Committee. Alberta – Canadá, 2003.
- PHAM, T. T. *et al.* **Effects of superplasticizer and water–binder ratio on mechanical properties of one-part alkali-activated geopolymer concrete**. Buildings Ano 13, N. 1835, 2023.
- PIMENTA, M. C. F.; SHRODER, N. T. **Resíduos da Construção Civil do Município de Porto Velho/RO: da Origem à Disposição Final**. 3º Fórum Internacional De Resíduos Sólidos, Porto Alegre - RS, 13 a 15 de junho de 2011.
- PIMENTEL, L. L. *et al.* **Argamassa com areia proveniente da britagem de resíduo de construção civil – Avaliação de características físicas e mecânicas**. Revista Matéria. Vol. 23, 2018. 14 p.
- PITTA, M. R. **Dimensionamento de pavimentos com camadas estabilizadas com cimento**. São Paulo: ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, 1984.
- _____. **Dosagem das misturas de solo cimento; normas de dosagem e métodos de ensaio**. 3ª. Edição. São Paulo: ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, 2004.
- _____. **Solo-cimento para revestimento de barragens de terra, diques e reservatórios**. 4.ed. São Paulo. ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, 2000.
- PHOO-NGERNKHAM, T. *et al.* **Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA–GBFS geopolymer**. Construction and Building Materials, Volume 91, 2015, p. 1-8.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO VELHO. **Diagnóstico preliminar para revisão do Plano Diretor Participativo do Município de Porto Velho/RO**. SEPOG – Secretaria Municipal de Planejamento e Orçamento e Gestão. Disponível em: https://sempog.portovelho.ro.gov.br/uploads/arquivos/2018/07/27714/15329676_13diagnostico-preliminar.pdf, publicado em julho de 2018b e acessado em 11/01/2019.
- _____. **Relatório de Gestão Ambiental – 2017**. SEMA – Secretaria Municipal de Meio Ambiente. Porto Velho, 2018a.
- _____. **Relatório de Gestão Ambiental – 2018**. SEMA – Secretaria Municipal de Meio Ambiente. Porto Velho, 2019.
- PROVIS, J. L. **Activating solution chemistry for geopolymers**. Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications, 2009, p. 50–71.
- PROVIS, J. L. **Alkali-activated materials**. Cement and Concrete Research, v. 114, 2018, p. 40–48.
- PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. **Geopolymers and related alkali-activated materials**. Annual Review of Materials Research, v. 44, n. 1, 2014, p. 299–327.

- PROVIS, J. L.; *et al.* **Do Geopolymers Actually Contain Nanocrystalline Zeolites? A Reexamination of Existing Results.** Chem. Mater., v. 17, 2005, p. 3075–3085.
- PRS - RECICLADORA DE RESÍDUOS SÓLIDOS. **Projeto de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil em Porto Velho.** Porto Velho, 2014.
- PYNGROPE, M. *et al.* **Properties of álcali-activated concrete (AAC) incorporating demolished Building waste (DBW) as aggregates.** Civil & Environmental Engineering, V. 8, 2021.
- QUECAN, S. J. **Propuesta de alternativ opuesta de alternativas para el apr a el aprovechamient echamiento del ladrillo o del ladrillo como RCD en Colombia – estudio de caso de Bogotá.** Universidad de La Salle. Bogotá, 2019.
- QUEIROZ, C. L. **Estabilização de misturas de solo argiloso e resíduo de construção civil com cimento Portland para uso em pavimentos.** Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2017.
- RAHARDJO, H. *et al.* **Use of recycled crushed concrete and Secudrain in capillary barriers for slope stabilization.** Canadian Geotechnical Journal. Vol. 50, 2013, 662 – 673 p.
- RAMOS, G. M. P. D. *et al.* **Contenção de talude com uso de solo cimento ensacado: projeto em área de interesse social.** RETEC, Vol. 12, N. 2. Ourinhos, 2019. 26 – 42 p.
- RANGARAJU, P. R., *et al.* **Properties and performance of ground glass fiber as a pozzolan in Portland cement concrete.** In Proceedings of the 11th international concrete sustainability conference. Silver Springs, MD, USA: National Ready Mixed Concrete Association, 2016.
- RANGEL, R. C. N. **Influência da variação da molaridade e da temperatura de cura nas propriedades físicas, químicas e mecânicas de argamassas de metacaulim e/ou resíduo de tijolo moído álcalis ativados por hidróxido de sódio.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. 2022, 123 p.
- REDDEN, R.; NEITHALATH, N. **Microstructure, strength, and moisture stability of alkali activated glass powder-based binders.** Cement & Concrete Composites n. 45. 2014, p. 46-56.
- REIS, E. P. da C. *et al.* **Alkali-activation of recycled concrete waste.** International Journal of Advances in Engineering & Technology. Vol. 16, Issue 4, 2023, p. 229-240.
- REIS, G. S. dos. *et al.* **Current applications of recycled aggregates from construction and demolition: a review.** Materials. Vol. 14, 2021. 21 p.
- RICHARDS, D. L.; RADLEY, H. R. **Soil-cement: guide for water resources applications.** PCA - Portland Cement Association, 2006.
- ROGERS, C.; GLENDINNING, S. **Lime requirement for stabilization.** Journal of the Transportation Research Board, Volume 1721 /2000 Geomaterials 2000, p. pp. 9-18, 2000.
- SÁ, W. B. de. **Estudo da interação solo-muro em concreto convencional, com resíduo de construção e demolição (RCD) e alvenaria de pedra.** Dissertação de mestrado. Universidade Católica de Pernambuco, 2006.
- SALAZAR, R. A. R. *et al.* **Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes.** Construction and Building Materials, v. 149, 2017. p. 130–138.

