



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO ARENOSO ESTABILIZADO
COM CINZA DE FUNDO DE BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR (CBCA) E CAL
DE CONCHA DE MARISCO**

ALISSON DO NASCIMENTO LIMA

Campina Grande – PB

Julho de 2026

ALISSON DO NASCIMENTO LIMA

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO ARENOSO ESTABILIZADO
COM CINZA DE FUNDO DE BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR (CBCA) E CAL
DE CONCHA DE MARISCO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotecnia

Linha de Pesquisa: Geotecnia Ambiental e Obras de Terra

Orientadora: Dra. Carina Silvani

Campina Grande – PB

Julho de 2026

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Sistema de Bibliotecas - SISTEMOTECA
Catalogação de Publicação na Fonte. UFCG - Biblioteca Central

L732c

Lima, Alisson do Nascimento.

Comportamento mecânico de um solo arenoso estabilizado com cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar (CBCA) e cal de concha de marisco / Alisson do Nascimento Lima. – 2026.

169 f. : il. color.

Tese (doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2026.

"Orientação: Profa. Dra. Carina Silvani".

Referências.

1. Estabilização de solos. 2. Resíduos Agroindustriais. 3. Ligantes Alternativos. 4. Reações Pozolânicas. I. Silvani, Carina. II. Título.

UFCG/BC

CDU 624.138.3(043.2)

ALISSON DO NASCIMENTO LIMA

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO ARENOSO ESTABILIZADO
COM CINZA DE FUNDO DE BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR (CBCA) E CAL
DE CONCHA DE MARISCO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) da
Universidade Federal de Campina Grande
(UFCG), como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil
e Ambiental.

Tese aprovada em: 02/07/2026

BANCA EXAMINADORA:

Dra. Carina Silvani - UFCG
(Orientadora)

Dra. Aline Figueirêdo da Nóbrega - UFCG
(Examinadora interna)

Dr. Adriano da Silva Félix - UFCG
(Examinador interno)

Dr. Eduardo Pavan Korf - UFFS
(Examinador externo)

PhD. Nilo Cesar Consoli - UFRGS
(Examinador externo)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

2. **ALUNO(A): ALISSON DO NASCIMENTO LIMA / COMISSÃO EXAMINADORA: DRA. CARINA SILVANI - PPGECA/UFCG - (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DRA. ALINE FIGUEIRÊDO DA NÓBREGA – PPGECA/UFCG – EXAMINADORA INTERNA, DR. ADRIANO DA SILVA FÉLIX - PPGECA/UFCG - EXAMINADOR INTERNO, DR. EDUARDO PAVAN KORF – PPGCTA/UFFS - EXAMINADOR EXTERNO, DR. NILO CESAR CONSOLI - PPGECA/UFRGS - EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 24/2026). / TÍTULO DA TESE: “COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO ARENOSO ESTABILIZADO COM CINZA DE FUNDO DE BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR (CBCA) E CAL DE CONCHA DE MARISCO” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INÍCIO: 14:00HORAS / NO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS, BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFCG, EM CAMPINA GRANDE, DE FORMA HÍBRIDA.**

3. **EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) ALUNO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA TESE, SENDO-LHE ATRIBUÍDO O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA, CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE TESE, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO(A), ALUNO(A) E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**

4. **CAMPINA GRANDE, 02 DE JULHO DE 2026**

5.

6.

7.

8.

9.



Documento assinado digitalmente
EDUARDO PAVAN KORF
Data: 07/07/2026 10:27:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

EDUARDO PAVAN KORF – PPGCTA/UFFS - EXAMINADOR EXTERNO



Documento assinado eletronicamente por **Alisson do Nascimento Lima, Usuário Externo**, em 03/07/2026, às 15:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Nilo Cesar Consoli, Usuário Externo**, em 03/07/2026, às 15:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **CARINA SILVANI, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/07/2026, às 16:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALINE FIGUEIREDO DA NOBREGA, PROFESSOR**, em 04/07/2026, às 12:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 06/07/2026, às 08:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adriano da Silva Félix, Usuário Externo**, em 06/07/2026, às 10:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **6608136** e o código CRC **0021AE9C**.

RESUMO

O desenvolvimento de ligantes alternativos derivados de resíduos agroindustriais surgiu como uma estratégia sustentável para reduzir o uso de materiais cimentícios convencionais na estabilização do solo. Nesse contexto, diversas fontes de materiais pozzolânicos, principalmente cinzas residuais de biomassa, e calce alternativas têm sido avaliadas para uso na composição de ligantes mais sustentáveis. A cinza de biomassa do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), como fonte de pozzolana, e as conchas de mariscos como fonte de carbonato de cálcio, que pode ser convertido em cal, representam materiais promissores no desenvolvimento de um agente estabilizante para solos. Logo, este estudo tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico de um solo arenoso estabilizado com cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar (CBCA) e cal de concha de marisco. Inicialmente, produziu-se a cal calcítica a partir de conchas de mariscos, nas formas virgem (CCV) e hidratada (CCH), e procedeu-se à sua caracterização física, química, mineralógica e morfológica. Os ensaios de resistência à compressão simples (q_u) foram executados com base em um planejamento fatorial de delineamento composto central rotacional (DCCR), em que as variáveis independentes consideradas foram o teor de CCH, o teor de CBCA e os pesos específicos secos. A avaliação da resposta geomecânica das misturas solo-CBCA e solo-CBCA-CCH foi realizada por meio de ensaios triaxiais do tipo isotropicamente consolidado com cisalhamento drenado (CID); para estes ensaios, foram considerados como variáveis o teor de CBCA e o teor de CCH. Ensaios de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e difração de raios X (DRX) foram utilizados para identificar a formação de géis de cimentação. Os resultados indicaram a viabilidade técnica de produzir uma cal, com potencial aplicabilidade como aglomerante e características similares à cal comercial. Os ensaios de resistência à compressão simples mostraram aumento de resistência à compressão simples (q_u) devido a cimentação provida pela CBCA e CCH, com resultados máximos da ordem de 2MPa. Para os resultados de q_u foi aplicado o método de dosagem racional baseado na razão porosidade/teor volumétrico de aglomerante, com uma proposição de um novo ajuste no índice que pondera os efeitos da CBCA e da CCH como teor volumétrico do aglomerante o índice porosidade/teor volumétrico de cal-cinza ajustado ($\eta/(L_{iv}^{0,28} * A_{iv}^y)$). Resultados de ensaios triaxiais mostraram o desenvolvimento de coesão devido ao processo de cimentação das amostras com CBCA e CCH. Maiores resultados de coesão foram obtidos dado o aumento do teor de CBCA e CCH na mistura, com ênfase no aumento de CBCA, que forneceu sílica amorfa para que as reações pozzolânicas acontecessem. Além disso, resultados de FTIR e DRX mostram a formação dos géis de

cimentação e que o peso específico e teores de CBCA e CCH influenciam na identificação desses géis. Por fim, foi observada a efetividade do uso da CBCA e CCH na formação de um agente cimentante para solos granulares, sendo uma alternativa potencialmente mais sustentável para a estabilização química de solos.

Palavras-chave: Estabilização de solos, resíduos agroindustriais, ligantes alternativos, reações pozolânicas

ABSTRACT

The development of alternative binders derived from agro-industrial residues has emerged as a sustainable strategy for reducing the use of conventional cementitious materials in soil stabilization. In this context, sources of pozzolanic materials, mainly residual biomass ash and alternative limes, have been evaluated for use in the composition of more sustainable binders. Sugarcane bagasse biomass bottom ash (SCBBA), as a source of pozzolan, and seashells, as a source of calcium carbonate that can be converted into lime, represent promising materials for developing a stabilizing agent for soils. Therefore, this study aimed to evaluate the mechanical behavior of a sandy soil stabilized with sugarcane bagasse biomass bottom ash (SCBBA) and seashell hydrated lime (SHL). Initially, the seashell limes was produced from seashell residues, as quicklime (SQL) and as hydrated lime (SHL), and then characterized through physical, chemical, mineralogical, morphological, and thermal analyses. Unconfined compressive strength (UCS) tests were performed using a Central Composite Rotatable Design (CCRD), with hydrated seashell lime content, SCBBA content, and dry unit weight as independent variables. The geomechanical response of soil–SCBBA and soil–SCBBA–SHL mixtures was investigated through isotopically consolidated drained (CID) triaxial tests, considering SCBBA and SHL contents as experimental variables. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and X-ray Diffraction (XRD) analyses were conducted to identify the formation of cementitious products. The results demonstrated the technical feasibility of producing a calcitic hydrated lime with characteristics comparable to those of commercial lime and with potential applicability as a soil stabilizing agent. The unconfined compressive strength results (q_u) revealed significant strength gains promoted by the combined cementation provided by SCBBA and SHL, with maximum strengths reaching approximately 2 MPa. Based on the rational dosage approach, a modified porosity/lime-ash volumetric content adjusted index was proposed, represented by $\eta/(L_{iv}^{0,28} * A_{iv}^y)$, which successfully accounted for the combined effects of lime and ash contents. Triaxial test results indicated that the stabilization process promoted the development of cohesion, which increased with increasing SCBBA and SHL contents, particularly with the increase in SCBBA content, highlighting the importance of amorphous silica availability for pozzolanic reactions. Furthermore, FTIR and XRD analyses confirmed the formation of cementitious gels and demonstrated that dry unit weight, SCBBA content, and HSL content influenced the development and identification of these products. Overall, the results demonstrate the effectiveness of SCBBA and hydrated seashell lime in

forming a cementing agent for granular soils, representing a potentially more sustainable alternative to chemical soil stabilization.

KEY-WORDS: soil stabilization, agro-industrial residues, alternative binders; pozzolanic reactions

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pelo dom da vida e por todas as pessoas que colocou em meu caminho ao longo desta jornada.

Agradeço imensamente à minha família, base fundamental da minha formação e de todas as minhas conquistas. Em especial, à minha mãe, Maria Gertudes, meu maior exemplo de força e amor incondicional.

Aos meus irmãos e sobrinhos, que contribuíram e continuam contribuindo para a minha formação como pessoa. Em especial, à minha irmã Auberlane e ao meu cunhado Jadson, pela amizade, apoio e companheirismo. E pelo maior presente que me deram: meu afilhado Pedro.

À minha orientadora e amiga, Carina, pela confiança, pela paciência e por toda a orientação ao longo desta caminhada. Em meio aos inúmeros desafios e incertezas que fazem parte da trajetória do doutorado, ter alguém verdadeiramente disposto a ajudar e a guiar torna o percurso mais leve e significativo.

Aos membros da banca: Dr. Nilo Consoli; Dra. Aline Nóbrega; Dr. Adriano Félix e Dr. Eduardo Korf, pelos comentários enriquecedores. Além das relevantes contribuições nas etapas anteriores do Professor Pedro Prietto e da Professora Lêda Lucena.

Aos meus amigos, que se fizeram presentes em todos os momentos e sempre torceram pelo meu sucesso. Em especial, Nathalya, Laís, Adrian, Milleny, Renato, Juliana, Julyane, Edilene, Camila e Jorginho.

Aos amigos do laboratório, com quem compartilhei ensaios, discussões, almoços e risadas, tornando essa trajetória mais agradável e enriquecedora. Meu agradecimento a Vitor Braga, Rogério, Osires, Victor Emanuel, Daniel, Carol, Melissa, Duda, Jucimara, Eloísa, Adla, Lara, Jorge, Gilson e Manoel, além de tantos outros com quem tive a oportunidade de compartilhar experiências e aprendizados.

Aos novos amigos que encontrei em Cuiabá, Glauco, Eloá, João e Cardoso. Obrigado pela acolhida, amizade e pelo apoio.

Aos técnicos e funcionários do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), Netinho, Arthur e Jadilson, pelo suporte prestado durante a realização dos ensaios e das análises laboratoriais.

Ao Laboratório de Materiais Multifuncionais e Nanocompósitos (LAMMEN-UFRN) ao Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste (CERTBIO-UFCG) pelas análises fornecidas para desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Campina Grande e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA), bem como aos professores que contribuíram para a minha formação acadêmica e profissional, em especial aos docentes da área de Geotecnia.

Por fim, o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. O incentivo proporcionado por esta instituição foi fundamental para a realização desta pesquisa e para o desenvolvimento da ciência no país.

LISTA DE SÍMBOLOS

φ	ângulo de atrito interno
ν	Coefficiente de Poisson
ε_v	Deformação volumétrica
ε_s	Deformação distorcional
ε_a	Deformação axial
c'	Intercepto coesivo
M	inclinação da envoltória de ruptura
η	Porosidade
γ_d	Peso específico aparente seco
γ_{ss}	Peso específico real do solo
γ_{sL}	Peso específico real da cal
γ_{sCBCA}	Peso específico real da CBCA
V_{CP}	Volume do corpo de prova
V_L	Volume de cal
ΔV	Variação de volume
V_o	Volume inicial da amostra.
m_L	Massa de cal
m_s	Massa de solo
G	Módulo cisalhante
G/p'	Módulo cisalhante normalizado
E	Módulo de elasticidade
L_{iv}	Teor volumétrico de cal
B_{iv}	Teor volumétrico de ligante
A_{iv}	Teor volumétrico de cinza

q Tensão desviadora

p' Tensão efetiva média

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BET	Brunauer-Emmet-Teller
C-A-S-H	Hidratos de Silicato de Alumínio de Cálcio
CBCA	Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar
CCH	Cal de Conchas de Marisco Hidratada
CCV	Cal de Conchas de Marisco Viva
CP	Corpo de Prova
C-S-H	Silicatos de Cálcio Hidratado
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difração de Raios X
DTA	Análise Térmica Diferencial
FRX	Fluorescência de Raios X
ICL	Initial Consumption of Lime
IP	Índice de Plasticidade
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentação
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Norma Brasileira
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
pH	Potencial Hidrogeniônico
qu	Resistência à compressão simples

R² Coeficiente de Determinação

SE Superfície Específica

SUCS Sistema Unificado de Classificação dos Solos

TGA Análise Termogravimétrica

UFCG Universidade Federal de Campina Grande

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismo de estabilização com cal e sílica amorfa em solo arenoso.....	29
Figura 2. Mecanismo das reações de estabilização em solo cimento (a) em função da hidratação do cimento e (b) em função das reações pozolânicas.....	31
Figura 3. Processo simplificado de fabricação de cimento, com interesse específico nas emissões de CO ₂	33
Figura 4. Esquema do aproveitamento energético da biomassa e das cinzas da biomassa para cimento e concreto.....	37
Figura 5. Combustão direta em usina termelétrica a biomassa	38
Figura 6. Difração de raios-X de cinzas volantes e cinzas de fundo de carvão mineral	39
Figura 7. Mapa de distribuição das áreas de plantio de cana-de-açúcar no Brasil	41
Figura 8. Ciclo de produção da cal de casca de ovos	47
Figura 9. Estrutura da concha de um marisco	49
Figura 10.(a) e (b) Depósito a céu aberto de conchas residuais na margem do Rio Igarassu-PE e (c) imagem de satélite da área.....	51
Figura 11. Efeito do tempo de cura na resistência a compressão simples em misturas solo-cinza volante-cal de carbureto.....	58
Figura 12. Variação da resistência à compressão simples para diferentes teores de cal: (a) amostras SRAB-cal, (b) amostras SRAB (12,5% FA)-cal e (c) amostras SRAB (25% FA)-cal	58
Figura 13. Resistência compressão simples de misturas areia-cal de carbureto(CL)- cinza de casca de arroz (RHA)/ pó de vidro (GG).....	61
Figura 14. Efeito da cinza de casca de arroz e cal na resistência a compressão simples	62
Figura 15. Curva de dosagem ajustada pelo índice η/L_{iv} (a) e η/B_{iv} (b).....	65
Figura 16. Comportamento tensão-deformação de um solo estabilizado com cinza volante e cal de carbureto	67
Figura 17. Comportamento tensão deformação de uma areia estabilizada com cal cimento e cinza de casca de arroz	69
Figura 18. Variação da resistência ao cisalhamento em função do aumento do teor de CLR (a) e período cura (b).....	70
Figura 19. Fluxograma da metodologia.....	71
Figura 20. Amostras de conchas intactas (a) e após a limpeza e desinfecção (b).	72
Figura 21. Ponto de coleta de resíduos de mariscagem (conchas)	72

Figura 22. Curva granulométrica do solo arenoso.....	73
Figura 23. Difratoograma do solo estudado	74
Figura 24. Área de depósito de cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar.....	75
Figura 25. Cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar bruta (a) e após peneiramento	76
Figura 26. Curva granulométrica da CBCA	76
Figura 27. Difratoograma da CBCA	77
Figura 28. Procedimento de moagem das conchas de marisco utilizando moinho de rolo.....	79
Figura 29. Amostra de pó de conchas calcinado a 900°C	79
Figura 30. Curva de consumo inicial de cal para mistura solo+35% de CBCA	84
Figura 31. Curva de compactação solo+35%CBCA e pontos de moldagem	85
Figura 32. Equipamento triaxial	90
Figura 33. DRX do pó de conchas com tempos de 0, 1, 2 e 3 horas de queima a 900°C.	95
Figura 34. Curvas granulométricas da CCV e CCH.....	96
Figura 35. Termogravimetria da cal de conchas nas formas virgem e hidratada	98
Figura 36. DRX das amostras CCH e CCV	100
Figura 37. MEV da amostra de CCV e CCH com (a) e (b) 2500 vezes de magnificação e (c) e (d) 5000 vezes de magnificação, respectivamente	101
Figura 38. Efeito do teor de CBCA na resistência à compressão simples.....	103
Figura 39. Efeito da cal de concha de marisco hidratada na resistência a compressão simples	104
Figura 40. Efeito do peso específico seco na resistência compressão simples	105
Figura 41. Gráfico de Pareto para resultados de resistência à compressão simples.....	106
Figura 42. Gráfico de valores observados versus preditos pelo modelo	108
Figura 43. Superfície resposta de q_u em função do teor de CCH e teor de CBCA	109
Figura 44. Superfície resposta de q_u em função do teor de CCH e peso específico seco.....	109
Figura 45. Superfície resposta de q_u em função do teor de CBCA e peso específico seco ...	110
Figura 46. Resistência à compressão simples em função do índice porosidade/teor volumétrico de cal de concha de marisco	111
Figura 47. Resistência a compressão simples em função do índice porosidade/teor volumétrico de ligante (B_{IV}).....	112
Figura 48. Resistência a compressão simples em função do teor do índice porosidade/teor volumétrico de cal e cinza ajustado.....	114

Figura 49. Comportamento tensão-deformação e volumétrico da mistura solo-diferentes teores de CBCA-5CCH na tensão confinante de 50kPa	115
Figura 50. Comportamento tensão-deformação e volumétrico da mistura solo-diferentes teores de CBCA-5CCH na tensão confinante de 100kPa	116
Figura 51. Comportamento tensão-deformação e volumétrico da mistura solo-diferentes teores de CBCA-5CCH na tensão confinante de 150kPa	116
Figura 52. Comportamento tensão-deformação e volumétrico da mistura Solo-35CBCA-diferentes teores de cal na tensão confinante de 50kPa.....	119
Figura 53. Comportamento tensão-deformação e volumétrico da mistura Solo-35CBCA-diferentes teores de cal na tensão confinante de 100kPa.....	119
Figura 54. Comportamento tensão-deformação e volumétrico da mistura Solo-35CBCA-diferentes teores de cal na tensão confinante de 150kPa.....	120
Figura 55. Envoltória de ruptura no plano p' versus q para amostra Solo-25CBCA-0CCH e Solo-25CBCA-5CCH no pico.	121
Figura 56. Envoltória de ruptura no plano p' versus q para amostra Solo-35CBCA-0CCH e Solo-35CBCA-5CCH no pico.	122
Figura 57. Envoltória de ruptura no plano p' versus q para amostra Solo-45CBCA-0CCH e Solo-45CBCA-5CCH no pico.	122
Figura 58. Envoltória de ruptura no plano p' versus q para amostra Solo-35CBCA-0CCH e Solo-35CBCA-3CCH no pico	125
Figura 59. Envoltória de ruptura no plano p' versus q para amostra Solo-35CBCA-0CCH e Solo-35CBCA-7CCH no pico	125
Figura 60. Envoltória de ruptura no plano p' versus q da mistura solo-25CBCA-5CCH no pico e no pós-pico.....	126
Figura 61. Envoltória de ruptura no plano p' versus q da mistura solo-35CBCA-5CCH no pico e no pós-pico.....	127
Figura 62. Envoltória de ruptura no plano p' versus q da mistura solo-45CBCA-5CCH no pico e no pós-pico.....	127
Figura 63. Envoltória de ruptura no plano p' versus q da mistura solo-35CBCA-3CCH no pico e no pós-pico.....	128
Figura 64. Envoltória de ruptura no plano p' versus q da mistura solo-35CBCA-7CCH no pico e no pós-pico.....	128

Figura 65. Comportamento tensão-dilatância para a mistura solo-diferentes teores de CBCA-5%CCH, para as tensões de confinamento de (a) 50kPa, (b) 100 kPa e (c) 150kPa.....	130
Figura 66. Comportamento tensão-dilatância para a mistura solo-35 CBCA-diferentes teores de CCH, para as tensões de confinamento de (a) 50kPa, (b) 100 kPa e (c) 150kPa	132
Figura 67. Módulo cisalhante normalizado (G/p') das misturas solo-diferentes teores de CBCA-5CCH nas tensões confinantes de (a) 50kPa, (b) 100kPa e (c) 150 kPa.	135
Figura 68. Módulo cisalhante normalizado (G/p') das misturas solo-35CBCA-diferentes teores de CCH nas tensões confinantes de (a) 50kPa, (b) 100kPa e (c) 150 kPa.....	137
Figura 69. Resultados de difração de raios-X de misturas solo-CBCA-CCH.....	139
Figura 70. Espectro de FTIR(a) para os materiais solo, CBCA e CCH e (b)para as misturas solo-CBCA-CCH curadas por 28 dias.....	140

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1. Revisão de condições de calcinação de conchas	54
Tabela 2. Resultados de espectroscopia por fluorescência de raios-X para a amostra de solo	74
Tabela 3. FRX da CBCA.....	78
Tabela 4. Resumo do programa de caracterização das cales de concha de marisco	80
Tabela 5. Variáveis controláveis	82
Tabela 6. Planejamento das amostras para resistência à compressão simples	83
Tabela 7. Variáveis fixadas	85
Tabela 8. Variáveis de ruído.....	86
Tabela 9. Planejamento dos ensaios triaxiais	89
Tabela 10. Resultados e limites granulométricos da cal para estabilização de solos	96
Tabela 11. FRX da cal de concha de marisco e de cal calcítica nas formas hidratada e virgem	99
Tabela 12. Análise de variância (ANOVA) dos resultados de resistência a compressão simples	107

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	22
1.1. Justificativa.....	24
1.2. Hipóteses	25
1.3. Objetivos.....	25
1.3.1. Objetivo geral	25
1.3.2. Objetivos específicos.....	25
1.4. Organização da Tese.....	26
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1. Estabilização de solos.....	27
2.1.1. Estabilização química.....	27
2.1.2. Estabilização com cal	28
2.1.3. Estabilização com cimento Portland	30
2.1.4. Problemas ambientais ligados a produção de cal e cimento Portland	31
2.2. Cinzas e reações pozolânicas.....	34
2.2.1. Reações pozolânicas	34
2.2.2. Cinzas na estabilização dos solos	35
2.3. Cinzas de biomassa.....	37
2.3.1. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar.....	40
2.3.2. Aplicação de cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar	43
2.4. Cales alternativas para estabilização de solos	46
2.4.1. Composição das conchas de mariscos	48
2.4.2. Disponibilidade e produção de cal de conchas de mariscos.....	50
2.4.3. Usos da cal de marisco	55
2.5. Comportamento geomecânico de solo estabilizado quimicamente.....	57
2.5.1. Resistência a Compressão Simples.....	57
2.5.2. Parâmetro de dosagem porosidade/teor volumétrico de ligante (η/Biv)	62

2.5.3.	Comportamento tensão-deformação de solos cimentados.....	66
3.	METODOLOGIA.....	71
3.1.	Materiais	71
3.1.1.	Conchas de marisco	71
3.1.2.	Solo.....	73
3.1.3.	Cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar (CBCA).....	75
3.2.	Programa experimental.....	78
3.2.1.	Etapa 1: Produção e caracterização da cal de concha de marisco	78
3.2.2.	Etapa 2: Avaliação da resistência à compressão simples das misturas solo/CBCA/CCH	81
3.2.3.	Planejamento Experimental.....	81
3.2.4.	Moldagem e Cura dos Corpos de Prova	86
3.2.5.	Ensaio de resistência à compressão simples	86
3.2.6.	Etapa 3: Avaliação do comportamento tensão-deformação.	88
3.2.7.	Etapa 4: Avaliação química dos produtos formados por FTIR e DRX.....	92
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	94
4.1.	Caracterização e obtenção da cal calcítica de concha de marisco	94
4.1.1.	Caracterização física da CCV e da CCH.....	95
4.1.2.	Análise térmica	96
4.1.3.	Caracterização química.....	98
4.1.4.	Caracterização mineralógica e morfológica	99
4.2.	Resistência à compressão simples da mistura solo/CCH/CBCA	102
4.2.1.	Análise estatística dos resultados de q_u	105
4.2.2.	Aplicação da dosagem porosidade/teor volumétrico de aglomerante para a q_u da mistura solo/CBCA/CCH	110
4.3.	Comportamento tensão-deformação da mistura solo/CBCA/CCH.....	114
4.3.1.	Efeito do teor de CBCA no comportamento tensão-deformação	114

4.3.2.	Efeito do teor de CCH no comportamento tensão-deformação.....	118
4.3.3.	Efeito das variáveis teor de CBCA e CCH na trajetória de tensões e na envoltória de ruptura.....	121
4.3.4.	Comportamento na dilatação das misturas solo-CBCA-CCH.....	129
4.3.5.	Comportamento da rigidez das misturas solo-CBCA-CCH.....	133
4.4.	Avaliação da formação dos produtos formados na estabilização de solo com CBCA e CCH	138
5.	CONCLUSÕES.....	143
6.	REFERÊNCIAS	147

1. INTRODUÇÃO

O exercício do desenvolvimento sustentável vem sendo fomentado por meio de transformações econômicas e do uso de novas tecnologias (Yuan; Zhang, 2020). Consequentemente, visando tornar esse modelo de desenvolvimento, a indústria dos aglomerantes e a academia têm focado na reinserção de resíduos agroindustriais no ciclo produtivo. No contexto das pesquisas em engenharia geotécnica e geoambiental, busca-se o alinhamento com os eixos da Agenda 2030, especialmente com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9, Indústria, Inovação e Infraestrutura, e com o ODS 12, Consumo e Produção Responsáveis, visando o desenvolvimento de infraestruturas mais sustentáveis (ONU, 2018). Logo, a pesquisa e aplicação de novos materiais a partir de resíduos, que podem ser aplicados à estabilização de solo, demandam considerável investigação científica.

A construção e manutenção de aterros, bases de pavimentos rodoviários e outras estruturas geotécnicas são intensivas, consumindo recursos naturais e, consequentemente, aumentando as emissões de gases de efeito estufa (Reddy; Janga; Kumar, 2024). Diversos estudos têm buscado explorar resíduos agrícolas e do setor agroindustrial como fonte para agentes cimentantes mais sustentáveis, como alternativa aos aglomerantes tradicionais, que possuem maior pegada de carbono (Anburuvel *et al.*, 2023; Consoli *et al.*, 2020; Ferraz *et al.*, 2018a, 2019; Wang *et al.*, 2022; Zaman *et al.*, 2018). Esses materiais se baseiam principalmente no uso de cinzas residuais e resíduos ricos em carbonato de cálcio, como cascas de ovos e conchas de mariscos, ostras e outros organismos bivalves. Logo, misturas destes ao solo podem melhorar as propriedades geotécnicas, especialmente em solos granulares que têm limitada capacidade de suporte; proporcionando a sustentabilidade, pois promovem: a reutilização e valorização de resíduos, a redução da extração de recursos naturais e energéticos, a redução do uso de aglomerantes com alta pegada de CO₂ e a minimização da necessidade ambientalmente antieconômica de extrair e/ou transportar solos para aterro ou bota-fora (Nicholson, 2015).

Diante da crescente demanda por energia, os resíduos de biomassa surgem como um recurso valioso para a geração de energia sustentável. Um exemplo é o uso da biomassa/bagaço de cana-de-açúcar na própria indústria sucroalcooleira como fonte energética (Almeida *et al.*, 2015; Vengala *et al.*, 2024). Este uso alinha-se aos esforços globais para promover uma economia circular mais sustentável (Gani *et al.*, 2023; Ibitoye *et al.*, 2021; Ioannidou *et al.*, 2009; Matthew *et al.*, 2022). Além disso, as cinzas geradas pela queima de biomassas, quando submetidas à temperatura adequada, apresentam grande potencial de atuar como pozolana,

devido à presença de sílica amorfa (Aliu *et al.*, 2023; De Lima; Cordeiro, 2021; Memon *et al.*, 2020; Mirzaei; Ghebrab; Fedler, 2025). A cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar (CBCA) sozinha não possui capacidade cimentante, no entanto, ela possui sílica amorfa na composição de material cimentante para solos granulares quando combinada com cal (Silvani *et al.*, 2023; Vengala *et al.*, 2024).

Por outro lado, a produção de cal comercial derivada de calcário apresenta elevados impactos ambientais: na exploração de um recurso mineral não renovável e no processo produtivo na forma de emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa (Araújo *et al.*, 2024; Laveglia *et al.*, 2023). Assim, Cescon; Bruschi; Korf, (2025) mostram que uma série fontes de carbonato de cálcio oriundas de organismos bivalves têm sido avaliadas nesse processo produtivo. Por exemplo, Ferraz *et al.*, (2019) avaliaram diferentes tipos de conchas de frutos do mar na obtenção de cal calcítica (ex.:amêijoa, mexilhão, berbigão comestível, cunha, navalha, ostra, berbigão de cachorro e vieiras). Os autores verificaram que resíduos de conchas podem ser aproveitados na produção de cal, com vários benefícios, entre os quais: a inexistência de impactos ambientais relacionados com a exploração do calcário; o menor gasto de energia no processo de cominuição; e a inexistência de custos de eliminação relacionados com a deposição em aterro.

Os mariscos bivalves são frutos do mar ricos em proteínas e nutritivos, com demanda crescente em todo o mundo. Suas conchas representam até 75% do seu peso total, fazendo com que seu descarte inadequado gere poluição do ecossistema, sendo, portanto, um grande desafio ambiental (Choi *et al.*, 2024). No mundo, estima-se que mais de 10 milhões de toneladas de conchas de marisco são produzidas anualmente e geralmente despejadas em campos abertos ou em aterros (Khan *et al.*, 2020). Segundo Camargo e Estupinan (2022), na região na cidade de Cabedelo-PB são descartadas cerca de 11 toneladas de conchas de marisco por dia. Logo, sendo este um subproduto de alta disponibilidade na zona costeira do Brasil e em outros países.

Diante do exposto, o presente estudo busca desenvolver e aplicar, ao melhoramento de solos, um novo aglomerante, utilizando, de modo inédito, a combinação de uma cal à base de concha de marisco e cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar (CBCA). De modo, a presente pesquisa propõe, além de uma solução mais sustentável para o descarte desses resíduos, também contribuir com a inovação de novos materiais aplicados à geotecnia. Destaca-se que, como apontado por Krogel *et al.*, (2026) a cal baseada em conchas de organismos bivalves não apresenta toxicidade relacionada a metais, Andreão *et al.*, (2020) observaram o

mesmo cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, portanto o uso desses resíduos que não fornecem risco ambiental ou à saúde no contexto de aplicação em estabilização de solos.

O presente estudo delimitou o solo utilizado como arenoso para avaliar a capacidade efetiva de cimentação do ligante proposto pela mistura entre a CBCA e cal de conchas hidratada. Este tipo de solo não apresenta coesão, devido a seu comportamento puramente friccional, sendo de melhor identificação da reatividade entre as fases da ativação proposta CBCA (precursor) e a CCH (ativador) identificando a fase cimentante. Além disso, solos arenosos de granulometria uniforme tendem a apresentar baixa capacidade de suporte e para aplicações em obras geotécnicas podem demandar melhoramento das suas propriedades de resistência.

1.1. Justificativa

Esta tese foi construída na justificativa de que se busca o desenvolvimento de um novo agente estabilizante de solos à base de resíduos agroindustriais. Evidencia-se que ainda não há estudos sobre produção e aplicação da cal de conchas residuais da atividade de mariscagem, especificamente na forma hidratada, como ativador alcalino em melhoramento de solos. Ainda, o uso de conchas incorpora aspectos de sustentabilidade, ao transformar subprodutos em matérias-primas, mantendo a mesma funcionalidade que fontes geogênicas de carbonato de cálcio (Laveglia *et al.*, 2023). Essa prática também contribui para aspectos econômicos, sociais e ambientais, alinhando-se ao conceito de sustentabilidade e resiliência (Reddy; Janga; Kumar, 2024). Logo, uma abordagem que considera as conchas residuais da atividade da mariscagem como matéria-prima é particularmente relevante para comunidades ribeirinhas economicamente vulneráveis, que obtêm sustento da coleta, limpeza e venda de moluscos bivalves e depositam os resíduos (conchas) nas margens dos rios, gerando riscos à saúde pública e impactos ambientais, como o assoreamento e a descaracterização dos ecossistemas locais.

Outro aspecto se refere à combinação da cal de concha de marisco com a cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar (CBCA), ainda não observada na literatura. A CBCA, apesar de bastante abundante no Brasil e aplicada em estudos anteriores, pouco se infere sobre a origem dessa cinza (fundo ou volante) que implica diretamente na sua reatividade e na consequente dosagem em processo de estabilização de solos. Além disso, o resíduo de fato ainda é pouco explorado na prática de melhoramento de solos.

Neste sentido, tanto a cal de concha de mariscos quanto a CBCA apresentam grande disponibilidade e, por vezes, um potencial risco ao meio ambiente e à saúde pública. Desta forma, aplicações destes materiais em combinação para a produção de um novo agente cimentante para solo, além de dar finalidade aos resíduos, reduzem a exploração de recursos naturais não-renováveis, a poluição ambiental e a pegada de carbono.

1.2. Hipóteses

Em um contexto de forte tendência ao desenvolvimento sustentável, economia circular e redução de emissão de gases do efeito estufa, o presente estudo busca as aplicações para o contexto da engenharia geotécnica abordando um novo agente estabilizador à base de cinzas de fundo de biomassa de cana-de-açúcar (CBCA) e cal de concha de marisco. Portanto, nesta tese pretende-se verificar a validação das seguintes hipóteses:

- A cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar (CBCA) é uma fonte de sílica amorfa e com potenciais usos como fonte de pozolana em processos de cimentação.
- É possível produzir uma cal calcítica de considerável qualidade por meio da moagem e calcinação de conchas de mariscos. E que esta possua propriedades similares a cal convencional obtida por moagem e calcinação do calcário.
- Um agente estabilizante de solo pode ser produzido a partir de cal de concha de marisco e cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Avaliar o comportamento mecânico de um solo arenoso estabilizado com cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar (CBCA) e cal de concha de marisco hidratada (CCH).

1.3.2. Objetivos específicos

- Investigar o potencial técnico de desenvolver uma cal calcítica a partir de conchas de mariscos;
- Analisar a influência das variáveis teor de CBCA e teor de CCH na resistência à compressão simples

- Avaliar a aplicação do coeficiente porosidade/teor volumétrico de aglomerante na previsão da resistência a compressão simples (q_u) da mistura solo/CBCA/CCH
- Avaliar o comportamento tensão-deformação em função dos teores de CBCA e CCH de misturas solo/CCH/CBCA e da trajetória de tensões.
- Investigar a formação dos produtos hidratados gerados pela reação entre a CCH e a CBCA;

1.4. Organização da Tese

Com o objetivo de apresentar a organização de elaboração e procedimentos adotados nesta pesquisa, a presente tese foi estruturada na seguinte organização:

- A introdução - apresenta o problema de pesquisa e a relevância do estudo, seguindo a justificativa e os objetivos para o desenvolvimento da pesquisa.
- Revisão bibliográfica: apresenta por capítulos o estado da arte sobre estabilização de solos, origem, produção e desenvolvimento de novos estabilizantes a base de resíduos. Sua estrutura por capítulos é apresentada da seguinte forma: Estabilização de solos; Cinzas e reações pozolânicas; Cales alternativas para estabilização de solos; Comportamento geomecânico de solo estabilizado quimicamente.
- A metodologia apresenta os materiais utilizados, bem como organiza e estabelece os métodos de caracterização do solo, da cal e de cinza utilizada, e os procedimentos necessários a avaliar qualitativamente e quantitativamente o agente cimentante desenvolvido, bem como as aplicações na estabilização de solos;
- Os resultados e discussões sistematizam e organizam as análises em tabelas e gráficos, além de trazer discussões pertinentes sobre o comportamento dos materiais, sua adequabilidade com padrões estabelecidos e sua efetividade em validar as hipóteses.
- As considerações finais abordam o cumprimento dos objetivos específicos definidos e sintetizam as contribuições obtidas na tese.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Estabilização de solos

Projetos geotécnicos podem demandar algumas propriedades aos solos a depender do uso específico, que vão desde resistência ao cisalhamento, baixa permeabilidade, estabilidade volumétrica (expansão e retração), e outras propriedades como rigidez, durabilidade e redução da erodibilidade (Villibor, 1978). Assim, para que o solo possa atender a critérios referentes a estas propriedades anteriormente citadas, e evitar-se processos mais onerosos como substituição de solo, modificação de projeto ou até considerar um projeto impraticável, a estabilização de solos é uma solução costumeiramente adotada (Nicholson, 2015).

A estabilização de solos é uma técnica antiga, McDowell (1959) aponta que no Antigo Egito e na Mesopotâmia já era utilizado o melhoramento de solos com cal em estradas não pavimentadas. Desde estas civilizações, o melhoramento de solos com agentes químicos vem apresentando evolução técnica contínua, com o desenvolvimento de novos aglomerantes e a compreensão das propriedades geotécnicas do solo. Assim, de acordo com Firoozi *et al.*, (2017), o solo estabilizado é um material compósito obtido da combinação de distintos materiais e da otimização das propriedades dos seus materiais constituintes.

A literatura, em termos gerais, estabelece três tipos de estabilização de solos: mecânica, granulométrica e química. Na estabilização mecânica, promove-se a densificação do solo por meio do rearranjo e do empacotamento das partículas durante o processo de compactação, resultando no aumento do número de contatos intergranulares, o que, em geral, implica elevação da resistência ao cisalhamento e redução da permeabilidade, conforme descrito em Consoli *et al.*, (2021) Ingles; Metcalf, (1972) e Mitchell, (1981). A estabilização física ou granulométrica que se estende por alterar a composição granulométrica do solo por inserção de material com fração suplementar para que, em geral, objetivando uma granulometria mais contínua. A estabilização química que se destaca por ser amplamente utilizada e ser bastante efetiva em prover alterações nas propriedades do solo, especialmente no seu comportamento mecânico (Villibor, 1978; Mitchell; Soga, 2005; Mitchell, 1981; Archibong *et al.*, 2020).

2.1.1. Estabilização química

A estabilização química consiste em modificar as propriedades geotécnicas de um material pela adição de um agente químico. Esse processo envolve reações químicas que

ocorrem ao longo de um determinado período, conhecido como período de cura. Entre os aglomerantes mais comuns utilizados estão a cal e o cimento Portland, ambos contendo óxidos de cálcio em sua composição. Na produção de cimento Portland, além do calcário, argilas são comumente utilizadas como fonte de silicatos de alumínio e ferro, além destes, podem ser inseridas na mistura de materiais cimentícios suplementares como: cinza volante, metacaulim, escória de alto forno, entre outros.

A estabilização de solos com uso de cal é diretamente relacionada com a disponibilidade de aluminossilicatos em estado amorfo. Em solos argilosos, essa disponibilidade é dada pela presença dos argilominerais (Barman; Dash, 2022). No caso de solos arenosos, compostos principalmente por quartzo (SiO_2) que possui estrutura cristalina, o uso da cal unicamente como agente estabilizador se torna ineficiente, no entanto, o seu uso pode se tornar eficiente quando usada junto à adição de fontes de pozolana (Silvani *et al.*, 2022). As pozolanas são materiais com alto teor de sílica ou sílica-alumina em estado amorfo e que reagem com a cal na presença de água para formar produtos de hidratação cimentícia (Walker; Pavía, 2011). Quando adicionados ao solo, promovem reações com a cal que resultam em melhorias nas propriedades mecânicas da mistura (Silvani; Benetti; Consoli, 2019; Nicholson, 2015).

Ainda outros materiais e compósitos podem ser utilizados na estabilização química, como a combinação de pozolanas presente em cinzas residuais (cinza volante, cinzas oriundas de biomassas etc.), ativação alcalina (geopolimerização), uso de biopolímeros (goma xantana, quitosana etc.), e polímeros orgânicos sintéticos (acrílico, acrilamida, emulsões químicas etc), e que se enquadram como processos químicos de estabilização (Huang *et al.*, 2021).

2.1.2. Estabilização com cal

A cal hidratada (CaOH_2) quando misturada com solo e água, aumenta o pH do meio, causando a dissolução da sílica (SiO_2) e da alumina (Al_2O_3) do solo. A curto prazo, especialmente em solos argilosos, há a ocorrência da floculação, sendo esta ocasionada pela troca de cátions Ca^{2+} da cal com os cátions monovalentes (Na^+ , K^+ , etc.) presentes na dupla camada difusa (DDL) dos argilominerais (Bhattacharja; Bhattu; Todres, 2003; Eades; Grim, 1966; Jha; Sivapullaiah, 2020). A longo prazo, nesse ambiente alcalino, a sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) podem então combinar-se com a cal (dissociada em Ca^{2+} e OH^-) para formar hidratos de silicato de cálcio (C-S-H) e hidratos de aluminato de cálcio (C-A-H), conforme Equações 1 e 2. A formação e cristalização destes hidratos (ou géis) são chamadas de reações

pozolânicas e podem ser ilustradas conforme mecanismo apresentado na Figura 1 (Ingles e Metcalf, 1972).

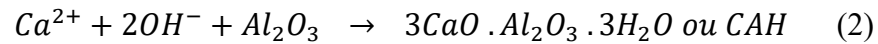
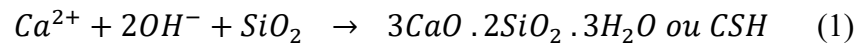
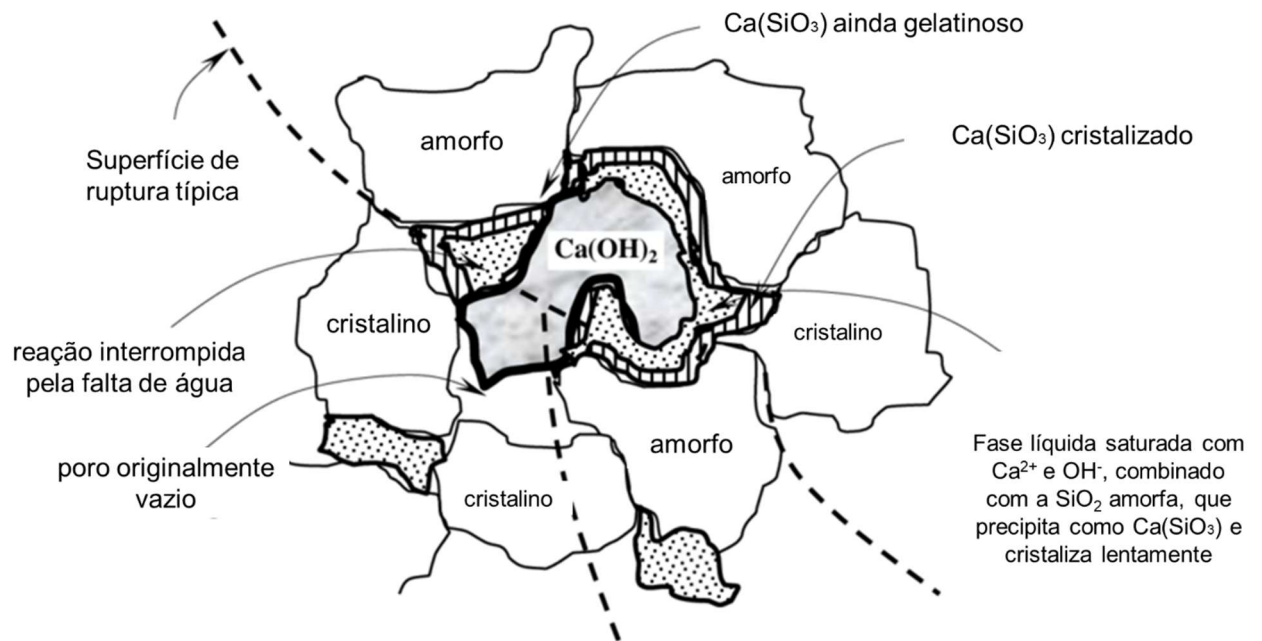


Figura 1. Mecanismo de estabilização com cal e sílica amorfa em solo arenoso.