- SALAZAR, R. A. R. *et al.* **Construction and demolition waste (CDW) recycling – as both binder and aggregates – in álcali-activated materials: a novel re-use concept.** Sustainability, v. 12. Issue 14, 2020.
- SALAZAR, R. A. R. *et al.* **Reuse of powders and recycled aggregates from mixed construction and demolition waste in alkali-activated materials and precast concrete units.** Sustainability, V 14, 2022.
- SANTOS, E. C. G. dos. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.
- SANTOS, L. M. dos. **Erosão em taludes de corte - métodos de proteção e estabilização.** Dissertação de mestrado. UEP, Guaratinguetá, 2015.
- SEGANTINI, A. A. da S.; WADA, P. H. **Estudo de dosagem de tijolos de solo cimento com adição de resíduos de construção e demolição.** Acta Scientiarum. Technology, 33(2), 179-183, 2011.
- SEGURA, I. P. *et al.* **A review: Alkali-activated cement and concrete production technologies available in the industry.** Heliyon 9, e15718, 2023.
- SHAKIR, A. *et al.* **Development of Bricks from waste material: A review paper.** Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2013, 812-818 p.
- SHI, C. *et al.* **New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement.** Cement and Concrete Research, v. 41, n. 7, 2011, p. 750–763.
- SHI, Z.; LOTHENBACH, B. **The role of calcium on the formation of alkali-silica reaction products.** Cement and Concrete Research, v. 126, 2019.
- SHOLTES, J. **River Bank Protection.** Cive 717, abr/2013.
- SIDDIKA, A. *et al.* **Alkali-activated foam: Understanding the relationship between rheology, activator-precursor interaction, and pore characteristics.** Construction and Building Materials, 409. 2023.
- SILVA, A. R. C. **Comportamento de talude arenoso imerso em escoamento fluvial.** Dissertação de mestrado. Universidade da Beira Interior. Covilhã - Portugal, 2014.
- SILVA, F. A. N. *et al.* **Preliminary Analysis of the Use of Construction Waste to Replace Conventional Aggregates in Concrete.** Buildings. V. 11, 2021. 13 p.
- SILVA, J. V. **Síntese e caracterização de geopolímeros macroporosos com uso de peróxido de hidrogênio.** Dissertação de mestrado. UFMG, Escola de Engenharia Civil, 2019. 102p.
- SILVEIRA, P. E. M. da. **Aplicação do resíduo de construção e demolição reciclado no compósito solo-cimento.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geociências - Área de concentração em Geociências e Meio- Ambiente. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2005. 134 p.
- SOROUSHAN, P. **Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement.** Constr. Build. Mater. 29, 2012, p. 368–377.
- SUN, Y. *et al.* **Evaluation of rheology and strength development of alkali-activated slag with different silicates sources.** Cement and Concrete Composites, n. 128, 2022.
- TAVARES, P. L. M. *et al.* **Utilização de agregados de resíduos de construção e demolição (RCD) em bases e sub-bases de pavimentos rodoviários. 1º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade.** Gramado, 2018.