Fonte: adaptado de Ingles e Metcalf (1972)

Logo, a resistência dos solos estabilizados com cal depende principalmente do SiO_2 e Al_2O_3 dissolvidos disponíveis para reações pozolânicas, bem como das quantidades existentes de íons divalentes de cálcio (Ca^{2+}) e íons monovalentes de hidroxila (OH^-). Uma vez que os íons Ca^{2+} e OH^- sejam totalmente consumidos, há uma redução do pH e as reações pozolânicas cessam, a menos que a quantidade de Ca^{2+} e OH^- seja restaurada ao sistema solo-cal-água (Mitchel e Soga, 2005). Neste sentido, a quantidade de cal adicionada ao solo deve ser superior à quantidade mínima necessária para atingir o pH máximo. Quanto maior a quantidade de cal (até um determinado valor limite), maior será a resistência alcançada pela mistura solo-cal, uma vez que maiores teores de cal estarão proporcionando a quantidade de Ca^{2+} e OH^- necessária para a ocorrência de reações pozolânicas (Ingles e Metcalf, 1972).

2.1.3. Estabilização com cimento Portland

A técnica solo-cimento Portland tem sido amplamente aplicada para estabilização de solos; ela se baseia nas reações de hidratação do cimento Portland para melhorar, principalmente, o comportamento mecânico dos solos. Esta técnica possui consideráveis aplicações por se adequar a solos de diversas características, além de possuir aplicações versáteis devido à rapidez de suas reações, em comparação com a cal. (Horpibulsuk; Rachan; Suddeepong, 2011). Assim a estabilização com cimento Portland tem sido usada com sucesso em diversas soluções como: camadas de base de pavimentos, proteção de taludes para barragens de terra, como camada de base para fundações rasas, controle de liquefação de areias, entre outros (Antunes; Simão; Freire, 2017; Consoli *et al.*, 2019a; Guthrie *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2008; Wu; Huang; Sungkar, 2017)

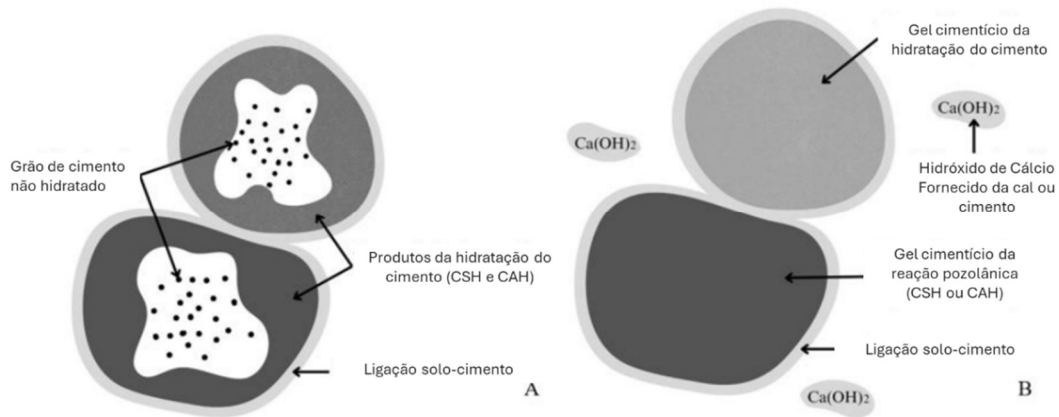
A hidratação do cimento Portland é um processo rápido, em que são produzidos géis de hidratação cimentícia e contribuem para a melhoria significativa da resistência do solo a curto prazo (Figura 2a). Essa resistência gerada pelo cimento Portland é atribuída à existência de quatro compostos principais em sua composição, dois à base de silicatos (silicato tricálcico – C_3S e silicato dicálcico – C_2S) e dois à base de aluminatos (aluminato tricálcico – C_3A e ferroaluminato tetracálcico – C_4AF) (Burris *et al.*, 2015).

Em geral, o cimento Portland consiste em uma quantidade maior de silicato tricálcico (C_3S), conforme Equação (3), que reage rapidamente com a água e, portanto, contribui relativamente mais para o ganho de resistência inicial do que o silicato dicálcico (C_2S), conforme a Equação (4) (Barman; Dash, 2022).



A Figura 2b apresenta o mecanismo de desenvolvimento de resistência devido aos produtos das reações pozolânicas, em que ocorre a dissociação de $Ca(OH)_2$ e o consequente aumento do pH da água dos poros. Assim, as bases fortes dissolvem a sílica e a alumina presentes no solo. A sílica e a alumina solubilizadas irão então reagir gradualmente com os íons de cálcio liberados pela hidrólise do cimento Portland, num processo análogo ao apresentado nas Equações 1 e 2, por meio das reações pozolânicas, gerando produtos cimentícios secundários a longo prazo (CSH ou CAH) (Horpibulsuk; Rachan; Suddeepong, 2011).

Figura 2. Mecanismo das reações de estabilização em solo cimento (a) em função da hidratação do cimento e (b) em função das reações pozolânicas.



Fonte: Adaptado de Korf *et al.*, (2024)

A estabilização de solos com cimento Portland pode ser aplicada em diversos tipos de solo desde solos residuais até solos transportados (Da Fonseca; Cruz; Consoli, 2009), como solos arenosos e solos argilosos (Horpibulsk *et al.*, 2011). No entanto, esta técnica se mostra mais eficiente quando aplicada em solos de baixa plasticidade ($IP < 20$) a arenosos (Prusinski; Bhattacharja, 1999). Apesar da ampla aplicação em solos argilosos e arenosos, as reações do cimento Portland podem variar a depender da mineralogia do solo.

Uma vez que é um aglomerante baseado em cálcio, em solos argilosos após a hidratação do cimento Portland ocorre a liberação de cátions de Ca^{2+} e a interação com os aluminossilicatos do solo é similar ao uso da cal hidratada. Entretanto, devido à reação produzir uma fração restrita de Ca(OH)_2 , esta pode ser mais rapidamente consumida, e consequentemente reduzir o pH cessando as reações pozolânicas. Em solos, sem ou com baixo teor de argilominerais, a reação ocorre mais direcionada à hidrólise e hidratação dos compostos do cimento, formando os géis CSH que interconectam as partículas de solo nos pontos de contato (Barman; Dash, 2022; Nicholson, 2015; Prusinski; Bhattacharja, 1999).

2.1.4. Problemas ambientais ligados a produção de cal e cimento Portland

Os principais objetivos da indústria de produção de materiais de construção, na atualidade, são: diminuir o consumo de energia e utilizar menos fontes de energia que liberam CO_2 . Dentre os materiais de construção mais comuns (cimento Portland, cal, aço, vidro, madeira, cerâmicas etc.), a cal, o cimento Portland e o aço despontam como as que necessitam

de abordagens mais eficientes do ponto de vista ambiental na sua exploração e aplicação. Isso se deve ao fato de sua produção utilizar elevadas quantidades de energia, em geral, por utilizar fontes energéticas com alta liberação de CO₂ e recursos minerais não renováveis (Huang *et al.*, 2020). O nível de energia incorporada na produção (*embodied energy*) do cimento Portland e da cal, são de considerável grandeza, sendo da ordem de 4,9 GJ/t e 3,02 GJ/t, respectivamente, (IEA, 2007). Desses valores, o uso médio global de energia para a mineração de calcário e argila corresponde a aproximadamente 0,1 GJ/t (McLellan *et al.*, 2012).

O calcário é calcinado, para a produção de cal, por meio do fornecimento de calor, e alto consumo energético. A reação de dissociação dos carbonatos contidos no calcário é promovida pelo calor absorvido pelo calcário. A dissociação começa quando o calcário atinge a temperatura de calcinação na superfície, com uma interface de reação bem definida movendo-se para o centro da pedra calcária, formando uma casca crescente de cal viva ao redor do núcleo não reagido. Para aumentar a velocidade da reação, a fim de atingir uma taxa de produção eficiente, é necessário aumentar a temperatura da superfície da pedra, assim comumente se usam temperaturas da ordem de 1200°C (Ochoa George *et al.*, 2010). Estudos como os de Ebneyamini *et al.*, (2021), Gutiérrez *et al.*, 2012 e Ochoa George *et al.*, (2010) mostram que o consumo de combustível, eletricidade e calcário são os fatores mais importantes no impacto ambiental de uma planta de cal.

O impacto ambiental da produção de cal pode ocorrer em escalas local, regional ou global. Em termos locais, destacam-se as emissões de poeira e as alterações na paisagem devido à mineração de calcário. No âmbito regional, os fornos utilizados na produção de cal, ao queimarem combustíveis como fonte de energia, podem liberar dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x), contribuindo para a formação de chuva ácida. Considerando a escala global, o principal impacto está associado à emissão de dióxido de carbono (CO₂) (National Council for Air and Stream Improvement 2013; Gutiérrez *et al.*, 2012). O processo de produção da cal está associado à emissão de elevadas quantidades de CO₂, estimando-se que a fabricação de 1 tonelada de cal resulte na liberação de aproximadamente 1,2 toneladas de CO₂ (Laveglia *et al.*, 2023; Ochoa George *et al.*, 2010).

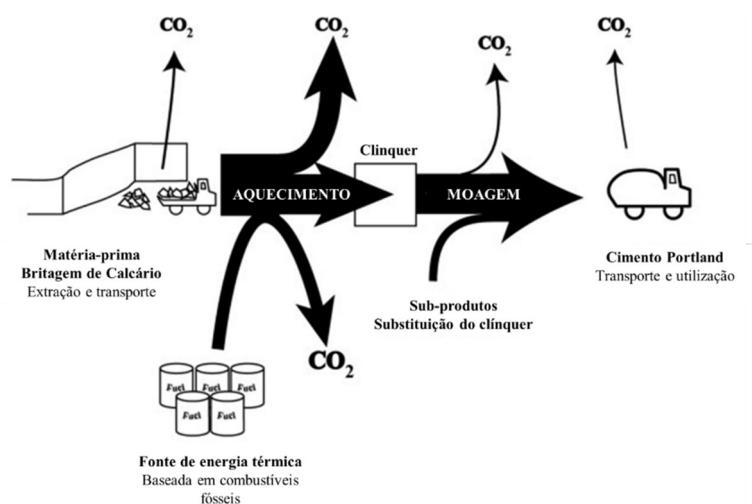
Na produção de cimento Portland, diversas matérias-primas são combinadas para atingir a composição ideal. É essencial uma quantidade suficiente de cálcio, sílica, alumínio e ferro para formar o clínquer, principal componente do cimento Portland. O calcário e a sílica são os principais elementos do cimento Portland, enquanto o ferro reduz a temperatura de reação e

confere ao material sua cor cinza característica. Durante o processo de fabricação, o calcário e a argila (fonte de silicatos de alumínio) são secos, triturados, misturados e aquecidos em fornos a temperaturas entre 1200°C e 1450°C, resultando na formação do clínquer. Posteriormente, o clínquer é triturado e combinado com outros ingredientes, como calcário e gesso, para produzir o cimento Portland comum (Huntzinger; Eatmon, 2009).

Durante esse processo, uma quantidade significativa de combustíveis fósseis e alternativos é queimada para fornecer energia às máquinas e aos fornos de cimento, secadores e pré-aquecedores. Deste modo, para fabricar um grande volume de cimento, uma alta quantidade de energia derivada de combustíveis fósseis é consumida, o que consequentemente libera altas quantidades de CO₂ (como apresentado no esquema da Figura 3) e outros gases como os óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO) (Blois; Lay-Ekuakille, 2021; Habert *et al.*, 2010; Kong; Sanjayan, 2008; Mohamad *et al.*, 2022). Além de outros compostos tóxicos, como metais pesados, e potencialmente cancerígenos (Blois; Lay-Ekuakille, 2021).

A indústria do cimento é uma das principais responsáveis pelas emissões globais de CO₂, correspondendo a cerca de 8% do total. Dentre essas emissões, aproximadamente 40% são provenientes exclusivamente do processo de calcinação do calcário, utilizado como matéria-prima. (Barcelo *et al.*, 2014). Em média as emissões são estimadas em 0,9 – 1,0 toneladas de CO₂ por tonelada de cimento Portland produzida (Ali; Saidur; Hossain, 2011; IPCC, 2006; Shehata; Sayed; Abdelkareem, 2021).

Figura 3. Processo simplificado de fabricação de cimento, com interesse específico nas emissões de CO₂.



Fonte Adaptado de Habert *et al.*, (2010)

Atualmente, a indústria do cimento Portland enfrenta não apenas a necessidade urgente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mas também um grande desafio: a competição com outras indústrias pelo uso de recursos naturais. O calcário, matéria-prima fundamental para o setor, é amplamente utilizado em outras áreas, como a agricultura (para reduzir a acidificação do solo), a fabricação de vidro, a produção de aço, a fabricação de plásticos, e o tratamento de água e esgoto, entre outras aplicações. Essa competição por um recurso natural não renovável e com elevado potencial poluidor destaca a importância de desenvolver tecnologias alternativas sustentáveis ao cimento convencional.(Monteiro; Miller; Horvath, 2017; Korf *et al.*, 2024). Entre essas alternativas, destacam-se os ligantes álcali-ativados, produzidos a partir de resíduos agroindustriais, e ativadores alcalinos, como a cal obtida de cascas de ovo e conchas de marisco (Araújo *et al.*, 2024; Consoli *et al.*, 2020; Ferraz *et al.*, 2024; Saldanha *et al.*, 2021).

2.2. Cinzas e reações pozolânicas

2.2.1. Reações pozolânicas

Um material pozolânico é geralmente definido como uma matéria-prima natural, sintética ou secundária, contendo altas porcentagens de SiO_2 e Al_2O_3 amorfos. Este, por si só, possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas, na presença de umidade e à temperatura ambiente, reage quimicamente com a cal, originando produtos como aluminatos de cálcio hidratados (CAH) e silicatos de cálcio hidratados (CSH), tendo um caráter hidráulico (Malhotra; Mehta, 2017).

As cinzas vulcânicas, argilas calcinadas, cinzas de carvão de usinas termelétricas, e cinzas de resíduos agroindustriais estão entre os materiais com características de pozolana (Consoli *et al.*, 2018, 2021; Ferreira *et al.*, 2023; Liguori *et al.*, 2019; Malhotra; Mehta, 2017). O desenvolvimento de resistência com o tempo, referente às reações pozolânicas, apenas acontece uma vez que a quantidade de Ca(OH)_2 seja suficiente. Logo, o balanceamento entre a quantidade de cal e pozolana presente na mistura é fundamental para que se obtenham maiores resistências (Horpibulsuk; Rachan; Suddepong, 2011).

Os materiais pozolânicos atualmente possuem grande interesse da indústria do cimento. Uma vez que a inserção deles na escala de produção reduz as emissões de CO_2 no processo de produção de cimento e diminui o calor de hidratação. Além disso, a reação pozolânica melhora

efetivamente a estrutura interna do concreto e melhora sua resistência efetiva à corrosão (Zhang *et al.*, 2021).

As pozolanas, naturais ou artificiais, podem ser usadas também como materiais cimentícios suplementares (*supplementary cementitious materials* - SCMs) na indústria da construção para reduzir o consumo de cimento Portland comum em materiais à base de cimento (Wang; Liu; Zhang, 2023). Cinzas de resíduos agroindustriais, como as de palha de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, cinza volante e cinza pesada de carvão mineral, entre outras, são fontes ricas em aluminossilicatos. Os SCMs, no contexto do melhoramento de solos, tem potencial para substituir parcialmente ou totalmente os agentes cimentantes tradicionais, podendo ser explorados como agentes pozolânicos (Rajamma *et al.*, 2009; Raut *et al.*, 2023). Diversos estudos vêm mostrando que essas cinzas têm em sua composição principalmente sílica (SiO_2), óxido de potássio (K_2O) e óxidos de cálcio (CaO), e que a cristalinidade desses compostos é determinada pelas condições de queima (Bahurudeen; Santhanam, 2015; Kang; Hong; Moon, 2019; Li *et al.*, 2021). Estas características estão sendo exploradas em diversas finalidades, como o desenvolvimento dos chamados cimentos e concretos verdes e/ou híbridos.

Com o aumento global nos volumes de cinzas de biomassa e nos custos associados ao seu descarte, crescem as pesquisas voltadas para o gerenciamento sustentável desses resíduos. Nesse contexto, a utilização de cinzas agroindustriais pela indústria como material cimentício suplementar (MCS) surge como uma alternativa atrativa, especialmente para países como China, Índia, Brasil, Tailândia e outros. Esses países utilizam grandes volumes de resíduos, como casca de arroz, biomassa de óleo de palma e bagaço de cana-de-açúcar, como fontes energéticas em processos de cogeração, o que os torna propensos a adotar essas soluções sustentáveis (Demis; Tapali; Papadakis, 2014).

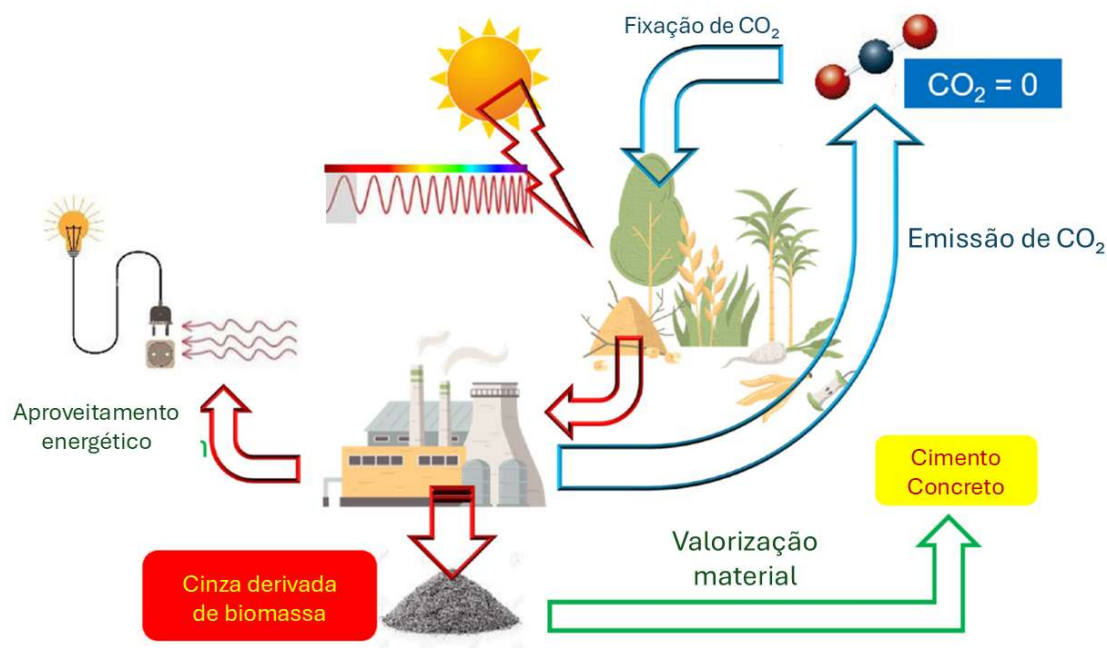
2.2.2. Cinzas na estabilização dos solos

Há uma série de benefícios ambientais importantes no uso de cinzas na estabilização de solos, incluindo a reutilização de um produto residual, a redução do uso de aglomerantes com alta pegada de CO_2 (cal e cimento) e a minimização dos impactos econômicos e ambientais de se extrair e/ou transportar solos para aterro ou bota-fora (Nicholson, 2015). Este tipo de estabilização também se alinha com aspectos referentes a economia circular em que resíduos podem ser absorvidos como matéria-prima, com redução da poluição gerada e menor exploração dos recursos naturais (Korf *et al.*, 2024).

Cinzas residuais da queima de carvão mineral são um dos materiais mais avaliados e utilizados de forma comercial, com propriedades bem definidas e normatizadas. Cinzas pesadas e cinzas volantes somam diversos estudos sobre seu uso na estabilização de diversos tipos de solos, seja como único estabilizante ou em compósito com outros materiais, como: cal, cimento, fibras, RAP, outras cinzas residuais dentre outros (Consoli; Da Rocha; Silvani, 2014; Hossain *et al.*, 2020; Punthutaecha *et al.*, 2006; Saride *et al.*, 2015; Tiwari; Satyam; Puppala, 2021). Esse tipo de material tem alto potencial de uso principalmente em regiões que utilizam da queima do carvão mineral, como Estados Unidos, parte da Europa e Região Sul e Norte do Brasil.

Por outro lado, há uma forte tendência global de explorar fontes alternativas de energia renovável como um substituto dos combustíveis fósseis. Neste sentido, resíduos agroindustriais estão experimentando uma demanda crescente por exploração como fonte energética e gerando consequentemente grandes quantidades de cinzas residuais. Neste processo, apresentado na Figura 4, o CO₂ liberado na combustão da biomassa foi previamente absorvido pelas plantas, o que neutraliza a pegada de carbono. Além de possibilitar a geração de energia, a combustão também produz cinzas de biomassa que podem apresentar propriedades adequadas para uso como material cimentício suplementar (SCM) (Payá *et al.*, 2024). Essas cinzas, em geral, têm potencial como base para aglomerantes alternativos. Além de ser uma solução promissora para atender às demandas de desenvolvimento sustentável (Shakouri; Hu; Stolle, 2023; Korf *et al.*, 2024).

Figura 4. Esquema do aproveitamento energético da biomassa e das cinzas da biomassa para cimento e concreto



Fonte: Payá *et al.*, (2024)

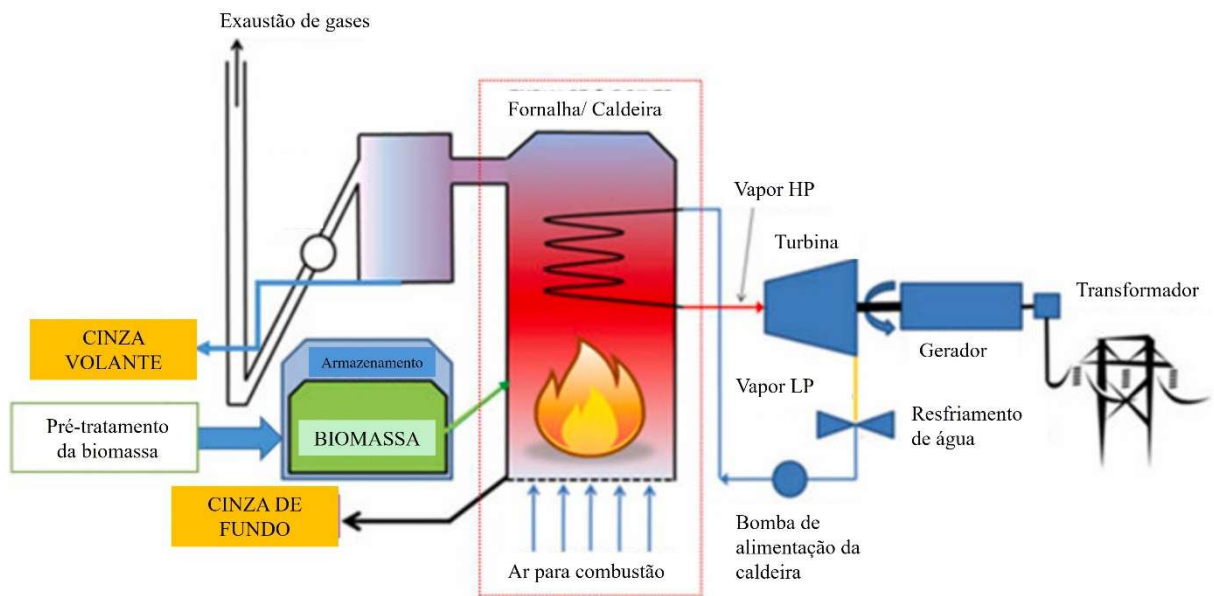
As cinzas residuais da agroindústria, de forma única, juntamente com cal ou cimento Portland, e em processos de ativação alcalina têm sido bastante avaliadas como agentes estabilizantes. Alguns destas cinzas já foram caracterizados e utilizadas como agentes estabilizadores, como: a cinzas da biomassa da produção de óleo de palma (Hossain *et al.*, 2020; Karim *et al.*, 2017; Pourakbar *et al.*, 2015), a cinza da casca de arroz (Anburuvel *et al.*, 2023; Ferreira *et al.*, 2023; Jittin; Bahurudeen; Ajinkya, 2020), cinza de lenha (Cabrera *et al.*, 2018; Ekinci; Hanafi; Aydin, 2020), cinzas de sementes de tâmara (Moubarak, 2024), cinza de palhas e sabugo de milho (Brooks, 2019; Singh, 2021; Yifru *et al.*, 2022), cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (Araújo *et al.*, 2024; Levandoski *et al.*, 2023; Silvani; Da Silva; Guedes, 2024) entre outras. Esta última, a cinza de bagaço de cana-de-açúcar, é oriunda da principal fonte de biomassa usada atualmente no Brasil, o que, conseqüentemente, gera uma ampla disponibilidade para reaproveitamento.

2.3. Cinzas de biomassa

Biomassas quando exploradas como fonte energética na indústria são usadas principalmente em processo de combustão direta - converter a energia da biomassa em calor

e/ou eletricidade com a ajuda de um ciclo de vapor (fogões, caldeiras e usinas termelétricas) (Demirbaş, 2001). A Figura 5 apresenta o esquema de aproveitamento energético da biomassa em estruturas termelétricas e os pontos de geração de cinzas residuais no processo produtivo. Deste processo, assim como ocorre na exploração energética do carvão mineral, também são originadas as cinzas de fundo de biomassa (*Biomass bottom ash - BBA*) que é a porção de resíduo não combustível encontrada na base do forno ou incinerador, enquanto que a cinza volante de biomassa (*Biomass fly ash - BFA*) é a porção de cinzas que escapa pela chaminé e é retida para evitar sua liberação na atmosfera (Cabrera *et al.*, 2014).

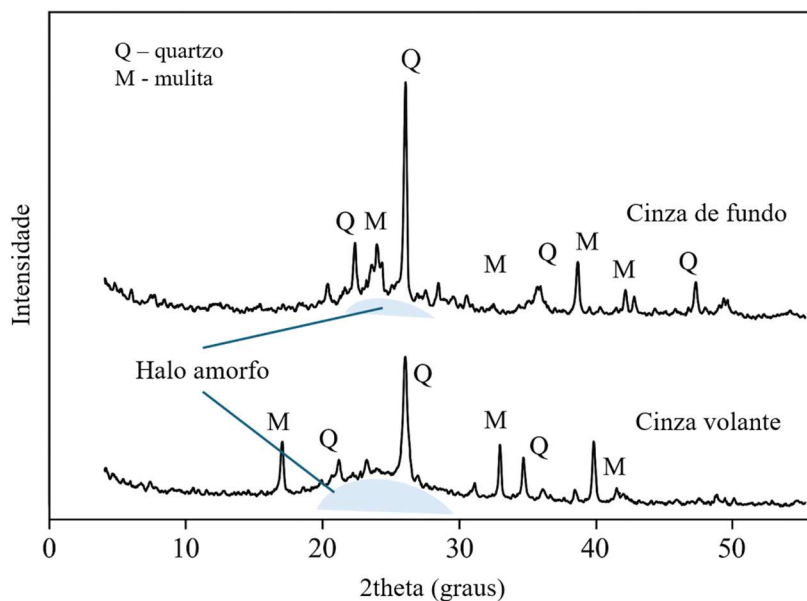
Figura 5. Combustão direta em usina termelétrica a biomassa



Fonte: Liang *et al.*, (2024)

As cinzas de fundo e volantes em linhas gerais possuem composição similar, no entanto, cinzas volantes tendem a ter uma maior homogeneidade, maior quantidade de sílica amorfa e por isso serem exploradas por indústrias de cimento (Munawar *et al.*, 2021). As cinzas de fundo, sejam de biomassa ou de carvão mineral, apresentam granulometria e composição mais heterogêneas, dependendo das características da fornalha e do procedimento de queima (Chindaprasirt *et al.*, 2009; Hinojosa *et al.*, 2014; Schlupp *et al.*, 2024). Além disso, as cinzas de fundo tendem a possuir menor quantidade de material reativo, isto é, uma maior predominância de minerais, como quartzo, em estado cristalino (Vilasini; Thangasamy; Balu, 2025), como mostrado na Figura 6.

Figura 6. Difração de raios-X de cinzas volantes e cinzas de fundo de carvão mineral



Fonte: Adaptado de Chindaprasirt *et al.*, (2009).

No contexto ambiental, este tipo cinza pode apresentar metais alcalinos, metais alcalino-terrosos, cloro, enxofre e silício, influenciando a reatividade e a lixiviação das fases inorgânicas, o que pode ter impactos ambientais significativos, como na ciclagem de nutrientes, se descartadas inadequadamente nos solos (James *et al.*, 2012). Por exemplo, a cinza de bagaço de cana-de-açúcar estudada por Bruschi *et al.*, (2022) foi classificada, de acordo com as normativas brasileiras, como um resíduo perigoso - Classe I, devido a concentrações de mercúrio (Hg) que excedem os limites estabelecidos na NBR 10004 (ABNT, 2004).

Em um estudo de análise de viabilidade de uso de BBA oriundas de diferentes indústrias que exploram biomassa de oliveiras na Espanha, Hinojosa *et al.* (2014) mostraram que a BBA tende a apresentar maior variabilidade do que a BFA. Os autores ainda mostram que a BBA tende a possuir maior teor de matéria orgânica (variando entre 5 e 20%), que seria indesejável para incorporação na indústria de cimento como material cimentício suplementar. Schlupp *et al.*, (2024) esses aspectos de baixa pureza e reatividade fazem com que a BBA seja a fração mais destinada a aterros.

De acordo com o estudo e revisão de Schlupp *et al.*, (2024) diversos estudos já avaliaram o uso de cinzas de fundo de biomassa como agregado, muitos com resultados positivos na resistência à tração e flexão, entretanto, como substituição de parte dos agregados, mas segundo

esses autores, quando a substituição é da ordem de 20%, a tendência é que haja um decréscimo dessa resistência.

Consoli *et al.*, (2007a) avaliaram o uso da cinza de fundo de carvão como geomaterial, observando que a presença de partículas angulares faz com que a cinza de fundo possa ter comportamento mais próximo ao de uma areia uniforme, por vezes apresentando maior ângulo de atrito e maior comportamento dilatante do que um solo arenoso. O que mostra que sua composição em melhoramento de solos tende a resultar em maior ângulo de atrito

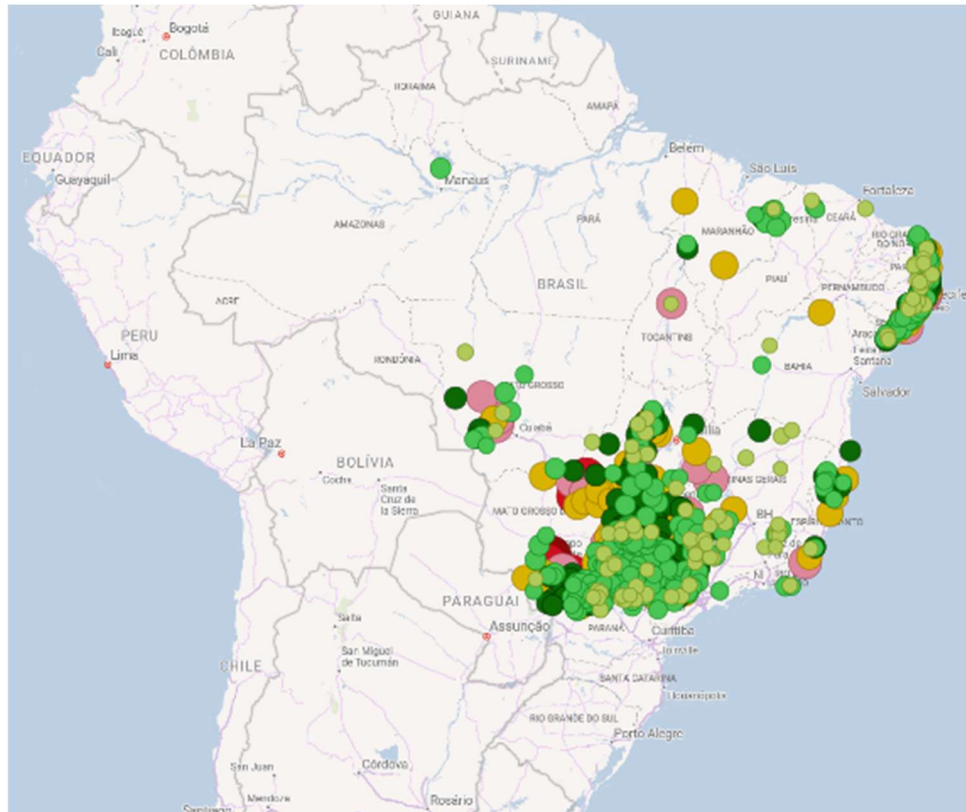
As cinzas de fundo são granulometricamente mais grossas e geralmente menos reativas do que as cinzas volantes, portanto, uma possível opção de reciclagem seria incorporá-las como agregado em materiais cimentícios (Schlupp *et al.*, 2024). Ainda de acordo com Schlupp *et al.*, (2024) a BBA é um material geralmente composto de sílica, óxido de cálcio e óxido de potássio, e que parte de sua mineralogia consiste principalmente de elementos cristalizados, sem fase amorfa. Além disso, o uso em estruturas de concreto armado pode tornar-se inviável devido à presença de cloretos solúveis, seja a BBA na forma de SCM ou como agregado, com o uso indicado para concretos não-estruturais ou material para aterros.

Cabrera *et al.*, (2018) mostrou a aplicabilidade do uso de cinza de fundo de biomassa de oliveira (BBA) para estabilização em um solo expansivo da Espanha, avaliando o uso para misturas em base de rodovias. Como principais resultados, o estudo mostrou que o uso da BBA melhora a capacidade de suporte e resistência ao cisalhamento. Além de reduzir a expansão livre de 6,74% para praticamente nulo, com melhoria similar à amostra estabilizada com cal.

2.3.1. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma importante atividade no setor agroindustrial brasileiro, que se concentra principalmente nas regiões centro-sul e Nordeste, como mostrado na Figura 7. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2026) a área plantada no ano de 2023 foi da ordem de 10 milhões de hectares. Dados da CONAB, (2025) estimam que a safra 2025/2026 deve ser da ordem de 668,8 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, adotando os critérios de rendimento de Jahanzaib Khalil; Aslam; Ahmad, (2021) de 6,8 kg de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar por tonelada de cana coletada, estima-se em 1,1 milhão de toneladas deste tipo de cinza disponível somente na safra 2025/2026.

Figura 7. Mapa de distribuição das áreas de plantio de cana-de-açúcar no Brasil



Fonte: ÚNICA (2025)

A alta disponibilidade desse tipo de resíduo, que costumeiramente é descartado nos próprios canaviais ou em aterros sanitários (Sales; Lima, 2010), tem despertado crescente interesse quanto ao seu potencial de reaproveitamento. Estudos em concretos e cimentos se debruçaram sobre o uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para diversos fins, como material pozolânico, filer ou agregado (Almeida *et al.*, 2015; Andreão *et al.*, 2020; Chusilp; Jaturapitakkul; Kiattikomol, 2009; Cordeiro *et al.*, 2008; Sales; Lima, 2010; Subedi *et al.*, 2021). Nos estudos que a utilizam como estabilizante de solos, assim como nos estudos para material cimentício suplementar, esta é explorada principalmente como fonte de sílica amorfa, para que, combinada com um ativador alcalino, geralmente a cal, gere produtos de cimentação (Ferrazzo *et al.*, 2023; Silvani *et al.*, 2023).

Vengala *et al.*, (2024), ao avaliar a estabilização de um solo argiloso com cinza de cana-de-açúcar e cal, observaram o aumento do CBR em 50% e na compressão simples em até 5 vezes a resistência à compressão simples do solo puro, para o valor ótimo de 12% de cal e 8% de CBCA. El-Emam *et al.*, (2025), em seu estudo, mostraram a melhoria de um solo siltoso de alta plasticidade (MH) aplicado como base do pavimento com o uso de cinza do bagaço de

cana-de-açúcar e cal. Os resultados mostraram que a estabilização diminuía a espessura de projeto do pavimento, reduzindo o custo em 16%, além de aumentar o tempo de vida útil.

Ewa *et al.*, (2023) avaliaram o uso de cinza do bagaço de cana-de-açúcar com pó de rocha calcária para estabilização de um solo argiloso (A-6) para aplicação na pavimentação, na forma de adição individual e combinada dos resíduos como agentes estabilizadores. Resultados de compressão simples mostraram que a combinação dos dois resíduos se mostrou mais efetiva do que a aplicação em separado. O maior aumento de resistência foi conseguido com teor limite de 15% de substituição dos resíduos no solo; a partir deste ponto não haveria mais cálcio disponível para reagir com a sílica amorfa e gerar géis de C-S-H.

Neste mesmo sentido, Silvani *et al.*, (2023), avaliaram o aumento da resistência à compressão simples em misturas de solo expansivo-cinza do bagaço de cana-de-açúcar-cal na presença de água salobra e potável. Em uma proporção de 75/25 de solo expansivo e cinza do bagaço de cana-de-açúcar, os autores variaram o teor de cal e peso específico. Os resultados mostraram que se obteve um aumento considerável da resistência à compressão simples, sendo que o uso da água salobra se mostrou ligeiramente superior ao uso de água potável. Destaca-se que alguns tipos de cinza do bagaço de cana-de-açúcar, a depender das condições de queima e origem e das condições de coleta, podem possuir em sua composição consideráveis quantidades de óxidos de cálcio (CaO) e magnésio (MgO). Silvani; Da Silva; Guedes, (2024) observaram que o tratamento de um solo com expansão média de 6,5% com teores de substituição de 12,5% de cinza do bagaço de cana-de-açúcar resulta em sua completa estabilização volumétrica. Esses resultados, segundo os autores, ocorreram devido à troca de catiônica entre o solo e cátions de Ca^{2+} e Mg^{2+} presentes na cinza.

Em solos arenosos ou grossos, os estudos com usos de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e cal se apresentam ainda mais restritos em quantidade. Um exemplo dessa aplicação é no estudo de Alavéz-Ramírez *et al.*, (2012) que usaram a mistura cinza do bagaço de cana-de-açúcar-cal para solos arenosos para produção de blocos em substituição ao cimento. Os resultados deste estudo mostraram que a mistura cinza do bagaço de cana-de-açúcar-cal foi responsável por melhorar a resistência à flexão e a compressão simples dos blocos se comparada aos tratados apenas com cal. Além disso, os autores identificaram a formação dos géis de C-S-H e C-A-S-H por meio de ensaios de DRX, similares aos apresentados nas amostras tratadas com cimento.

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar pode ser utilizada com outras bases, como o hidróxido de sódio (NaOH). Souza (2023) mostrou que, usando cinza do bagaço de cana-de-

açúcar, oriunda de uma pequena fábrica de cachaça, e um ativador alcalino forte (NaOH), é possível melhorar a resistência e o comportamento resiliente de um solo arenoso aplicado à pavimentação, devido a formação de géis N-A-S-H e C-A-S-H, produtos da reação de álcali-ativação.

2.3.2. Aplicação de cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar

Estudos mostram que a cinza de cana-de-açúcar e outras biomassas obtidas de indústrias sucroalcooleiras, assim como as cinzas oriundas de carvão mineral, podem ser classificadas como volantes, quando captadas por filtros, ou cinzas de fundo, quando depositadas na base da fornalha (Cabrera *et al.*, 2014; Díaz-López *et al.*, 2024; Muñoz-Castillo; Bueno-Rodríguez; Eliche-Quesada, 2026; Sales; Lima, 2010). No entanto, os estudos que aplicam esse resíduo no melhoramento de solos tendem a generalizar como material único, apesar de terem características diferentes. Como reportado por Sales; Lima, (2010), no contexto produtivo brasileiro, as cinzas de fundo de bagaço de cana-de-açúcar são removidas da caldeira em via úmida, juntamente com a cinza volante decorrente da lavagem dos filtros, com auxílio de esteiras.

Alguns estudos mostram que após as saídas das caldeiras as cinzas de fundo de bagaço de cana-de-açúcar apresentam característica de material granular, composto por fração orgânica não queimada e uma fração arenosa com menor reatividade. Deste modo, vem-se aplicando na forma este material como substituição nas frações de agregado miúdo ou filler, em misturas asfálticas, concretos e argamassas com cimento Portland (Hipólito; Ildefonso, 2024; Muñoz-Castillo; Bueno-Rodríguez; Eliche-Quesada, 2026; Pereira Neto *et al.*, 2025).

Nos estudos voltados à aplicação da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em concretos e argamassas, a variabilidade das propriedades do material tem recebido atenção crescente. Em função das diferentes condições de combustão empregadas nas usinas sucroalcooleiras, bem como da presença de contaminantes oriundos do solo e de fertilizantes, diversos pesquisadores têm investigado métodos para separar a fração amorfa reativa de componentes menos reativos, como o quartzo cristalino, visando maximizar o potencial pozolânico da cinza (Cordeiro; Linhares; Lemos, 2022; Cordeiro; Tavares; Toledo Filho, 2016).

A influência das características das cinzas também tem sido observada em aplicações geotécnicas. Nesse contexto, Díaz-López *et al.*, (2023, 2024) avaliaram a estabilização de um solo expansivo na Espanha utilizando cinzas de biomassa provenientes de uma usina

termelétrica de grande porte. Os autores investigaram dois tipos distintos de resíduos: a cinza de fundo (*Biomass Bottom Ash* – BBA) e a cinza volante (*Biomass Fly Ash* – BFA). A BBA foi caracterizada por apresentar granulometria mais grosseira, comparável à de um pedregulho fino, além de elevado teor de matéria orgânica decorrente da presença de partículas não completamente queimadas durante o processo de combustão. Em contraste, a BFA apresentou elevada finura, baixo teor de matéria orgânica e maiores concentrações de sulfatos solúveis e potássio. Os resultados demonstraram que as propriedades físicas e químicas das cinzas exerceram influência direta no desempenho mecânico das misturas estabilizadas. Quando combinadas com cal virgem e nanossílica, as amostras contendo BFA apresentaram aumento de aproximadamente três vezes na capacidade de suporte, avaliada por meio do ensaio CBR, enquanto as misturas contendo BBA apresentaram incremento da ordem de 1,75 vez. Em ambos os casos, observou-se redução expressiva do potencial expansivo do solo, com índices de expansão próximos de zero. Segundo os autores, o melhor desempenho da BFA está associado à sua maior reatividade, decorrente da elevada finura e da maior área superficial específica.

Além dos ganhos mecânicos, Díaz-López *et al.*, (2023, 2024) investigaram os aspectos ambientais associados ao uso dessas cinzas. Os ensaios de lixiviação indicaram que tanto a BBA quanto a BFA podem apresentar concentrações de metais potencialmente tóxicos, como cromo, arsênio e molibdênio, superiores a determinados limites ambientais. Entretanto, os autores verificaram que o processo de estabilização promove o encapsulamento desses elementos devido à formação de produtos cimentantes, especialmente géis de C–S–H, capazes de imobilizar metais pesados por mecanismos de adsorção e coprecipitação. Adicionalmente, a análise de ciclo de vida demonstrou que a utilização da BBA apresenta menor impacto ambiental em comparação à BFA, sobretudo por proporcionar uma alternativa de destinação para grandes volumes desse resíduo.

No que se refere ao comportamento geomecânico, Díaz-López *et al.*, (2023) avaliaram a resistência ao cisalhamento das misturas por meio de ensaios triaxiais consolidados não drenados (CU). Para amostras curadas por sete dias, verificou-se aumento significativo do intercepto coesivo em relação ao solo natural, passando de 35 kPa para aproximadamente 80 kPa na mistura contendo 5% de BBA. Esse valor foi equivalente ao obtido para a mistura estabilizada com 1,5% de cal virgem. Em contrapartida, o ângulo de atrito permaneceu praticamente inalterado, mantendo-se em torno de 29°. Quando foi utilizado 10% de BFA com 0,5% de cal virgem, observou-se comportamento distinto, caracterizado por intercepto coesivo próximo de zero e aumento do ângulo de atrito para aproximadamente 36°. Este resultado

provavelmente se deve à elevada quantidade de potássio (K^+) presente na BFA, que, juntamente com a cal, modificou o comportamento do solo por meio da floculação.

Estudos aplicaram a cinza do bagaço de cana-de-açúcar como parte de um ligante alcali-ativado, que combinava além da CBCA, cal de casca de ovo e hidróxido de sódio (NaOH) (Araújo *et al.*, 2023; Bruschi *et al.*, 2021; Ferrazzo *et al.*, 2023; Levandoski *et al.*, 2023). Ainda que estes não detalhem as características da origem do material (se de volante, de fundo, e temperatura de queima), os resultados chegam a análises semelhantes, em que a CBCA é uma fonte de sílica amorfa, apta a compor um agente cimentante à base de resíduos com potencial aplicação na estabilização de rejeitos de mineração e de solos expansivos. Além disso, resultados mostram que além da melhoria de propriedades mecânicas, o uso da CBCA neste tipo de aplicação é uma solução mais sustentável do que o uso de estabilizantes ternários como o cimento Portland (Araújo *et al.*, 2024; Bruschi *et al.*, 2022).

O processo de recalcinação das cinzas (requeima a temperatura controlada) pode ser explorado para homogeneizar e potencializar a reatividade da CBCA, mas inserem um maior consumo energético (Cordeiro; Barroso; Toledo Filho, 2018; Silvani; Da Silva; Guedes, 2024).

Em seu artigo de revisão sistemática Yayek; Kojing; Sorum, (2026) mostram que a CBCA é bastante avaliada no melhoramento de solos argilosos e/ou expansivos. Por vezes como agente que autoinduz a estabilização por troca de cátions de ($Na^+ \rightarrow Ca^{2+}$), como também reportado por Silvani; Da Silva; Guedes, (2024) e na formação de géis cimentícios (C-S-H e N-A-S-H), quando se usam ativadores alcalinos base de cálcio e/ou hidróxido de sódio. Logo, esta revisão mostra uma lacuna sobre seu uso na estabilização de solos granulares, onde sua incorporação como material pozolânico necessita de ativadores alcalinos, como cal, para a formação de estabilização e melhoria das propriedades do geomaterial.

Hasan *et al.*, (2016) utilizaram a fração da CBCA passante na peneira de abertura de 0,42 mm, sem identificar se é cinza de fundo ou volante, ou mistura de ambas, aplicadas a um solo expansivo estabilizado com cal, com aplicação em pavimentação. Observou-se que a adição de CBCA, em conjunto com a cal, reduziu a expansão do solo, além de aumentar a capacidade de suporte (CBR). Os melhores resultados foram obtidos com 18,75% de cinza e 6,25% de cal, havendo também aumento na resistência à compressão simples.

Assim como discutido por estudos anteriores, a aplicação das cinzas de biomassa terá comportamento variável pela categoria à qual se enquadra (volante ou de fundo), assim como

já bem consolidado na literatura para as cinzas de carvão mineral (Andreão *et al.*, 2019; Vilasini; Thangasamy; Balu, 2025; Vilasini; Thangasamy, 2025). Logo, sua adequada aplicação na estabilização de solos, e interpretação dos resultados, passa pela compressão das características do material utilizado.

2.4. Cales alternativas para estabilização de solos

Diversos estudos têm buscado explorar resíduos industriais, agrícolas e do setor alimentício como fonte para agentes cimentantes sustentáveis, como alternativa a aglomerantes tradicionais, que possuem maior pegada de carbono (Anburuvel *et al.*, 2023; Consoli *et al.*, 2020; Ferraz *et al.*, 2018a, 2019; Han *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2022; Zaman *et al.*, 2018). No que se refere especificamente a resíduos que possuam predominância de carbonato de cálcio (CaCO_3) em sua composição, Zaman *et al.*, (2018) avaliam que, se adequadamente processados por moagem e calcinação, esse tipo de material apresenta alto potencial de aplicação. Alguns resíduos se destacam nesse quesito: os resíduos da extração de gás acetileno (carbeto de cálcio), as cascas de ovo e as conchas de mariscos.

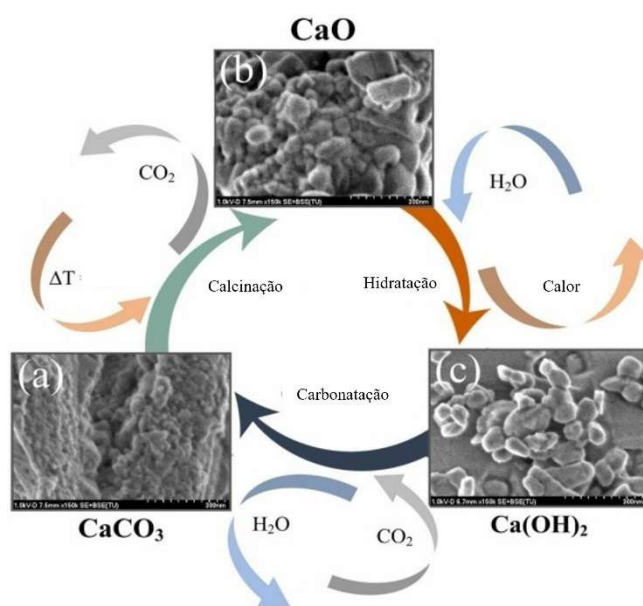
O resíduo de carbeto de cálcio ou cal de carbureto é composto de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ com pequenas quantidades de carbonato de cálcio (CaCO_3), óxido de sílica (SiO_2) e outros óxidos metálicos, sendo este um resíduo gerado como uma pasta aquosa durante o processo de produção de gás acetileno. A reciclagem da cal de carbureto a torna apta a diversas aplicações que incluem a estabilização de solos (Saldanha *et al.*, 2018). A composição química dessa cal é predominante de CaO (>70%), conforme resultados de FRX apresentados por Saldanha *et al.*, (2018). Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), calcita (CaCO_3) e grafita (C) são os minerais dominantes presentes na cal de carbureto.

Diversos estudos validaram a cal de carbureto como um ativador alcalino na estabilização de solos, combinando como fonte de aluminossilicatos para diversos tipos de solos e rejeitos de mineração (Bruschi *et al.*, 2022; Consoli *et al.*, 2001, 2019b; Julphunthong *et al.*, 2024; Scheuermann Filho *et al.*, 2021). Scheuermann Filho *et al.*, (2021) avaliaram a combinação da cal de carbureto com pó de vidro na estabilização de solos dispersivos, Julphunthong *et al.*, (2024) também estudou uso desta mesma cal juntamente com cinza volante de carvão na estabilização de solos colapsíveis, Consoli *et al.*, (2019b) combinou esse material com cinza de casca de arroz para estabilização em solos arenosos e (Bruschi *et al.*, 2022)

utilizou a mesma com cinza de bagaço de cana-de-açúcar e um ativador alcalino (NaOH) na estabilização de rejeitos de mineração de bauxita. Em resumo, todos os estudos avaliam de forma positiva o uso da cal de carbureto e a melhoria das propriedades como resistência à compressão não confinada, rigidez e resistência ao cisalhamento, em função da combinação com fontes de sílica amorfa na produção de agentes cimentantes.

As cascas de ovo também passaram por uma série de estudos que mostram sua potencialidade de serem transformadas em cal para uso na indústria, na construção civil e na estabilização de solos (Beck *et al.*, 2010; Consoli *et al.*, 2020; Cree; Rutter, 2015; Ferraz *et al.*, 2018b; Saldanha *et al.*, 2021; Zaman *et al.*, 2018). Essa alta potencialidade se deve à composição da casca de ovo ser de 97 % de CaCO_3 e este estar na forma do mineral calcita, mais puro do que o calcário extraído nas minas, que contém impurezas como argilas, areias e outros minerais. Assim, quando calcinado, esse material produz uma cal com teor de CaO da ordem de 90%, em um ciclo de produção descrito por Gomez-Vazquez *et al.*, (2024) na Figura 8.

Figura 8. Ciclo de produção da cal de casca de ovos



Fonte: Adaptado de Gomez-Vazquez *et al.*, (2024)

No que se refere a aplicação na estabilização de solos, diversos estudos avaliaram a cal de casca de ovo: no tratamento de solos expansivos (Araújo *et al.*, 2021), associada com escória de alto forno, para estabilização de solos para fins rodoviários (Bensaifi *et al.*, 2019); com cinza de casca de arroz, na estabilização de solos sob ataque ácido (Reis *et al.*, 2022) e em solos

lateríticos para construção de rodovias (Anburuvel *et al.*, 2023); com cinza de bagaço de cana-de-açúcar e ativação alcalina (Araújo *et al.*, 2024) encontrando aumento na resistência mecânica da mistura.

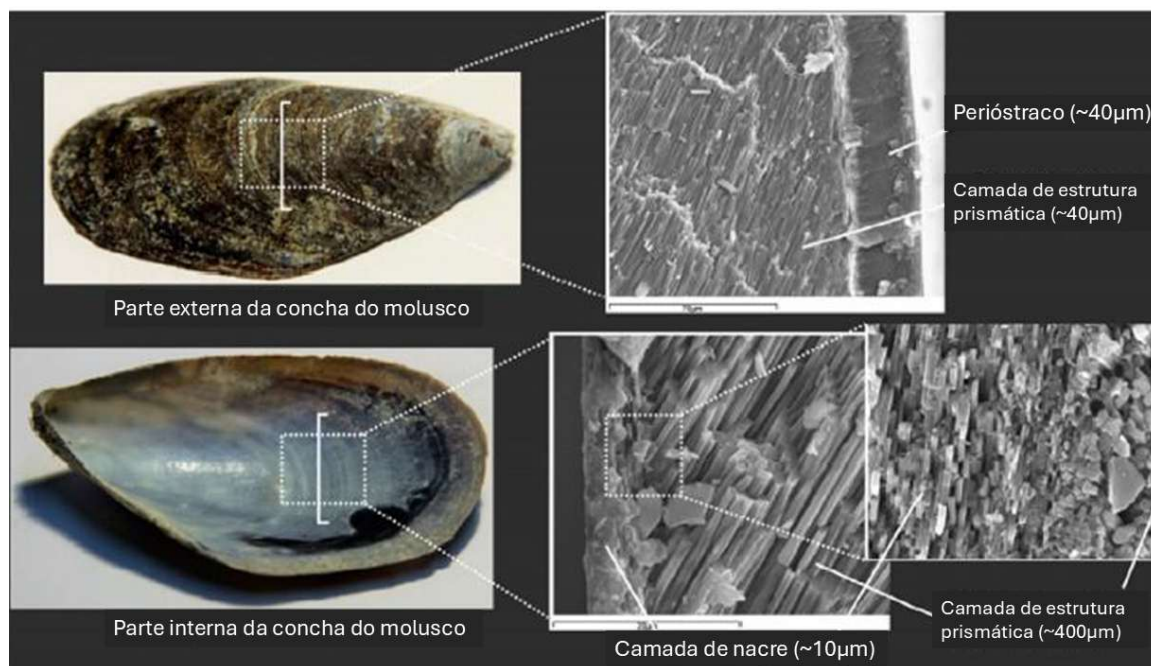
As conchas de mariscos, resíduos da atividade de mariscagem, recentemente, estão sendo estudados para aplicações similares às anteriores. No uso em concretos, Mo *et al.*, (2018) mostram que o uso das conchas após moagem como substituição parcial de agregado graúdo, miúdo e na forma de pó resulta em consideráveis melhorias na resistência, trabalhabilidade, resistência ao fogo, entre outros.

As conchas de mariscos geralmente possuem teor de CaCO_3 superior a 90%, quantitativo semelhante ao teor de carbonato de cálcio do calcário utilizado na produção de cimento Portland (Mosher *et al.*, 2012). Nesse sentido, é proeminente a possibilidade da transformação das conchas residuais da atividade de mariscagem em matéria-prima calcária, e potencial transformação em cales para diversas finalidades, que podem incluir a estabilização de solos.

2.4.1. Composição das conchas de mariscos

A biomineralização do carbonato de cálcio (CaCO_3) realizada por organismos é amplamente observada em invertebrados aquáticos, que possuem exoesqueletos e são capazes de formar diversas estruturas, sendo as conchas as mais comuns. O carbonato de cálcio das conchas se cristaliza por meio de processos bioquímicos, com deposição alternada de aragonita, calcita ou cristais de madrepérola incrustados em uma matriz orgânica composta por proteínas, quitina e polissacarídeos, que não excedem 1% em volume do corpo, conforme a Figura 9. Embora a matriz orgânica seja quantitativamente um constituinte menor na concha dos moluscos, é o principal componente que controla diferentes aspectos dos processos de formação da concha: desde a síntese de minerais amorfos transitórios e evolução para fases cristalinas, até a escolha do polimorfo de carbonato de cálcio (calcita ou aragonita) e a organização dos cristalitos em microestruturas complexas (Alvarado; Alvarado-Quintana, 2022).

Figura 9. Estrutura da concha de um marisco



Fonte: Alvarado; Alvarado-Quintana, (2022)

As conchas de organismos bivalves, disponíveis em grandes volumes principalmente em regiões costeiras, não possuem uso eminente e são comumente consideradas resíduos. Seu descarte inadequado causa um nível significativo de preocupação ambiental e resulta em desperdício de recursos naturais. No entanto, por serem constituídas principalmente por CaCO_3 com pequena quantidade de matriz orgânica, possuem potencial para utilização como matéria-prima (Yao *et al.*, 2014).

Em geral, simplesmente as conchas de organismos marinhos moídas não apresentam reatividade ou propriedades que contribuam para a cimentação de materiais, uma vez que estas são compostas por formas estáveis do carbonato de cálcio (Caldas, 2018; Han *et al.*, 2010). No entanto, este tipo de material triturado mostrou-se adequado como agregado miúdo em argamassas (Martínez-García *et al.*, 2019; Yoon *et al.*, 2004), uso como substituição parcial de agregados e filler (Caldas, 2018; Leite *et al.*, 2024) ou total com potencial uso para elementos estruturais e com uma melhor resistência ao fogo (Ahsan *et al.*, 2022). Ainda, quando calcinado o pó de conchas de mariscos apresenta composição química predominantemente de óxidos de cálcio (CaO), conforme resultados de espectroscopia por fluorescência de raios x (FRX) observado em literatura (Ferraz *et al.*, 2019; Sudjianto; Suraji; Susilo, 2021). Aspecto que reforça sua potencialidade como matéria-prima alternativa ao calcário na produção de cal, por exemplo.

Logo, alternativas de valorização dessas conchas são estratégias sustentáveis de uso de resíduos implementados à escala industrial. As conchas de mariscos constituem uma fonte confiável de carbonato de cálcio (Medina Uzcátegui; Vergara; Martínez Bordes, 2022). O que destaca seu potencial para se tornarem uma matéria-prima secundária promissora para diversas aplicações, numa perspectiva de economia circular (Summa *et al.*, 2022).

2.4.2. Disponibilidade e produção de cal de conchas de mariscos

Os mariscos bivalves são frutos do mar ricos em proteínas e nutritivos, com demanda crescente em todo o mundo. Suas conchas, representam entre 75% e 90% do seu peso total, fazendo com que a poluição do ecossistema, gerada pelo seu descarte a céu aberto, seja um grande desafio ambiental (Choi *et al.*, 2024; Summa *et al.*, 2022). Na Coreia do Sul, estima-se que o resíduo anual seja de aproximadamente 300.000 toneladas de conchas de ostras, cobrindo 4,1 hectares da costa todos os anos (Bonnard; Boury; Parrot, 2020). Para Taiwan este número é estimado em 25.000 toneladas (Wei *et al.*, 2018). De acordo com (Li *et al.*, 2023) apenas na China são descartadas cerca de 15 milhões de toneladas de conchas por ano, para o ano de 2022 a produção mundial de moluscos bivalves foi estimada em 18,9 milhões de toneladas (FAO, 2024).

No Brasil, de acordo com Silva, Carolsfeld & Gálvez, (2014), em um estudo com uma comunidade de catadores do molusco bivalve *Anomalocardia Brasiliiana* mostram que o após o desconchamento (processo que consiste em aferventar o marisco para extração da parte comestível) o rendimento líquido médio representa aproximadamente 8,9% da massa bruta pescada. Ou seja, a cada 10 kg de marisco processados, são descartadas 9,1 kg de conchas. Ainda segundo os autores a quantidade coletada por cada catador varia entre 10 a 17 kg/dia. Considerando que, segundo o Relatório da FAO (2008), há mais de 50.000 marisqueiras no Nordeste e mesmo com ressalvas a defasagem do número de pessoas vinculadas a atividade, se estimaria uma produção mínima de resíduos da ordem de 500 toneladas por dia.

Oliveira, (2016) mostra que apenas uma comunidade ribeirinha do município de Igarassu-PE chega a despejar uma quantidade de 789,6 toneladas de conchas residuais por mês no Rio Igarassu, contribuindo para o seu assoreamento, como apresentado na Figura 10a e Figura 10b. O autor ainda mostra que a quantidade de material é tão grande que as áreas de depósito podem ser visualizadas por imagem de satélite, conforme a Figura 10c. O mesmo fenômeno é observado por Silva; Silva; Lafayette, (2024) em um estudo de análise espaço-temporal do depósito desse material em uma ilha de restinga na zona metropolitana do Recife-

PE, que mostra que com o tempo essas áreas tendem a aumentar e só são suprimidas quando há algum tipo ocupação urbana na área.

Camargo e Estupinan, (2022) estimam que só na região da cidade de Cabedelo, Estado da Paraíba, são descartadas cerca de 11 toneladas de conchas de marisco por dia. Em outras localidades do litoral do Nordeste brasileiro, como Salinas da Margarida-BA Chaval-CE, Recife-PE e Arez-RN, relatam que há problemas relativos ao descarte e à incapacidade de reaproveitamento das conchas dos mariscos (Araújo, 2020; Gomes, 2022; Leite *et al.*, 2024; SANTOS, 2013).

Figura 10.(a) e (b) Depósito a céu aberto de conchas residuais na margem do Rio Igarassu-PE e (c) imagem de satélite da área.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Oliveira (2016)

Sem tratamento, as pilhas dessas conchas produzem problemas de saneamento e odores desagradáveis. Apesar desse resíduo possuir origem biogênica, conchas de mariscos não são biodegradáveis, logo, modificam os solos locais, as águas naturais e os ecossistemas marinhos, especialmente se a seu descarte não for controlado (Bonnard; Boury; Parrot, 2020).

Estudos recentes mostram potenciais aplicabilidades de conchas residuais para diversas finalidades como produção de cosméticos, materiais médicos, remediação de solos, tratamento de água, síntese de materiais (Ok; Lim; Moon, 2011; Saharudin *et al.*, 2018; Vieira; Coelho; De Jesus, 2019; Mediarman *et al.*, 2021; Ruslan *et al.*, 2022; Kul *et al.*, 2023). No entanto, as utilizações têm sido limitadas a condicionadores de solo para agricultura, adsorventes de baixo custo, suplementos de cálcio etc.

A reciclagem de resíduos de conchas de mariscos pode ser uma boa alternativa ao descarte, principalmente em processo de estabilização de solos, pois, devido à possível salinidade residual, esta pode não ser adequada a outros usos como concreto armado (Lee; Tsai; Chen, 2020).

Alvarenga *et al.*, (2012) conduziram uma avaliação do ciclo de vida (ACV) do berço ao túmulo de ostras produzidas e consumidas no sul do Brasil, incorporando como alternativa ao descarte a reciclagem de conchas de ostras. Foram considerados dois cenários – A) disposição em aterros e B) utilização como matéria-prima calcária. Este último cenário, segundo os autores, teve menores impactos ambientais, pois, além de evitar os efeitos carcinogênicos do primeiro cenário, substitui todo o impacto decorrente da extração, transporte e beneficiamento do calcário. Também foi considerada uma menor distância de transporte entre a indústria de beneficiamento e o aterro, além de aspectos referentes ao tipo de veículo e consequente nível de poluição decorrentes desta logística. Ainda que ampliando ao limite de 323 km entre os restaurantes (produção de conchas de ostras como resíduo) e a unidade de beneficiamento, ainda assim ter-se-ia menor impacto do que o cenário A. Assim, em cenários que considerem a coleta das conchas diretamente dos catadores poderiam reduzir distâncias de transporte e consequentemente amplificar o uso das conchas como matéria-prima calcária.

Neste contexto, comprovado potencial econômico e ambiental de conchas de moluscos bivalves, o uso desse material é um campo promissor de pesquisas, e se deve buscar a longo

prazo métodos potenciais de reciclagem para resíduos e eliminar os problemas ambientais que estes podem causar (Yao *et al.*, 2014).

Desde o início da década de 1980, pesquisadores têm investigado a utilização de concha de ostra e outros organismos bivalves como substituto de agregados em materiais de construção ou de clínquer de cimento (Yao *et al.*, 2014). Estudos com Análises Térmicas Diferenciais Simultâneas (DTA e TG) mostraram que o pó de conchas de mariscos após temperaturas de 750°C não passou por maiores alterações químicas (Yamaguchi; Hashimoto, 2022).

Suwannasingha *et al.*, (2022) e Bonnard; Boury; Parrot, (2020) ao avaliaram diferentes tipos de resíduos de conchas marinhas e processos de calcinação, observaram que a temperatura de 900 °C é a mais adequada, para que se fosse obtido uma completa transformação de CaCO_3 em CaO (cal virgem). A Tabela 1 apresenta diferentes temperaturas e granulometrias utilizadas por pesquisadores na obtenção de cal virgem de concha, muitas vezes nomeada “seashell ash”. Essas variações podem, em certo grau, influenciar a reatividade do material. Outro aspecto destacado na Tabela 1 é que, em geral, as temperaturas utilizadas nos estudos são superiores a 800°C, ponto em que ocorre a transformação do carbonato de cálcio (CaCO_3) em óxido de cálcio (CaO) (Ebneyamini *et al.*, 2021).

Tabela 1. Revisão de condições de calcinação de conchas

Temperatura (°C)	Tempo (horas)	Granulometria inferior a	Material (tipo de concha)	Estudo
250-300	1-2	0,42 mm	Concha de ostra	(Sudjianto; Suraji; Susilo, 2021)
900	5	-	Concha de caranguejo azul (BS) (Portunus pelagicus) Osso de choco (CB) (Sepia brevimana) Concha de mexilhão verde (GS) (Perna viridis) concha de ostra (OS) (Saccostrea cucullata)	(Suwannasingha <i>et al.</i> , 2022)
770	4	1 mm	Concha de ostra	(Ok; Lim; Moon, 2011)
900	-	0.075 mm	Concha de ostra	(Etim <i>et al.</i> , 2022a)
800	1	0.075 mm	Conchas de pervinca	(Etim <i>et al.</i> , 2022b)
800			Concha de ostra	(Wei <i>et al.</i> , 2018)
900	2	0.045 mm	Concha de berbigão (Anadara Granosa)	(Kul <i>et al.</i> , 2023)
800	3	-	amêijoia de pescoço curto (Paphia undulate), Concha de berbigão (Anadara granosa) e Concha de molusco de casca dura (Meretrix lyrata)	(Saharudin <i>et al.</i> , 2018)
1000	3	0.250	Conchas de amêijoia, mexilhão, berbigão comestível, cunha, navalha, ostra, berbigão de cachorro e vieira	(Ferraz <i>et al.</i> , 2018a)

Ferraz *et al.*, (2019) avaliaram diferentes tipos de conchas de frutos-do-mar na obtenção de cal calcítica (ex.:amêijoas, mexilhão, berbigão comestível, cunha, navalha, ostra, berbigão de cachorro e vieiras) e constataram que resíduos de conchas podem ser utilizados na produção de cal. Os resultados da análise por fluorescência de raios-X (FRX) indicaram que a cal obtida a partir de conchas apresenta um teor de óxido de cálcio (CaO) semelhante ao da cal derivada do calcário, com uma média de 76% para as conchas e 82% para o calcário. Além disso, apesar de ter reatividade um pouco menor, há vários benefícios, entre os quais, a inexistência de impactos ambientais relacionados com a exploração do calcário, o menor gasto de energia no processo de cominuição, ou a inexistência de custos de eliminação relacionados com a deposição em aterro.

2.4.3. Usos da cal de marisco

Os estudos (Her *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022) avaliaram conchas de ostras e vieiras como substituição ao calcário na produção de clínquer-cimento. Em ambas as análises os autores procederam com a substituição da fonte de carbonato de cálcio, oriunda do calcário, pela proveniente das conchas. Nas análises químicas (FRX, FTIR), mineralógicas, térmicas e mecânicas, estes obtiveram resultados que indicam clínquer apresenta propriedades e características similares entre amostras que usaram o calcário em comparado com amostras que usaram o pó de conchas, resultando em cimento de idêntica qualidade. No entanto, alguns estudos indicam que há limitações do uso de concha de mariscos para substituir o CaCO_3 nas indústrias de aço e cimento devido às preocupações práticas de que possam conter impurezas, como Na, K e Cl, que podem ser prejudiciais aos produtos siderúrgicos devido à corrosão e ter efeitos indesejáveis em estruturas de concreto armado (Wei *et al.*, 2018).

O uso de pó de casca de mariscos (sem calcinação) em cimentos ou concretos requer restrições de salinidade muito rigorosas, semelhantes ao caso de uso como fertilizante. A lavagem natural da água pela chuva, o outro recurso hídrico é o método mais econômico na solução deste problema, mas levanta preocupações sobre odores, contaminação do ambiente circundante e do abastecimento de água, e a produção de águas residuais (Choi *et al.*, 2024).

A presença de NaCl tende a ter menor influência ou até respostas positivas quando se trata do melhoramento de solos, e em especial os estabilizados com cinzas, em que a salinidade pode melhorar as propriedades geotécnicas do solo (Consoli *et al.*, 2019; Silvani *et al.*, 2023).

Alguns estudos, ainda que de maneira restrita, já avaliaram algumas propriedades e comportamento da cal calcítica oriunda de mariscos aplicados a geotecnia.

Na geotecnia ambiental Ok; Lim; Moon, (2011) observaram o potencial de uso da cal de canchas virgem na retenção de metais pesados em solos contaminados, assim como observado por Reis *et al.*, (2022) para a cal obtida por casca de ovo. Essa propriedade se deve a capacidade adsorvente por ter apenas CaO (cal virgem) em sua composição, após o processo de calcinação. Sudjianto; Suraji; Susilo, (2021) produziram e utilizaram a cal de ostras moídas para melhoramento de solo expansivo, estes observaram a redução da umidade ótima de compactação, redução da plasticidade, e consequente redução da expansão.

Os estudos, ainda que restritos, apresentam as potencialidade pra uso desse resíduo na estabilização de solos, como o de Petti *et al.*, (2024) que avaliou a estabilização mecânica de sedimentos marinhos dragados, com pó de conchas de mexilhão e cimento. Os resultados se mostraram positivos, ainda que, neste caso, as conchas não tenham sido calcinadas. Segundo os autores, o pó de conchas se mostra uma fonte de carbonato de cálcio e que, dentre outros aspectos, atua como um preenchedor de vazios, melhora as trocas eletrolíticas entre sedimento e cimento e aumenta a área de contato entre as partículas minerais, promovendo as reações de hidratação química.

Os estudos de Etim; Attah; Yohanna, (2020), Etim *et al.*, (2022a), Etim *et al.*, (2022b), também utilizaram conchas de ostras e perivina moídas, com calcinação a temperaturas entre 800 e 900°C. Em suma, estes autores observaram melhorias do comportamento geomecânico, para fins rodoviários, com a adição de cal de concha de ostras, de forma única ou associada com cimento ou cal.

Moghim; Noorzad; Shirvani, (2022) estudaram uma argila de alta plasticidade estabilizada com o que estes nomearam como cinza de conchas (*Seashell Ash -SSA*), sendo este material o pó de conchas (<0,425 mm) calcinado a 900°C por 1 hora. O que pode ser considerada uma cal viva, dada a transformação do carbonato de cálcio em óxido de cálcio (94,74% de CaO). No que se refere aos resultados deste estudo, os autores mostram que a SSA aumentou consideravelmente a resistência a compressão simples e a durabilidade da argila, com máximo obtido com 9% de SSA e com teores superiores ocorrendo a redução. Os autores associam este comportamento à flocculação provida pelo Ca^{++} , que muda a estrutura do solo, e as reações pozolânicas, como confirmado pelas análises microestruturais. Estes resultados corroboram a eficácia da SSA como um aditivo não tradicional para estabilização do solo.

2.5. Comportamento geomecânico de solo estabilizado quimicamente

O comportamento mecânico de solos estabilizados com ligantes alternativos, como aqueles baseados em materiais alcalinos, ainda carece de entendimento profundo, apesar de avanços na análise de solos cimentados com cal e cimento. Os ligantes alternativos apresentam vantagens ambientais, reduzindo impactos negativos associados a aglomerantes tradicionais e mitigando problemas como rigidez excessiva e fissuração reflexiva em pavimentos (Rezaeimalek; Huang; Bin-Shafique, 2017; Sebesta, 2005). A estabilização ocorre pela reação entre a alcalinidade e os componentes de resíduos, como sílica e alumina, sendo a viabilidade econômica influenciada pela proximidade entre a geração e o uso dos resíduos (Consoli *et al.*, 2021). Deste modo, são emergentes novas propostas de ligantes e estudos que deem suporte a sua viabilidade e aplicação

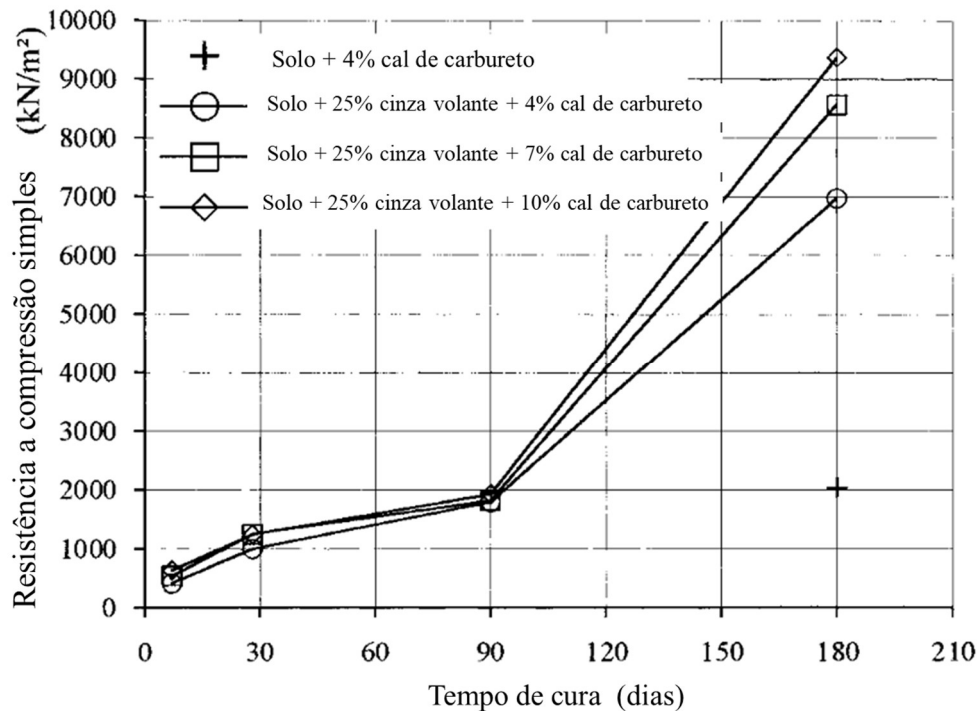
2.5.1. Resistência a Compressão Simples

Uma forma prática de se observar a efetividade de alteração da resistência de um solo que passou por algum tipo de melhoramento são os ensaios de resistência não confinada. Consoli *et al.*, (2014) demonstra que além de mostrar os efeitos de agentes cimentantes na resistência do solo, estes ensaios apresentam alta reprodutibilidade quando minimizados os efeitos da sucção, por meio da imersão prévia em água antes da ruptura. Com isso, inúmeros estudos se desenvolvem utilizando este ensaio como método de avaliação e validação de agentes cimentantes, tipos de solo, resíduos, umidades de compactação, tempo de cura entre outros, (Baldovino *et al.*, 2020; Baldovino; Rosa; Calabokis, 2024; Consoli *et al.*, 2019b; Consoli; Gravina Da Rocha; Silvani, 2014; Da Fonseca; Cruz; Consoli, 2009; Saldanha *et al.*, 2021; Silvani *et al.*, 2023).

Em termos de resultados experimentais, especialmente em sistemas que utilizam misturas de cinzas residuais e cal, os resultados de resistência à compressão simples (q_u) mostram um desempenho superior quando comparados a misturas que utilizam apenas cal ou apenas pozolana. Consoli *et al.*, (2001) avaliou o solo residual de arenito Botucatu (SRAB), sendo este classificado como uma areia siltosa (SM), com substituição de 25% de cinza volante (tipo F), e adições de cal de carbureto. Os resultados mostram que a mistura cinza volante-cal atuam como um agente de estabilização de reação lenta, e que conforme a Figura 11, os resultados de resistência compressão simples mostram que após 28 dias de cura todas as amostras apresentaram resistência da ordem de 1 MPa, e este valor se torna quase 10 vezes

maior após 180 dias. Enquanto misturas apenas com cal apresentam ganhos menores de resistência à compressão simples. Provando-se válido o uso de composições de uma fonte de sílica amorfa (cinzas residuais) e cales para o melhoramento das propriedades mecânicas do solo.

Figura 11. Efeito do tempo de cura na resistência a compressão simples em misturas solo-cinza volante-cal de carbureto

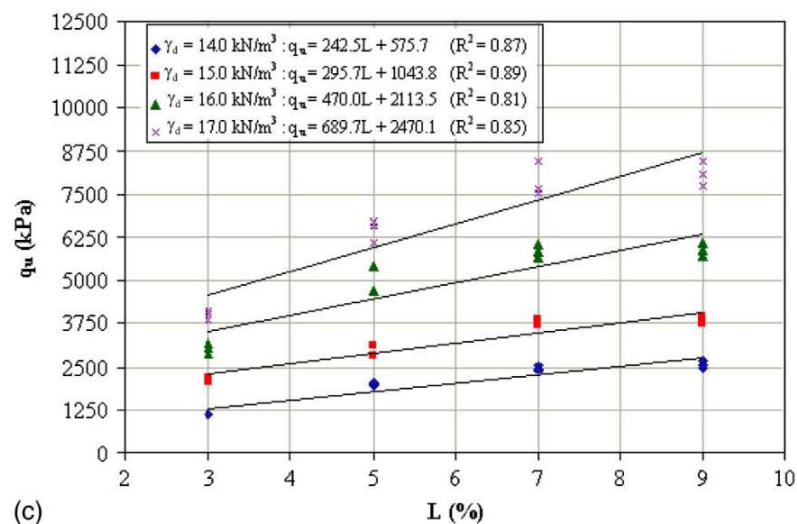
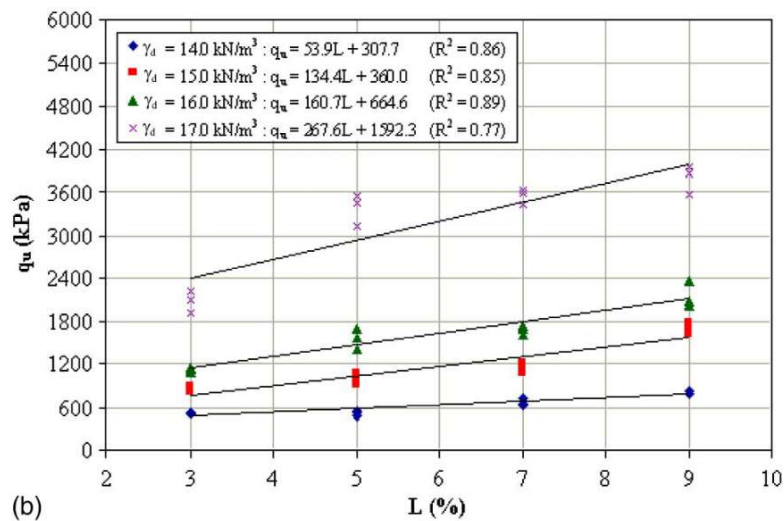
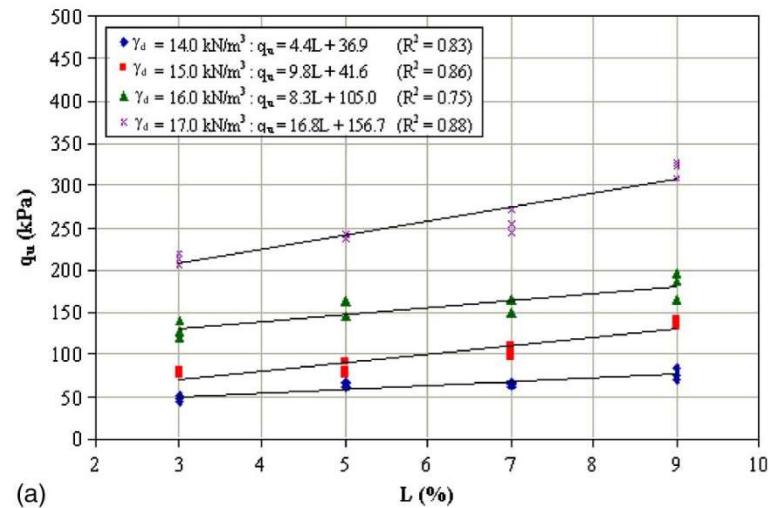


Fonte: Consoli *et al.*, (2001)

De modo reiterado, aumento q_u do solo, com o uso de cal dolomítica comercial e a cinza volante (FA). Parte dos resultados estão apresentados na

Figura 12a, as misturas apenas com cal apresentam um aumento de q_u , no entanto com a substituição do solo por cinza volante, nos teores de 12,5 e 25 % (Figura 12b e Figura 12c, respectivamente) observa-se um aumento ainda mais significativo em q_u . Esse incremento de resistência à compressão simples chega a ser até 25 vezes maior quando comparado ao teor máximo de cinza com misturas que contêm apenas cal.

Figura 12. Variação da resistência à compressão simples para diferentes teores de cal: (a) amostras SRAB-cal, (b) amostras SRAB (12,5% FA)-cal e (c) amostras SRAB (25% FA)-cal



Fonte: Consoli; Rosa; Saldanha, (2011)

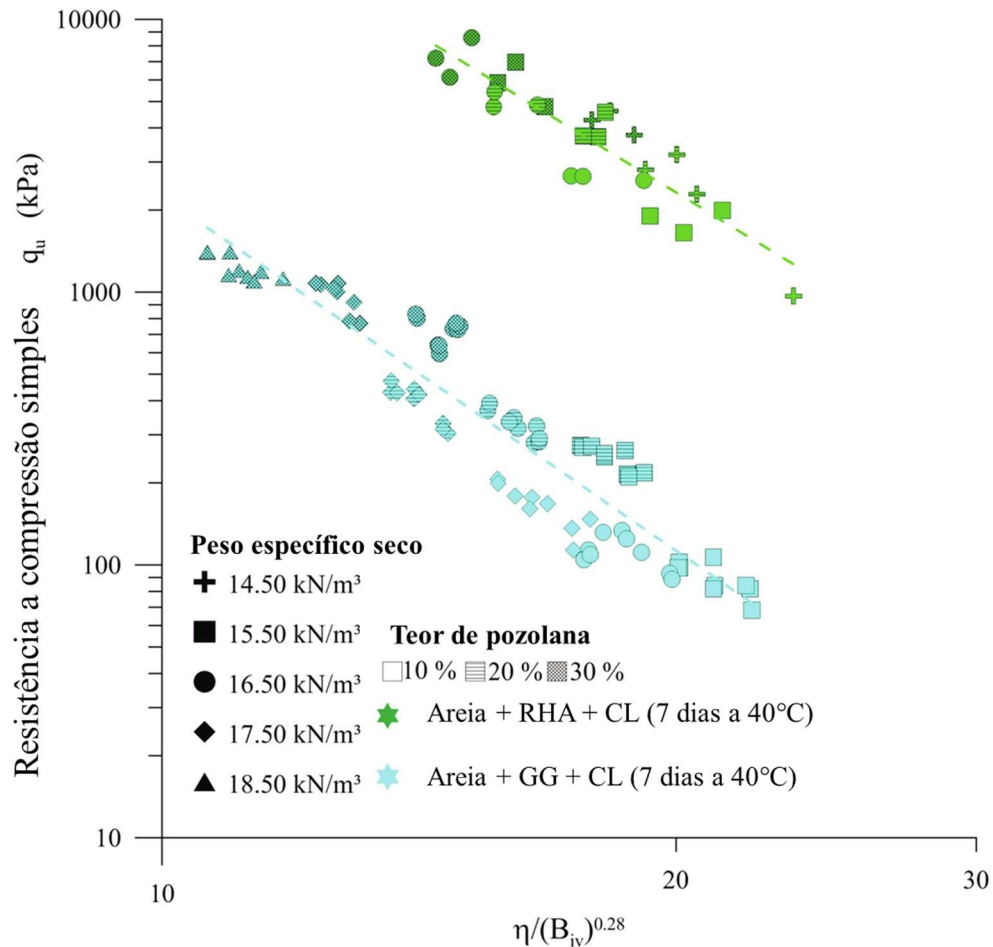
Sharma; Swain; Sahoo, (2012) avaliaram misturas de cal e cinza volante aplicadas a um solo expansivo. Os resultados indicaram melhorias nas propriedades geotécnicas do solo com

a adição conjunta de cinza e cal. As análises demonstraram modificações em nível microestrutural, como a redução da capacidade de troca catiônica, a desestruturação da montmorilonita e a formação de géis do tipo C–S–H e C–A–H. Essa série de transformações explica o aumento da resistência à compressão simples observado em comparação com o solo não estabilizado.

Resultados similares foram observados por Silvani *et al.*, (2023) ao usar cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) e cal na estabilização de um solo expansivo. Estes autores observaram uma tendência de aumento da resistência à compressão simples em função do aumento do teor de cal. Ainda, estes autores observaram que a salinidade presente em águas salobras podem ser um agente catalisador das reações pozolânicas entre a CBCA e a cal, como reforça os resultados de Consoli; Saldanha; Scheuermann Filho, (2019) ao avaliar durabilidade e resistência a compressão simples de misturas com cinza volante e cal de carbureto, com adição de NaCl.

Consoli *et al.*, (2021) avaliaram o potencial de novas fontes de materiais pozolânicos na estabilização de uma areia uniforme (areia de Osório), destacando-se a cinza de casca de arroz (*Rice Husk Ash* – RHA) e o vidro moído (*Ground Glass* – GG). Em diferentes proporções, esses materiais foram combinados com cal de carbureto (*Carbide Lime* – CL), empregada como fonte de hidróxido de cálcio. Os resultados demonstraram a viabilidade da utilização desses resíduos como constituintes de agentes cimentantes alternativos, capazes de promover ganhos expressivos de resistência por meio do desenvolvimento de reações pozolânicas. Os resultados da Figura 13 mostraram que a quantidade e o tipo de pozolana usada, o teor de cal carbureto e a porosidade afetam a resistência e outras propriedades de misturas compactadas de areia-pozolana-CL. Conforme a Figura 13, os autores mostram que o efeito das cinzas da casca de arroz apresenta melhor resposta do que o vidro moído, especialmente quando curadas a temperaturas superiores (40° C).

Figura 13. Resistência compressão simples de misturas areia-cal de carbureto(CL)- cinza de casca de arroz (RHA)/ pó de vidro (GG)

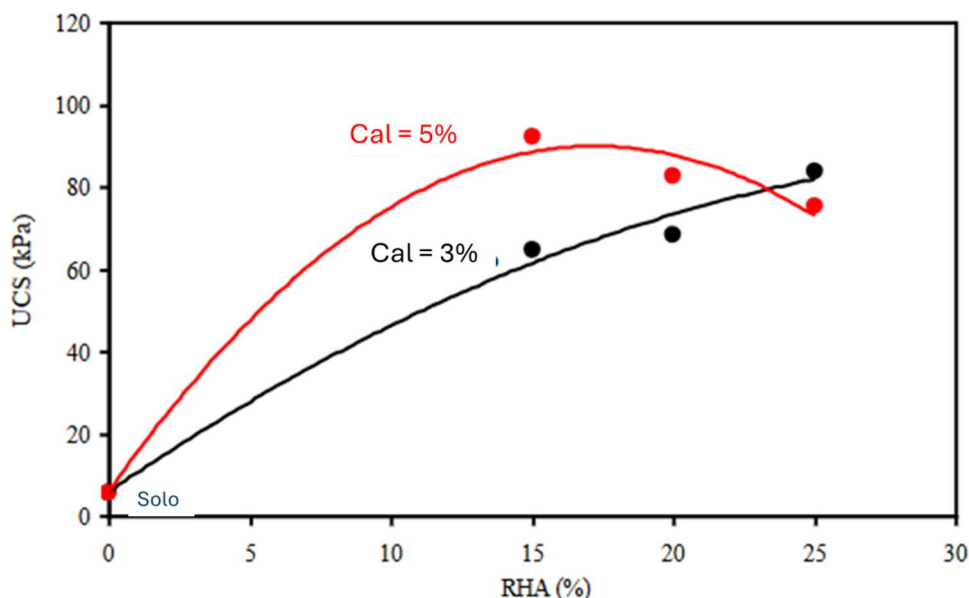


Fonte: Adaptado de Consoli *et al.*, (2021)

Logo, um parâmetro relevante nos resultados na melhora das propriedades de resistência do solo é a atividade pozolânica da cinza. Behak; Musso, (2016), ao avaliar a estabilização de areia siltosa com cinza de casca de arroz e cal, observaram um aumento limitado da resistência à compressão simples, mesmo com o aumento do teor de cal e cinza na mistura, conforme a Figura 14. Esse comportamento, segundo os autores, deve-se a baixa reatividade da cinza utilizada, pois esta não teve uma queima não controlada, sendo este um aspecto restritivo para uso de maiores teores de cal. De modo oposto, o estudo de Bagheri; Ahmad; Ismail, (2014) utilizou da cinza de casca de arroz com queima controlada (a temperatura de 500°C, por 120 min) obtendo um material com alta pozolanicidade, máxima finura e alta quantidade de sílica ($\text{SiO}_2 \sim 90\%$). Logo, esses autores ao avaliar a resistência a compressão simples de uma areia siltosa estabilizada com um agente estabilizador composto por 25% de cimento, 50% de cal e

25% de cinza de casca de arroz, mostraram que a cinza se comporta como material cimentício suplementar, com alta potencialidade a substituição na fração de aglomerantes tradicionais.

Figura 14. Efeito da cinza de casca de arroz e cal na resistência a compressão simples



Fonte: Adaptado de Behak; Musso, (2016)

Além da reatividade do material fonte de sílica e alumina, a adequação da fonte de hidróxido de cálcio também é essencial para elevar o pH da mistura, favorecer as reações de cimentação e, conseqüentemente, proporcionar maior resistência à compressão simples. Além do uso já comprovado da cal de carbureto nessa papel (Consoli *et al.*, 2001, 2021) outros estudos, como Saldanha *et al.*, (2021) validaram a cal da casca de ovo com pó de vidro como agente cimentante responsável por aumentar a resistência e rigidez de uma areia mal-graduada (areia de Osório).