- TAVIRA, J. *et al.* **Recycling screening waste and recycled mixed aggregates from construction and demolition waste in paved bike lanes.** Journal of Cleaner Production Vol. 190, 2018, 211-220 p.
- TORGAL, F. P. *et al.* **Handbook of recycled concrete and demolition waste.** Woodhead Publishing, 2013.
- TORGAL, F. P.; JALALI, S. **Utilization of mining wastes to produce geopolymers.** In: Geopolymers, structure, processing, properties and applications, Woodhead Publishing Limited Abington Hall, Cambridge, UK, pp.267-293, 2009.
- TORRES CARRASCO, M. **Reutilización de residuos vítreos urbanos e industriales en la fabricación de cementos alcalinos. Activación, comportamiento y durabilidad.** Tese de doutorado. Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias, Departamento de Química Inorgánica. Madrid, 2015. 433 p.
- TORRES CARRASCO, M. PUERTAS, F. **Waste glass as a precursor in alkaline activation: Chemical process and hydration products.** Construction and Building Materials. Nro 139. 2017, p. 342-354.
- TRANNNIN, I. C. de B.; PANCIERI, T. do A. **Uso de agregados reciclados de resíduos da construção e demolição como alternativa sustentável para a pavimentação.** Revista SODEBRAS – Vol. 14 N° 163, 2019. 26 – 31 p.
- TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA. **Guide to Bridge Hydraulics 2ª.** Edição. Ottawa, Ontario. 181 pp, 2001.
- TRIMIS - TRANSPORTE RESEARCH AND INNOVATION MONITORING AND INFORMATION SYSTEM. **Alternative materials in road construction (Final report).** European Commission, 2001. Disponível em: https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20040909_17270_6_52558_alt-mat.pdf, acessado em 10/01/2021.
- VAN DEVENTER, J. S. J. *et al.* **Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials.** Waste and Biomass Valorization, v. 1, n. 1, 2010, p. 145–155.
- VARGAS, A. S. de. *et al.* **Avaliação da resistência à compressão e da morfologia de cinzas volantes álcali-ativadas a partir de solução combinada de NaOH e Ca(OH)₂.** Revista Tecnologia e Tendências. v. 8 n. 2: Julho / Dezembro – 2009.
- VELAZQUEZ, A. *et al.* **Geopolymer based on concrete demolition waste.** Advanced Powder Technology, V. 27, 2016. p. 1173–1179.
- VELÁZQUEZ, L. E. G. **A influência da umidade de compactação na durabilidade, rigidez e resistência de um solo fino artificialmente cimentado.** Dissertação de Mestrado. PPGEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2016, 115 p.
- VIEIRA, C. S. **Valorization of fine-grain construction and demolition (C&D) waste in geosynthetic reinforced structures.** Waste and Biomass Valorization, Vol. 11, 2020. 1615–1626 p.
- WANG, S. D.; SCRIVENER, K. L.; PRATT, P. L. **Factors affecting the strength of alkali-activated slag.** Cement and Concrete Research, v. 24, n. 6. 1994. p. 1033–1043.
- WELDES, H. H.; LANGE, K. R. **Properties of solubel silicates.** Ind. & Eng. Chemistry. V. 61, n.4, 1969. 29-44p.
- WONG, C. L. *et al.* **Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review.** Journal of Cleaner Production. Vol. 195, 2018. 226-239 p.
- XIAO, R. *et al.* **Evaluation of Glass Powder-Based Geopolymer Stabilized Road Bases Containing Recycled Waste Glass Aggregate.** Transportation Research Record. Vol. 2674, 2020. p. 22–32.

- YUSSLEE, E.; BESKHUROUT, S. **The Physical Properties Study of the Hybrid One-Part Alkali-Activated Argatar.** Disponível em <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4219476>, publicado em 2022, acessado em julho de 2023
- ZHANG, H. L. *et al.* **Evaluating the crushing characteristics of recycled construction and demolition waste for use in road bases.** Transportation Geotechnics. Vol. 28, 2021.
- ZHANG, L.; YUE, Y. **Influence of waste glass powder usage on the properties of alkaliactivated slag mortars based on response surface methodology.** Construction and Building Materials, v. 181, p. 527–534, 2018.
- ZUDA, L. *et al.* **Properties of Alkali Activated Aluminosilicate Material after Thermal Load.** International Journal of Thermophysics, No. 4, 2006. p. 1250-1263.

APÊNDICE 1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS GRANULOMETRIA

Quadro 51. Resultados dos ensaios realizados – areia reciclada.

PREPARAÇÃO DO MATERIAL				PENEIRAMENTO GROSSO							
UMIDADE HIGROSCÓPICA				Recipiente N.º		01					
Recipiente N.º		7	3	-	PENEIRAS		Peso da amostra seca		% que passa da Amostra Total		
Solo Úmido + Tara		98,52	96,58	g	PEN	N.º	mm	Retido	Passado		
Solo Seco + Tara		97,11	94,52	g		2"	50,8	0,00	1973,1	100,0	
Tara		13,67	16,75	g		1 1/2"	38,1	0,00	1973,1	100,0	
Água		1,41	2,06	g		1"	25,4	0,00	1973,1	100,0	
Solo Seco		83,44	77,77	g		3/4"	19,1	24,12	1949,0	98,8	
Teor de Umidade		1,7	2,6	%	004	3/8"	9,5	274,16	1674,8	84,9	
Média		2,2		%	020	N.º 4	4,8	103,43	1571,4	79,6	
a) - Amostra Total Úmida		2000,0		g	007	N.º 10	2,0	330,61	1240,8	62,9	
b) - Solo Seco Retido pela Peneira 10		732,3		g	PENEIRAMENTO FINO						
c) - Solo Úmido Pass. Peneira 10 = (a - b)		1267,7		g	Recipiente N.º		02				
d) - Solo Seco Pas. Peneira 10 = c/ 1 + h		1240,8		g	PESO DA AMOSTRA PARCIAL ÚMIDA					200,0	g
e) - Amostra Total Seca = b + d		1973,1		g	PESO DA AMOSTRA PARCIAL SECA					195,8	g
RESUMO DA GRANULOMETRIA	Pedregulho	37,1		%	PENEIRAS		Peso da amostra seca		% que passa da Amostra	% que passa da Amostra	
	Areia Grossa	33,0		%	PEN	N.º	mm	Retido	Passado		
	Areia Fina	16,9		%	017	N.º 40	0,42	102,66	93,1	47,6	29,9
	Silte + Argila	13,0		%	013	N.º 200	0,074	52,57	40,5	20,7	13,0

Quadro 52. Resultados dos ensaios realizados – vidro reciclado.

PREPARAÇÃO DO MATERIAL				PENEIRAMENTO GROSSO							
UMIDADE HIGROSCÓPICA				Recipiente N.º		01					
Recipiente N.º		4	2	-	PENEIRAS		Peso da amostra seca		% que passa da Amostra Total		
Solo Úmido + Tara		121,14	118,24	g	PEN	N.º	mm	Retido	Passado		
Solo Seco + Tara		121,01	117,90	g		2"	50,8	0,00	1998,2	100,0	
Tara		16,54	12,40	g		1 1/2"	38,1	0,00	1998,2	100,0	
Água		0,13	0,34	g		1"	25,4	0,00	1998,2	100,0	
Solo Seco		104,47	105,5	g		3/4"	19,1	0,00	1998,2	100,0	
Teor de Umidade		0,1	0,3	%	004	3/8"	9,5	222,55	1775,7	88,9	
Média		0,2		%	020	N.º 4	4,8	364,01	1411,7	70,6	
a) - Amostra Total Úmida		2000,0		g	007	N.º 10	2,0	613,04	798,6	40,0	
b) Solo Seco Retido pela Peneira 10		1199,6		g	PENEIRAMENTO FINO						
c) - Solo Úmido Pass. Peneira 10 = (a - b)		800,4		g	Recipiente N.º		02				
d) Solo Seco Pas. Peneira 10 = c/ 1 + h		798,6		g	PESO DA AMOSTRA PARCIAL ÚMIDA					800,0	g
e) Amostra Total Seca = b + d		1998,2		g	PESO DA AMOSTRA PARCIAL SECA					798,2	g
RESUMO DA GRANULOMETRIA	Pedregulho	60,0		%	PENEIRAS		Peso da amostra seca		% que passa da Amostra Parcial	% que passa da Amostra Total	
	Areia Grossa	30,3		%	PEN	N.º	mm	Retido	Passado		
	Areia Fina	4,7		%	017	N.º 40	0,42	605,54	192,7	24,1	9,6
	Silte + Argila	4,9		%	013	N.º 200	0,074	93,88	98,8	12,4	4,9

Quadro 53. Resultados do ensaio de massa específica do pó de vidro.

D. REAL (NBR-6458)	Pic Nº	14	15	UMIDADE HIGROSCÓPICA		
Solo úmido (g)		90,69	88,62	(MATERIAL PASSANDO NA # 2,00 mm)		
Peso do Picnômetro(g)		100,89	78,00	Cápsula Nº.	88	04
Picnômetro+ solo úmido(g)		191,54	166,62	Peso da cápsula+solo úmido(g)	89,54	87,45
Picnômetro+solo+água		389,74	371,54	Peso da cápsula+solo seco(g)	88,89	86,95
Temperatura(°C)		23,0	23,0	Peso da água(g)	0,65	0,50
Picnômetro+água(g)		336,72	319,91	Peso da cápsula(g)	14,86	10,86
Temperatura(°C)		22,5	22,5	Peso do solo seco(g)	74,03	76,09
Densidade Real		2,430	2,416	Umidade (%)	0,9	0,7
Densidade Real Média (a 20°C)		2,423		Umidade Média (%)	0,8	

Quadro 54. Resultados dos ensaios realizados – solo utilizado Fase 4.