2.5.2. Parâmetro de dosagem porosidade/teor volumétrico de ligante (η/Biv)

A dosagem de solo-cimento não pode ser baseada somente na relação água/cimento, desenvolvida para concretos, pois a compactação do solo-cimento não promove a expulsão completa do ar da mistura, tornando o preenchimento de vazios com água ineficiente, diferentemente do que ocorre em argamassas e concretos tradicionais. Portanto, a resistência dos solos melhorados não pode ser correlacionada ao fator água/cimento (Baldovino; Rosa; Calabokis, 2024).

No que se refere a solos cimentados, a relação entre porosidade (η) e teor volumétrico de aglomerante - *Binder* (B_{iv}) - tem sido amplamente explorada em vários estudos que investigam as propriedades dos solos estabilizados com diferentes materiais (Baldovino; Dos Santos Izzo; Ekinici, 2023; Román Martínez *et al.*, 2023). Esse termo é utilizado por combinar dois ou mais materiais que juntos possuem característica de aglomerante, sendo assim substituindo os termos C_{iv} (cimento Portland) ou L_{iv} (cal hidratada) adotados em estudos anteriores. O B_{iv} é uma razão adimensional definida pelo volume do agente cimentante dividido pelo volume total da amostra.

A razão porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}) estabelecida por (Consoli *et al.*, 2007b) e a razão porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv})(Consoli; Lopes Júnior; Heineck, 2009) pode ser considerada a primeira metodologia de dosagem racional para esses solos cimentados (Baldovino; Dos Santos Izzo; Ekinici, 2023) e esta vem continuamente se mostrando adequada e validada experimentalmente para diferentes teores de cal, cimento, cinzas, ligantes álcali-ativados, porosidades, no contexto de estabilização de solos e rejeitos de mineração (Araújo *et al.*, 2021; Baldovino *et al.*, 2019; Bruschi *et al.*, 2021; Consoli *et al.*, 2007b, 2018; Consoli; Da Rocha; Silvani, 2014; Consoli; Gravina Da Rocha; Silvani, 2014; Consoli; Rosa; Saldanha, 2011; Guedes *et al.*, 2024; Levandoski *et al.*, 2023; Mafessoli *et al.*, 2023; Reis *et al.*, 2022; Scheuermann Filho *et al.*, 2021; Servi *et al.*, 2022).

Assim, a resistência a compressão simples (q_u) ou resistência a tração por compressão diametral (q_t) pode modelada por uma equação hiperbólica em função da razão η/B_{iv} ajustada a dois expoentes empíricos (b e k) e uma constante empírica K (em kPa), considerando B_{iv} o teor volumétrico de aglomerantes (Cimento Portland, cal, cinzas álcali-ativadas) conforme a Equação 5. Em que o expoente b é aproximadamente igual a 1 para solos granulares (ex.: areias limpas)(Consoli *et al.*, 2010, 2013) e menor que uma unidade para solos granulares com consideráveis teores de finos, solos argilosos (Consoli *et al.*, 2012; Silvani *et al.*, 2023).

$$q_u \text{ ou } q_t = K \left(\frac{\eta}{B_{iv}^b} \right)^k \quad (5)$$

Scheuermann Filho; Dias Miguel; Consoli, (2022) descreveram que o expoente b descreve a relação entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento em cada solo. Se b for igual a um ($b = 1$), indica que tanto a porosidade quanto a quantidade de cimento têm influência equivalente quanto à resistência de um determinado solo misturado ao cimento. Um valor positivo de b menor que um ($b < 1$) indica que a porosidade tem maior relevância na

mistura solo-cimento compactado. Entretanto, se b for maior que um ($b > 1$), as ligações cimentícias influenciam significativamente a resistência. O método envolve o desenvolvimento da curva de porosidade/ volume de agente cimentante versus resistência à compressão simples, chamada de *curva de dosagem*.

Diambra *et al.*, (2017) mostraram que os expoentes b e k são dependentes da matriz do solo, e que a Equação 5 pode ser reformulada considerando um único parâmetro que represente a matriz do solo (a). Logo, baseados em resultados experimentais os autores fazem a seguinte consideração que o $b = 1/a$ e $k = -a$, logo, a Equação 5 pode ser reescrita conforme a Equação 6 seguinte consideração. Além disso, o escalar k é governado pelas propriedades tanto do solo quanto da matriz cimentícia.

$$q_u \text{ ou } q_t = K \left(\frac{n}{(B_{iv})^{1/a}} \right)^{-a} \quad (6)$$

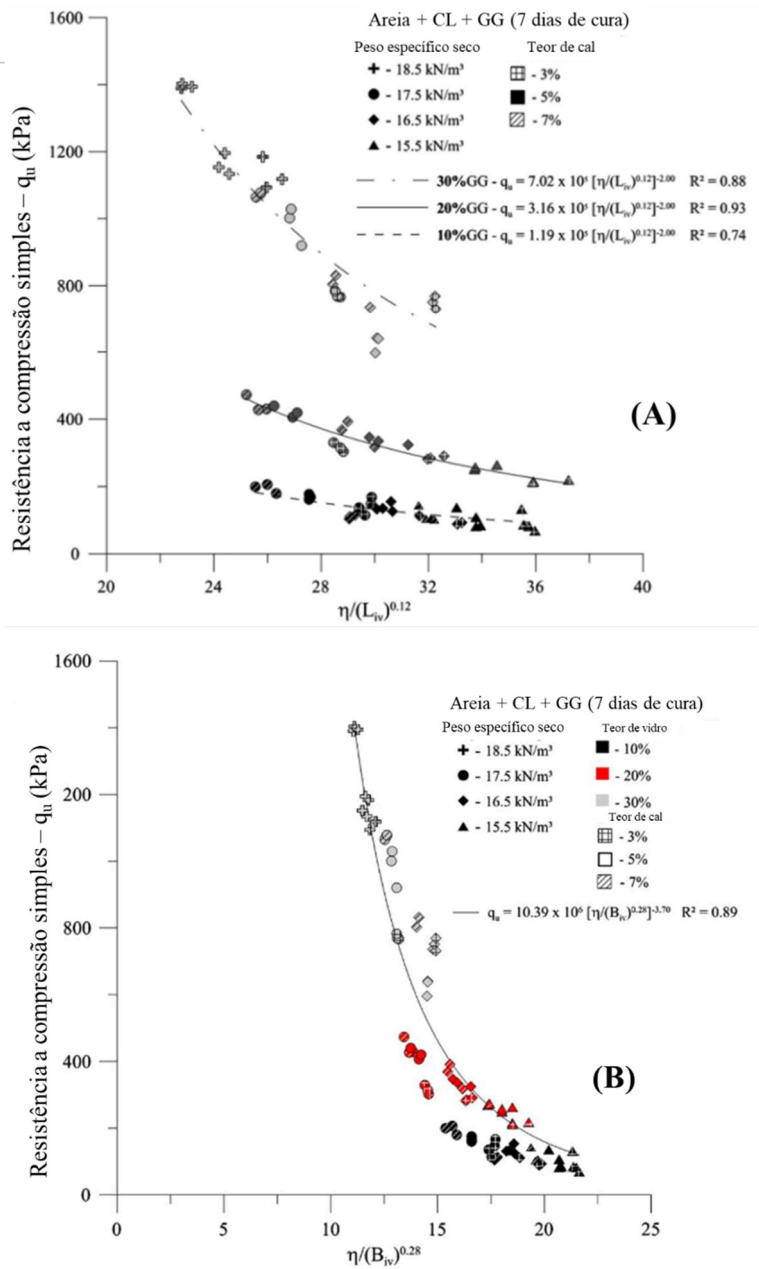
Os estudos de Diambra *et al.*, (2017, 2018, 2021) com o enfoque teórico, com base no conceito de superposição das contribuições de resistência à ruptura das fases solo e matriz cimentícia, (Diambra *et al.*, 2018) forneceu uma derivação teórica para a resistência à compressão não confinada de solos granulares cimentados artificialmente. O modelo teórico assume que o material cimentado composto é isotrópico. A matriz granular do material segue conceitos da mecânica do solo em estado crítico e a resistência da fase cimentada é descrita pelo critério de ruptura de Drucker-Prager. O comportamento do solo cimentado na ruptura é então determinado pela superposição das contribuições de resistência das duas fases: a resistência ao cisalhamento do solo cimentado composto com a fase cimentada do solo, em que a ruptura ocorre simultânea das fases cimentada e da matriz do solo; e há a compatibilidade de deformação entre as duas fases.

Esses desenvolvimentos teóricos validam a Equação 6, que descreve a resistência à compressão não confinada de solos granulares cimentados. E que o expoente interno é igual ao inverso expoente externo com sinal positivo.

No entanto, apesar dos avanços significativos nas metodologias de dosagem e aplicações do índice de porosidade/teor volumétrico de agente cimentante, os métodos que envolviam estabilizações à base de pozolana com resíduos permaneceram estagnados. Como a grande maioria das pozolanas não é autocimentante, elas precisam ser usadas em conjunto com

um ativador (Baldovino; Dos Santos Izzo; Ekinci, 2023). A partir dessa necessidade, foi proposta a relação η/B_{iv} , que trata do quociente entre a porosidade e o teor volumétrico total do agente cimentante (ou seja, cimento ou cal mais pozolana) conforme apresentado por (Baldovino *et al.*, 2020; Consoli *et al.*, 2018). De acordo com a Figura 15, os resultados que antes contemplavam variações do teor de cal (Figura 15a) podem ser então ajustados em uma curva única de potência fazendo uso do termo B_{iv} (Figura 15b) que compatibiliza os efeitos do cal e da cinza, para distintas porosidades.

Figura 15. Curva de dosagem ajustada pelo índice η/L_{iv} (a) e η/B_{iv} (b)



Fonte: Consoli *et al.*, (2018)

2.5.3. Comportamento tensão-deformação de solos cimentados

Prietto (2004) em seu estudo teórico-experimental reforça que o comportamento de solos cimentados na compressão triaxial é comandado pelas contribuições relativas a cimentação, que compõe a parcela coesiva do material, e do atrito interno e dilatância, que compõem a parcela friccional da resposta do material. No entanto, essa resposta preponderante do material é governada principalmente pelo nível de tensões efetivas e pela densidade inicial.

A estrutura nas areias cimentadas é uma combinação entre a cimentação entre as partículas (*bonding*) e do arranjo intergranular (*fabric*), que por sua vez é função da densidade e do intertravamento entre as partículas (*packing*). Segundo Cuccovillo; Coop, (1999), o comportamento das areias estruturadas pode ser classificado em dois tipos básicos: (1) dominado pela cimentação (*bonding-dominated*), quando o material apresenta uma resposta predominantemente coesiva durante o cisalhamento; e (2) dominado pelo arranjo intergranular (*fabric-dominated*), quando a resposta do material no cisalhamento é predominantemente friccional

No entanto estas considerações devem ser avaliadas para o caso de areias estabilizadas com sistemas cinza-cal, uma vez que este tipo de ligante, usualmente se apresenta em maior quantitativo (na faixa de 15 a 25% de cinza) (Consoli *et al.*, 2001; Moubarak, 2024; Rafiei; Maleki, 2024). De modo que, estas podem inclusive se alterar em termos de comportamento pós-pico, e uma vez que usualmente são avaliados baixos teores de cimento (Aiban, 1994; Amini; Hamidi, 2014)

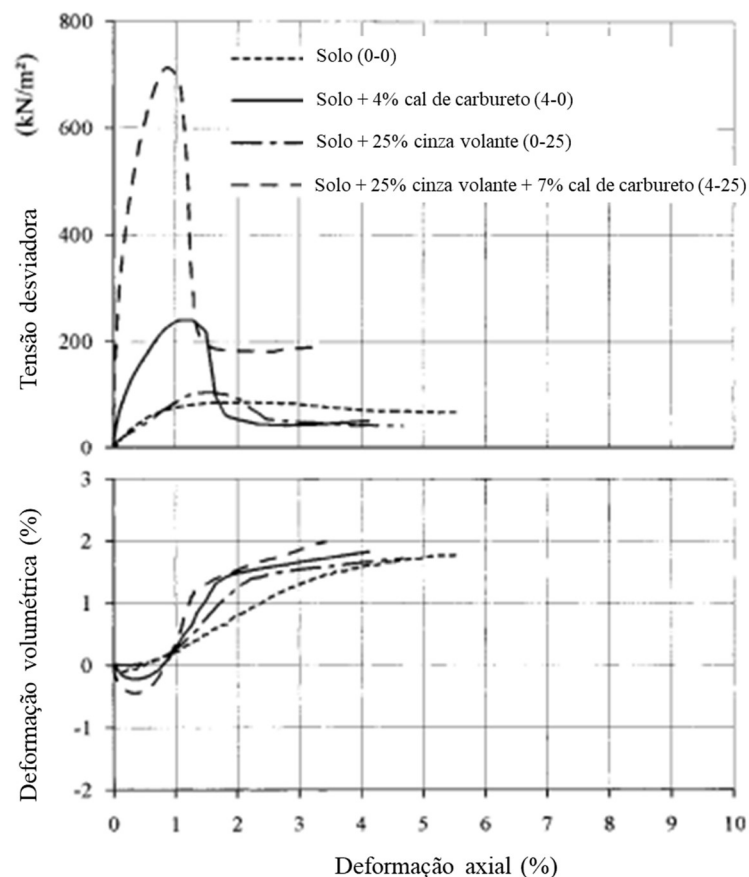
Diversos estudos avaliaram o comportamento tensão deformação de solos granulares cimentados, com diferentes tipos de ligantes considerando carregamento a tensão confinante isotrópica (Aiban, 1994; Ajorloo; Mroueh; Lancelot, 2012; Consoli *et al.*, 2001; Schnaid; Prietto; Consoli, 2001b) e multiaxiais, (Corte *et al.*, 2024; Festugato *et al.*, 2023; Reddy; Saxena, 1993; Silvani *et al.*, 2022) na importância de compreender as fases referentes ao comportamento friccional do solo e do agente cimentante. Consoli, (2014) mostrou que o ângulo de atrito de solos granulares é o mesmo para um dado tipo de solo e cimento, bem como é função de q_t/q_u também evidenciado por Floss, (2012) ao estudar outras areias cimentadas de distintas gêneses.

Os estudos citados anteriormente incluem uma série de relações, e generalizações sobre o comportamento tensão-deformação - que incluem propriedades como rigidez, durabilidade

etc. - e que podem ser aplicadas para solo cimentados sejam granulares ou finos (Consoli *et al.*, 2017). No entanto no contexto de desenvolvimento de novos ligantes, faz-se necessário validar este tipo de generalizações de parâmetros geomecânicos, sendo necessário aprofundamento no comportamento tensão deformação inerentes as aplicações. Deste modo esta seção discute e apresenta características do comportamento tensão-deformação de novos ligantes baseados em misturas cinza-cal.

No que se refere a uso de ligantes a base de cinza-cal, alguns estudos avaliam seu comportamento e como este pode diferir de solos que estabilizados com cal e cimento, em termos de comportamento tensão-deformação. Por exemplo, nos resultados de Consoli *et al.*, (2001) em ensaios triaxiais *isotropic consolidated and drained* (CID) apresentados na Figura 16 mostram que o comportamento geral do solo foi significativamente influenciado pela adição de subprodutos industriais (cinza volante e cal de carbureto), com 28 dias de cura.

Figura 16. Comportamento tensão-deformação de um solo estabilizado com cinza volante e cal de carbureto

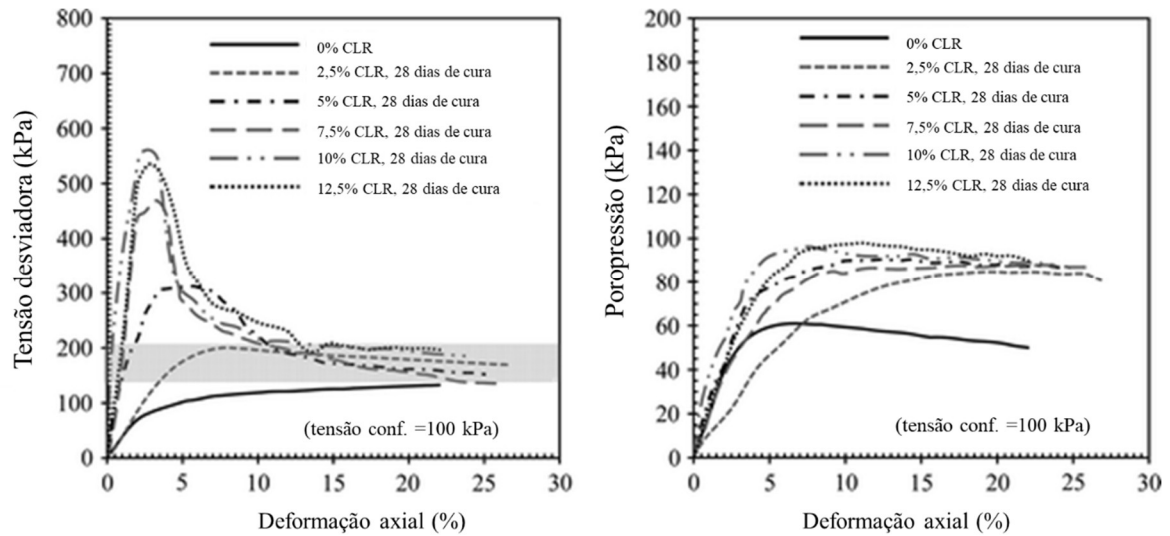


Fonte: (Consoli *et al.*, 2001)

Os resultados apresentados na Figura 16 demonstram que o solo sofre alterações significativas no seu comportamento tensão-deformação dependendo do tipo de estabilizante utilizado, dentre as alterações estão a resistência pico, a rigidez e a fragilidade do material. Ainda, destacam-se os efeitos da adição de cal carbureto ao solo, evidenciados pela comparação entre as curvas do solo natural (0-0) e do solo estabilizado com 4% de cal carbureto (4-0), em que há um aumento na resistência de pico. Comportamento oposto é observado quando há apenas a substituição do solo por cinza volante, que não promove considerável modificação do comportamento do solo. Além disso, observa-se o efeito combinado da cal carbureto e da cinza volante, representado pela curva 4-25 (4% de cal carbureto e 25% de cinza volante). Nesta última é possível observar que a mistura cinza-cal apresenta maior resistência e consequente maior rigidez, além de redução significativa na deformação axial de ruptura (Consoli *et al.*, 2001). Deste modo, misturas do tipo cinza-cal são materiais de alta potencialidade em substituição ao cimento e a cal, considerando o desempenho mecânico e ambiental por utilizarem resíduos industriais.

Outros estudos, como o de Bagheri; Ahmad; Ismail, (2014) incorporaram cinzas residuais como substituição parcial no teor de aditivo, avaliando uso e interação com aglomerantes mais tradicionais. Estes autores avaliaram uma composição de 25% de cimento, 50% de cal e 25% de cinza de casca de arroz (CLR) como agente estabilizador, aplicado a uma areia siltosa. Resultados de ensaios triaxiais do tipo CIU da areia estabilizada com um agente estabilizador CLR com teores de 0 a 12,5%. mostraram um aumento da resistência ao cisalhamento do solo em função do aumento do teor de CLR e consequentemente, da matriz cimentícia, além do comportamento frágil na ruptura (Figura 17).

Figura 17. Comportamento tensão deformação de uma areia estabilizada com cal cimento e cinza de casca de arroz

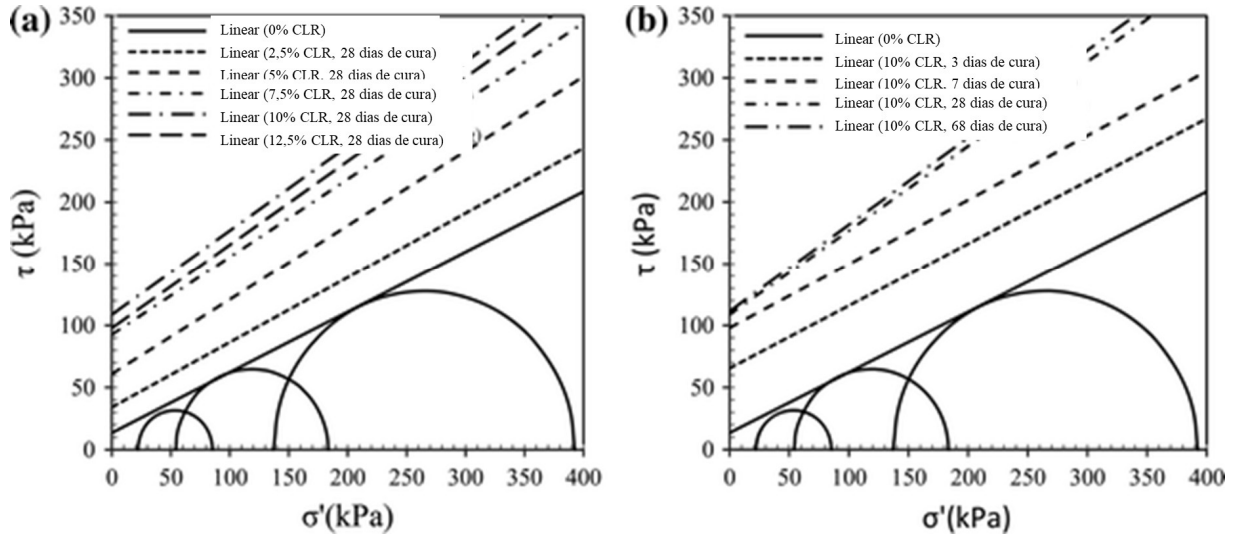


Fonte: Bagheri; Ahmad; Ismail, (2014)

Além disso, há um crescimento da poropressão devido aos fortes efeitos de cimentação causados pelo aumento do conteúdo de CLR, como pode ser observado na Figura 17b. Outra discussão apontada pelos autores se refere ao comportamento frágil que se torna mais proeminente em menores tensões de confinamento, e que há um aumento da resistência pós-pico para amostras estabilizadas em função da tensão de confinamento.

Ainda acerca do estudo de Bagheri; Ahmad; Ismail, (2014), na Figura 18, são apresentadas envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb para diferentes teores de ligante (Figura 18a) e para diferentes tempos de cura (Figura 18b). Os resultados mostram que a coesão aumenta com o aumento do teor de ligante e com o aumento do tempo de cura, no entanto o ângulo de atrito quase estável para os tempos de cura de 3 e 7 dias. Ao seguir a lógica que em solos cimentados a coesão decorre diretamente do nível de matriz cimentícia presente no material, e que estas se desenvolvem ao longo prazo. Com 28 e 68 dias, os autores observaram que há um leve aumento do ângulo de atrito. Os autores associam esse aumento ao aumento do pH, que pode ser interpretado com o contínuo desenvolvimento da matriz cimentante ao longo do tempo de cura, já que o pH continua a se manter básico.

Figura 18. Variação da resistência ao cisalhamento em função do aumento do teor de CLR (a) e período cura (b)



Fonte: Bagheri; Ahmad; Ismail, (2014)

Outro importante estudo que corrobora com a literatura anteriormente apresentada é o de Rafiei; Maleki, (2024) que avaliou o comportamento geomecânico de uma argila siltosa de baixa plasticidade (CL-ML) estabilizada com cal (3, 5 e 7%), cinza volante (5, 10 e 15%), separadamente e em misturas. Os resultados, assim como Consoli *et al.* (2001) mostram uma maior resistência de pico para as amostras que combinam a cal com a cinza, do que para as amostras estabilizadas com os agentes individualmente. De acordo com os autores, todas as amostras estabilizadas apresentaram um comportamento *strain softening*; no entanto, a intensidade da deformação diminui ao aumentar a tensão de confinamento. Em comparação com o solo natural, as amostras estabilizadas apresentaram um comportamento frágil devido a cimentação, com uma redução da deformação axial relacionada ao pico. Sendo a amostra com melhor desempenho a de mistura de 5% de cal e 15% de cinza volante.

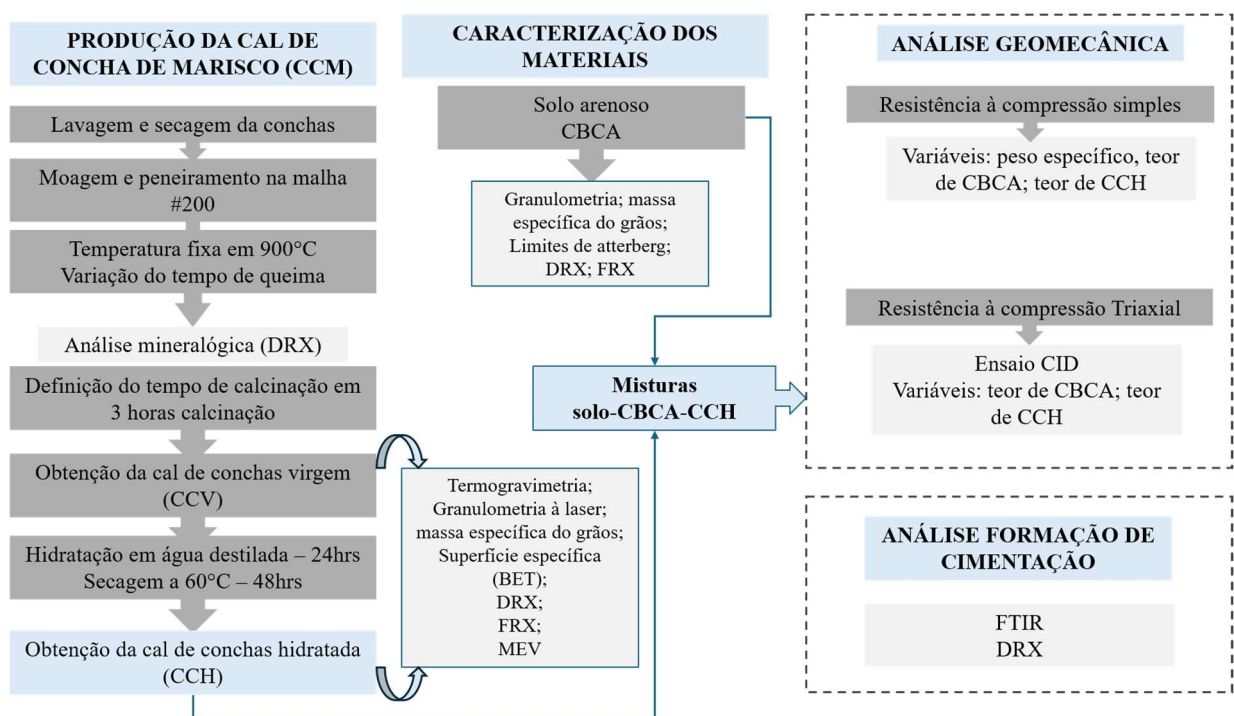
Estes autores também avaliaram a degradação do módulo de rigidez da mistura ótima, por meio de ensaios cíclicos, com amplitude da carga cíclica igual à metade da resistência de pico. Os resultados mostraram que após 100 ciclos de carga ocorre a quebra de apenas alguns pontos de cimentação considerados fracos, e não sendo suficiente para quebrar as ligações mais fortes criadas pelas reações pozolânicas do ligante alcalino. Além disso a taxa de degradação permanece quase constante (Rafiei; Maleki, 2024).

Deste modo, a estabilização de solos com misturas cinza e cal se mostra eficiente em termos de prover maior resistência e rigidez da matriz cimentante.

3. METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados os materiais utilizados nesta pesquisa com sua respectiva caracterização, as normativas utilizadas, além dos métodos e procedimentos adotados a fim de viabilizar os objetivos deste estudo. Na Figura 19 é apresentado o fluxograma que separa as fases do estudo, iniciadas na produção e caracterização da cal de concha de marisco, seguidas da caracterização dos materiais, e após a definição das misturas dos materiais foram executadas as fases de análise geomecânica e de formação de cimentação.

Figura 19. Fluxograma da metodologia



3.1. Materiais

3.1.1. Conchas de marisco

As conchas de *Anomalocardia brasiliiana*, ou popularmente conhecida como Vôngole, berbigão ou chumbinho, conforme Figura 20, foram fornecidas por catadores de marisco que desenvolvem sua atividade na Localidade de Costinha, na cidade de Lucena-PB, margem ao Rio Paraíba (Figura 21).

Após a coleta das conchas, estas foram imersas por 24 horas em solução de cloro para desinfecção (Figura 20). Em seguida, as conchas foram secas ao ar por igual período, para, a partir de então, estarem aptas ao processamento.

Figura 20. Amostras de conchas intactas (a) e após a limpeza e desinfecção (b).

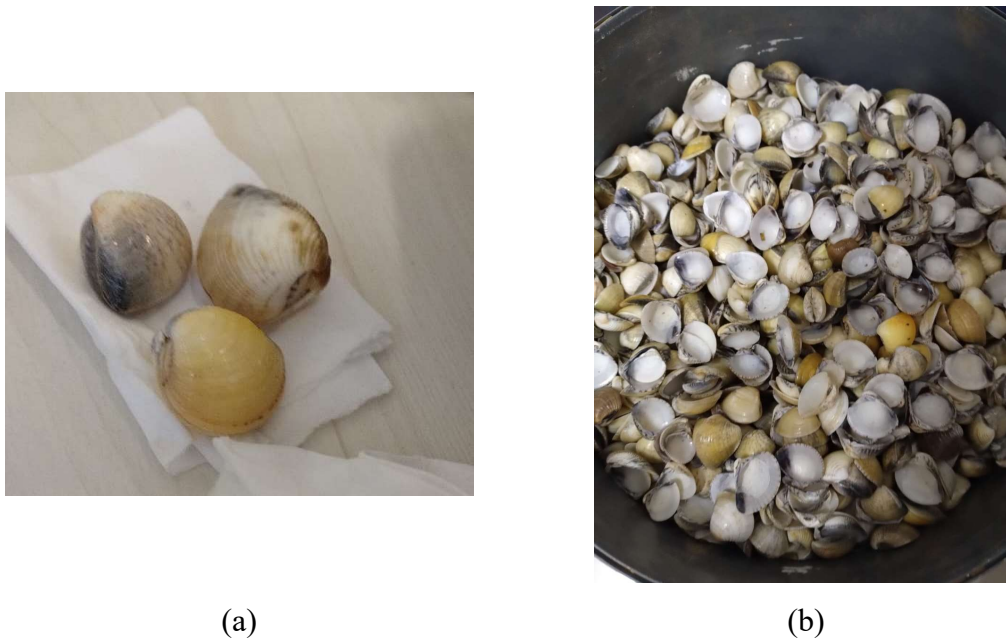


Figura 21. Ponto de coleta de resíduos de mariscagem (conchas)

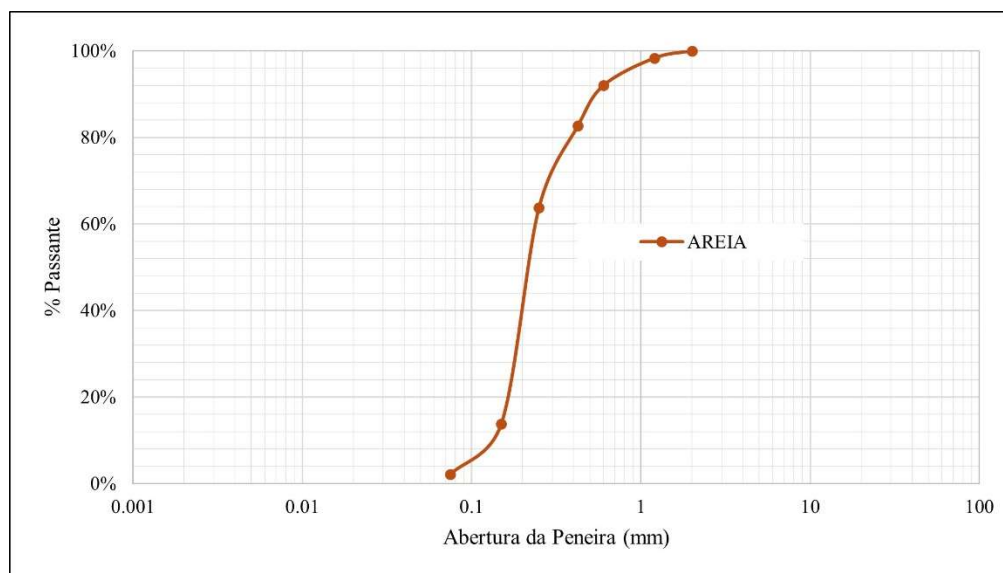


3.1.2. Solo

O solo avaliado é uma areia lavada de rio. A escolha por este material se deve a solos granulares e uniformes tipicamente apresentarem baixa capacidade de suporte. Esta escolha também está associada ao estudo do desenvolvimento de um novo agente cimentante, pois como apontado por Rezaeian; Ferreira; Ekinci, (2019) solos com granulometria uniforme evidenciam o efeito das ligações de cimentação, o que tende a facilitar a avaliação do novo agente cimentante isoladamente.

Na Figura 22 é apresentada a curva granulométrica do solo, obtida conforme a NBR 7181 (ABNT, 2025). O coeficiente de uniformidade (C_u) obtido foi igual a 1,8, sendo assim classificado como um solo uniforme ou mal graduado, e coeficiente de curvatura (C_c) igual a 1,21. Logo, por não apresentar plasticidade o solo foi classificado pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) de acordo com a D2487 (ASTM, 2017) como sendo SP, ou seja, uma areia mal-graduada. Ainda, de acordo com o método da NBR 6508 (ABNT, 2025) o solo apresentou massa específica dos grãos (ρ_s) igual a 2,74g/cm³.

Figura 22. Curva granulométrica do solo arenoso



A Tabela 2 apresenta os resultados de espectroscopia de fluorescência de raios-X (FRX) referente ao solo, obtida conforme a NBR 16137 (ABNT, 2016). O método utiliza amostras previamente secas, pulverizadas e analisadas conforme o procedimento operacional do equipamento (EDX 720 da Shimadzu), sendo a quantificação dos óxidos realizada pelo software do fabricante, com os resultados expressos em porcentagem em massa dos principais

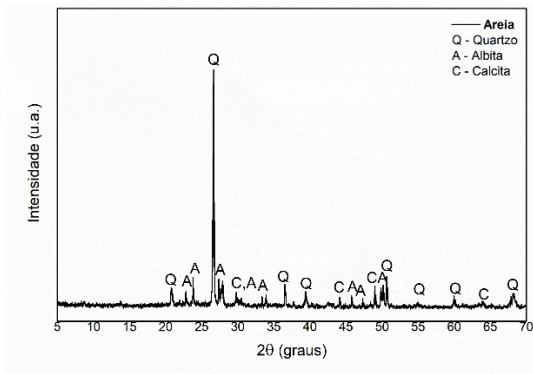
óxidos constituintes. Os resultados mostraram que o solo é composto principalmente por óxidos de silício e alumínio, característicos de solos granulares.

Tabela 2. Resultados de espectroscopia por fluorescência de raios-X para a amostra de solo

Composto	Fração (%)
SiO ₂	73,35
Al ₂ O ₃	11,60
CaO	3,87
Fe ₂ O ₃	3,24
K ₂ O	2,92
Na ₂ O	1,65
MgO	1,14
TiO ₂	1,07
Outros	1,04
Perda ao fogo	0,13

Para a análise mineralógica do solo e dos demais materiais foi utilizada a técnica de difração de raios X (DRX). O equipamento utilizado foi um difratômetro Bruker D2 Phaser, operando com tensão de 40 kV e corrente de 30 mA, utilizando radiação Cu K α ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$), com varredura no intervalo de $5^\circ \leq 2\theta \leq 70^\circ$ e passo angular de $0,02^\circ$. As amostras foram analisadas na forma de pó. A Figura 23 apresenta o difratograma do solo utilizado neste estudo. É possível observar que este é composto principalmente por quartzo, albita (feldspato) e calcita, o que é compatível com os resultados observados de FRX observados anteriormente, além de sua característica textural e granulométrica de uma areia quartzosa.

Figura 23. Difratograma do solo estudado



3.1.3. Cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar (CBCA)

A cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar (CBCA) foi coletada em área de depósito em uma usina sucroalcooleira localizada no município de Santa Rita, Estado da Paraíba, conforme a Figura 24. A CBCA é um material considerado resíduo pela indústria local, resultante do processo de exploração energética por combustão direta do bagaço de cana-de-açúcar nas caldeiras da fábrica. Esse resíduo não apresenta ainda uma destinação que valorize tecnicamente sua potencialidade, sendo comumente descartado nas áreas dos canaviais.

A queima do bagaço da cana-de-açúcar dentro da fornalha industrial acontece em temperaturas da ordem de 700 a 800°C, após a queima, as cinzas residuais se acumulam no fundo da fornalha. Sales & Lima, (2010) e Andreão *et al.*, (2019) reportam similar procedimento em outras indústrias do setor da região Sudeste do Brasil, em que as cinzas são removidas por um método de via úmida (fluxo de água na base da fornalha). Logo, foi estabelecido para o escopo desta tese o termo cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar (CBCA) devido ao ponto de coleta e às condições em que esse material foi obtido.

Figura 24. Área de depósito de cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar



A CBCA foi coletada em sacos plásticos e transportada para o Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) e seca em estufa em temperatura de 105°C. O beneficiamento aplicado foi o peneiramento em peneira #100 (0,150 mm). A Figura 25 apresenta a CBCA bruta,

conforme coletada (Figura 25a) e após peneiramento (Figura 25b). Em que se obteve rendimento (percentual com tamanho de partícula inferior a 0,15 mm) da ordem de 25 %.

Figura 25. Cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar bruta (a) e após peneiramento



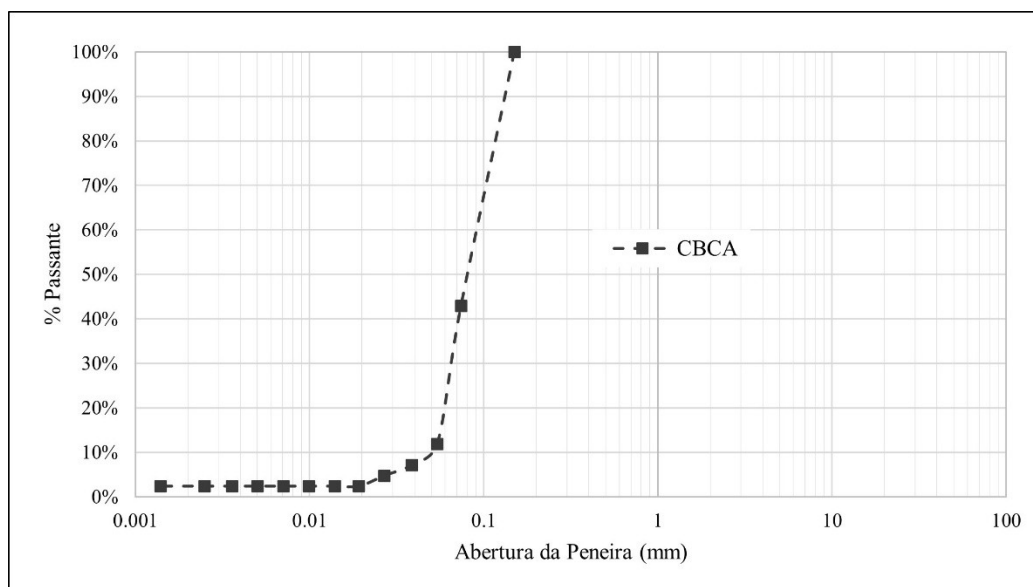
(a)



(b)

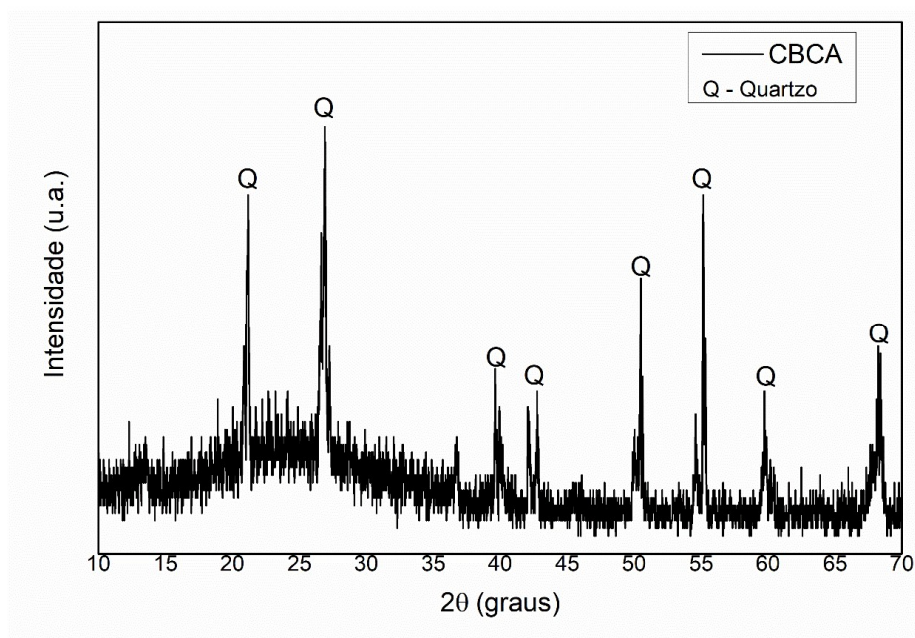
A CBCA, de acordo com a NBR 6508 (ABNT, 2025) apresentou massa específica dos grãos igual a 2,51 g/cm³, valor praticamente igual para a CBCA caracterizada por Silvani; Da Silva; Guedes, (2024). A curva granulométrica da cinza é apresentada na Figura 26. A classificação geotécnica deu-se como um silte de baixa plasticidade (ML) de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), normativa ASTM D2487 (ASTM, 2017).

Figura 26. Curva granulométrica da CBCA



A Figura 27 apresenta os resultados de análises de difração de raios X realizadas, que mostram que a CBCA é predominantemente composta por quartzo e material em condição amorfa, com presença de um halo amorfo entre 15 e 30 graus. Estes resultados são esperados devido às características do processo de lavagem pelo qual a CBCA passa após a queima, resultados similares foram observados na literatura para cinzas de fundo de bagaço de cana-de-açúcar (Andreão et al., 2019; Bahurudeen; Santhanam, 2015). Atribui-se também à lavagem a remoção de eventuais outros minerais, restando apenas o quartzo dos grãos de solo.

Figura 27. Difratoograma da CBCA



A composição da CBCA obtida por meio do ensaio de FRX, pelo método da NBR 16137 (ABNT, 2016), é apresentada na Tabela 3. O procedimento de análise foi o mesmo adotado na caracterização do solo descrito na seção anterior. Os resultados mostram que a CBCA é composta principalmente por óxidos de sílica, potássio e alumínio. Somando as frações de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , chega-se a teores de 71,35% da composição, o que implicaria em uma cinza de Classe F de acordo com a ASTM C618 (ASTM, 2019). Entretanto, destaca-se que parte da fração de SiO_2 decorre da fração de quartzo presente na CBCA.

Tabela 3. FRX da CBCA

Composto	Fração (%)
SiO ₂	52,45
K ₂ O	12,69
Al ₂ O ₃	9,38
CaO	5,64
Fe ₂ O ₃	3,49
P ₂ O ₅	3,41
MgO	1,97
TiO ₂	1,38
ZrO ₂	0,55
SO ₃	0,27
Outros	0,32
Perda ao fogo	8,40

3.2. Programa experimental

3.2.1. Etapa 1: Produção e caracterização da cal de concha de marisco

Para a obtenção da cal de concha de marisco utilizaram-se as conchas descritas no item 3.1.1. como material base. A partir deste material, os procedimentos de i a v foram adotados, visando obter a cal-hidratada, a ser usada nas demais etapas desta tese:

- i. O processamento das conchas de mariscos iniciou-se com a secagem a 100 °C em estufa por um período de 24 horas para remoção da umidade residual;
- ii. Após secagem, foi realizada a moagem em moinho de rolo por 2 horas, procedendo-se, assim, à separação da fração passante na peneira de abertura de 0,075 mm e retornando o material retido para moagem, otimizando o uso do material, conforme esquema apresentado na Figura 28;

Figura 28. Procedimento de moagem das conchas de marisco utilizando moinho de rolo



- iii. Com o material passante, procedeu-se à calcinação do material na temperatura de 900°C, com base em resultados da literatura que indicam que nesta temperatura todo o carbonato de cálcio é transformado em óxido de cálcio (Alvarado; Alvarado-Quintana, 2022; Kul *et al.*, 2023; Suwannasingha *et al.*, 2022). Visando à otimização da energia gasta, estudou-se o tempo de queima de 1, 2 e 3 horas, sendo resultante desse processo um material com aspecto cinza independente do tempo de queima, como representado na Figura 29.

Figura 29. Amostra de pó de conchas calcinado a 900°C



- iv. Em seguida, foram realizados ensaios de difração de raios X (DRX), utilizando equipamento e metodologia descritos no item 3.2.1, de cunho qualitativo, que

serviram de suporte para determinar o tempo mínimo de queima para a transformação do carbonato de cálcio em óxido de cálcio (cal virgem);

- v. Determinado o tempo de queima para a transformação em cal de conchas na forma virgem (CCV) com predominância de óxido de cálcio, foi realizado o procedimento de transformação em cal de conchas na forma hidratada (CCH), uma forma mais estável e que se aproxima da cal hidratada comercialmente utilizada. Para isto, seguiu-se o procedimento similar ao utilizado por Acosta, (2021) e Ferreira, (2022) referente a produção da Cal de casca de ovo: a)hidratação da cal em água destilada por 24h; b) secagem da cal hidratada em estufa por 48h à 60°C; c) Destorroamento da cal hidratada com pistilo e almofariz.