AMOSTRA TOTAL SECA			UMIDADE HIGROSCÓPICA			RESUMO	
AMOSTRA TOTAL ÚMIDA			1000,0	CÁPSULA Nº		PEDREG.: ACIMA 4,8mm	6,2
RETIDO Nº 10			142,5	C + S + A		AR. GROSSA: 4,8 - 2,0mm	8,0
PASSANDO Nº 10 ÚMIDA			857,5	C + S		AR. MÉDIA: 2,0 - 0,42mm	83,9
PASSANDO Nº 10 SECA			857,5	C - CÁPSULA		AREIA FINA: Nº40-200	1,6
PESO DA ÁGUA				A - ÁGUA		PASSANDO Nº200	0,4
AMOSTRA TOTAL SECA			1000,0	S - SOLO SECO		TOTAL	100,0
AMOSTRA MENOR Nº 10 ÚMIDA			100,0	UMIDADE		RETIDO: Nº 10 - 200	85,4
AMOSTRA MENOR Nº 10 SECA			99,8	MÉDIA			
MATERIAL RETIDO							
PENEIRA (CÓDIGO)	PENEIRA (POL)	PENEIRA (MM)	PESO GRAMAS	PORC. AMOSTRA MENOR Nº10	PORC. AMOSTRA TOTAL	PORCENTAGEM ACUMULADA	PORC. PASS. DA AM. TOTAL
PEN 001	1"	25,4		-			100,0
PEN 004	3/8"	9,5	35,7	-	3,6	3,6	96,4
PEN 020	Nº 4	4,8	26,4	-	2,6	6,2	93,8
PEN 007	Nº 10	2,0	80,5	-	8,0	14,3	85,8
PEN 017	Nº 40	0,42	62,4	62,5	53,6	67,8	1,9
PEN 015	Nº 200	0,075	14,3	14,3	12,3	80,1	0,35

Quadro 55. Resultados dos ensaios realizados – solo utilizado Fase 5.

PREPARAÇÃO DO MATERIAL				PENEIRAMENTO GROSSO								
UMIDADE HIGROSCÓPICA				Recipiente Nº	01							
Recipiente N.º				12	57	-	PENEIRAS		Peso da amostra seca		% que passa da Amostra Total	
Solo Úmido + Tara				117,40	100,80	g	PEN	N.º	mm	Retido		Passado
Solo Seco + Tara				113,81	97,34	g		2"	50,8	0,00	1948,7	100,0
Tara				27,40	15,50	g		1 1/2"	38,1	0,00	1948,7	100,0
Água				3,59	3,46	g		1"	25,4	0,00	1948,7	100,0
Solo Seco				86,41	81,84	g		3/4"	19,1	26,80	1921,9	98,6
Teor de Umidade				4,2	4,2	%	004	3/8"	9,5	180,20	1741,7	89,4
Média				4,2		%	020	N.º 4	4,8	105,80	1635,9	83,9
a) - Amostra Total Úmida				2000,0		g	007	N.º 10	2,0	304,30	1331,6	68,3
b) - Solo Seco Retido pela Peneira 10				725,8		g	PENEIRAMENTO FINO					
c) - Solo Úmido Pass. Peneira 10 = (a - b)				1274,2		g	Recipiente Nº		02			
d) - Solo Seco Pas. Peneira 10 = c/ 1 + h				1222,9		g	PESO DA AMOSTRA PARCIAL ÚMIDA					200,0 g
e) - Amostra Total Seca = b + d				1948,7		g	PESO DA AMOSTRA PARCIAL SECA					192,0 g
RESUMO DA GRANULOMETRIA			Pedregulho	31,7	%	PENEIRAS			Peso da amostra seca		% que passa da Amostra Parcial	% que passa da Amostra Total
			Areia Grossa	35,5	%	PEN	N.º	mm	Retido	Passado		
			Areia Fina	17,0	%	017	N.º 40	0,42	99,70	92,3	48,1	32,8
			Silte + Argila	15,9	%	013	N.º 200	0,074	47,70	44,6	23,2	15,9

APÊNDICE 2 – RESUMO DOS DADOS – ESTUDO ESTATÍSTICO

RESUMO - RESULTADOS ENSAIOS																									
TEOR CIMENTO	TEMPO CURA	FASE 2 (cimento Portland)				FASE 3 (cimento alternativo)						FASE 6 (cimento alternativo)													
		A/C ou W/L	CP (MPa)	Perda de Massa (%)	HS (MPa)	perda massa HS (%)	HSS (MPa)	perda massa HSS (%)	Precursor	razão A/P	part. PV	conc. NaOH (M)	W/L	HSC (MPa)	perda massa HS (%)	HSSCH (MPa)	perda massa HSS (%)	Precursor	razão A/P	part. PV	conc. NaOH (M)	W/L			
5%	7 DIAS		2,2		1,3		1,2							2,0		2,5									
	14 DIAS	2,4510	2,1	19,70%	1,6	40,4%	1,5	32,1%					2,4510	2,8	18,93%	3,1	21,84%							0,40	
	21 DIAS		2,2		1,9		1,8							3,0		3,3									
	28 DIAS		2,3		2,5		2,2							4,5		4,9									
7%	7 DIAS		2,6		1,7		1,4							3,6		3,1									
	14 DIAS	1,7537	2,9	18,90%	2,0	51,4%	1,5	51,4%					1,7537	4,2	16,33%	4,3	17,93%							0,40	
	21 DIAS		3,8		2,4		1,7							5,1		5,1									
	28 DIAS		4,3		2,6		2,5							5,8		6,5									
10%	7 DIAS		4,3		2,2		2,1							4,0		5,3									
	14 DIAS	0,9900	4,4	12,30%	2,4	52,3%	2,4	38,3%					0,9900	5,1	14,93%	7,7	13,42%							0,40	
	21 DIAS		5,4		2,5		2,7							5,4		8,1									
	28 DIAS		6,9		2,9		2,9							6,2		9,7									
13%	7 DIAS		6,6		2,7		2,4							4,8		6,8									
	14 DIAS	1,0373	6,6	12,50%	2,8	31,8%	2,7	35,4%					1,0373	5,1	13,43%	7,7	8,94%							0,40	
	21 DIAS		7,0		2,8		2,8							6,1		8,2									
	28 DIAS		7,7		3,1		3,2							6,9		10,1									
15%	7 DIAS		7,6		2,8		2,6							5,1		7,9									
	14 DIAS	0,9917	7,7	7,60%	2,8	40,3%	2,8	41,3%					0,9917	5,8	13,67%	8,8	6,11%							0,40	
	21 DIAS		8,2		3,1		3,1							6,6		10,5									
	28 DIAS		9,1		3,2		3,4							6,5		11,9									

TEOR CIMENTO	HS (Fase 3)		HSSS (Fase 3)		HS (Fase 6)		HSSS (Fase 6)					
	massa seca inicial HS3 (g)	relação w/b HS3	perda massa HS3 (%)	massa seca HSSS3 (g)	relação w/b HSSS3	perda massa HSSS3 (%)	massa seca inicial H6 (g)	relação w/b HS6	perda massa HS6 (%)	massa seca inicial HSSS6 (g)	relação w/b HSSS6	perda massa HSSS6 (%)
5%	2937	2,451	40,40%	2693	2,451	32,10%	2669	0,4	18,93%	2655	0,4	21,84%
7%	2981	1,754	51,40%	2981	1,754	51,40%	2650	0,4	16,33%	2683	0,4	17,93%
10%	2912	0,990	52,30%	2796	0,990	38,30%	2852	0,4	14,93%	2819	0,4	13,42%
13%	2867	1,037	31,80%	2776	1,037	35,40%	2604	0,4	13,43%	2537	0,4	8,94%
15%	3054	0,992	41,30%	2941	0,992	41,30%	2526	0,4	13,67%	2424	0,4	6,11%

ANEXO 1 – CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO DA PRENSA UTILIZADA


Certificado de Calibração
Laboratório Medição Rondônia

Certificado: 194752/20

Data Calibração: 06/10/2020

Validade: 10/2021

OS: 624816-A/2020

1 / 2

Solicitante: BETONTECH TECNOLOGIA DE CONCRETO LTDA
 Rua Rio Candelas, 4171 - Nova Esperança - Porto Velho - RO - 76822-550 - Brasil

Contratante: O MESMO

Características do Instrumento

Descrição: PRENSA HIDRAULICA

Identificação: 3044

Marca: SOLOTEST

Condições Ambientais

Serviço executado nas instalações do cliente:

Temperatura: 23,1 °C ± 1,0 °C Umidade: 55,0 %ur ± 5,0 %ur

Procedimentos

Calibração Executada conforme: ITTEC010

Revisão: 3

Padrões

Identificação:	Marca:	Certificado:	Calibrado por:	Validade:
PTF-0619	ALFA	1156105	CIT-0045	09/2023
PTO-1160	HIGHMED	J016595/2019	K&L-C-AL0065	04/2022

Resultados Obtidos

FORÇA

Faixa de Uso: 0,00 a 100,00 tnf

Faixa de Indicação: 0,00 a 100,00 tnf Resolução: 0,01 tnf

V.I	V.R	Erro de Medição	Incerteza Expandida	Incerteza Expandida + Erro	(k)	Veff
tnf	tnf	tnf	tnf	tnf		
5,00	5,000	0,000	0,525	0,525	2,00	Infinito
10,00	10,420	-0,420	0,525	0,945	2,00	Infinito
15,00	15,020	-0,020	0,650	0,670	2,00	Infinito
20,00	20,020	-0,020	0,650	0,670	2,00	Infinito
25,00	25,150	-0,150	0,851	1,001	2,00	Infinito
30,00	30,200	-0,200	0,851	1,051	2,00	Infinito
40,00	40,220	-0,220	1,053	1,273	2,00	Infinito
50,00	50,220	-0,220	1,420	1,640	2,00	Infinito
60,00	60,200	-0,200	1,702	1,902	2,00	Infinito
70,00	70,320	-0,320	2,059	2,379	2,00	Infinito

O CONTEÚDO APRESENTADO NESTE DOCUMENTO/REGISTRO TEM SIGNIFICADO RESTRITO E SE APLICA SOMENTE A ESTA SITUAÇÃO. É PROIBIDA A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DO MESMO SEM A AUTORIZAÇÃO DO EMITENTE.