Assim obtidas as cales nas formas virgem e hidratada, procedeu-se à caracterização física, química e mineralógica, seguindo ensaios conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Resumo do programa de caracterização das cales de concha de marisco

Avaliação	Norma/Técnica	CCV	CCH
Massa específica dos grãos	NBR 16605 (ABNT, 2017)		x
Termogravimetria (25-1000°C)	TG/DTA	x	x
Composição mineralógica	Difração de Raios-X(DRX)	x	x
Composição química	Fluorescência de raios X (FRX)	x	x
Granulometria	Difração por raios laser		x
Superfície específica	BET		x
Morfologia	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	x	x

Os ensaios termogravimétricos avaliaram o comportamento das amostras de CCV e CCH na faixa de temperatura de 25 a 1000°C. O ensaio de termogravimetria foi realizado em atmosfera inerte utilizando nitrogênio (N₂), com taxa de aquecimento de 10°/min, com amostras depositadas em cadinho de alumina. Já o ensaio de morfologia por microscopia eletrônica de varredura foi realizado nas amostras sem metalização e sem aplicação de alto vácuo, na forma de pó disperso sobre fita de carbono, com níveis de magnificação de 2500x e 5000x.

3.2.2. Etapa 2: Avaliação da resistência à compressão simples das misturas solo/CBCA/CCH

3.2.3. Planejamento Experimental

O planejamento experimental adotado para a moldagem das amostras e posterior avaliação da resistência à compressão simples (q_u) considerou como variáveis independentes o teor de cal de concha hidratada (CCH), o teor de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) e o peso específico seco. Inicialmente, foi empregado um Delineamento Composto Central (DCC), contemplando os pontos fatoriais (-1 e $+1$) e os pontos centrais (0), conforme apresentado na Tabela 5. A análise preliminar dos resultados indicou evidências de falta de ajuste do modelo inicialmente proposto, uma vez que o teste de falta de ajuste apresentou p-valor igual a $0,048$, valor inferior ao nível de significância de 5% . Esse resultado sugere que a resposta experimental não poderia ser adequadamente descrita apenas pelos termos lineares e de interação considerados no delineamento inicial, indicando a possível existência de efeitos de curvatura na superfície de resposta.

Diante disso, procedeu-se à ampliação do planejamento experimental por meio da inclusão de pontos axiais ($-\alpha$ e $+\alpha$), configurando um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). Essa estratégia permitiu o ajuste de segunda ordem, possibilitando a estimativa dos efeitos quadráticos em função das variáveis investigadas.

O planejamento experimental apresentado na Tabela 5 foi elaborado com base nos procedimentos descritos por Rodrigues; Iemma, (2014) e Montgomery, (2017) para delineamentos compostos centrais rotacionais. Esse tipo de planejamento é constituído por um arranjo fatorial completo (2^k), em que k representa o número de variáveis independentes, acrescido de pontos centrais e pontos axiais. A posição dos pontos axiais é definida pelo parâmetro (α), calculado por meio da expressão $\alpha = (2^k)^{1/4}$. Considerando que o presente estudo envolve três variáveis independentes ($k=3$), obteve-se $\alpha = 1,68$, valor utilizado para a definição dos níveis axiais do planejamento experimental.

Tabela 5. Variáveis controláveis

Variável	$-\alpha$	-1	0	$+1$	$+\alpha$
Teor de CBCA (%)	18,2	25	35	45	51,8
Teor de CCH (%)	1,6	3	5	7	8,4
Peso específico seco (kN/m ³)	15,3	16	17	18	18,7

A Tabela 6 apresenta o planejamento e o número de amostras moldadas e ensaiadas para o ensaio de resistência à compressão simples. Para os pontos fatoriais, foram aplicadas repetições em tréplicas e, para o ponto central, 5 repetições, o que viabiliza uma melhor compreensão do erro puro associado ao modelo resultante.

Tabela 6. Planejamento das amostras para resistência à compressão simples

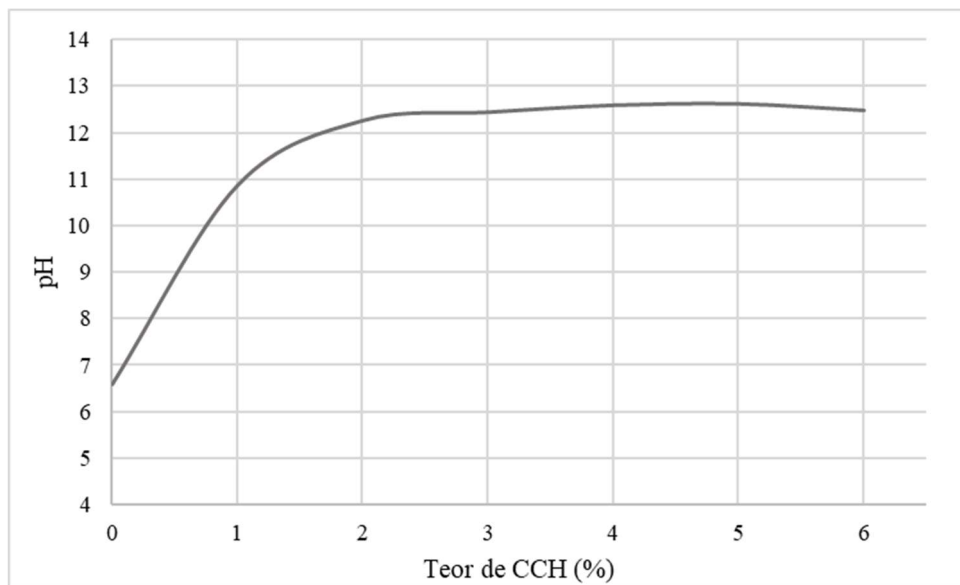
Amostra	Teor de CBCA (%)	Teor de CCH (%)	Peso específico seco	Número de repetições
			(kN/m ³)	
1	25	3	16	3
2	25	3	18	3
3	25	7	16	3
4	25	7	18	3
5	45	3	16	3
6	45	3	18	3
7	45	7	16	3
8	45	7	18	3
9	18,2	5	17	3
10	1,3	5	17	3
11	35	1,6	17	3
12	35	8,4	17	3
13	35	5	15,3	3
14	35	5	18,7	3
15	35	5	17	5
Total de amostras				47

Os teores de substituição de cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar (CBCA) foram nos níveis 18,2, 25, 35, 45, 51,8 %. Estes valores foram baseados em testes iniciais, uma vez que amostras com teores da ordem de 10% não mantiveram estrutura após imersão em água após 28 dias de cura. Além disso, estes valores são típicos quando se trata de cinza de fundo de biomassa, segundo Cabrera *et al.*, (2018), e similares aos avaliados por Consoli *et al.*, (2008) em seu estudo com solo-cinza de fundo de carvão na proporção 50/50 estabilizado com cal de carbureto.

Os teores de cal foram fixados com base no ensaio de consumo inicial de cal (ICL) (Figura 30) realizado para o teor de 35% de CBCA, conforme a ASTM D6276 (ASTM, 2019). Este ensaio consiste em adicionar cal ao solo até obter-se um pH constante. O teor de cal no qual o pH estabiliza é entendido como o teor mínimo de cal para se estabilizar o solo (Rogers;

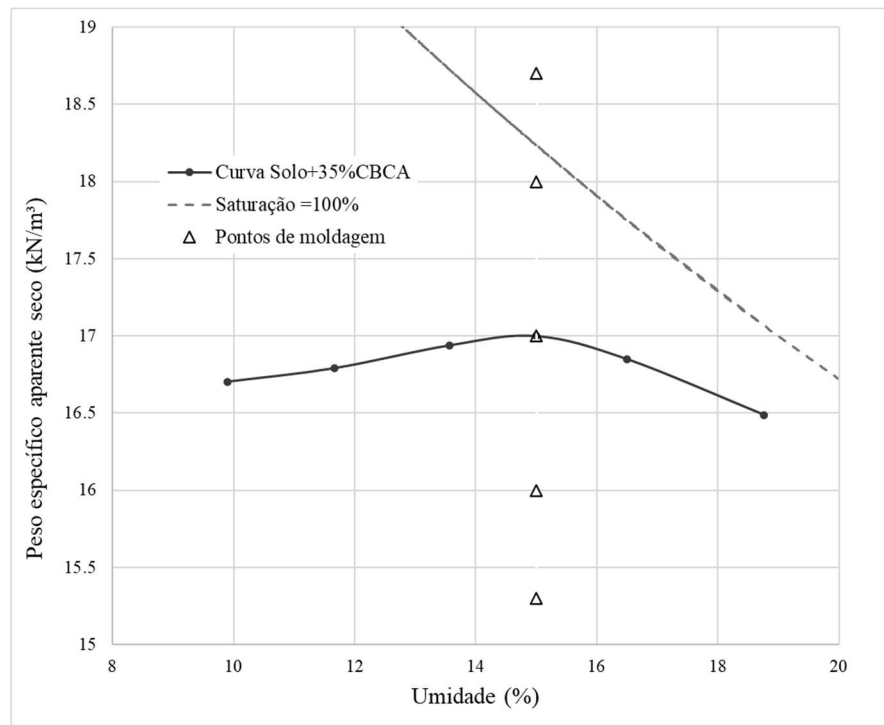
Glendinning; Roff, 1997), para tanto, definiu-se como sendo 3% o teor mínimo adotado, e o ponto central com 5%. Por fim, após as considerações do planejamento estatístico citado anteriormente, a cal hidratada de conchas de marisco (CCH) foi aplicada como adição nos teores de 1,6, 3, 5, 7 e 8,4%. A CCH utilizada foi obtida conforme os procedimentos estabelecidos na Etapa 1 (item 3.2.1) e armazenada em sacos plásticos de fechamento hermético.

Figura 30. Curva de consumo inicial de cal para mistura solo+35% de CBCA



Os pesos específicos aparentes secos (γ_d) foram escolhidos com base na curva de compactação na energia Proctor normal (ASTM, 2021) da mistura com 65% de solo e 35% CBCA, conforme apresentado na Figura 31. Essa mistura foi adotada como delimitadora por se tratar de ponto médio dos teores de CBCA aplicados, o que viabiliza a moldagem das misturas. O resultado obtido para o peso específico seco máximo ($\gamma_{d\text{máx}}$) foi de 17kN/m³, foi usado como ponto central desta variável no planejamento fatorial e a umidade ótima de 15% foi fixada para as demais moldagens. A variação do γ_d , nos níveis já apresentados na Tabela 5, viabiliza aplicar o método de dosagem porosidade/teor volumétrico de ligante proposto por Consoli *et al.*, (2007).

Figura 31. Curva de compactação solo+35%CBCA e pontos de moldagem



A Tabela 7 apresenta as variáveis fixadas neste estudo. O solo estudado foi uma areia uniforme, conforme apresentado no item 3.1.2, pois este tipo de solo exige elevadas quantidades de cimento para sua estabilização (Consoli; Gravina Da Rocha; Silvani, 2014; Silvani *et al.*, 2022). O tempo de cura mínimo foi definido com base no tempo necessário para a ocorrência das reações pozolânicas (Silvani *et al.*, 2023). A umidade de compactação foi definida como sendo 15% baseada na curva de compactação para o ensaio de Proctor Normal (Figura 31).

Tabela 7. Variáveis fixadas

Variáveis	Unidade	Níveis
Tipo de solo	-	Areia uniforme
Tempo de cura	dias	28
Umidade	%	Definida a partir da curva Proctor normal

A Tabela 8 apresenta as variáveis de ruído e medidas mitigadoras empregadas. As variáveis de ruído não são controláveis. Visando minimizar os efeitos destas foram aplicadas medidas de controle.

Tabela 8. Variáveis de ruído

Variável	Medida de Controle
Equipamento e operador	Utilização de único equipamento com único operador
Homogeneidade dos resíduos	Uso de amostra única, colhida de uma única vez
Homogeneidade do solo	Uso de amostra única, colhida de uma única vez

A variável resposta que será medida nos experimentos, visando avaliar a influência do teor de cal de concha de marisco do peso específico seco, será a resistência à compressão simples do solo estabilizado com cal de concha e marisco e CBCA.

3.2.4. Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram moldados corpos de prova com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Estes foram moldados com a mistura dos materiais secos, adição de água e posterior compactação estática em três camadas com escarificação entre elas. Após o procedimento de moldagem, todas as amostras foram medidas e pesadas para atingir γ_d entre 99 e 101% do valor alvo; diâmetro dentro de $\pm 0,5$ mm; altura dentro de ± 1 mm; e teor de umidade dentro de $\pm 0,5\%$. Após a moldagem os corpos de prova foram envelopados em filme plástico, etiquetados, acondicionados em um saco plástico e guardados em caixa térmica, para garantir a temperatura constante durante a cura.

3.2.5. Ensaio de resistência à compressão simples

Os ensaios de compressão simples foram realizados com corpos de prova (CPs) curados por 28 dias. Antes da ruptura, os CPs foram imersos em água por 24 horas; esta prática visa elevar a saturação dos corpos de prova e minimizar os efeitos da sucção na resistência à compressão simples (Saldanha; Consoli, 2016). O equipamento utilizado na ruptura dos corpos de prova foi a prensa hidráulica Shimadzu, com capacidade de 100kN e com velocidade de carregamento de 1,4 mm por minuto, conforme a norma da ASTM D2166 (ASTM, 2024).

Para os resultados de resistência à compressão simples (q_u) foi aplicada análise de variância (ANOVA) para um nível de significância de 5%, de modo a avaliar os efeitos das variáveis independentes (teor de CBCA, teor de CCH e peso específico seco) na variável resposta (q_u). Além dos testes de normalidade e de homoscedasticidade.

Os resultados também foram analisados com base na metodologia de dosagem de solo-cal proposta por Consoli; Lopes Júnior; Heineck, (2009) definida pelo índice porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv}^b) dado pela razão entre as Equações 7 e 8. A porosidade inicial (η) das amostras foi calculada pela razão entre o volume de vazios e o volume total do corpo de prova (Equação 7). Na Equação 7 é incluída a proporcionalidade dos materiais que compõem o corpo de prova, com relação à massa e consequente volumetria.

$$\eta = 100x \left\{ 1 - \left\{ \frac{\frac{\gamma_d V_s \left\{ \frac{S}{100} \right\}}{1 + \left(\frac{L}{100} \right) \left\{ \frac{L}{100} \right\}}}{\gamma_{sS}} + \frac{\frac{\gamma_d V_s \left\{ \frac{CBCA}{100} \right\}}{1 + \left(\frac{L}{100} \right) \left\{ \frac{L}{100} \right\}}}{\gamma_{sCBCA}} + \frac{\frac{\gamma_d V_s \left\{ \frac{L}{100} \right\}}{1 + \left(\frac{L}{100} \right) \left\{ \frac{L}{100} \right\}}}{\gamma_{sL}} \right\} \right\} \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde:

η : Porosidade

S: Teor gravimétrico de solo

L: Teor gravimétrico de cal

CBCA: Teor gravimétrico de CBCA

γ_d : Peso específico aparente seco da amostra (kN/m^3)

γ_{sS} : Peso específico real do solo (kN/m^3)

γ_{sCBCA} : Peso específico real da CBCA (kN/m^3)

γ_{sL} : Peso específico real da cal (kN/m^3)

E o teor volumétrico de cal da amostra foi calculado a partir da razão entre o volume de cal adicionado e o volume total da amostra expressa na Equação 8.

$$L_{iv} = \frac{V_L}{V_{CP}} = \frac{m_L/\gamma_{sL}}{V_s} \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

L_{iv} : Teor volumétrico de cal

V_L : Volume de cal

V_{CP} : Volume do CP

m_L : Massa de cal

γ_{sL} : Peso específico real da cal

A adaptação da metodologia de Consoli; Lopes Júnior; Heineck, (2009) que unifica o teor de ligante (CBCA+cal) em um único número como teor volumétrico de ligante B_{iv} , proposta por Consoli *et al.*, (2018), também foi aplicada sendo o índice apresentado na Equação 9.

$$B_{iv} = \frac{V_L + V_C}{V_{CP}} = \frac{m_L/\gamma_{sL} + m_{CBCA}/\gamma_{sCBCA}}{V_{CP}} \quad \text{Eq. (9)}$$

Ainda é proposto um novo índice, que segue uma lógica similar à do B_{iv} , mas separa, em termos independentes, os teores volumétricos de cal e de cinza, cada um com expoente próprio. Calcula-se o teor volumétrico de cinza (A_{iv}) conforme a Equação 10 e obtém-se o índice apresentado como sendo este o índice porosidade/teor volumétrico de cinza – cal ajustado ($\eta/(L_{iv}^b A_{iv}^y)$). O objetivo da proposição é melhorar o ajuste da curva de dosagem e aplicar operações estatísticas aos resultados experimentais.

$$A_{iv} = \frac{V_{CBCA}}{V_{CP}} = \frac{m_{CBCA}/\gamma_{sCBCA}}{V_s} \quad \text{Eq. (10)}$$

3.2.6. Etapa 3: Avaliação do comportamento tensão-deformação.

A análise do comportamento tensão–deformação foi realizada, conforme o planejamento estabelecido na Tabela 9, com o objetivo de avaliar os efeitos da variação do teor de CBCA e de CCH. Os ensaios foram realizados para amostras sem adição de cal (0% de CCH), bem como para misturas com teor médio de CCH definido no planejamento experimental (5%), variando-se o teor de CBCA nos níveis de 25%, 35% e 45%. Adicionalmente, avaliou-se a influência do teor de CCH, mantendo-se fixo o teor médio de CBCA (35%) e variando-se o teor de CCH em 3%, 5% e 7%.

Tabela 9. Planejamento dos ensaios triaxiais

Teor de CCH (%)	Teor de CBCA (%)	Número de tensões confinantes avaliadas
0	25	3
0	35	3
0	45	3
5	25	3
5	35	3
5	45	3
3	35	3
7	35	3
Total de ensaios		25

Os ensaios foram realizados com consolidação isotrópica e cisalhamento drenado (CID), conforme os procedimentos estabelecidos pela D7181 (ASTM, 2020). Os corpos de prova foram moldados estaticamente em dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, seguindo os mesmos critérios de moldagem descritos no item 3.2.2.2.

O equipamento utilizado neste ensaio foi o triaxial IPC Global modelo 002-2049 conforme apresentado na Figura 32. Este equipamento pode realizar ensaios triaxiais monotônicos, cíclicos e de carga repetida em amostras cilíndricas de solo com relação de aspecto de 2. O funcionamento do equipamento utiliza pressões de ar e água, em que o atuador axial funciona com pressão de ar, enquanto os dispositivos de variação de volume e pressão da célula possuem interfaces ar-água para transmissão e aplicação de pressão. Ainda as medidas de deformação são realizadas pelo atuador externo, e com medida de variação volumétrica, mas sem instrumentação interna de deformação.

Figura 32. Equipamento triaxial



Todos os ensaios compreenderam quatro etapas principais: percolação, saturação, consolidação e cisalhamento. Na fase de saturação, os corpos de prova foram considerados saturados quando atingiram o parâmetro B igual ou superior a 0,95. Em seguida foi aplicada a tensão de consolidação isotrópica, sendo adotadas para cada conjunto de amostras as tensões de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa. Na fase de cisalhamento drenado, com aquisição de dados a cada minuto, foi aplicada uma taxa de deslocamento de 0,0173 mm/min. Essa velocidade de carregamento foi adotada em outros estudos com materiais granulares cimentados (Consoli et al., 2017), de modo que as poropressões fossem dissipadas. No tratamento dos resultados foram aplicadas as correções de área propostas por La Rochelle *et al.*, (1988) que considera as distintas formas de ruptura da amostra.

As amostras de cada ensaio foram identificadas de acordo com a tensão confinante, teor de cinza, e teor de cal usado. Por exemplo, a amostra consolidada a tensão de confinamento de 50 kPa, que possuía o teor de CBCA em substituição de 35% de CBCA e 5% de CCH, adotou-se o código 50kPa-35CBCA-5CCH.

Algumas considerações foram aplicadas na análise dos resultados dos ensaios triaxiais. Foram consideradas análises no plano p' versus q , no qual os parâmetros de resistência foram obtidos nesse espaço. Schofield e Wroth, (1986) define esses invariantes como descritos na Equação 11 e 12:

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad (11)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} x \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (12)$$

Onde p' é a tensão efetiva média e q é a tensão desviadora e σ_1 , σ_2 , e σ_3 são as tensões principais efetiva maior, intermediária e menor, respectivamente.

Deste modo, dada a condição de ensaio em que $\sigma_2 = \sigma_3$, as Equação 12, pode ser definida na forma da Equação 13:

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 = \sigma'_d \quad (13)$$

Ainda, as deformações volumétricas e distorcionais seguiram a seguinte lógica: a deformação volumétrica (ε_v) é diretamente obtida a partir da variação de volume medida no ensaio, conforme descrito na Equação 14, onde ΔV é a variação de volume e V_0 é o volume inicial da amostra.

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (14)$$

Como os resultados são de ensaio triaxial axisimétrico, sem medida de deformação interna radial:

- ε_1 = deformação axial (medida diretamente);
- $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ = deformações radiais (iguais entre si).

A deformação volumétrica pela Equação 15:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad (15)$$

Logo, a deformação radial foi estimada de acordo com a Equação 16:

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_v - \varepsilon_1}{2} \quad (16)$$

A deformação distorcional (ε_s), na formulação clássica do estado crítico, é dada pela Equação 17:

$$\varepsilon_s = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \quad (17)$$

Substituindo ε_3 , da Equação 16, na Equação 17, obtém-se a Equação 18, utilizada para cálculo e apresentação dos resultados em termos de deformações distorcionais:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_1 - \frac{\varepsilon_v}{3} \quad (18)$$

Para a análise de rigidez, foi analisada com base no módulo cisalhante normalizado, dado pela razão do módulo cisalhante pela tensão efetiva média, (G/p') . Portanto, algumas considerações foram feitas. Dado que o módulo de elasticidade é dado pela razão $E = q/\varepsilon_a$, e a deformação axial (ε_a) é a razão a variação do deslocamento do atuador e a altura inicial do corpo de prova ($\varepsilon_a = \Delta h/h_0$), logo o coeficiente de Poisson é definido pela Equação 19:

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_a} \right) \quad (19)$$

Ainda que o módulo cisalhante, é dado pela Equação (20):

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (20)$$

Por fim, a dilatação é dada pela razão da deformação volumétrica pela deformação axial ($d\varepsilon_v/d\varepsilon_s$) e os parâmetros de resistência efetivos ângulo de atrito interno (φ) e intercepto coesivo (c'), foram obtidos conforme a Equação 21 e Equação 22, respectivamente. Em que M é a inclinação da envoltória formada pelos pontos de pico da tensão desvio, para as tensões de confinamento avaliadas.

$$\varphi = \arcsen \left(\frac{3M}{6+M} \right) \quad (21)$$

$$c' = \frac{q}{M \cdot \cotg \varphi} \quad (22)$$

3.2.7. Etapa 4: Avaliação química dos produtos formados por FTIR e DRX

Para verificação da formação dos géis de cimentação das amostras, foram realizados ensaios de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e de difração de raios X (DRX) em amostras na forma de pó. A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) é um tipo de espectroscopia de absorção, em que a energia absorvida se encontra na região do infravermelho (4000 cm^{-1} – 400 cm^{-1}), podendo ser utilizada para identificar um composto ou investigar a composição de uma amostra de forma semiquantitativa. Logo, este tipo de análise foi utilizado para identificar a formação de géis de C-S-H e C-A-S-H, por meio da avaliação das posições e comprimento de onda. A mesma lógica foi aplicada nos resultados dos ensaios DRX para identificação da formação destes géis cimentícios, mas agora esta identificação foi feita em função da distância interbasal.

Nas análises de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), os espectros foram obtidos utilizando o equipamento Frontier FT-IR, equipado com detector de LiTaO₃, na faixa de varredura do infravermelho médio (4000 a 400 cm⁻¹). Para a análise por difração de raios X (DRX), utilizou-se o mesmo equipamento e o mesmo método de análise, conforme descrito na seção de caracterização dos materiais.

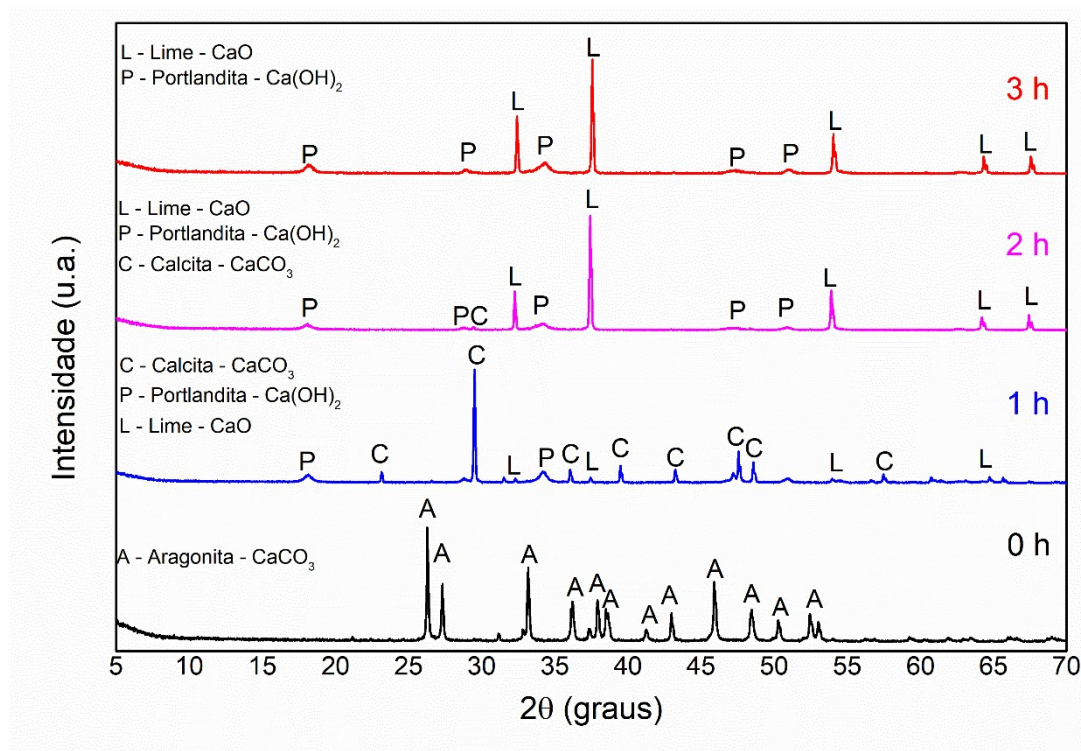
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização e obtenção da cal calcítica de concha de marisco

Os resultados dos ensaios de DRX do pó de conchas de marisco calcinadas por diferentes tempos são apresentados na Figura 33. O pó de conchas sem calcinação (0 h), conforme a Figura 33, apresenta sua composição basicamente carbonato de cálcio (CaCO_3) na forma do mineral aragonita. Este resultado concorda com o fato de que o organismo que gera as conchas avaliadas neste estudo biomineraliza a aragonita e não calcita, como discutido por Alvarado & Alvarado-Quintana, (2022). Em termos práticos, o mineral tem a mesma composição base do calcário calcítico, o que comprova a potencialidade de uso desse material como fonte de carbonato de cálcio biogênica, assim como a casca de ovo.

Ainda pode ser observado na Figura 33 que, para a temperatura de calcinação de 900°C , diferentes durações de queima influenciam na transformação do carbonato de cálcio em óxido de cálcio (CaO). Observa-se uma progressiva transformação ao longo do tempo de queima, durante a qual os picos de aragonita e calcita vão desaparecendo. A Figura 23 permite avaliar que o tempo de queima de 3 horas resulta em uma transformação completa das frações de carbonato de cálcio em formas de hidróxido e óxido de cálcio. Esse tempo de queima de 3 horas é superior ao considerado adequado por Ferraz *et al.*, (2019), de 2 horas, ao calcinar diferentes tipos de conchas, e inferior ao período de 4 horas utilizado por Saldanha et al., (2021) para calcinar cascas de ovos, no entanto, nenhum dos autores fez uma análise do efeito do tempo de queima na transformação mineral. Por fim, o material obtido desse processo foi denominado Cal de Conchas Virgem (CCV).

Figura 33. DRX do pó de conchas com tempos de 0, 1, 2 e 3 horas de queima a 900°C.



Após o procedimento de calcinação procedeu-se com a hidratação da CCV para obter a cal de conchas hidratada (CCH) conforme descrito no item 3.2.1. As amostras de CCV e CCH foram submetidas a ensaios de caracterização comumente utilizados para aglomerantes.

4.1.1. Caracterização física da CCV e da CCH

A norma ASTM C997 (ASTM, 2018) estabelece critérios granulométricos para cal virgem e cal hidratada para uso na estabilização de solos (Tabela 10), e estes foram verificados com relação aos resultados obtidos para a CCH e a CCV na Figura 34. Com relação à cal hidratada para estabilização de solos, a ASTM C997 (ASTM, 2018) estabelece as porcentagens máximas retidas nas peneiras #30 (0,60 mm) e #200 (0,075 mm) de 3 e 25%, respectivamente. No que se refere à cal virgem, a norma estabelece que todo material deve ser passante em peneira de abertura de 25,4 mm (#1). Os resultados da Tabela 10 e a Figura 34 mostram que tanto a CCV quanto a CCH apresentam fração granulométrica passante totalmente na peneira de abertura de 0,6 mm (#30) e de 0,075 mm (#200). Além desses, foi verificado que ambas as cales atendem aos critérios granulométricos da normativa do DNIT 418-EM (DNIT, 2019) que trata da especificação de cales aplicadas na pavimentação. Dessa forma, ambas as cales atendem aos critérios normativos estabelecidos para serem aplicadas ao melhoramento de solos. Estes resultados mostram que ambas as cales estão dentro das condicionantes granulométricas

estabelecidas pela ASTM C997 (ASTM, 2018). Ainda, os resultados da Tabela 10 apresentam melhores características granulométricas do que obtidos por Consoli *et al.*, (2020) e Saldanha *et al.*, (2021) para a cal de casca de ovo, a qual não atende completamente os critérios da ASTM C997 (ASTM, 2018).

Figura 34. Curvas granulométricas da CCV e CCH

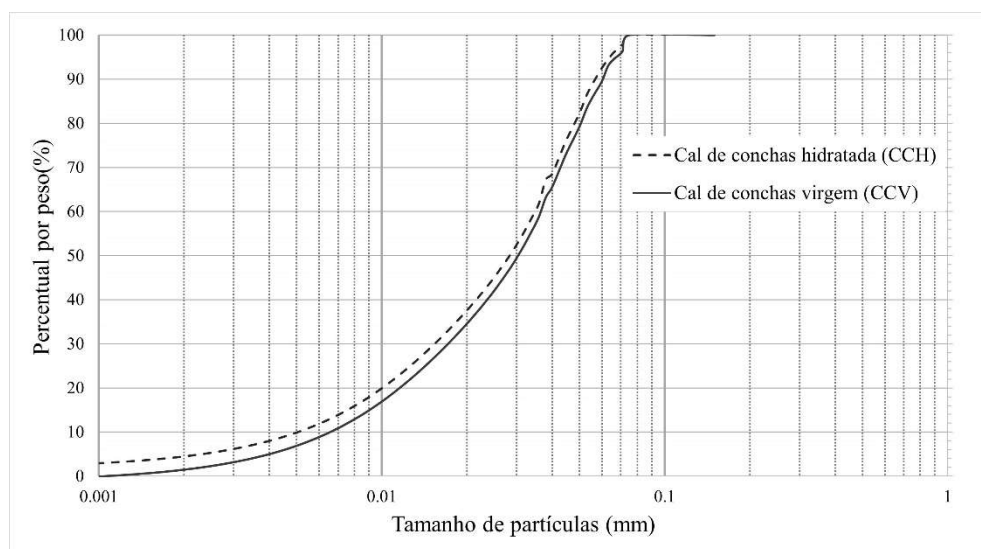


Tabela 10. Resultados e limites granulométricos da cal para estabilização de solos

Cal	Peneiras	Resultados (%)	Limites (ASTM C977) (%)
Cal de conchas hidratada (CCH)	#30 (0,60 mm)	0	≤ 3
	#200 (0,075 mm)	0	≤ 25
Cal de conchas virgem (CCV)	#1 (25,4 mm)	0	≤ 0

A massa específica dos grãos para a CCH obtida pelo método da NBR 16605 (ABNT, 2017) foi de 2,21 g/cm³. Este valor é próximo ao que se espera para cal hidratada com alto teor de óxido de cálcio, segundo Oates, (2008), que é de 2,24 g/cm³. Com relação à massa específica da CCV o resultado obtido foi de 3,00 g/cm³, valor pouco inferior ao referente à cal calcítica virgem comercial que apresenta massa específica dos grãos de 3,2 a 3,4 g/cm³ (Oates, 2008).

4.1.2. Análise térmica

Análises termogravimétricas foram executadas, conforme apresentado na Figura 35, com o objetivo de prover uma análise quantitativa dos principais constituintes na forma de

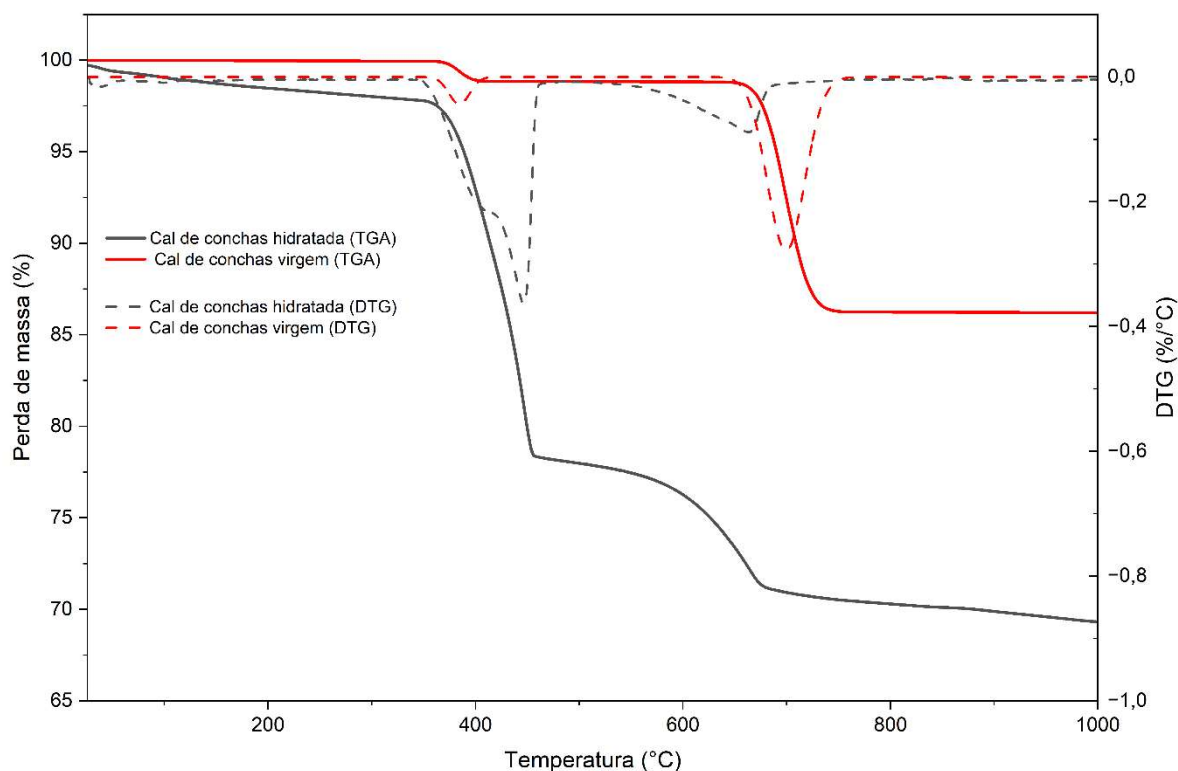
compostos CaO das amostras de CCH e CCV. A curva de termogravimetria derivada (DTG) para CCV, apresentada na Figura 35, mostra dois picos distintos correspondentes à decomposição de Ca(OH)_2 e à degradação de CaCO_3 , e indica uma perda de massa total de 13,24%. O primeiro pico, ocorrendo em torno de 384°C , corresponde a um processo menor de desidroxilação, resultando em uma perda de massa de 1,01%. O segundo pico, mais proeminente ($699,43^\circ\text{C}$), com perda de massa igual a 12,23% está associado à liberação de CO_2 do CaCO_3 . Esse mesmo comportamento térmico foi relatado por Böke *et al.*, (2008) e Ma *et al.*, (2025) ao avaliarem a carbonatação de cal virgem e por Leontakianakos *et al.*, (2015) ao investigarem as características físico-químicas de cales virgens ricas em magnésio e cálcio. Além disso, essa quantidade de dióxido de carbono fica acima da recomendação ($<5\%$) estabelecida na ASTM C977 (ASTM, 2018).

Além disso, a amostra de CCV apresentou, de acordo com cálculos estequiométricos, 4,49% de Ca(OH)_2 e 28,53% de CaCO_3 , e considerando que a fração restante seria puramente CaO, esse percentual seria de 66,98%. O alto teor de CaCO_3 pode ser atribuído à exposição das amostras da CCV ao CO_2 atmosférico durante a preparação e a análise, o que leva à recarbonatação e à formação de CaCO_3 . A recarbonatação explica as discrepâncias observadas entre os resultados da análise termogravimétrica (TGA e DTG) e DRX para CCV, nos quais a calcita (CaCO_3) foi identificada nos resultados de termogravimetria, mas não nos resultados de DRX. O efeito do CO_2 atmosférico na cal virgem e o processo de recarbonatação durante o resfriamento da cal virgem fresca podem ser fatores que indicam a instabilidade no uso e armazenamento deste material.

De forma análoga, a Figura 35 mostra dois picos distintos (termogravimétrico derivado – DTG), para a CCH, que correspondem à desidroxilação do Ca(OH)_2 e à decomposição do CaCO_3 , nas temperaturas de $446,42^\circ\text{C}$ e $664,08^\circ\text{C}$, respectivamente. Estes picos mostram que ocorreram duas reações, implicando na perda de massa em duas fases. Na primeira, foi identificada uma perda de 19,71%, no intervalo de temperatura entre as temperaturas de 350°C e 475°C decorrente da perda de H_2O no processo de decomposição de $[\text{Ca(OH)}_2]$. O segundo pico decorrente da degradação de alguma fase residual do carbonato de cálcio, correspondente a 4,88% de perda de massa. Esta perda se refere a degradação do carbonato de cálcio e a liberação de CO_2 que aconteceu a entre 585 e 700°C . Este teor de CO_2 respeita o preconizado na ASTM C977 (ASTM, 2018), que estabelece que o teor de CO_2 deve ser inferior a 5%. De acordo com os cálculos estequiométricos das reações de desidroxilação e decomposição, e

considerando que toda fração restante é puramente CaO, é possível obter que a CCH é composta por 81,13% de Ca(OH)_2 , 9,0% de CaO e 9,87% de CaCO_3 .

Figura 35. Termogravimetria da cal de conchas nas formas virgem e hidratada



4.1.3. Caracterização química

Em relação à reatividade química, a CCV apresentou uma variação de temperatura de 37 °C durante a hidratação, excedendo o mínimo de 30 °C em 20 minutos, estabelecido pela norma ASTM C977 (ASTM, 2018). Essa resposta exotérmica confirma que a CCV produzida contém CaO livre suficiente para reagir efetivamente com a água durante a estabilização química do solo.

Os resultados da Tabela 11 mostram que a CCV, de acordo com o ensaio de FRX, é majoritariamente composta por óxido de cálcio com teor da ordem de 84,7% e com presença minoritária de óxido de ferro, que pode ter origem decorrente do processamento e moagem em moinho de rolo. Ainda, no que se refere a CCH sua composição majoritária também é de óxido de cálcio, em uma fração menor do que a observada para o CCV, devido à característica inerente a um material hidratado que possui maior perda ao fogo.

A composição química das cales apresentada na Tabela 11 corrobora os resultados encontrados na termogravimetria, no sentido de que há uma menor quantidade de óxido de

cálcio na cal hidratada e a cal virgem é a que possui maior quantidade desse composto. Além disso, algo a se destacar é baixo teor de SO_3 , da ordem de 0,07% para a cal de conchas hidratada, o que segundo (Ferraz *et al.*, 2019) se correlaciona com a reatividade, pois quanto menor a presença desse composto, maior a reatividade do material.

Tabela 11. FRX da cal de concha de marisco e de cal calcítica nas formas hidratada e virgem

Composto	Fração (%)			
	CCH	CCV	Cal hidratada comercial*	Cal virgem comercial*
CaO	70,67	84,61	68,0	89,4
Fe_2O_3	1,18	1,31	-	0,13
SiO_2	0,30	0,20	3,0	0,43
SrO	0,27	0,28	-	0,19
SO_3	0,07	-	0,03	0,23
CuO	0,01	0,01	-	-
MgO	-	-	1,0	1,26
Outros	-	-	2,95	8,36
Perda ao Fogo	27,49	13,4	25,0	0

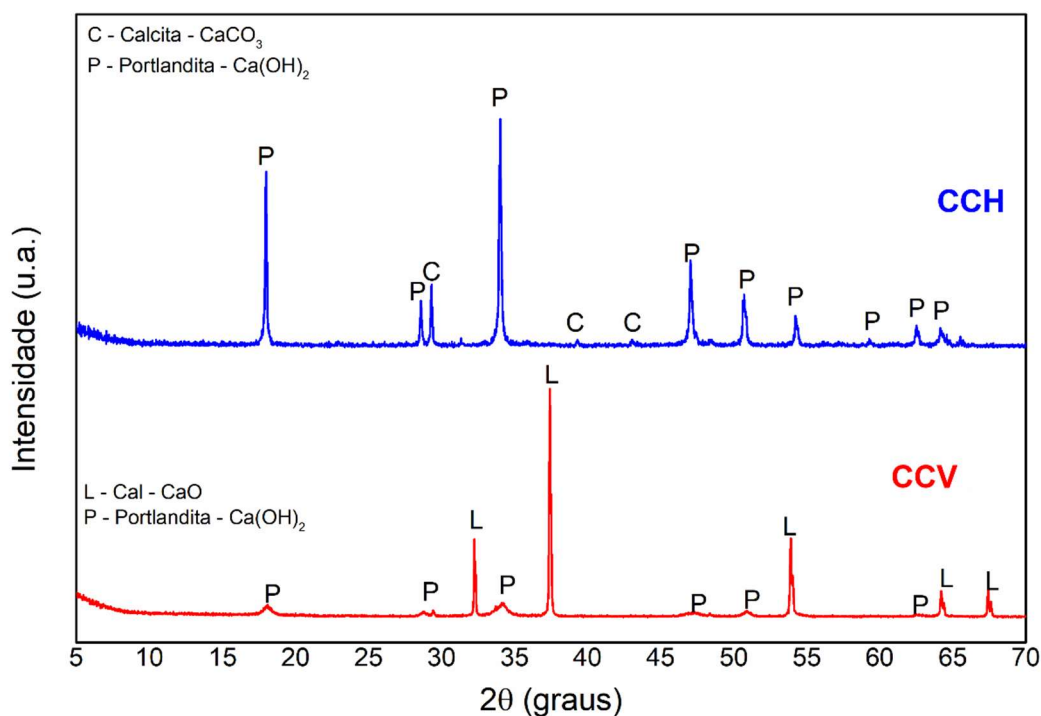
Fonte:*Adaptado de Lima; Chotoli, (2020)

4.1.4. Caracterização mineralógica e morfológica

Na etapa de caracterização mineralógica e morfológica foram realizados os ensaios de difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de determinação da superfície específica pela técnica de *Brunauer-Emmet-Teller – BET*, para as amostras de CCV e CCH.

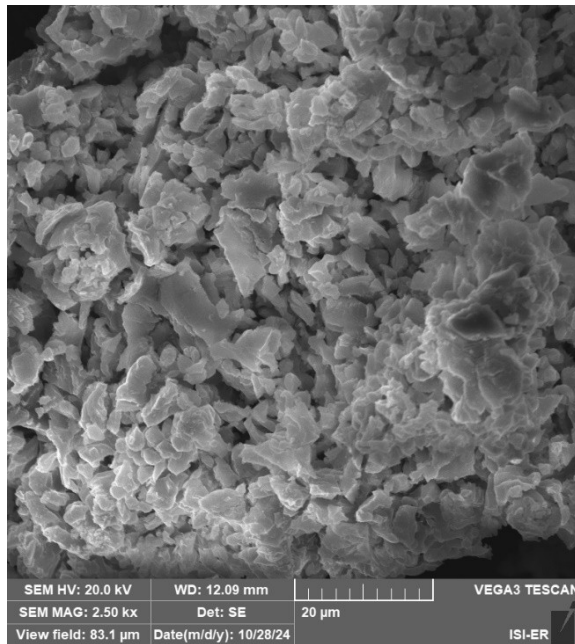
A Figura 36 apresenta os resultados do ensaio de DRX da amostra CCH e da amostra CCV. Os resultados da amostra CCH mostram que ocorreu, como esperado, a formação do portlandita após o processo de hidratação, desta forma validando a metodologia adotada para a hidratação da amostra. Além disso, é possível observar a formação de fases de calcita (CaCO_3), correspondente ao processo de carbonatação, atribuído à absorção de CO_2 . Estes resultados corroboram o observado no item 4.1.2, nos resultados de termogravimetria.

Figura 36. DRX das amostras CCH e CCV

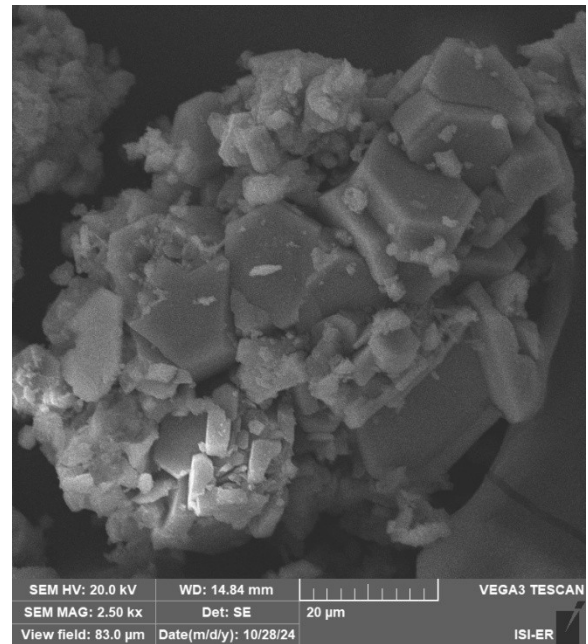


A Figura 37 apresenta os resultados do ensaio de MEV, evidenciando a morfologia do material resultante da transformação do pó de conchas nas distintas formas de cal (virgem e hidratada). É observado nas amostras de CCV, Figura 37a e Figura 37c, há uma estrutura desorganizada com maior superfície específica e com maior número de camadas, semelhante ao observado por Srichanachaichok; Pissuwan, (2023). Este aspecto corresponde à reatividade esperada de uma cal virgem. Para a CCH nas Figura 37b e Figura 37d são identificadas estruturas mais densas e estáveis com a formação de estruturas hexagonais referentes à identificação do mineral portlandita, como destacado na Figura 37d também observada por Saldanha *et al.*, (2021) na obtenção da cal de casca de ovo.

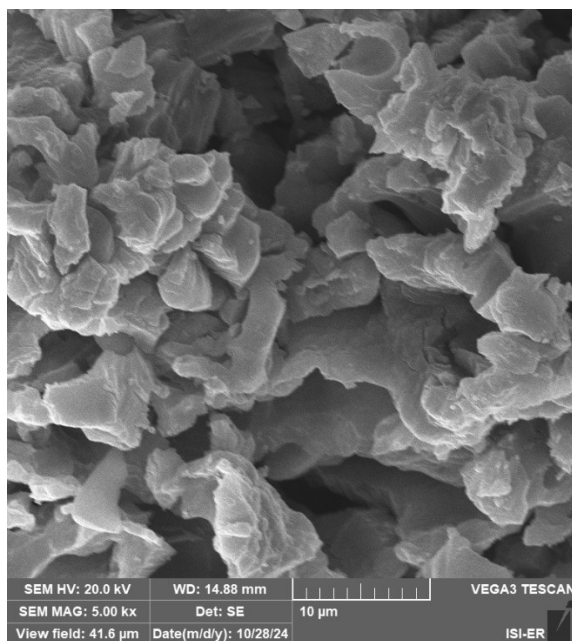
Figura 37. MEV da amostra de CCV e CCH com (a) e (b) 2500 vezes de magnificação e (c) e (d) 5000 vezes de magnificação, respectivamente



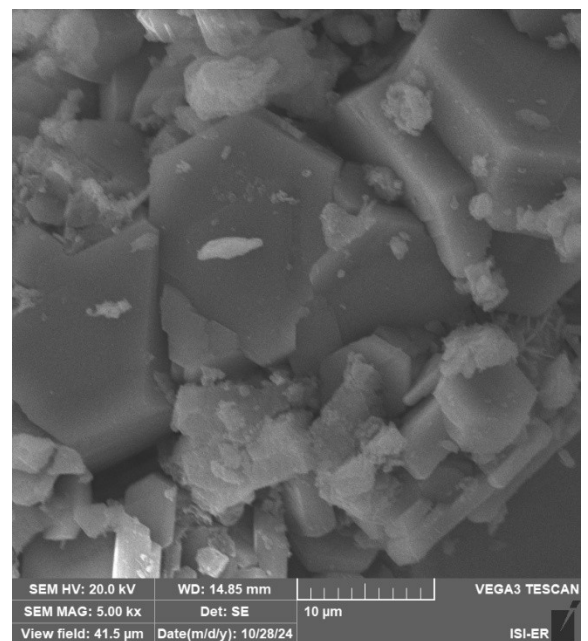
(a)



(b)



(c)



(d)

Os resultados da adsorção de nitrogênio por BET revelaram as áreas de superfície específicas (SSA) de CCV e CCH. Para CCV, a SSA medida foi de $0,8 \text{ m}^2/\text{g}$, o que é consistente com os valores relatados por Ferraz et al. (2019) para cal virgem derivada de conchas marinhas semelhantes. Esse valor é consideravelmente menor do que os observados em estudos anteriores

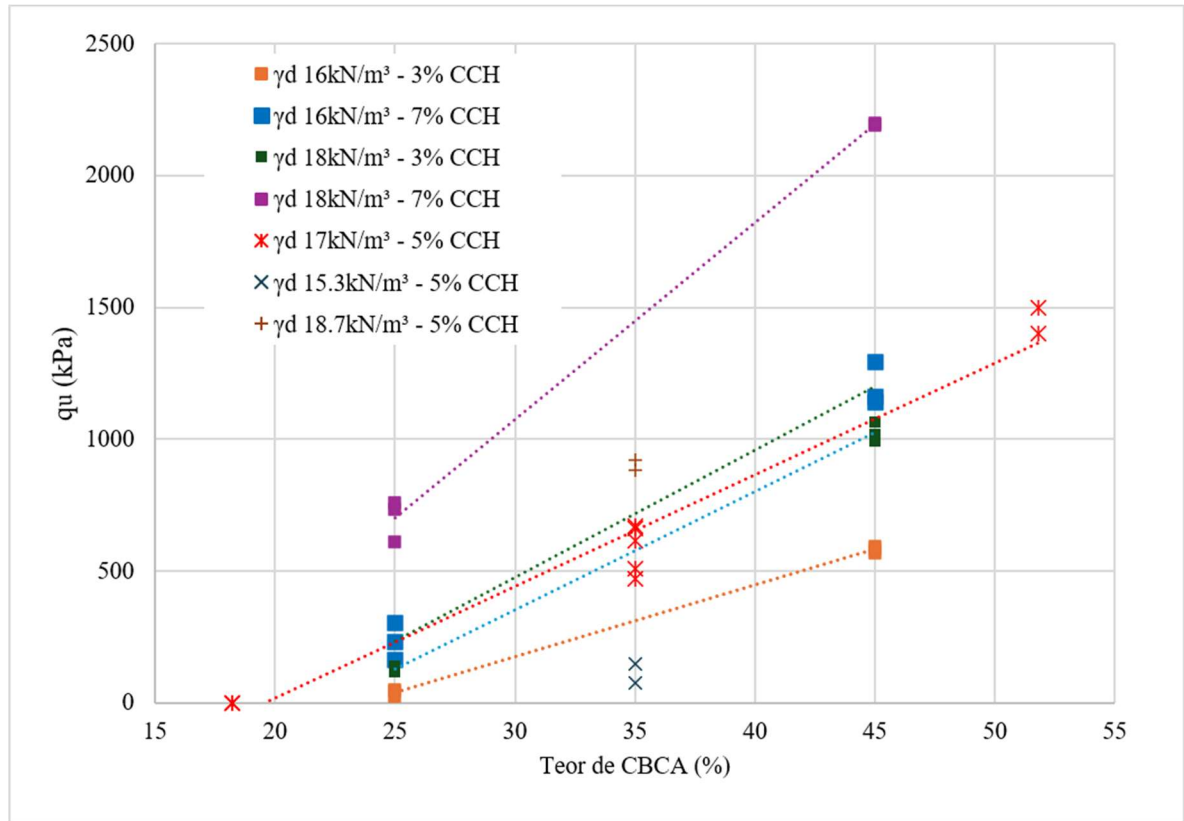
para cal virgem calcítica derivada do calcário produzida sob temperaturas semelhantes, que variaram de 3,85 a 5,33 m²/g (Ferraz *et al.*, 2019; Moropoulou; Bakolas; Aggelakopoulou, 2001). Para CCH, a SSA medida foi de 4,6 m²/g, um resultado próximo ao obtido para cal hidratada de casca de ovo (4,8 m²/g) por Consoli *et al.* (2020). No entanto, esse valor ainda é inferior às áreas de superfície específicas comumente relatadas para cal hidratada calcítica, que variam entre 11 e 18 m²/g (Cardoso *et al.*, 2009).

4.2. Resistência à compressão simples da mistura solo/CCH/CBCA

Nesta seção são apresentados resultados de resistência à compressão simples (q_u) de acordo com o planejamento fatorial e por variáveis independentes consideradas, sendo estas: teor de cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar (CBCA), teor de cal de conchas hidratada (CCH) e peso específico seco (γ_d).

A Figura 38 apresenta os resultados de q_u em função do teor de CBCA. Os resultados mostram que o teor de CBCA influencia positivamente a resistência à compressão simples, independentemente dos teores de CCH e de γ_d . O que pode ser atribuído ao aumento de sílica amorfa disponível para reação com a cal, uma vez que, por se tratar de um solo arenoso de baixa reatividade, a presença de material amorfo pode ser considerada um dos principais fatores para o aumento de q_u (Alavéz-Ramírez *et al.*, 2012; Consoli *et al.*, 2019b; Consoli; Rosa; Saldanha, 2011). Além disso, assim como visto por Alavéz-Ramírez *et al.*, (2012) o aumento de CBCA em misturas com solos granulares contribui para o aumento da densidade da matriz de solo e da resistência observada. Ainda de acordo com a Figura 38, é possível observar que as amostras com 18,2% de CBCA, apresentaram resistência igual a zero. Esse resultado ocorreu devido à desestruturação dos corpos de prova mediante a saturação por imersão aplicada antes do ensaio. Como já discutido anteriormente, isso demonstra que na estabilização de solos granulares a quantidade de sílica reativa é um fator-chave para que se tenha ganhos de resistência.

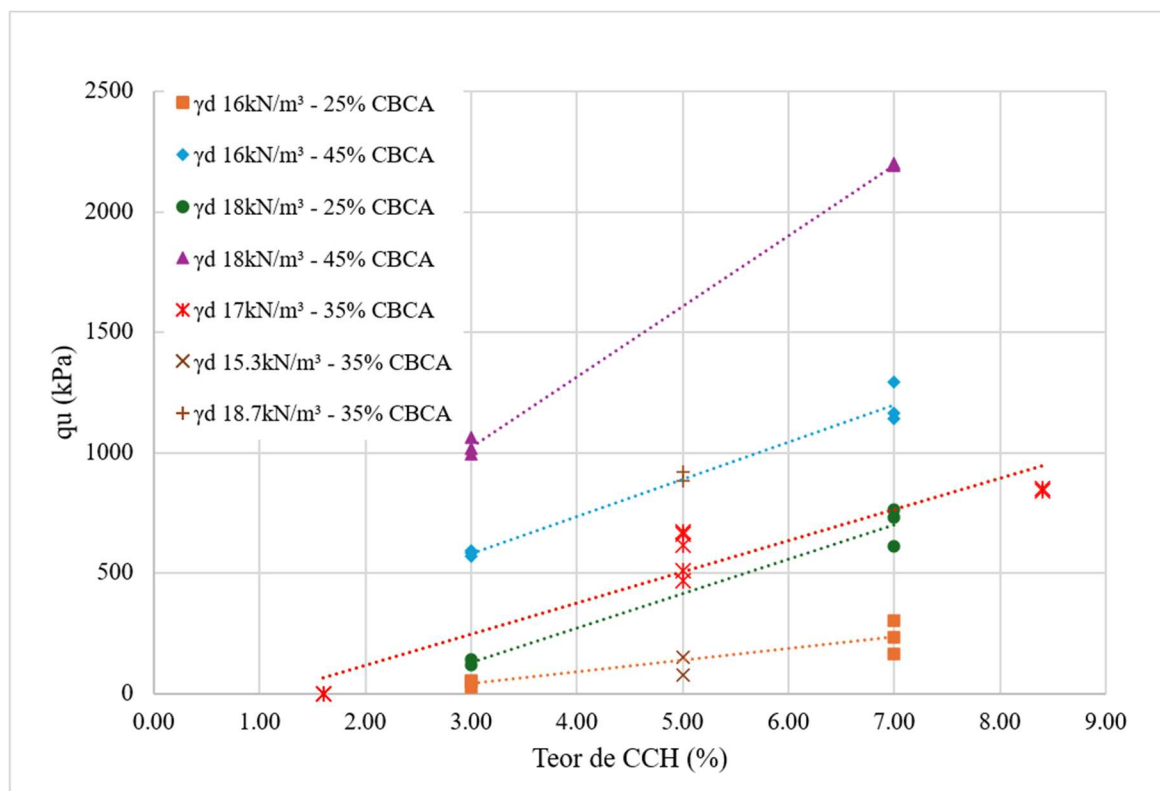
Figura 38. Efeito do teor de CBCA na resistência à compressão simples



A Figura 39 apresenta os resultados de q_u em função do teor de CCH aplicado. Assim como observado para o efeito da CBCA, o aumento do teor de cal na mistura implicou no aumento da resistência à compressão simples. Esse efeito atribuiu-se ao aumento da presença da CCH um ativador alcalino da CBCA, além de prover a disponibilidade de cálcio no meio para então formar-se géis de silicato hidratado de cálcio (C-S-H)(Baldovino *et al.*, 2019; Ferrazzo *et al.*, 2023; Rafiei; Maleki, 2024).

Outro ponto observado na Figura 39 foi que para o teor mínimo de CCH testado (1,8%), abaixo do ICL apresentado na Figura 30, não apresentou quantidade suficiente de ativador alcalino para que se gerassem reações de cimentação, pois as amostras com este teor de cal, após os 28 dias de cura, apresentaram desestruturação quando imersas em água.

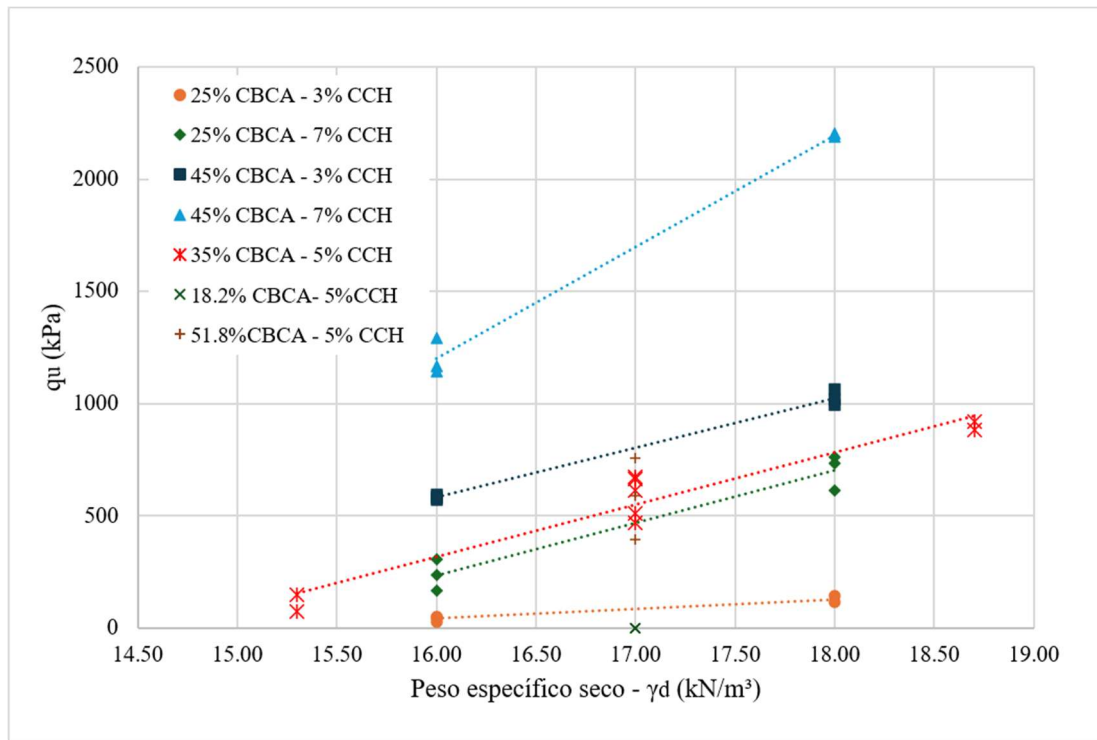
Figura 39. Efeito da cal de concha de marisco hidratada na resistência a compressão simples



A Figura 40 demonstra o efeito do peso específico seco (γ_d) nas misturas solo/CBCA/CCH. Observou-se, a partir destes resultados, que o γ_d exerceu um efeito em menor escala, visto que, para diferentes teores de cal (CCH) e distintos valores de γ_d , foram obtidos resultados de resistência à compressão simples (q_u) bastante similares. Por exemplo, na mistura com menor teor de CBCA (25%) e menor teor de CCH (3%), o aumento do peso específico e a consequente redução da porosidade não influenciaram significativamente o valor de q_u . Pode-se inferir que, mesmo em condições de maior densidade, a disponibilidade de sílica amorfa e cal para reagir se mostrou um limitador no ganho de resistência.

Nesse contexto, o γ_d demonstrou maior influência em misturas com maiores teores de CBCA e CCH. Por exemplo, na mistura em que a proporção de CBCA foi de 45% e 7% de CCH o aumento da densidade resultou em diferenças mais acentuadas: para um γ_d de 16kN/m³, a resistência média à compressão simples (q_u) foi de 1200 kPa; ao se aumentar o γ_d para 18 kN/m³, obteve-se um q_u médio de 2134kPa o que representa um aumento de 78% na resistência do material. Esse comportamento, se deve ao aumento de partículas finas que melhor se aproximam em maiores densidades, obtendo um melhor preenchimento de vazios e uma maior cimentação entre partículas (Beckett; Ciancio, 2014; Chang; Woods, 1992).

Figura 40. Efeito do peso específico seco na resistência compressão simples

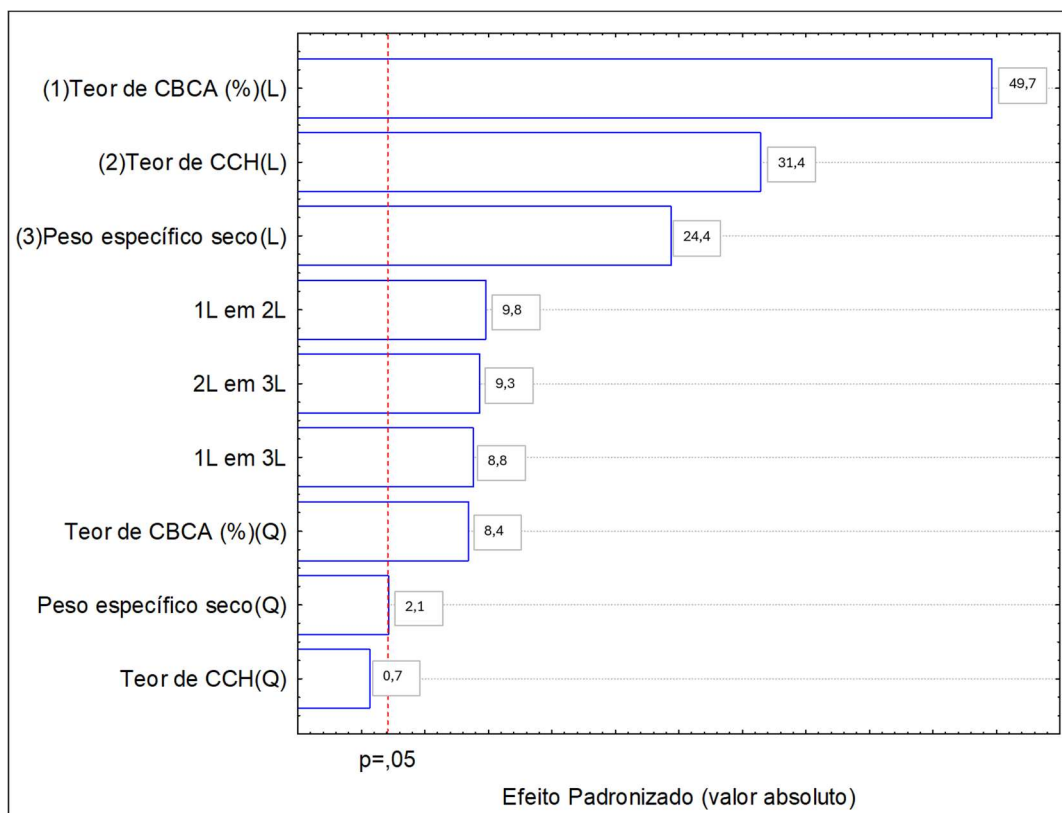


4.2.1. Análise estatística dos resultados de q_u

A análise estatística dos resultados avaliou o efeito das variáveis independentes e a interação entre elas na resistência à compressão simples, com um nível de significância (α) de 5%. Na Figura 41, é apresentado o gráfico de Pareto dos efeitos das variáveis independentes; observa-se que todas as variáveis são significativas e influenciam a variável resposta, considerando o intervalo de confiança de 95%.

O efeito do teor de CBCA se mostrou o mais significativo entre as demais variáveis, sendo o peso específico seco (γ_d) o de menor significância, como também observado nos dados experimentais da seção anterior. Outro aspecto observado é que a interação entre as variáveis, par a par, se mostra significativa. Além disso, com relação aos termos quadráticos (Q), é possível perceber que apenas o termo referente ao teor de CBCA (Q) tem uma maior significância, devendo este, necessariamente, ser incluído como componente do modelo de superfície de resposta.

Figura 41. Gráfico de Pareto para resultados de resistência à compressão simples



A Tabela 12 apresenta o resultado da análise de variância (ANOVA) referente aos resultados de compressão simples da mistura solo/CBCA/CCH. Os resultados reiteram o apresentado no gráfico de Pareto em que todas as variáveis independentes são significantes, bem como a interação quando combinadas em pares. No entanto, apenas o termo quadrático do teor de CCH não é significativo ($p > 0,05$), o que mostra que o efeito dessa variável é linear. Além disso, a soma dos quadrados reforça que o teor de CBCA (L) foi o principal fator preditivo nas amostras, sendo este valor 2,5 vezes o valor referente ao efeito do teor de CCH (L) na resistência à compressão simples. Para validade das análises da ANOVA, foi avaliada a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk. O resultado ($p = 0,20$) não indicou desvio significativo da distribuição normal ($p > 0,05$), confirmando a adequação do modelo para a realização da ANOVA.

Tabela 12. Análise de variância (ANOVA) dos resultados de resistência a compressão simples

	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	p-valor
(1)Teor de CBCA (L)	7733819	1	0,000
Teor de CBCA (Q)	222663	1	0,000
(2)Teor de CCH(L)	3098104	1	0,000
Teor de CCH(Q)	1360	1	0,516
(3)Peso específico seco(L)	1863766	1	0,000
Peso específico seco(Q)	14334	1	0,042
1L em 2L	301536	1	0,000
1L em 3L	244055	1	0,000
2L em 3L	272523	1	0,000
Falta de ajuste	394178	5	0,000
Erro puro	81562	26	
Total	12964147	40	

O modelo quadrático obtido é apresentado na Equação 23, sendo este um modelo quadrático reduzido obtido pela remoção dos termos não significativos ($p > 0,05$). O modelo reduzido apresentou coeficiente de determinação $R^2 = 0,96$ indicando elevada capacidade preditiva para a resistência à compressão simples das misturas estudadas. Em que X_1 é o teor de CBCA (%); X_2 é o teor de CCH (%) e X_3 = peso específico seco (kN/m^3)

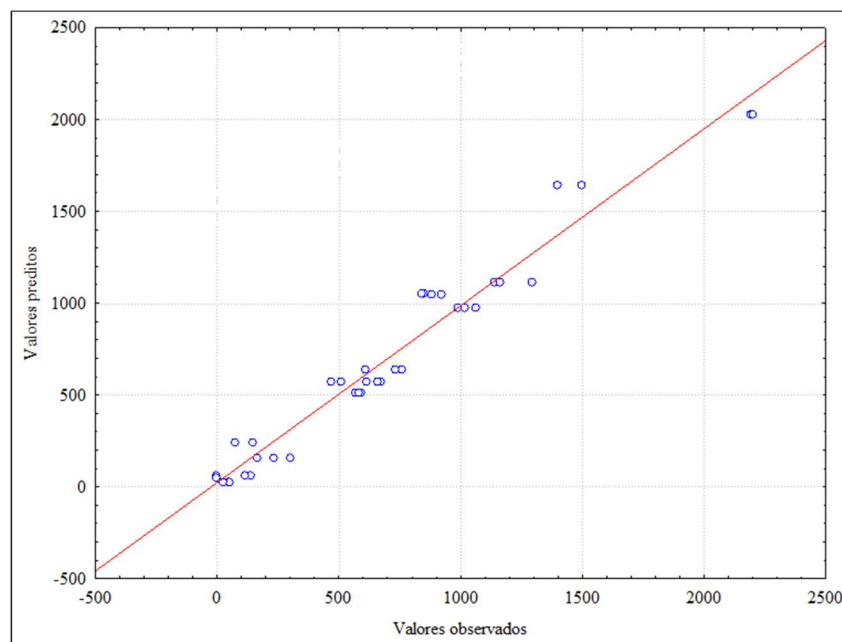
$$q_u = 570,6689 + 469,31X_1 + 99,0326X_1^2 + 295,69X_2 + 236,7935X_3 + 25,4507X_3^2 + 117,7442X_1X_2 + 106,4573X_1X_3 + 112,4951X_2X_3$$

(23)

A análise de variância indicou falta de ajuste significativa para o modelo ajustado ($p < 0,05$). Em princípio, esse resultado sugere que a equação quadrática não descreve integralmente toda a variabilidade observada na resposta. Entretanto, essa interpretação deve ser analisada em conjunto com os demais indicadores estatísticos do modelo. O coeficiente de determinação obtido ($R^2 = 0,96$) evidencia a elevada capacidade explicativa da Equação 23 ajustada, indicando que a maior parte da variabilidade experimental foi adequadamente representada pelos fatores estudados e suas interações.

Adicionalmente, observou-se reduzida magnitude do erro puro, decorrente do elevado número de repetições experimentais realizadas no planejamento. Nessas condições, pequenas discrepâncias entre os valores observados e preditos podem resultar em significância estatística do teste, mesmo quando o modelo apresenta elevado poder preditivo e adequada representação prática. De fato, a soma de quadrados associada à falta de ajuste correspondeu a aproximadamente 3% ($\text{Falta de ajuste/Erro total} = 394178/12964147 = 0,003$) da variabilidade total da resposta, indicando que a parcela não explicada pelo modelo possui magnitude relativamente reduzida quando comparada à variabilidade global dos dados experimentais. A Figura 42 apresenta o gráfico de preditos versus observados e mostra a homoscedasticidade do modelo, isto é, os resíduos apresentaram distribuição aleatória em torno da linha de resíduo nulo, sem tendência sistemática e com dispersão aproximadamente constante.

Figura 42. Gráfico de valores observados versus preditos pelo modelo



Por fim, as Figura 43, Figura 44 e Figura 45 apresentam as superfícies de resposta que podem ser obtidas baseadas no modelo da Equação 23. Na Figura 43 e na Figura 45 observa-se que há de fato uma maior curvatura na representação gráfica direcionada ao eixo que está associado ao teor de CBCA, principalmente quando se compara com a Figura 44 que possui variáveis de comportamento linear (teor de CCH) ou quase puramente linear (peso específico seco).

Figura 43. Superfície resposta de q_u em função do teor de CCH e teor de CBCA

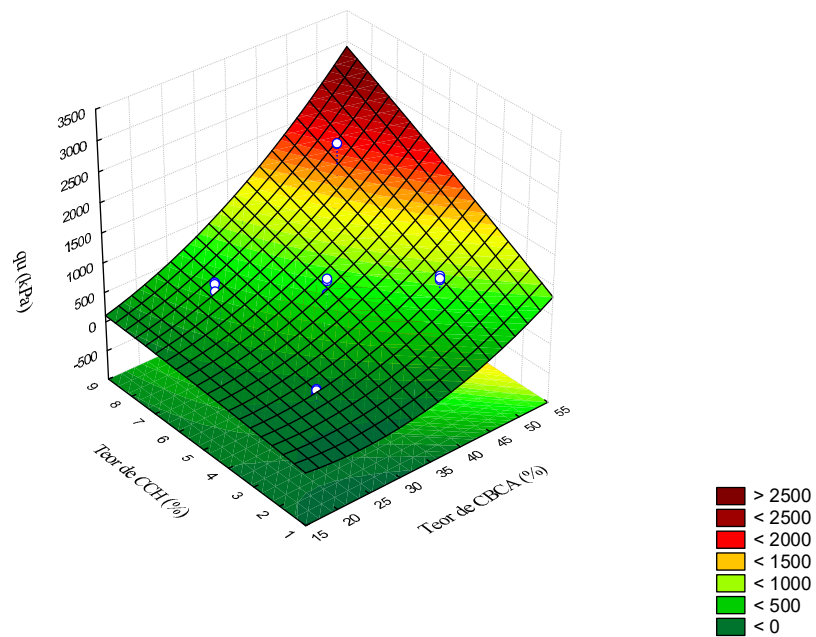


Figura 44. Superfície resposta de q_u em função do teor de CCH e peso específico seco

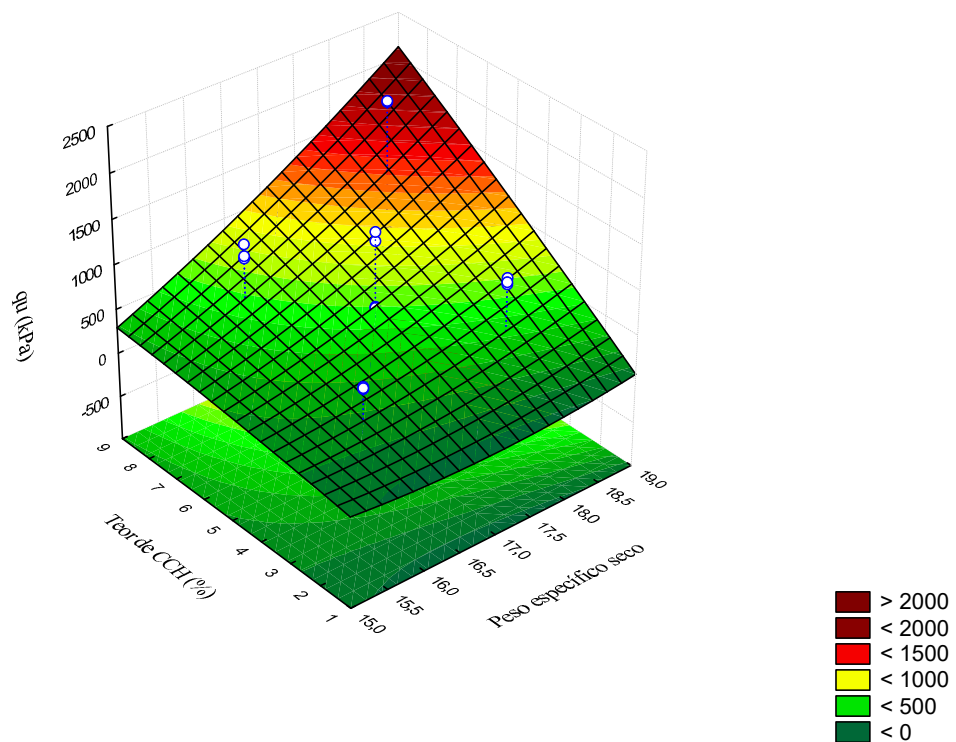
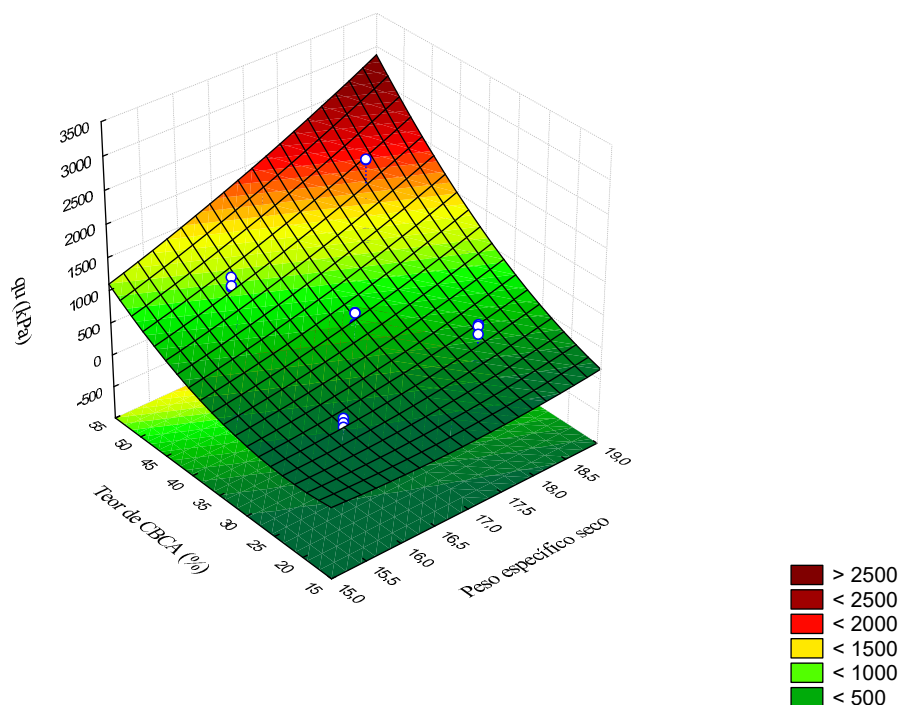


Figura 45. Superfície resposta de q_u em função do teor de CBCA e peso específico seco

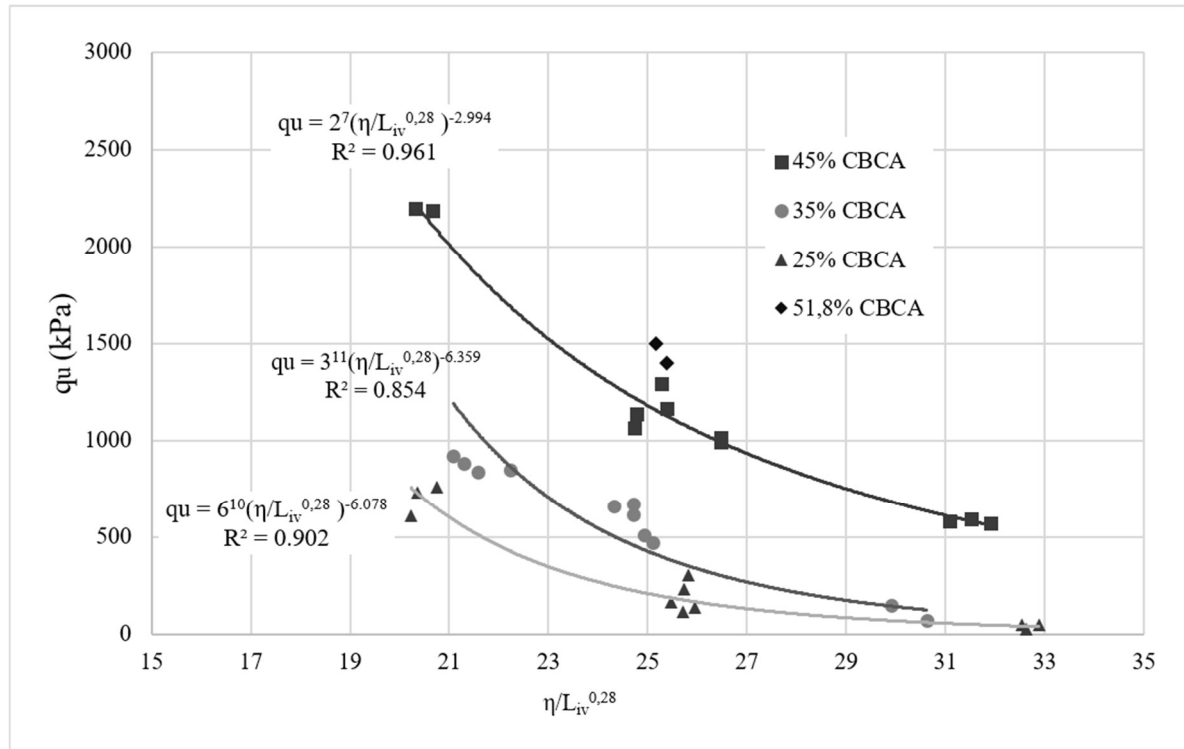


4.2.2. Aplicação da dosagem porosidade/teor volumétrico de aglomerante para a q_u da mistura solo/CBCA/CCH

A Figura 46 apresenta a curva de dosagem baseada no índice porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv}) proposto por (Consoli; Lopes Júnior; Heineck, 2009) que unifica as variáveis peso específico (por intermédio do cálculo da porosidade) com o efeito do teor CCH como aglomerante. Os resultados são apresentados em uma única curva para cada teor de CBCA presente na mistura. Com exceção dos pontos axiais (18,2 e 51,8 %) que por não terem variação do peso específico e teor de cal não apresentam uma curva de ajuste.

O expoente de minoração do efeito da CCH, aplicado ao denominador do teor volumétrico de cal (L_{iv}) que apresentou melhor ajuste, foi de $b=0,28$ (vide Equação 5). Este mesmo expoente foi aplicado em outros estudos que usam a cal como agente estabilizante, em misturas de solo arenoso-cinza (Consoli *et al.*, 2009, 2019b; Consoli; Da Rocha; Silvani, 2014; Consoli; Gravina Da Rocha; Silvani, 2014) e que apresentam considerável ajuste, considerando o coeficiente R^2 .

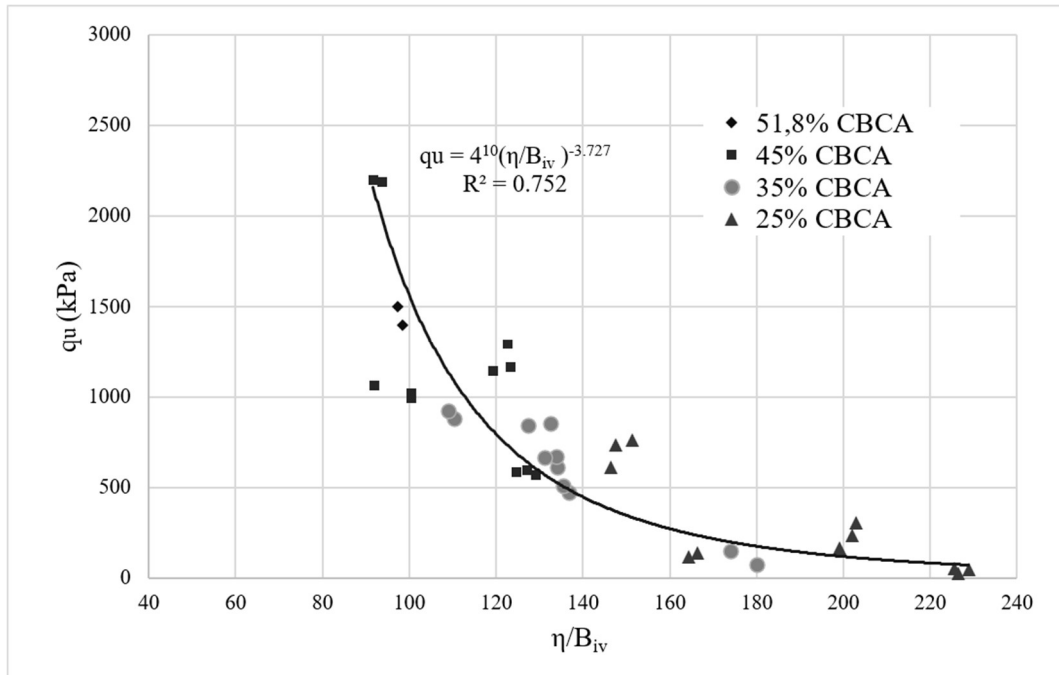
Figura 46. Resistência à compressão simples em função do índice porosidade/teor volumétrico de cal de concha de marisco



Logo, de acordo com a Figura 46, como não foi possível unificar em uma única curva devido à variação do teor de CBCA, para condicionar estes em uma única curva de dosagem foi aplicado o índice teor volumétrico de ligante (B_{iv}) apresentado por Consoli *et al.*, (2018). Este índice trata da razão entre o somatório dos teores volumétricos de cal (L_{iv}) e de cinza (A_{iv}), dividido pelo volume total da amostra (V), conforme a Equação 9.

Na Figura 47 são apresentados os resultados de resistência à compressão simples em função do índice η/B_{iv} . Essa representação se baseia em estudos anteriores (Baldovino; Dos Santos Izzo; Ekinci, 2023; Bruschi *et al.*, 2021; Consoli *et al.*, 2019b, 2021), que usam a combinação entre percussores (cinzas residuais) e cal.

Figura 47. Resistência a compressão simples em função do índice porosidade/teor volumétrico de ligante (B_{iv})



Scheuermann Filho; Dias Miguel; Consoli, (2022) descreveram que o expoente b (vide Equação 5) descreve a relação entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento em cada solo. Se b for igual a um ($b = 1$), indica que tanto a porosidade quanto a quantidade de aglomerante têm influência equivalente quanto à resistência de um determinado solo misturado ao aglomerante. Assim, foram obtidas a curva e a equação apresentadas na Figura 47, em que o expoente b de melhor ajuste (R^2) foi igual a 1. Conforme evidenciado por Scheuermann Filho; Dias Miguel; Consoli, (2022), isto indica que tanto a porosidade quanto a quantidade de agente cimentante têm influências equivalentes. Expoentes similares foram obtidos para materiais arenosos tratados com cimento Portland, e o valor do expoente $b = 1$ é característico de solos arenosos, conforme discute Diambra *et al.*, (2017).

Ao comparar os resultados da Figura 47 com estudos com materiais similares, solo arenoso estabilizado com cinza e cal, observa-se que na literatura o parâmetro B_{iv} é expressado com menor efeito, isto é, aplicando a fase considerada como aglomerante um efeito reduzido por meio da aplicação de um expoente da ordem de 0,28 (Consoli *et al.*, 2019b, 2021). Sendo o peso específico seco (interpretado na forma de porosidade) um dos fatores de maior influência sobre o comportamento de solos estabilizados. No entanto, para os resultados apresentados e discutidos no presente estudo, a fase cimentante, CBCA-CCH, teve considerável efeito em que apresentou comportamento na dosagem similar ao de solos arenosos tratados com cimento

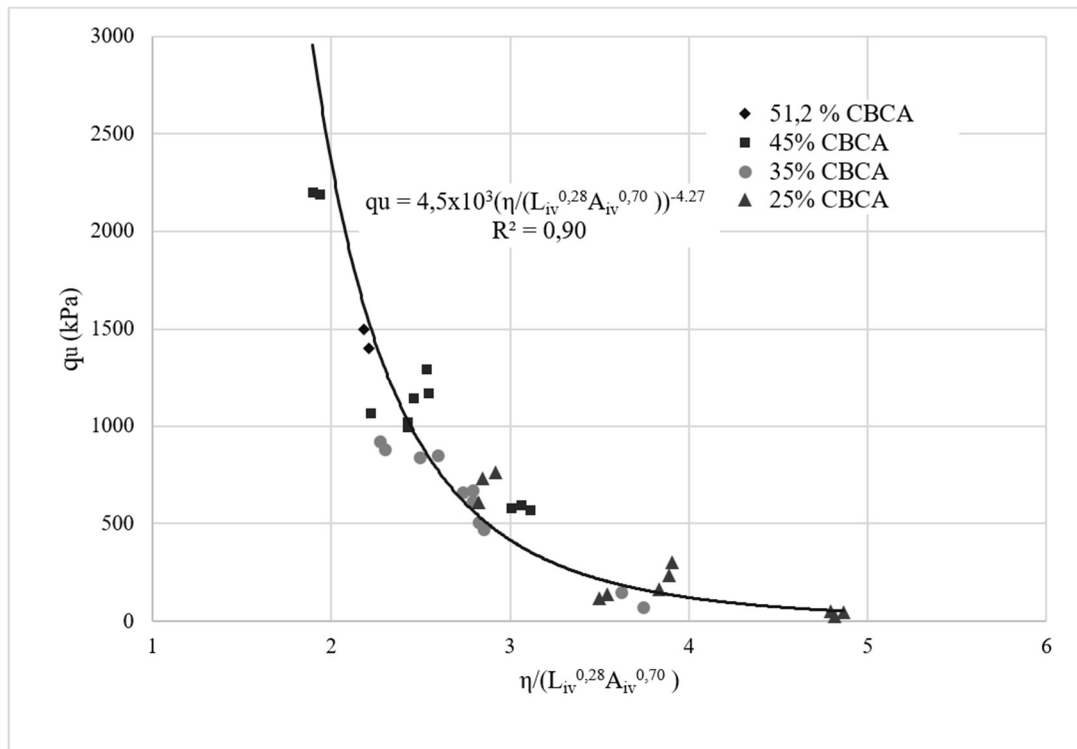
Portland. Este aspecto se refletiu na análise estatística, como evidenciado na ANOVA, em que a soma dos quadrados do efeito da CBCA foi mais que o dobro com relação ao efeito CCH e o peso específico (que pode ser relacionado com a porosidade) teve menor significância.