Certificado de Calibração Laboratório Medição Rondônia

Certificado: 194752/20

Data Calibração: 06/10/2020

Validade: 10/2021

OS: 624816-A/2020

2 / 2

Observações Gerais

NÃO HOUVE AJUSTE

- V.I: Valor indicado no instrumento na unidade do mesmo.
- V.R: Valor de Referência na unidade de medição do padrão.
- A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição 1 com ν eff graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- A condição de Aprovado/Reprovado se restringe apenas as grandezas metrologicas do instrumento, sendo que o limite de erro especificado para esta condição é de responsabilidade do Cliente.
- A operação de ajuste / regulagem não faz parte do escopo dos serviços.
- A validade de calibração do instrumento, quando apresentada neste certificado, é de responsabilidade do cliente.

Endereço de Emissão: Rua Zona Franca, 2034 - Bairro: Conceição - Porto Velho - Rondônia
Data de emissão: 15 de Outubro de 2020

Assinado Eletronicamente

Gleidson Ramos Marques

Gerente Técnico



Assinado Digitalmente por:
Gleidson Ramos Marques
Data: 20/10/2020 18:10

O CONTEÚDO APRESENTADO NESTE DOCUMENTO/REGISTRO TEM SIGNIFICADO RESTRITO E SE APLICA SOMENTE A ESTA SITUAÇÃO. É PROIBIDA A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DO MESMO SEM A AUTORIZAÇÃO DO EMITENTE.



Certificado de Calibração Laboratório Medição Rondônia

Certificado: 117843/22

Data Calibração: 02/05/2022

Validade: 05/2023

OS: 755114-A/2022

1 / 2

Solicitante: BETONTECH TECNOLOGIA DE CONCRETO LTDA
Local do serviço: Rua Rio Candéias, 4171, - Nova Esperança - Porto Velho - RO - 76822-550 - Brasil

Contratante: BETONTECH TECNOLOGIA DE CONCRETO LTDA

Características do Instrumento

Descrição: PRENSA HIDRAULICA **Identificação:** 3044
Marca: SOLOTEST **Modelo:** 1501220
N° Série: 3044

Condições Ambientais

Serviço executado nas instalações do solicitante.

Temperatura: 23,4 °C ± 1,0 °C **Umidade:** 53,0 %ur ± 5,0 %ur

Procedimentos

Calibração Executada conforme: ITTEC010 **Revisão:** 3

Padrões

Identificação:	Marca:	Certificado:	Calibrado por:	Validade:
PTF-0619 CÉLULA DE CARGA PADRÃO	ALFA	1156105	SENAI-CAL0045	09/2023
PTO-0726 TERMOHIGRÔMETRO PADRÃO	MINIPA	PTO-072623/09/21	MEDIÇÃO-CAL0183	09/2022

Resultados Obtidos
FORÇA
Faixa de Uso: 0,00 a 100,00 tnf

Faixa de Indicação: 0,00 a 100,00 tnf **Resolução:** 0,01 tnf

V.R	V.I	Erro de Medição	Incerteza Expandida	Incerteza Expandida + Erro	(k)	Veff
tnf	tnf	tnf	tnf	tnf		
5,000	5,05	0,05	0,53	0,58	2,00	Infinito
10,000	10,13	0,13	0,53	0,66	2,00	Infinito
15,000	15,10	0,10	0,65	0,75	2,00	Infinito
20,000	20,26	0,26	0,65	0,91	2,00	Infinito
25,000	25,23	0,23	0,85	1,08	2,00	Infinito
30,000	30,47	0,47	0,85	1,32	2,00	Infinito
40,000	40,65	0,65	1,05	1,70	2,00	Infinito
50,000	50,95	0,95	1,42	2,37	2,00	Infinito
60,000	61,12	1,12	1,70	2,82	2,00	Infinito
70,000	71,52	1,52	2,06	3,58	2,00	Infinito

O CONTEÚDO APRESENTADO NESTE DOCUMENTO/REGISTRO TEM SIGNIFICADO RESTRITO E SE APLICA SOMENTE A ESTA SITUAÇÃO. É PROIBIDA A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DO MESMO SEM A AUTORIZAÇÃO DO EMITENTE.



Certificado de Calibração Laboratório Medição Rondônia

Certificado: 117843/22

Data Calibração: 02/05/2022

Validade: 05/2023

OS: 755114-A/2022

2 / 2

Observações Gerais

NÃO HOUVE AJUSTE

- V.R: Valor de Referência na unidade de medição do padrão.
- V.E: Valor médio indicado no instrumento na unidade de medição do mesmo.
- A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com Veff graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- A condição de Aprovado/Reprovado se restringe apenas as grandezas metroológicas do instrumento, sendo que o limite de erro especificado para esta condição é de responsabilidade do Cliente.
- A operação de ajuste / regulagem não faz parte do escopo dos serviços.
- A validade de calibração do instrumento, quando apresentada neste certificado, é de responsabilidade do cliente.