Neste sentido, ainda que a razão η/B_{iv} tenha apresentado ajuste considerado bom ($R^2=0,75$), a ponderação entre os efeitos da CBCA e da CCH é realizada de forma volumétrica no cálculo do índice B_{iv} , o que pode desproporcionar o efeito individual das variáveis que se combinam na forma de fase cimentante. Diante deste contexto, é proposto um novo índice que retoma o $L_{iv}^{0,28}$ estabelecido nos resultados apresentados na Figura 46, validado em estudos anteriores para misturas solo-cinza-cal, e incorpora o teor volumétrico de CBCA (A_{iv}^y) como parte do denominador referente à componente de cimentação, conforme apresentado na Equação (10).

A proposição desse novo índice se deu pela busca de uma representação que melhor ajuste os pesos dos efeitos das proporções volumétricas de cinza e cal. Outros estudos conseguiram com sucesso adaptar o índice proposto por Consoli *et al.*, (2007) e Consoli; Lopes Júnior; Heineck, (2009) incorporando variáveis como teor de umidade inicial e tempo de cura. Baldovino; la Rosa; Calabokis, (2023) e Baldovino; Ekinici; Bruschi, (2024) unificaram a variável independente teor volumétrico de umidade de compactação (C_w) junto a composição obtendo o índice porosidade-água/aglomerante ($\eta C_w/(B_{iv}^{2a})$) que ajusta resultados de compressão não confinada, rigidez e durabilidade. Em contexto similar, Miturski (2025) incorporou o tempo de cura ao índice η/C_{iv} , obtendo um índice $\eta/(T^B C_{iv}^A)$. Neste sentido, o novo índice $\eta/(L_{iv}^{0,28} * A_{iv}^y)$ com teor volumétrico de precursor de aluminossilicato (CBCA) na equação tem um expoente que equaliza os efeitos da variável independente, e que pode ser estendido para outros resultados de misturas solo-cinza-cal.

Os resultados de q_u são apresentados na Figura 48 plotados em função do novo índice porosidade/teor volumétrico de cal -cinza ajustado ($\eta/(L_{iv}^{0,28} * A_{iv}^y)$). O expoente y foi adotado como sendo $y \approx 2,5 * b$, que reflete a análise estatística, em que o efeito da CBCA foi de aproximadamente 2,5 vezes o efeito da CCH como apresentado na análise estatística. Essa proporcionalidade também pode ser atribuída à proporção CaO/SiO_2 , que, segundo Shi e Lothenbach (2019), valores iguais ou superiores a 0,5 favorecem a formação de géis de C-S-H. Por fim, a aplicação do novo índice resultou na melhora do ajuste da curva, que passou a apresentar $R^2=0,90$.

Figura 48. Resistência a compressão simples em função do teor do índice porosidade/teor volumétrico de cal e cinza ajustado



4.3. Comportamento tensão-deformação da mistura solo/CBCA/CCH

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados de ensaios triaxiais isotropicamente consolidados e drenados (CID) executados em dois blocos de análise: um que considera o efeito do teor de CBCA na mistura e outro que avalia o efeito do CCH na mistura. Para avaliar o efeito das amostras com teor de CBCA foi considerada a variação nos níveis de 25, 35 e 45%, e fixando o teor de CCH em 5%. Para o caso das amostras com teor de CBCA fixo em 35% (ponto médio) e variando os teores de CCH de 0, 3, 5 e 7%, como os resultados com 35% de CBCA e 5% de CCH no primeiro bloco de análises, estes se repetirão para análise comparativa do efeito do teor de cal foram os teores de 0, 3 e 7%. Além disso, ressalta-se que algumas variáveis foram consideradas constantes: peso específico seco em 17 kN/m^3 , a umidade de compactação em 15% e o tempo de cura em 28 dias.

4.3.1. Efeito do teor de CBCA no comportamento tensão-deformação

A Figura 49, Figura 50 e Figura 51 apresentam o comportamento tensão-deformação da mistura de solo com substituição de 25% (solo-25CBCA-5CCH), 35% (solo-35CBCA-5CCH)

e 45% de CBCA (solo-45CBCA-5CCH), divididas por tensão de confinamento de 50, 100 e 150 kPa respectivamente.

Figura 49. Comportamento tensão-deformação e volumétrico da mistura solo-diferentes teores de CBCA-5CCH na tensão confinante de 50kPa

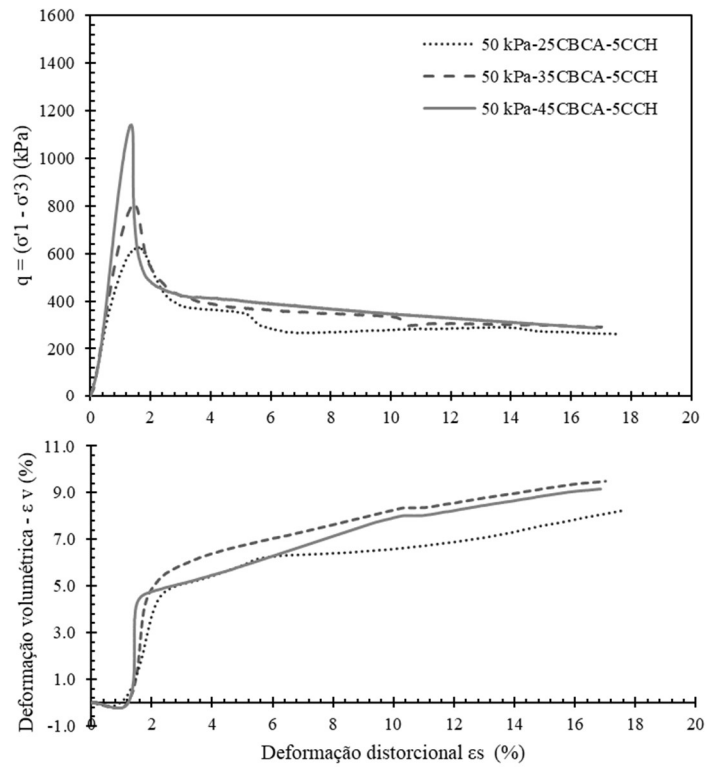


Figura 50. Comportamento tensão-deformação e volumétrico da mistura solo-diferentes teores de CBCA-5CCH na tensão confinante de 100kPa

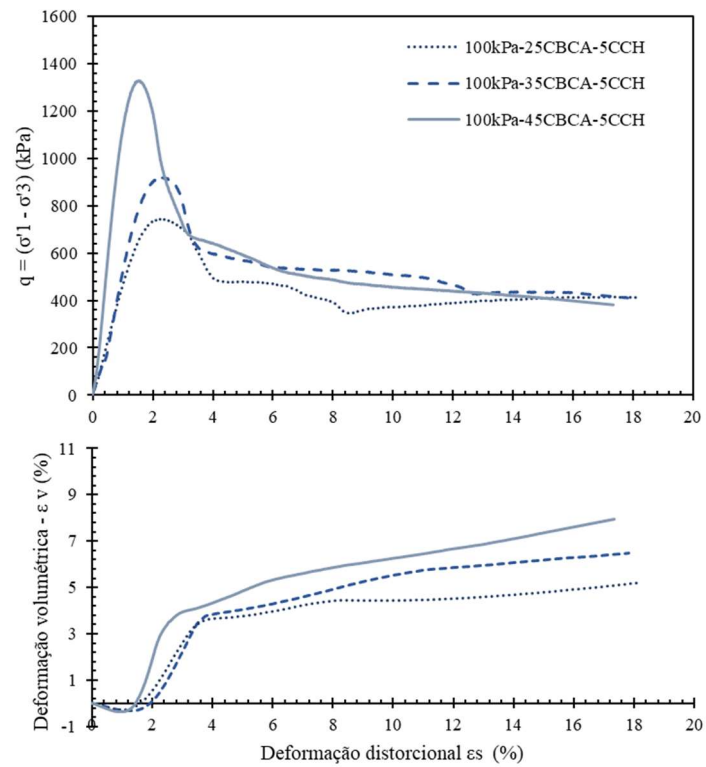
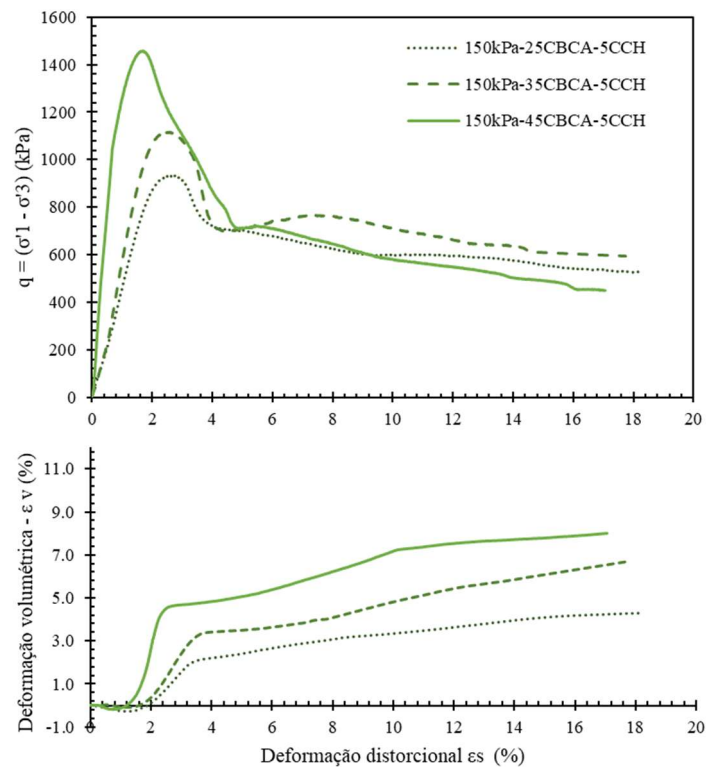


Figura 51. Comportamento tensão-deformação e volumétrico da mistura solo-diferentes teores de CBCA-5CCH na tensão confinante de 150kPa



Os resultados mostram que, para todas as tensões de confinamento, houve um acréscimo da tensão de pico para as amostras com o aumento do teor de CBCA, independente da tensão de confinamento. Deste modo, observou-se que há uma mudança de comportamento do material devido ao processo de cimentação, associado ao aumento de CBCA, o que pode ser interpretado como o aumento da disponibilidade de material reativo na mistura. Por exemplo, na Figura 51, observa-se que a mistura contendo 25% de CBCA apresentou tensão de pico de aproximadamente 930 kPa, enquanto o aumento desse teor para 45% resultou em uma elevação significativa da resistência, atingindo cerca de 1460 kPa. Esse comportamento corresponde a um acréscimo de aproximadamente 57% na tensão de pico, ou, de forma equivalente, a uma resistência cerca de 1,6 vezes superior à observada para a mistura com menor teor de CBCA.

Bagheri, Ahmad e Ismail, (2014) observaram comportamento similar ao fazerem a adição de uma mistura de cimento Portland-cal-cinza de casca de arroz, em diferentes proporções, na estabilização de uma areia siltosa. Segundo este estudo, os resultados triaxiais isotopicamente consolidadas e não-drenados (CIU) mostraram que o aumento do teor cinza de casca de arroz, teve maior influência no comportamento mecânico em termos de aumento da coesão, superando misturas que tinham apenas cimento e cal como adição.

A comparação entre Figura 49, Figura 50 e Figura 51 mostram que a resistência de pico e a resposta volumétrica observadas estão diretamente relacionadas à tensão de confinamento aplicada. A Figura 49 mostra que as amostras com menor tensão de confinamento (50kPa) apresentam, maior variação na deformação volumétrica (ϵ_v) no pós-pico, observado pelo aumento da expansão volumétrica das amostras, o que é interpretado como um comportamento mais dilatante. Resultados semelhantes foram observados por Ajorloo; Mroueh; Lancelot, (2012) e Lin *et al.*, (2024) para areias cimentadas com cimento Portland, Consoli *et al.*, (2015b) para uma areia argilosa com cinza volante e cal, e Rezende *et al.*, (2022) ao avaliar uma areia cimentada por precipitação de calcita induzida por microrganismos.

O comportamento pós-pico, observado nas Figura 49, Figura 50 e Figura 51, fica evidente que as curvas tendem a convergir para um valor único, o que caracteriza o estado crítico das amostras. Este comportamento é característico de solos cimentados, isto é, apresentando um pico acentuado com posterior abrupta queda na tensão de desvio e também foi identificado e observado por Consoli *et al.*, (2015b) para misturas de solo cinza volante e cal.

4.3.2. Efeito do teor de CCH no comportamento tensão-deformação

As Figura 52, Figura 53 e Figura 54 mostram o efeito do teor de CCH na mistura solo/CBCA/CCH, em diferentes tensões de confinamento. Os resultados são comparados com o material base, a mistura solo-35CBCA-0CCH, isto é, com teor de CCH igual a zero e sem tempo de cura.

De forma geral, observa-se que, como nos resultados de resistência à compressão simples, o teor mínimo de cal (3%) aqui aplicado resulta em cimentação. Um aspecto relevante pode ser observado na Figura 52, referente aos ensaios realizados sob a menor tensão confinante avaliada ($\sigma_3 = 50 \text{ kPa}$). Nessa condição, a mistura 35CBCA-5CCH apresentou tensão desviadora de pico da ordem de 800 kPa, valor relativamente próximo à resistência à compressão simples média (q_u), obtida para amostras moldadas com mesmas características, de aproximadamente 585 kPa. Considerando que ambas as amostras foram moldadas sob condições idênticas, esse resultado sugere que a aplicação de uma baixa tensão confinante produz um incremento moderado na resistência mobilizada.

Essa análise torna-se ainda mais evidente ao se comparar com a mistura sem adição de CCH (35CBCA-0CCH), ensaiada sob a mesma tensão confinante de 50 kPa, com pico de aproximadamente $q = 275 \text{ kPa}$. Admitindo-se que esse valor represente uma estimativa da contribuição da tensão confinante para a resistência mobilizada, pode-se inferir que a parcela resistente associada à cimentação da mistura 35CBCA-5CCH corresponde a aproximadamente 525 kPa ($800 - 275 = 525 \text{ kPa}$), valor bastante próximo da resistência à compressão simples observada para essa mistura ($q_u = 585 \text{ kPa}$). Embora essa comparação seja apenas indicativa, ela sugere que a resistência mobilizada sob baixos níveis de confinamento é fortemente governada pela cimentação desenvolvida na matriz solo-CBCA-CCH.

Figura 52. Comportamento tensão-deformação e volumétrico da mistura Solo-35CBCA- diferentes teores de cal na tensão confinante de 50kPa

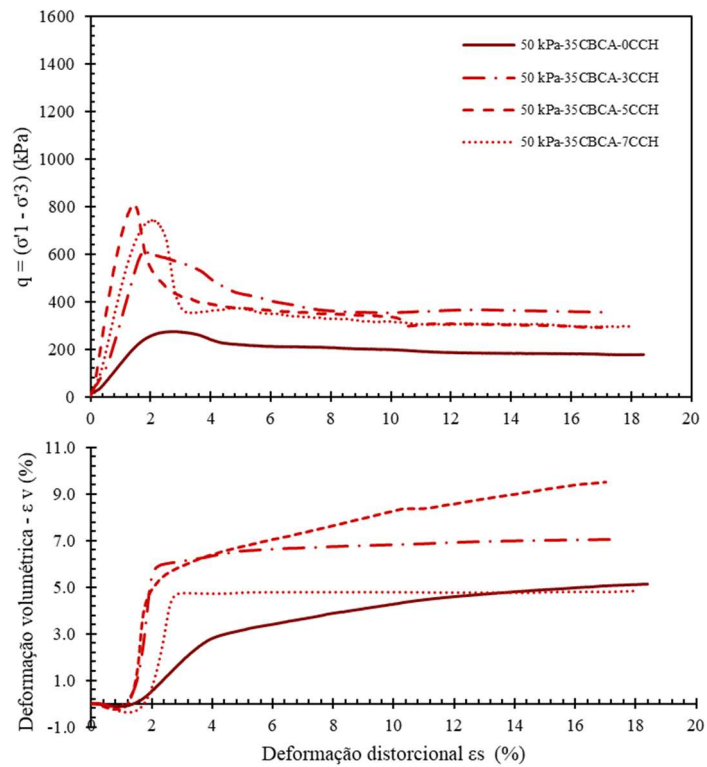


Figura 53. Comportamento tensão-deformação e volumétrico da mistura Solo-35CBCA- diferentes teores de cal na tensão confinante de 100kPa

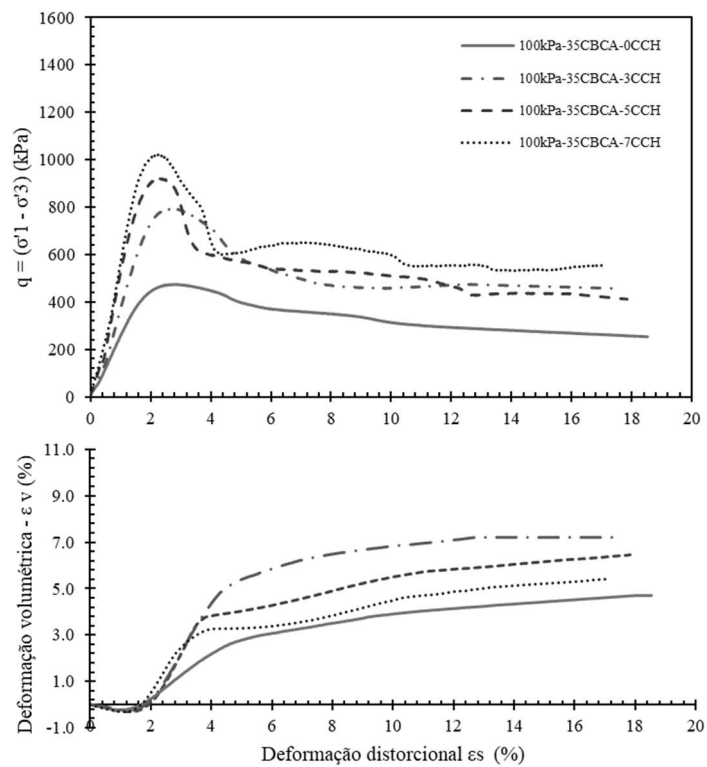
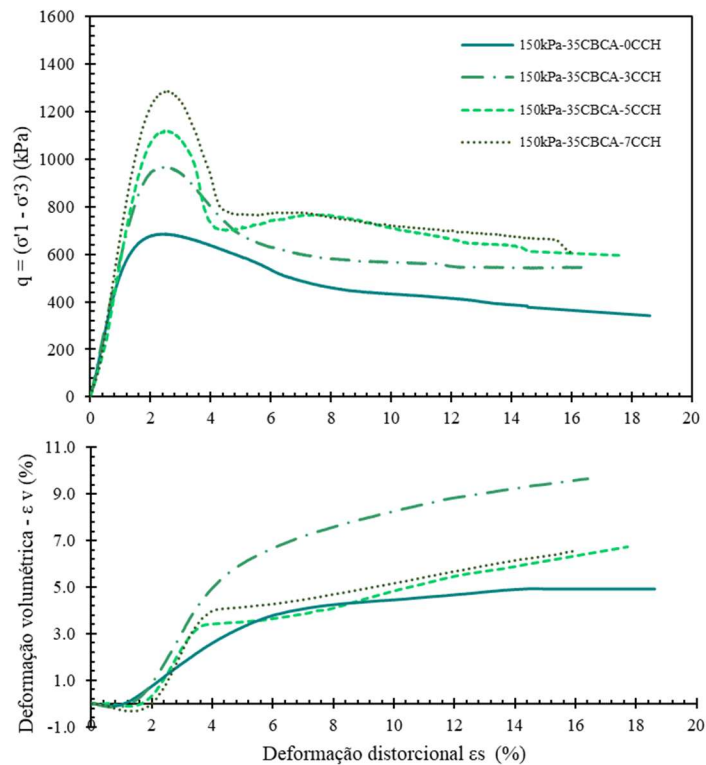


Figura 54. Comportamento tensão-deformação e volumétrico da mistura Solo-35CBCA- diferentes teores de cal na tensão confinante de 150kPa



O efeito do aumento do teor de CCH mostrou-se menos pronunciado quando comparado ao efeito da incorporação de CBCA, considerando a faixa de teores investigada. Conforme observado na Figura 52 e na Figura 54, com tensões confinantes de 50 e 150 kPa, respectivamente, o incremento do teor de CCH de 3% para 7% promoveu um aumento da ordem de 33% na tensão de pico das misturas. Em contrapartida, ao comparar a introdução da CCH com a mistura sem CCH observa-se um ganho considerável na resistência de pico. Por exemplo, conforme apresentado na Figura 52, a tensão de pico aumentou de 273 kPa para o material não cimentado para 608 kPa na mistura contendo 3% de CCH, correspondendo a um incremento de aproximadamente 123% na resistência de pico.

Esses resultados, assim como observado por Consoli *et al.*, (2001; 2015a) indicam que a presença da cal promove uma mudança de comportamento do material devido a considerável cimentação, conseguida com o teor mínimo de cal, sendo o aumento desse teor apresentando aumentos mais restritos. Essa restrição pode se referir à redução da disponibilidade de sílica em estado amorfo para reações de cimentação.

4.3.3. Efeito das variáveis teor de CBCA e CCH na trajetória de tensões e na envoltória de ruptura

As Figura 55, Figura 56 e Figura 57 comparam as trajetórias de tensões e as respectivas envoltórias de ruptura, referentes às amostras com e sem adição de 5% CCH no estágio de pico (máxima tensão desviadora), para os teores de 25, 35 e 45 % de CBCA. Os resultados são apresentados no plano p' versus q para as amostras solo-CBCA-5CCH, no qual o ângulo de atrito interno de pico (ϕ'_p) foi calculado com base no parâmetro M do estado crítico, sendo este valor o coeficiente angular da regressão linear que passa pelos pontos, e a coesão pelo critério de Mohr-Coulomb.

Figura 55. Envoltória de ruptura no plano p' versus q para amostra Solo-25CBCA-0CCH e Solo-25CBCA-5CCH no pico.

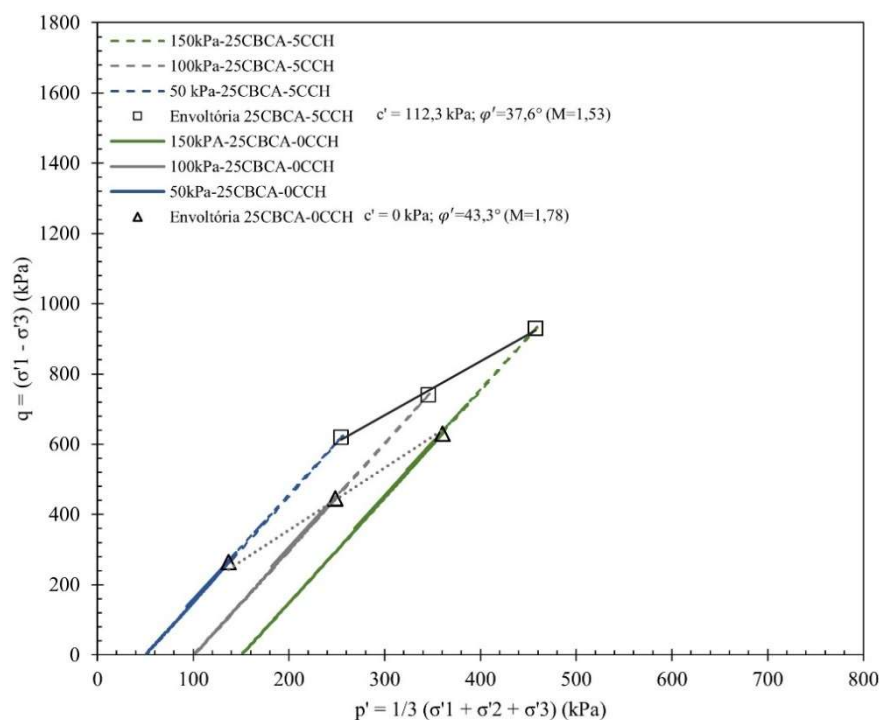


Figura 56. Envoltória de ruptura no plano p' versus q para amostra Solo-35CBCA-0CCH e Solo-35CBCA-5CCH no pico.

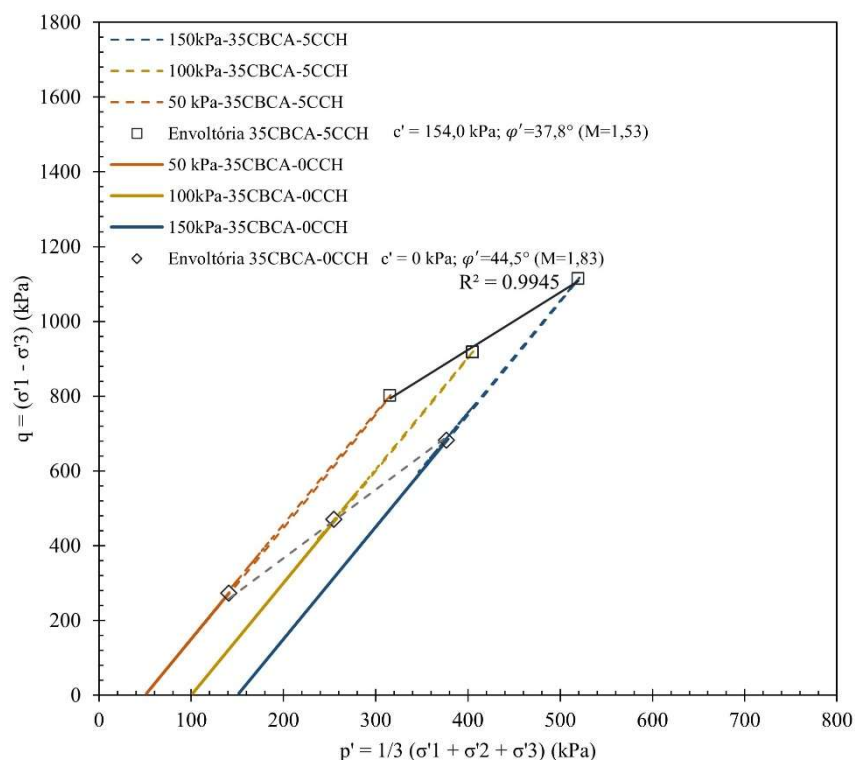
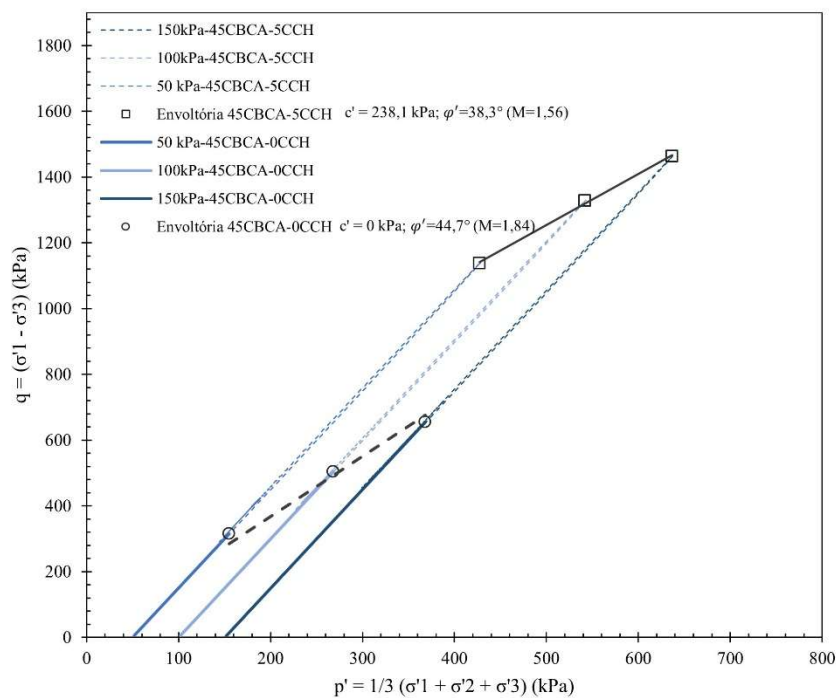


Figura 57. Envoltória de ruptura no plano p' versus q para amostra Solo-45CBCA-0CCH e Solo-45CBCA-5CCH no pico.



Ao comparar a Figura 55, a Figura 56 e a Figura 57 para as amostras com cimentação (adição de CCH) com 25, 35 e 45% de substituição de CBCA obteve-se ângulo de atrito interno no pico de 37,6°, 37,8° e 38,3°, respectivamente. Logo, com exceção do efeito na coesão, devido à cimentação, os resultados mostram que as envoltórias são bastante similares.

Na Figura 55 são apresentados os resultados para as amostras com teor de CBCA de 25%, na qual foi observado que o material sem CCH apresenta ângulo de atrito (φ_p') igual a 43,3° e coesão (c') igual a zero, por se tratar de um material de comportamento puramente granular e sem cimentação. Para a amostra cimentada (adição de 5% CCH) obteve-se um ângulo de atrito interno de φ_p' =37,6° e a formação de coesão igual a 112,3kPa, comportamento também reportado em outros estudos para areias cimentadas (Reddy; Saxena, 1993; Rios; Viana da Fonseca; Baudet, 2014; Schnaid; Prietto; Consoli, 2001a).

Na Figura 56 são apresentadas as envoltórias referentes a misturas com 35% de CBCA. Nesta foi observado para as amostras cimentadas φ_p' =37,8°, praticamente idêntico ao teor observado para o teor de 25% CBCA, e c' = 154,0kPa. O que reforça que a CBCA atua no aumento da coesão, pelo aumento da disponibilidade de sílica e alumina para reações pozolânicas na mistura.

De modo similar, na Figura 57 é apresentada a envoltória referente ao teor de 45% de CBCA na mistura. Para esta amostra os resultados da amostra cimentada atingem uma coesão igual a 238,1 kPa, e φ_p' =38,3°. Como discutido anteriormente, apenas há alteração significativa referente à coesão, o ângulo de atrito permanece praticamente o mesmo para todas as amostras com CCH curadas por 28 dias.

Nas amostras não cimentadas, das Figura 55, Figura 56 e Figura 57, com apenas CBCA e sem tempo de cura (25CBCA-0CCH, 35CBCA-0CCH e 45CBCA-0CCH), não há considerável alteração do ângulo de atrito, sendo eles 43,3°, 44,5° e 44,7°, para os teores de 25, 35 e 45% de CBCA, respectivamente. Estes valores são superiores ao observado para o solo cimentado, conforme observado por Schnaid; Prietto; Consoli, (2001) para areia com cimento Portland.

Os resultados mostram que a incorporação de CBCA exerceu influência limitada sobre o comportamento friccional do material. Tendência semelhante foi observada para as misturas cimentadas, conforme discutido anteriormente. Esse comportamento pode ser atribuído às características granulométricas da própria CBCA, que, mesmo após o peneiramento, apresenta

uma fração significativa de partículas com dimensões equivalentes às de areia fina. Dessa forma, a substituição parcial do solo por CBCA promove o preenchimento dos vazios da matriz granular, contribuindo para a manutenção do arranjo estrutural e dos mecanismos de atrito entre partículas. Consequentemente, mesmo para teores de substituição elevados, da ordem de 45%, não foram observadas alterações expressivas nos parâmetros associados à resistência friccional do material.

Além disso, a redução do φ_p' para materiais cimentados, pode ser atribuída a mudança do comportamento friccional e a quebra da cimentação, uma vez que, na fase antes do pico a dilatância nos materiais cimentados tende a ser menor até a total quebra da cimentação, também observado por outros estudos (Clough *et al.*, 1981; Li; Liu; Liu, 2015; Singh *et al.*, 2023).

Para análise do efeito do teor de CCH nas trajetórias de tensões e nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, compara-se a Figura 58, a Figura 56 (anteriormente apresentada na discussão do efeito da CBCA) e a Figura 59. Ao comparar o φ_p' obtido para as amostras com cimentação, foram obtidos os valores de 39,6°, 37,8° e 46,6°, para os teores de 3, 5 e 7% de CCH. O que mostrou uma maior variabilidade desse parâmetro com o aumento do teor de CCH, de modo que para 7% de CCH obteve-se um φ_p' superior ao da amostra sem cimentação (solo-35CBCA-0CCH) que foi da ordem de 44,3°. Essa variabilidade pode ser atribuída ao ajuste da envoltória, baseada em apenas três tensões confinantes, além da cimentação entre amostras ter apresentado menor efeito entre elas, o que pode implicar em certo nível de variabilidade entre ensaios. Jia *et al.*, (2019) observou comportamento similar em amostras de *loess* estabilizadas com cal, especificamente para curtos tempos de cura (7 e 28 dias). Segundo estes autores, a longo prazo as reações pozolânicas continuam a aumentar e a tendência de coesão se mantém com o aumento de cal na mistura.

Figura 58. Envoltória de ruptura no plano p' versus q para amostra Solo-35CBCA-0CCH e Solo-35CBCA-3CCH no pico

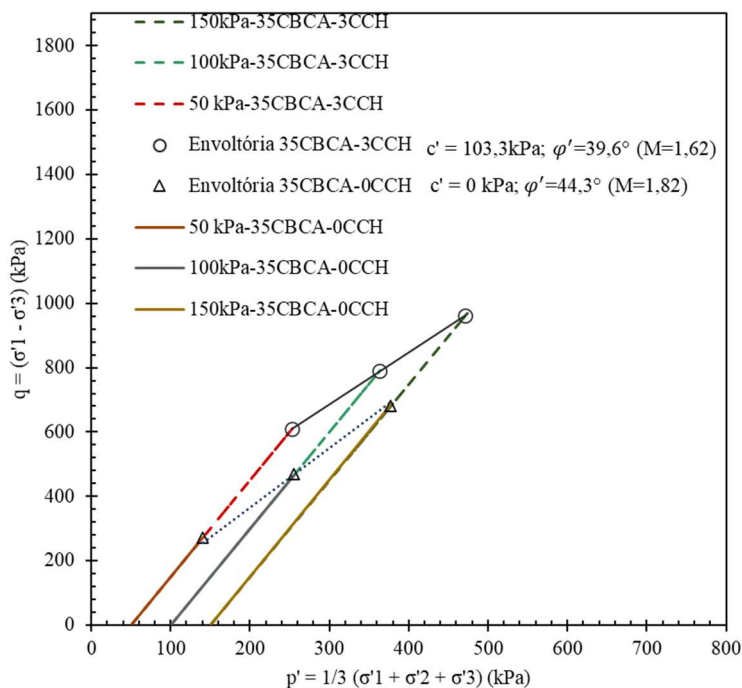
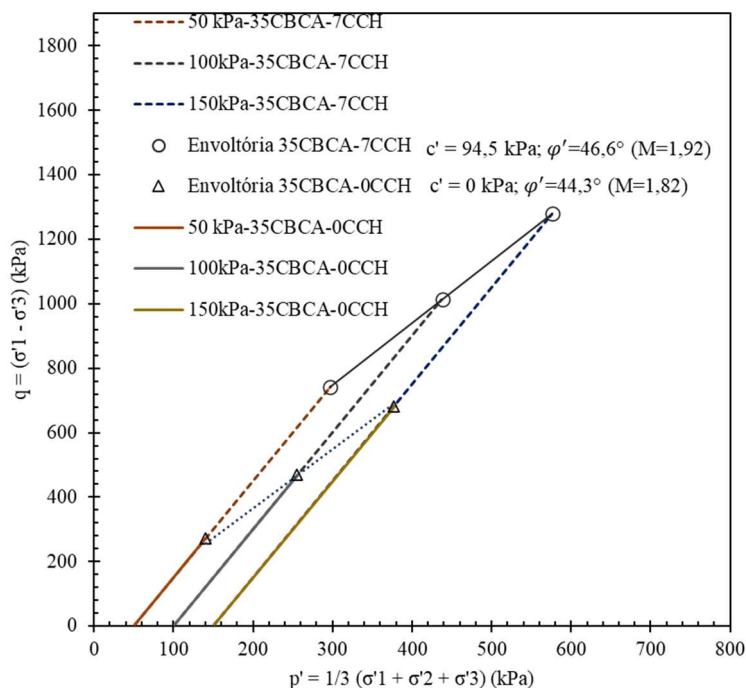


Figura 59. Envoltória de ruptura no plano p' versus q para amostra Solo-35CBCA-0CCH e Solo-35CBCA-7CCH no pico



Os resultados da coesão foram os seguintes valores: 103,3, 154,0 e 94,5 kPa, para as amostras com 3, 5 e 7% de CCH, respectivamente. Esses resultados mostram que entre o teor de 3 e 5% de CCH houve um aumento da coesão, no entanto, quando aumentado o teor de CCH

para 7%, esse parâmetro reduz, praticamente em igual magnitude. Essa variabilidade ocorre mesmo que, conforme observado na Figura 59, as amostras contendo 7% de CCH tenham apresentado maiores valores de tensão de pico. De modo semelhante ao discutido para o ângulo de atrito, as diferenças observadas nos valores de coesão podem ser atribuídas ao procedimento de ajuste da envoltória de ruptura. Isso ocorre porque a coesão foi determinada a partir do critério de resistência de Mohr-Coulomb, que assume uma envoltória linear no plano de tensões. Entretanto, é amplamente reconhecido que a envoltória de ruptura de solos e materiais cimentados apresenta comportamento não linear. Dessa forma, pequenas variações na posição dos pontos experimentais podem resultar em diferenças nos parâmetros de resistência estimados (Jia *et al.*, 2019).

Figura 60, Figura 61 e Figura 62 avaliam a envoltória do pós-pico das amostras com 5% de CCH, variando o teor de CBCA. Já as Figura 63 e Figura 64 (juntamente com a Figura 61) com a envoltória do pós-pico das amostras com 35CBCA, variando o teor de CCH. Em todos os casos são de amostras curadas por 28 dias, para grandes deformações (>15%), quando não há mais a presença de coesão devido à quebra da cimentação ($c' = 0$ kPa) e o solo deforma a um volume praticamente constante.

Figura 60. Envoltória de ruptura no plano p' versus q da mistura solo-25CBCA-5CCH no pico e no pós-pico

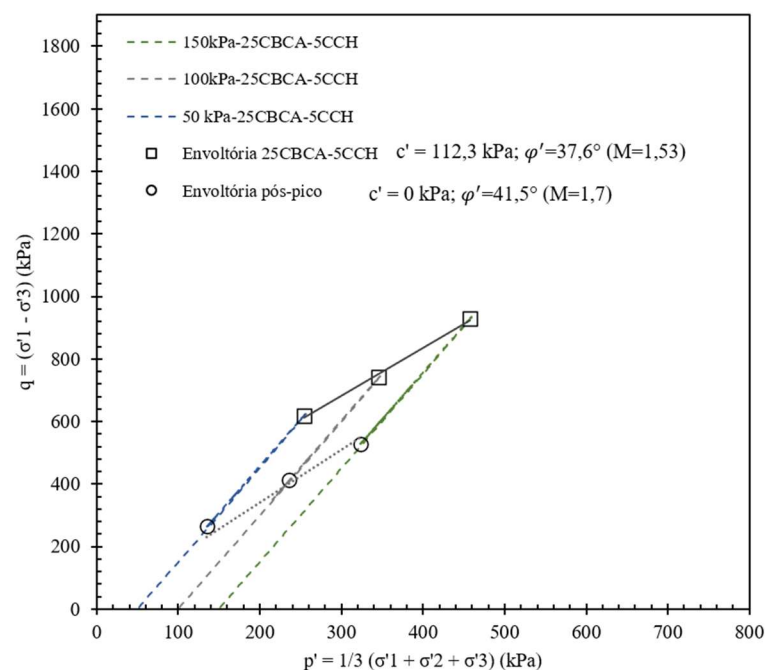


Figura 61. Envoltória de ruptura no plano p' versus q da mistura solo-35CBCA-5CCH no pico e no pós-pico

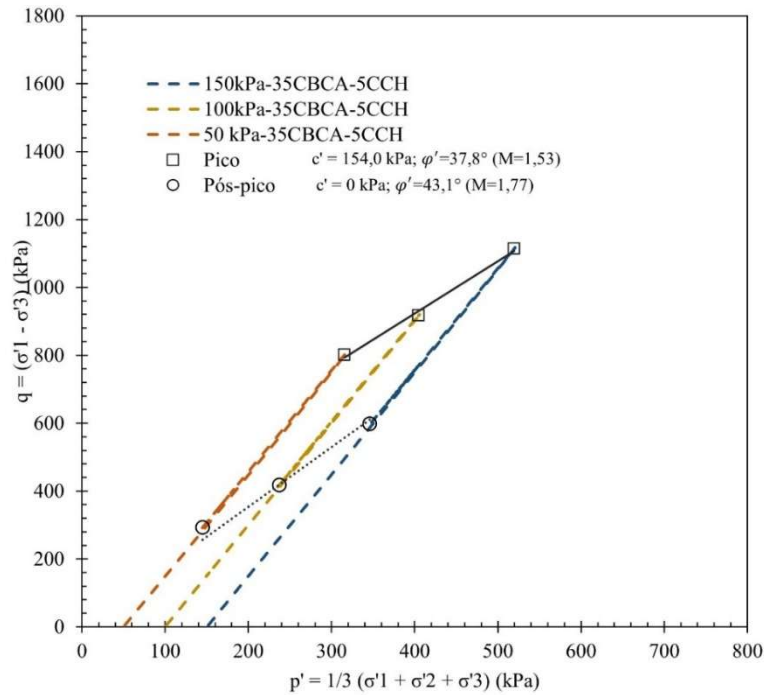


Figura 62. Envoltória de ruptura no plano p' versus q da mistura solo-45CBCA-5CCH no pico e no pós-pico

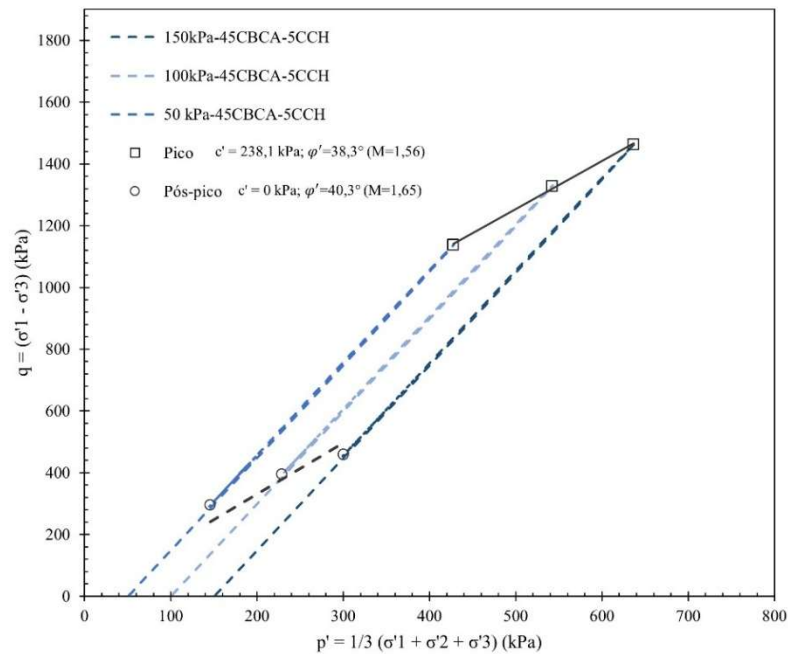


Figura 63. Envoltória de ruptura no plano p' versus q da mistura solo-35CBCA-3CCH no pico e no pós-pico

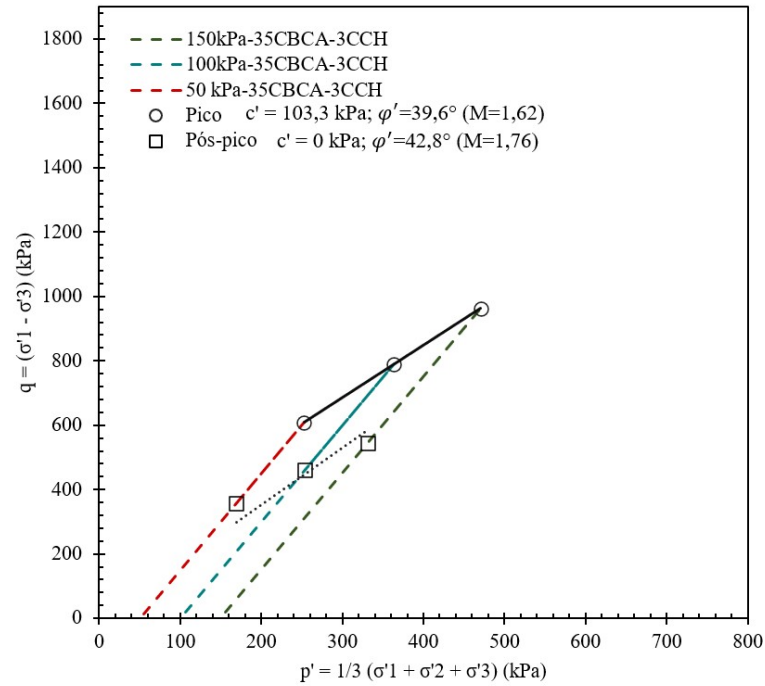
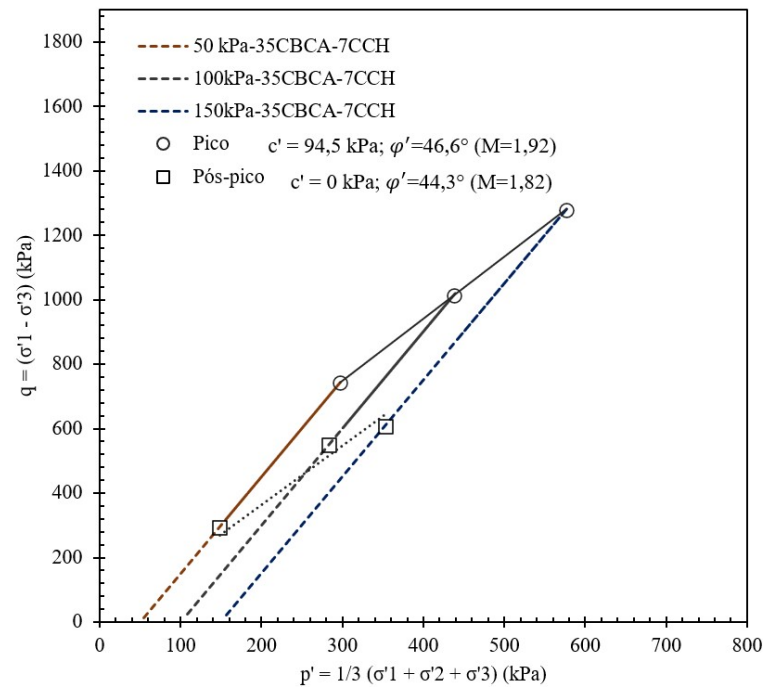


Figura 64. Envoltória de ruptura no plano p' versus q da mistura solo-35CBCA-7CCH no pico e no pós-pico



Ao se analisar o comportamento pós-pico das misturas avaliadas, observa-se que a mistura solo-25CBCA-5CCH (Figura 60) apresentou valor de $M = 1,70$. Para a mistura solo-35CBCA-5CCH (Figura 61), foi obtido $M = 1,77$, enquanto a mistura solo-45CBCA-5CCH

(Figura 62) apresentou $M = 1,65$. Considerando a influência do teor de CCH, verifica-se que a mistura solo–35CBCA–3CCH (Figura 63) apresentou $M = 1,76$, ao passo que a mistura solo–35CBCA–7CCH (Figura 64) apresentou $M = 1,82$. A comparação entre os parâmetros obtidos nas condições de pico e pós-pico indica que, com exceção da mistura solo–35CBCA–7CCH, os valores de (M) determinados no regime pós-pico foram superiores aos observados na condição de pico, resultando em maiores ângulos de atrito mobilizados. Esse comportamento sugere que, após a ruptura inicial da estrutura cimentada, ocorreu uma reorganização do esqueleto granular capaz de manter ou até mesmo intensificar os mecanismos friccionais mobilizados durante o cisalhamento.