Endereço de Emissão: Rua Zona Franca, 2034 - Bairro: Conceição - Porto Velho - Rondônia
Data de emissão: 17 de Maio de 2022

Assinado Eletronicamente
Gleidson Ramos Marques
Gerente Técnico



Assinado Digitalmente por:
Gleidson Ramos Marques
Data: 19/05/2022 21:05

O CONTEÚDO APRESENTADO NESTE DOCUMENTO/REGISTRO TEM SIGNIFICADO RESTRITO E SE APLICA SOMENTE A ESTA SITUAÇÃO. É PROIBIDA A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DO MESMO SEM A AUTORIZAÇÃO DO EMITENTE.



Certificado de Calibração Laboratório Medição Rondônia



Certificado: 138449/23

Data Calibração: 07/06/2023

Validade: 06/2024

OS: 853133-A/2023

1 / 2

Solicitante: BETONTECH TECNOLOGIA DE CONCRETO LTDA

Local do serviço: Rua Rio Candelas, 4171, - Nova Esperança - Porto Velho - RO - 76822-550 - Brasil

Contratante: BETONTECH TECNOLOGIA DE CONCRETO LTDA

Características do Instrumento

Descrição: PRENSA HIDRAULICA

Identificação: 3044

Marca: SOLOTEST

Modelo: 1501220

Nº Série: 3044

Condições Ambientais

Serviço executado nas instalações do solicitante.

Temperatura: 29.5 °C ± 1.0 °C

Umidade: 54.0 %ur ± 5.0 %ur

Procedimentos

Calibração Executada conforme:

ITTEC010

Revisão: 3

Padrões**Identificação:**

PTF-0619 CÉLULA DE CARGA PADRÃO

Marca:

ALFA

Certificado:

1156105

Calibrado por:

GENAI-CAL0045

Validade:

09/2023

PTO-0726 TERMOMIGRÔMETRO PADRÃO

MINIPA

PTO-0726 16/09/22

MEDIÇÃO

08/2023

Resultados Obtidos**FORÇA**

Faixa de Uso: 0,00 a 100,00 tnf

Faixa de Indicação: 0,00 a 100,00 tnf Resolução: 0,01 tnf

V.R	V.I	Erro de Medição	Incerteza Expandida	Incerteza Expandida + Erro	(k)	Veff
tnf	tnf	tnf	tnf	tnf		
0,000	0,000	0,000	0,525	0,525	2,00	Infinito
5,000	5,180	0,180	0,525	0,705	2,00	Infinito
10,000	10,220	0,220	0,525	0,745	2,00	Infinito
15,000	15,100	0,100	0,650	0,750	2,00	Infinito
20,000	20,340	0,340	0,650	0,990	2,00	Infinito
25,000	25,230	0,230	0,851	1,081	2,00	Infinito
30,000	30,340	0,340	0,851	1,191	2,00	Infinito
40,000	40,100	0,100	1,053	1,153	2,00	Infinito
50,000	50,420	0,420	1,420	1,840	2,00	Infinito
60,000	60,540	0,540	1,702	2,242	2,00	Infinito
70,000	70,610	0,610	2,059	2,659	2,00	Infinito

O CONTEÚDO APRESENTADO NESTE DOCUMENTO/REGISTRO TEM SIGNIFICADO RESTRITO E SE APLICA SOMENTE A ESTA SITUAÇÃO. É PROIBIDA A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DO MESMO SEM A AUTORIZAÇÃO DO EMITENTE.



Certificado de Calibração Laboratório Medição Rondônia

Certificado: 138449/23

Data Calibração: 07/06/2023

Validade: 06/2024

OS: 853133-A/2023

2 / 2

Observações Gerais

HOUVE AJUSTE

- V.R: Valor de Referência na unidade de medição do padrão.
- V.I: Valor médio indicado no instrumento na unidade de medição do mesmo.
- A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com V_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-402.
- A condição de Aprovado/Reprovado se restringe apenas as grandezas metrológicas do instrumento, sendo que o limite de erro especificado para esta condição é de responsabilidade do Cliente.
- A operação de ajuste / regulagem não faz parte do escopo dos serviços.
- A validade de calibração do instrumento, quando apresentada neste certificado, é de responsabilidade do cliente.
- Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido a calibração nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

Endereço de Emissão: Rua Zona Franca, 2034 - Bairro: Conceição - Porto Velho - Rondônia
Data de emissão: 12 de Junho de 2023

Assinado Eletronicamente

PAMELLA DANTAS MARQUES

Gerente Técnico



Assinado Digitalmente por:
PAMELLA DANTAS
MARQUES
Data: 13/06/2023 18:42

O CONTEÚDO APRESENTADO NESTE DOCUMENTO/REGISTRO TEM SIGNIFICADO RESTRITO E SE APLICA SOMENTE A ESTA SITUAÇÃO. É PROIBIDA A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DO MESMO SEM A AUTORIZAÇÃO DO EMITENTE.