Para todas as amostras no estado crítico, em comparação com o estado de pico, tende a haver uma certa alteração de comportamento devido à formação da banda de cisalhamento, impactando no respectivo φ_{pp}' . De modo que este apresenta valores da ordem do observado como φ_p ($\approx 44^\circ$) das amostras sem cimentação (Figura 55, Figura 56 e Figura 57), convergindo para o comportamento do esqueleto granular (Lade; Trads, 2014).

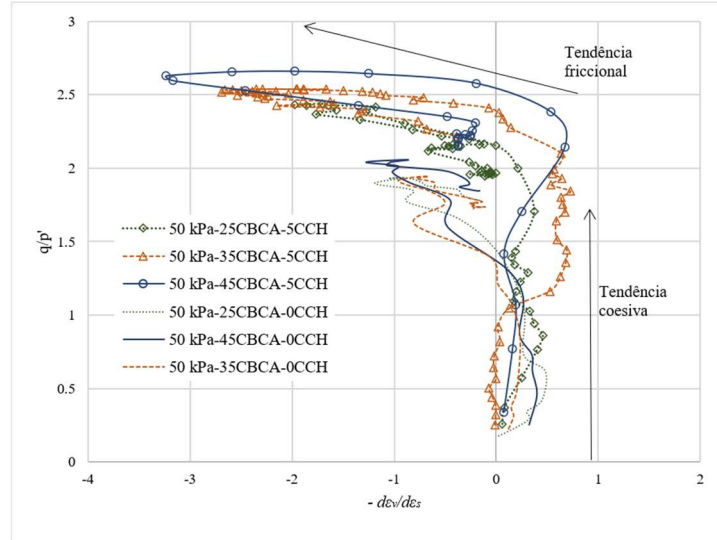
4.3.4. Comportamento na dilatância das misturas solo-CBCA-CCH

Para solos e geomateriais em estados críticos é fundamental a compreensão da dilatância, especialmente na descrição do comportamento de solos granulares cimentados (Bolton, 1986). O comportamento das misturas areia-CBCA e areia-CBCA-CCH, com relação ao grau de cimentação desenvolvida, é observado em resultados tensão-dilatância na Figura 65 e Figura 66. A Figura 65 apresenta o comportamento em função da variação do teor de CBCA, enquanto na Figura 66 analisa-se o efeito do teor de CCH. Para tanto, foi considerada a tensão mobilizada normalizada pela razão q/p' e a dilatância é dada pela razão da deformação volumétrica pela deformação axial ($d\varepsilon_v/d\varepsilon_s$).

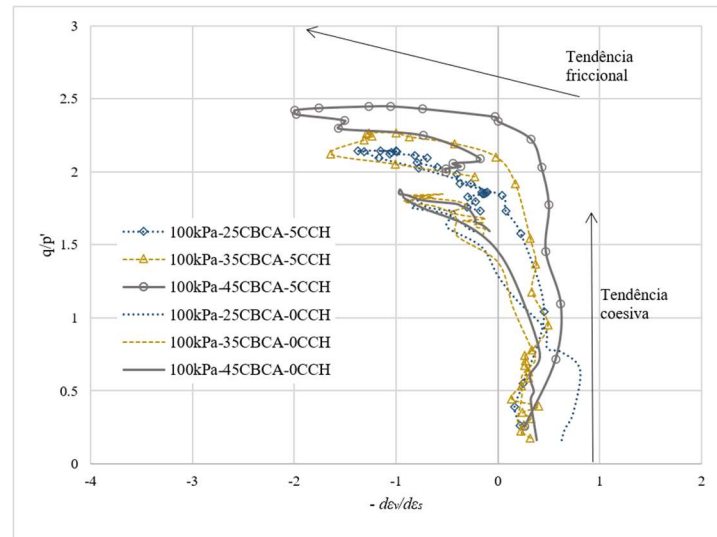
Na Figura 65 referente às misturas solo-CBCA-0CCH independente da tensão confinante, é observado que o material tende a ter comportamento puramente granular, em que a dilatância chega a zero para uma razão q/p' próxima a 1,5, valor próximo ao de M para a envoltória de ruptura. Este comportamento mostra que a substituição de CBCA em diferentes teores não afeta consideravelmente a estrutura de modo a mudar o comportamento na dilatância, como reportado por Wan; Guo, (2004) mesmo em substituição da ordem de 45% de CBCA.

Figura 65. Comportamento tensão-dilatância para a mistura solo-diferentes teores de CBCA-5%CCH, para as tensões de confinamento de (a) 50kPa, (b) 100 kPa e (c) 150kPa

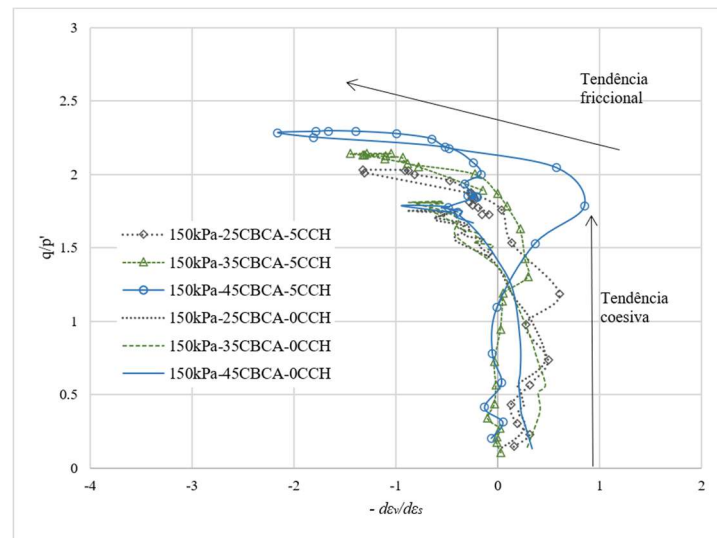
(a)



(b)



(c)



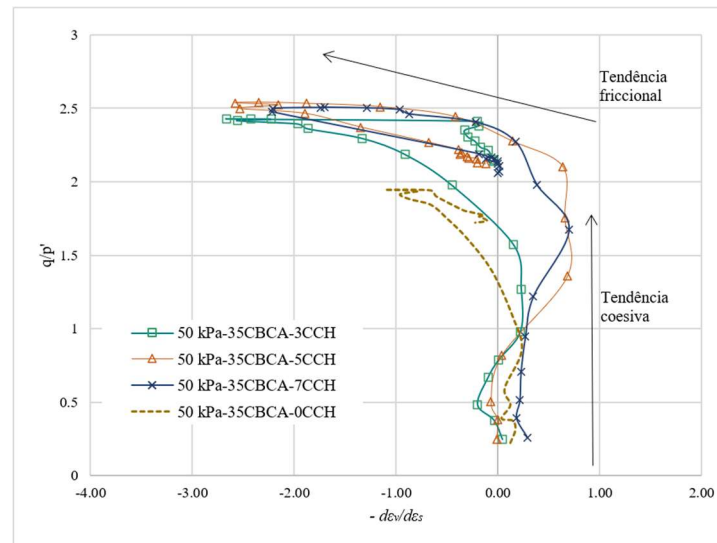
A Figura 65 mostra que devido à presença de maiores teores de CBCA na mistura e consequente formação de cimentação, é observado que a depender da tensão de confinamento é demandado um maior trabalho para a quebra da cimentação, isto é, uma maior razão q/p' independente da tensão de confinamento. Como observado na Figura 65 para menor tensão de confinamento (50kPa) a curva de dilatância atinge maiores valores de q/p' chegando a um ponto de inflexão maior que as demais tensões confinantes.

Os resultados apresentados nas Figura 65 e Figura 66, mostram um comportamento característico da forma que se apresentam as curvas, em que a curvatura para cima nos materiais não cimentados, e curvatura para baixo para os materiais cimentados (Jin; Li, 2025). Esse comportamento, segundo Jin e Li, (2025), considera o efeito combinado da energia de quebra de ligações e da energia de rearranjo.

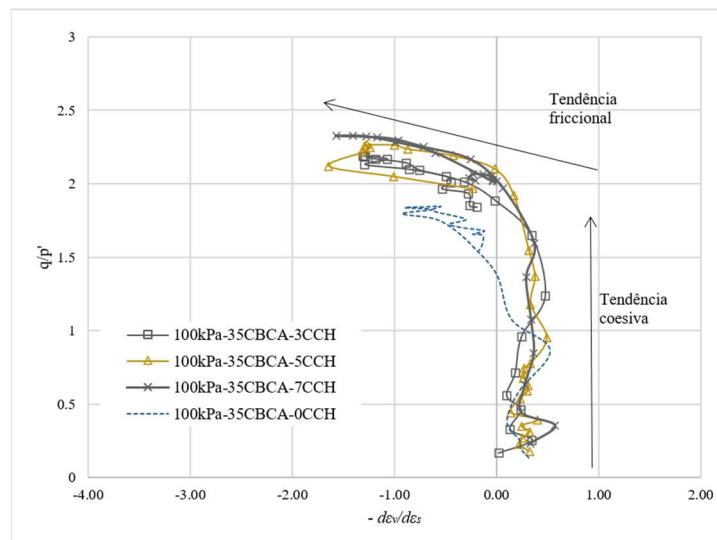
Outro aspecto observado nos resultados das Figura 65 e Figura 66 mostra que há uma mudança de comportamento do material, de friccional para coeso-friccional. Em que a tendência coesiva é observada quando a amostra está sendo comprimida e que a parte inicial das curvas, se verticaliza, representando assim o trabalho adicional requerido para a quebra das ligações cimentantes (Singh *et al.*, 2023).

Figura 66. Comportamento tensão-dilatância para a mistura solo-35 CBCA-diferentes teores de CCH, para as tensões de confinamento de (a) 50kPa, (b) 100 kPa e (c) 150kPa

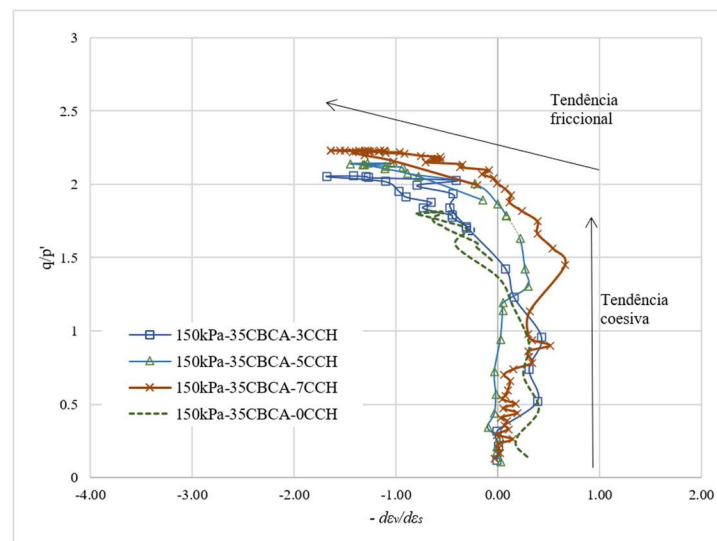
(a)



(b)



(c)



A Figura 66 mostra que a quantidade CCH também implica na variação de comportamento da mistura, em que o aumento de CCH tende a aumentar a tendência coesiva. Assim como observado para a variação do teor de CBCA, no entanto, a quebra da cimentação (dilatância igual a 0) ocorre em uma menor amplitude de q/p , o que mostra principalmente que para misturas com teores baixos de CCH ou de CBCA, 3 e 25% respectivamente, ocorre uma cimentação mais fraca, como já indicado nas seções anteriores.

Por fim, tanto o aumento do teor de CBCA quanto de CCH na mistura geram maiores de cimentação, com ênfase na quantidade de CBCA. Consequentemente misturas com maior quantidade de ambos os fatores tendem a demandar um maior trabalho para a quebra da cimentação. Assim como observado por Singh *et al.*, (2023) ao aumentar o teor de cimento Portland e por Azaiez *et al.*, (2021) ao aumentar o teor de cinza volante de carvão em areias.

4.3.5. Comportamento da rigidez das misturas solo-CBCA-CCH

A Figura 67 apresenta o comportamento do módulo cisalhante normalizado (G/p') separado em função das tensões de confinamento, com ênfase na avaliação do efeito da CBCA na rigidez. Para as misturas sem a presença de CCH variando o teor de CBCA entre elas, o comportamento é bem similar, independentemente da tensão confinante e do teor de CBCA, apresentando comportamento característico de uma areia compacta.

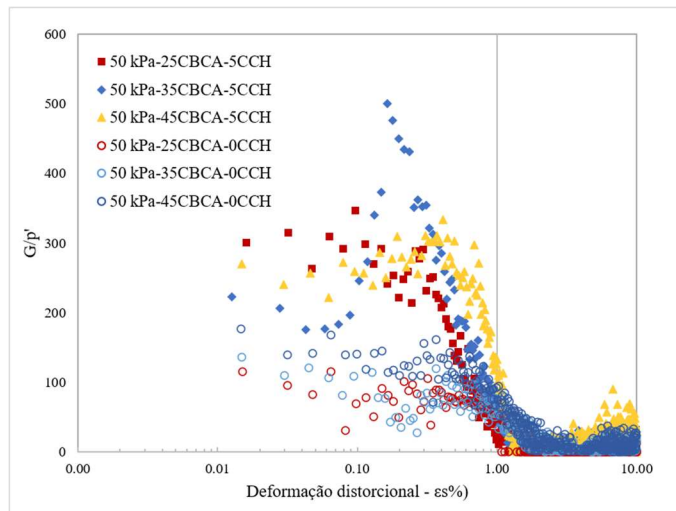
Quando se avalia o efeito do teor de CBCA, os resultados mostram que o processo de cimentação é traduzido em um maior módulo cisalhante normalizado e que é possível identificar o ponto em que se inicia a degradação da cimentação, dada pela inflexão da curva da linha de tendência dos pontos. De modo geral, os módulos cisalhantes normalizados tendem a atingir máximos valores especialmente para baixas tensões de confinamento, como observado nas Figura 67a.

Entretanto, conforme observado nas Figura 67b e Figura 67c, a mistura solo-45CBCA-5CCH apresenta reduzida influência da tensão confinante sobre sua resposta mecânica, evidenciando o papel predominante da cimentação na mobilização da resistência e da rigidez do material. Esse comportamento sugere que a estrutura cimentada desenvolvida na mistura é capaz de suportar parcela significativa das tensões aplicadas, reduzindo a dependência da resistência em relação ao confinamento externo.

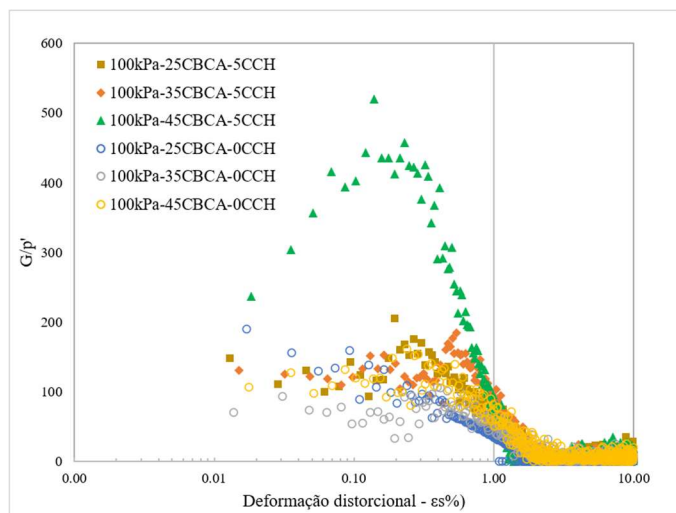
Por outro lado, a mistura solo-25CBCA-5CCH, que apresentou menor resistência mecânica e, conseqüentemente, menor grau de cimentação, exibiu comportamento distinto. Para tensões confinantes superiores a 100 kPa, observa-se uma resposta mais próxima daquela tipicamente verificada em areias compactas, nas quais a resistência e a rigidez são fortemente influenciadas pelo nível de tensão efetiva atuante. Esse resultado está de acordo com as observações de Hardin e Drnevich, (1972), que demonstraram que a rigidez de materiais granulares tende a aumentar com a tensão confinante efetiva, sendo essa dependência mais pronunciada em materiais com menor grau de cimentação ou estruturação.

Figura 67. Módulo cisalhante normalizado (G/p') das misturas solo-diferentes teores de CBCA-5CCH nas tensões confinantes de (a) 50kPa, (b) 100kPa e (c) 150 kPa.

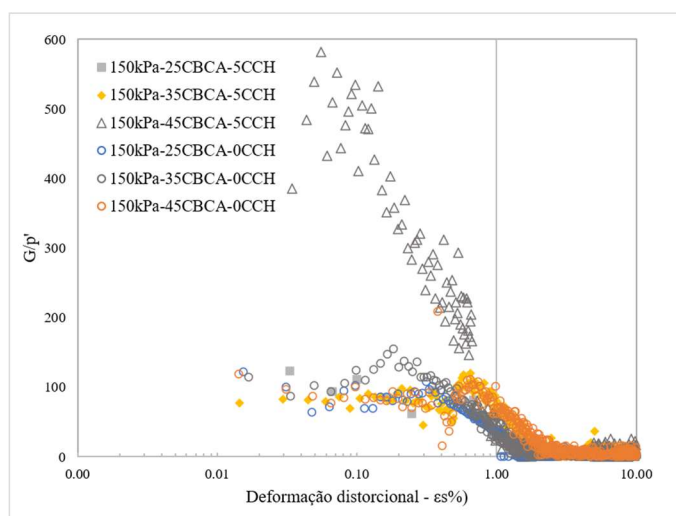
(a)



(b)



(c)

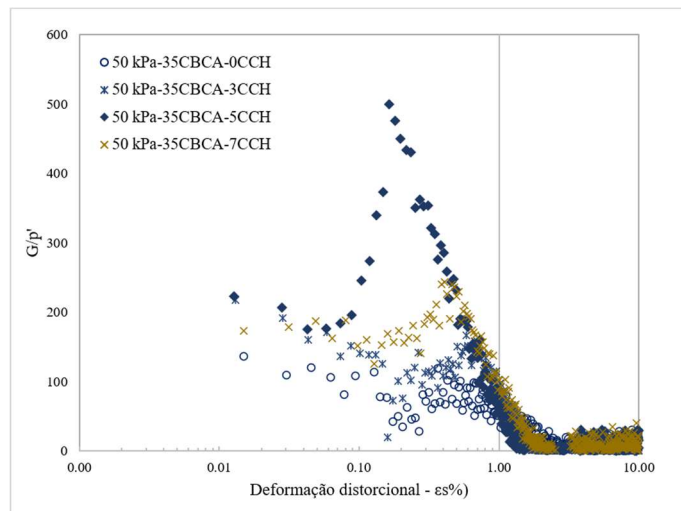


A Figura 68 apresenta a resposta da rigidez das misturas com diferentes teores de CCH. Na Figura 68a fica evidente que quanto maior o teor de CCH adicionado, maior a rigidez do material, no entanto, a rigidez máxima é atingida com 5% de CCH. O que pode indicar que para o teor de CBCA de 35% o teor ótimo de CCH seria da ordem de 5%, e com maiores adições de CCH não teria ganho significativo na rigidez do material. Ainda é possível observar que a mistura solo-35CBCA-5CCH tem quebra da cimentação a baixas deformações da ordem de 0,2%.

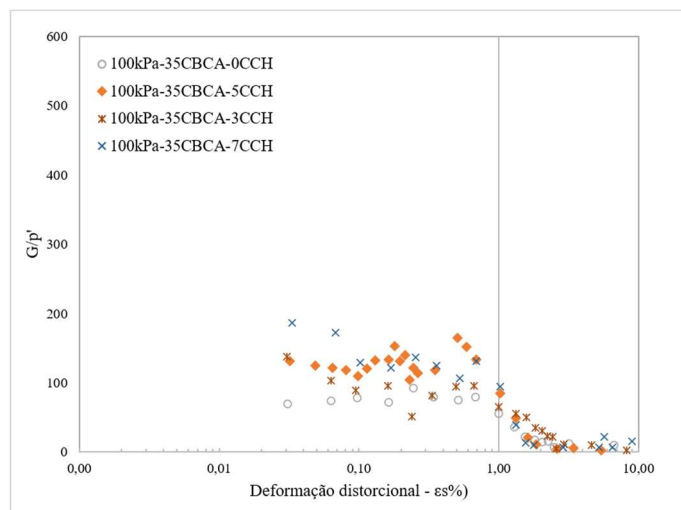
Com o aumento da tensão confinante para 100 kPa (Figura 68b) e 150 kPa (Figura 68c), é observado que um considerável decaimento de G/p' , aproximando-se do comportamento do material sem adição de CCH. Essa tendência, como evidenciado anteriormente, mostra que há uma fraca cimentação do material, o que condiz com a resposta mecânica observada nas seções anteriores. Em todos os casos evidencia-se que a degradação da rigidez ocorre para deformações distorcionais próximas a 1%, que é o esperado tanto para materiais granulares cimentados e não cimentados (Fu *et al.*, 2024; Porcino; Marcianò, 2017; Sharma; Fahey, 2004).

Figura 68. Módulo cisalhante normalizado (G/p') das misturas solo-35CBCA-diferentes teores de CCH nas tensões confinantes de (a) 50kPa, (b) 100kPa e (c) 150 kPa.

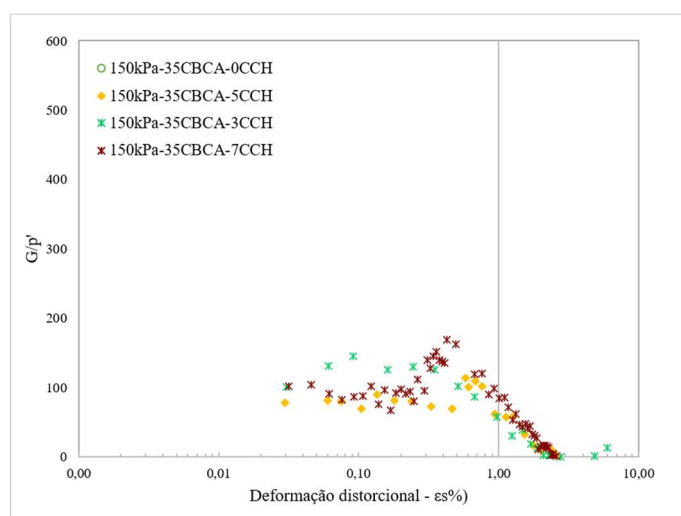
(a)



(b)



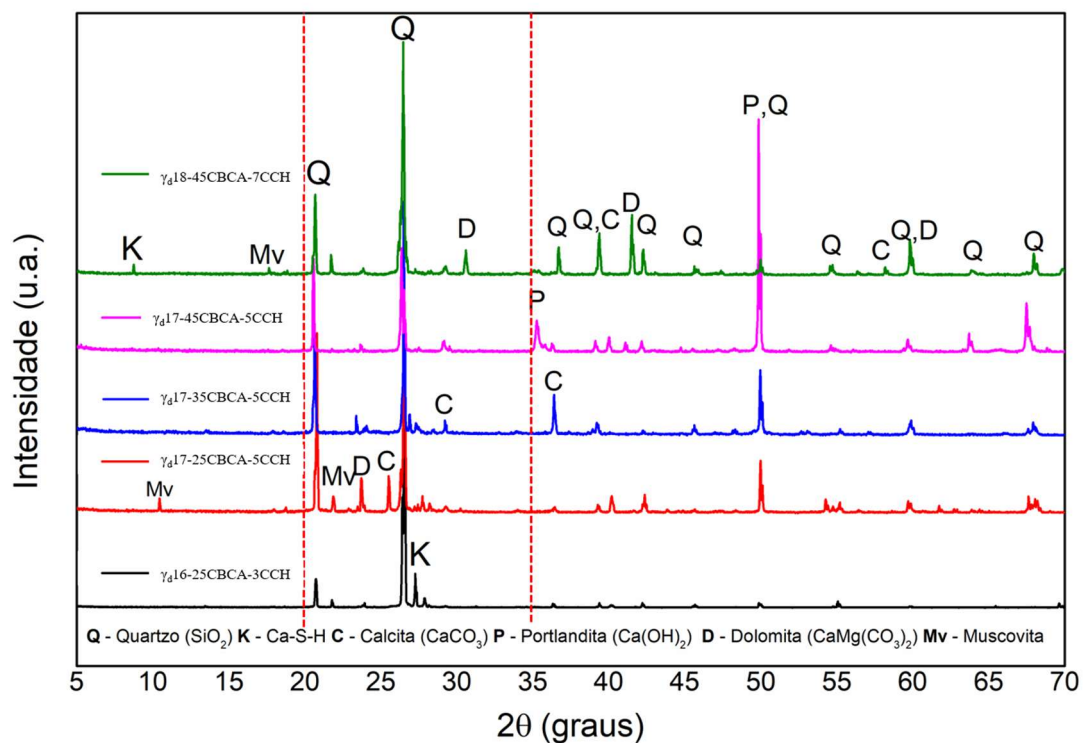
(c)



4.4. Avaliação da formação dos produtos formados na estabilização de solo com CBCA e CCH

A identificação da formação de géis de cimentação foi realizada com os ensaios de DRX e FTIR. A Figura 69 apresenta os resultados de difração de raios X de um conjunto de amostras selecionadas, nas quais foram avaliadas misturas com teor fixo de CCH de 5% e peso específico seco fixo de 17 kN/m³, considerando variável o teor de CBCA. Além de amostras que combinavam os máximos níveis de peso específico seco, teor de CBCA e teor de CCH ($\gamma_d18-45\text{CBCA}-7\text{CCH}$) e níveis mínimos destas mesmas variáveis ($\gamma_d16-25\text{CBCA}-3\text{CCH}$). Estas amostras foram obtidas após o ensaio de compressão simples. As análises desses resultados mostram que não se identifica facilmente uma fase semicristalina que indique a formação de géis de cimentação, comportamento similar também foi observado em solos tratados com cal Zhou *et al.*, (2021). De acordo com estes autores, a identificação dos produtos de hidratação por DRX se mostra limitada devido à natureza predominantemente amorfa ou semicristalina dessas fases, e quando se associa com materiais de alta cristalinidade (solo arenoso), mais difícil se torna essa identificação. Ainda é válido salientar que na maioria das amostras não se identificam picos de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), com exceção da mistura $\gamma_d17-45\text{CBCA}-5\text{CCH}$, o que mostra que houve um consumo desse material durante as reações pozolânicas que aconteceram durante o período de cura.

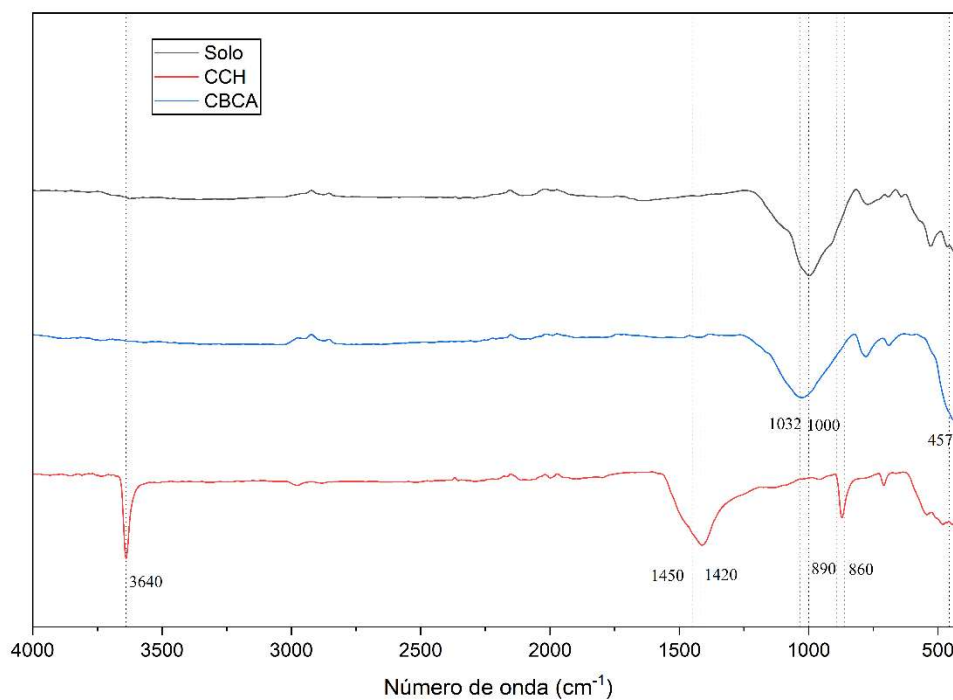
Figura 69. Resultados de difração de raios-X de misturas solo-CBCA-CCH



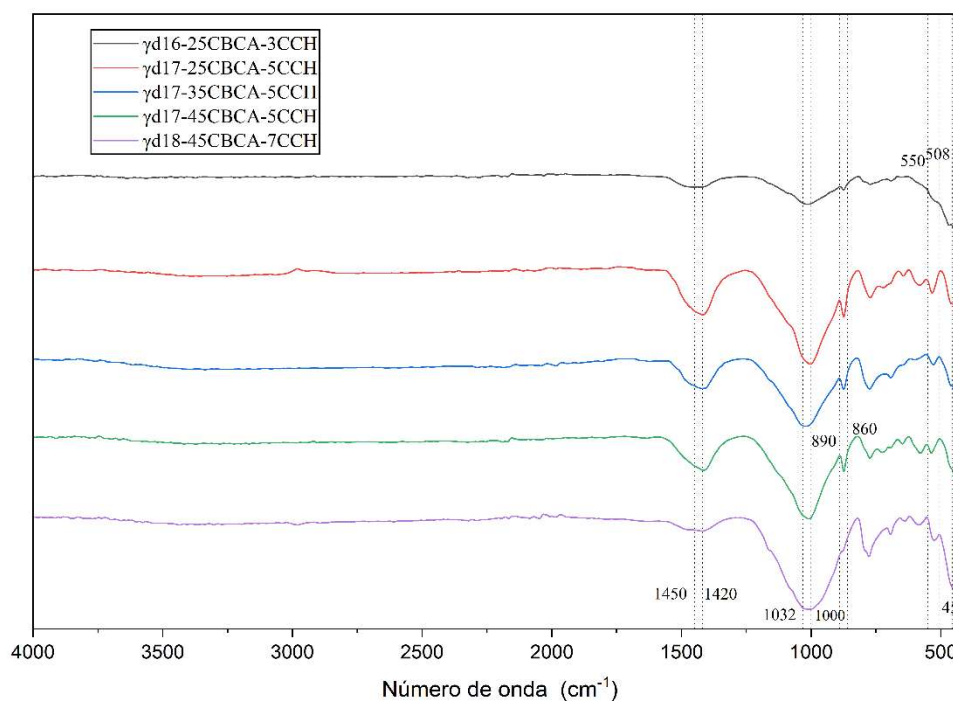
Na Figura 70 são apresentados os resultados do ensaio de FTIR realizado para as amostras selecionadas, essas amostras possuem as mesmas características das submetidas ao ensaio de DRX.

Figura 70. Espectro de FTIR(a) para os materiais solo, CBCA e CCH e (b) para as misturas solo-CBCA-CCH curadas por 28 dias

(a)



(b)



Os espectros de FTIR dos materiais solo, CBCA e CCH (Figura 70a) demonstraram a predominância de sílica no solo e na CBCA, evidenciada pelas bandas de estiramento das ligações Si–O–Si entre aproximadamente 1000 e 1032 cm^{-1} e pela deformação angular Si–O próxima de 457 cm^{-1} . Faz-se relevante destacar que a largura da banda que indica as ligações Si–O–Si indica que parte da sílica da CBCA possui baixo grau de ordenamento estrutural. Essa fração amorfa ou pouco cristalina é a porção com maior potencial de dissolução em meio alcalino e, conseqüentemente, de participação na reação pozolânica (Ouedraogo *et al.*, 2022). Entretanto, como a CBCA também contém quartzo residual, nem toda a intensidade observada nessa região deve ser associada à sílica reativa. Para a CCH, a banda estreita em 3640 cm^{-1} confirmou a presença de portlandita, enquanto as absorções próximas de 1450–1420 e 890–860 cm^{-1} indicaram a presença de calcita, oriunda de carbonatação parcial do material, comportamento similar observado por (Galván-Ruiz *et al.*, 2009).

Na Figura 70b são apresentados os espectros de FTIR das misturas após o período de cura. Nestes resultados foi possível observar uma banda de absorção intensa em aproximadamente 1000-1032 cm^{-1} . Essa região está associada às vibrações de estiramento das ligações Si–O–Si e Si–O–Al presentes na sílica amorfa da CBCA e nos produtos cimentantes formados durante a cura. Em sistemas estabilizados com cal, essa banda é frequentemente associada à formação de gel C-S-H e/ou C-A-S-H, resultantes da reação entre o Ca(OH)_2 proveniente da cal hidratada e a sílica proveniente da cinza (Vilasini; Thangasamy; Balu, 2025; Vilasini; Thangasamy, 2025).

Outra região de transmitância entre 508-550 cm^{-1} e o estiramento em 457 cm^{-1} , segundo Puertas *et al.*, (2011) e Puertas; Fernández-Jiménez; Blanco-Varela, (2004) são regiões onde identifica-se formação de géis C-S-H e C-A-S-H. Além disso, foi possível observar a ausência da banda característica da portlandita (3640 cm^{-1}) evidenciando o consumo desse material durante as reações pozolânicas.

Outro ponto observado é que na faixa de transmitância de 1000–1050 cm^{-1} , na mistura com maior peso específico seco, maior teor de CBCA e maior teor de CCH ($\gamma_{d18-45}\text{CBCA-7CCH}$), foram identificados um maior estiramento e um maior alargamento, o que indica um maior presença de géis de CSH na mistura (García Lodeiro *et al.*, 2010). No sentido oposto, a amostra avaliada com menor peso específico seco, menor teor de CBCA e menor teor de CCH ($\gamma_{d16-25}\text{CBCA-3CCH}$) obteve menor estiramento. Esses resultados mostram que há uma maior formação de géis de cimentação nas amostras mais densas e com maior teor de fração aglomerante (CBCA+CCH), o que corrobora as análises geomecânicas observadas

anteriormente. Amostras com composições intermediárias de peso específico, teor de CCH e teor de CBCA, obtiveram também nível de transmitância intermediário, com relação aos outros exemplos anteriormente discutidos.

Por fim, as bandas observadas em aproximadamente $1420\text{--}1450\text{ cm}^{-1}$, $860\text{--}890\text{ cm}^{-1}$ são características dos grupos carbonato (CO_3^{2-}), indicando a presença de calcita (Vicent; Criado; García-Ten, 2019). A formação dessa fase pode ocorrer tanto pela carbonatação parcial da CCH residual quanto pela precipitação de carbonatos durante o período de cura. A intensidade dessas bandas sugere que parte do hidróxido de cálcio disponível foi convertida em carbonato de cálcio.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo a respeito do comportamento mecânico de um solo arenoso estabilizado com cinza de fundo de biomassa de cana-de-açúcar (CBCA) e cal de concha de marisco hidratada (CCH), pode-se concluir que:

- foi possível validar a produção de uma cal calcítica a partir de conchas de mariscos trituradas, tanto na forma hidratada (CCH) quanto na forma virgem (CCV). As caracterizações químicas, físicas, morfológicas e térmicas demonstraram que ambas apresentam propriedades compatíveis com cales calcíticas convencionais empregadas na estabilização de solos. O processo de produção adotado atendeu aos requisitos estabelecidos pela ASTM C977 quanto à granulometria, temperatura de reação e teor de óxido de cálcio. Em relação ao teor de dióxido de carbono (CO_2), apenas a CCH apresentou valor inferior ao limite de 5% estabelecido pela norma, enquanto a CCV apresentou teor de 12,23%, evidenciando sua elevada suscetibilidade à recarbonação quando exposta à atmosfera.
- Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples (q_u) demonstraram que o teor de CBCA, o teor de CCH e o peso específico seco influenciam significativamente a resistência mecânica das misturas. A análise de variância (ANOVA) indicou que o teor de CBCA foi a variável de maior influência sobre a resistência à compressão simples, seguido pelo teor de CCH e peso específico seco. O planejamento experimental baseado no Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) evidenciou a presença de curvatura na superfície de resposta, associada principalmente aos efeitos do teor de CBCA e do peso específico seco, confirmando a necessidade da utilização de um modelo de segunda ordem para a adequada representação do fenômeno. O modelo obtido teve ajuste da ordem de $R^2=0,96$.
- A interpretação dos resultados sob a perspectiva dos índices de dosagem mostrou que o índice porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv}^b) não foi capaz de unificar os resultados para os diferentes teores de CBCA avaliados. A análise dos dados permitiu determinar um expoente de minoração da influência volumétrica da cal, $b=0,28$. Quando os resultados foram analisados em função do índice porosidade/teor volumétrico de aglomerante (η/B_{iv}), obteve-se uma curva única de dosagem com coeficiente de determinação de aproximadamente 0,75. Contudo, considerando a maior influência estatística da CBCA sobre a resistência mecânica, foi proposto o novo índice $\eta/(L_{iv}^{0,28}$

$*A_{iv}^y$), adotando-se ($y=2,5b$), o qual permitiu unificar os resultados em uma única curva de dosagem com coeficiente de determinação igual a 0,90. Este novo índice representa um avanço na interpretação dos resultados, organizando a previsibilidade de q_u por meio de um índice unificado que considera a ponderação dos efeitos das variáveis analisadas.

- Os ensaios triaxiais evidenciaram que o aumento dos teores de CBCA e de CCH promoveu incrementos expressivos na resistência de pico das misturas. De modo geral, os maiores ganhos de resistência foram observados com o aumento do teor de CBCA, refletindo diretamente no aumento da coesão do material. Em contrapartida, os valores de ângulo de atrito apresentaram variações pouco significativas, indicando que a incorporação de CBCA não alterou substancialmente os mecanismos de resistência friccional. Esse comportamento foi atribuído à granulometria da cinza, que apresenta fração significativa de partículas equivalentes à areia fina, contribuindo para o preenchimento dos vazios sem modificar de forma relevante o esqueleto granular responsável pela resistência por atrito. As análises de dilatância e módulo cisalhante normalizado (G/p') indicaram comportamento compatível com materiais granulares cimentados. As misturas contendo maiores teores de CBCA e CCH apresentaram maior dilatância, e maior rigidez. Estas observações evidenciaram o efeito da cimentação na estrutura do material, uma vez que, foi necessária uma maior energia, maiores valores de q/p' , para a degradação da cimentação. Adicionalmente, verificou-se que as misturas com maiores níveis de cimentação apresentaram menor dependência do estado de tensões, particularmente aquelas contendo 45% de CBCA, que exibiram comportamento mais rígido e menos sensível à variação da tensão confinante.
- Os resultados de DRX e FTIR evidenciaram a formação de produtos cimentantes nas misturas avaliadas, independentemente das combinações de peso específico seco, teor de CBCA e teor de CCH. Em particular, as análises de FTIR permitiram identificar de forma mais evidente o aumento da intensidade das bandas associadas às ligações Si–O–Si, corroborando a formação de géis cimentantes e indicando que o desenvolvimento desses produtos foi influenciado pelas variáveis independentes investigadas.

Por fim, o novo ligante à base de cinza de fundo de bagaço de cana-de-açúcar e cal de conchas de marisco hidratada (CCH) foi validado em termos de agente cimentante, e com adequada dosagem pode-se obter consideráveis ganhos na capacidade geomecânica do solo avaliado. Além disso, essas análises provêm que este geomaterial pode ser aplicado em uma

gama de infraestruturas geotécnicas, com um viés de reuso de resíduos agroindustriais, que podem melhorar os índices de sustentabilidade das soluções adotadas.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a estabilidade à recarbonatação da cal de concha na forma viva e hidratada, fornecendo parâmetros mais adequados em termos de armazenamento.
- Avaliar por meio de análise de ciclo de vida a sustentabilidade da técnica de estabilização com CBCA e CCH em comparado com o uso de cimento Portland na melhoria de solos
- Avalia o CCH como único aglomerante aplicado a solos argilosos e/ou expansivos
- Avaliar comportamento de misturas solo-CBCA-CCH sujeitas a diferentes trajetórias de tensões
- Avaliar a lixiviação de metais das misturas solo/CBCA/CCH

6. REFERÊNCIAS

- ABNT – BRAZILIAN ASSOCIATION OF TECHNICAL STANDARDS. ABNT Catalogo. **Resíduos sólidos – Classificação - NBR 10004**. ABNT Catalogo, , 2004. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=V1BmejNuejBUdy9maDNQa2hZemsxU0pm dFF%200VDVndmw=>. Acesso em: 3 out. 2024.
- ACOSTA, C. J. M. **Melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de vidro e cal de casca de ovo**. 2021. Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/229465>. Acesso em: 18 nov. 2024.
- AHSAN, M. H. *et al.* Mechanical behavior of high-strength concrete incorporating seashell powder at elevated temperatures. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 50, p. 104226, 2022.
- AIBAN, S. A. A study of sand stabilization in eastern Saudi Arabia. [s. l.], 1994.
- AJORLOO, A. M.; MROUEH, H.; LANCELOT, L. Experimental Investigation of Cement Treated Sand Behavior Under Triaxial Test. **Geotechnical and Geological Engineering**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 129–143, 2012.
- ALAVÉZ-RAMÍREZ, R. *et al.* The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 34, p. 296–305, 2012.
- ALI, M. B.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. S. A review on emission analysis in cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 15, n. 5, p. 2252–2261, 2011.
- ALIU, A. O. *et al.* Evaluation of pozzolanic reactivity of maize straw ash as a binder supplement in concrete. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 18, p. e01790, 2023.
- ALMEIDA, F. C. R. *et al.* Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 82, p. 31–38, 2015.
- ALVARADO, C.; ALVARADO-QUINTANA, H. Thermal Decomposition of Seashell Powder. *In: 20TH LACCEI INTERNATIONAL MULTI-CONFERENCE FOR ENGINEERING, EDUCATION AND TECHNOLOGY: “EDUCATION, RESEARCH AND LEADERSHIP IN POST-PANDEMIC ENGINEERING: RESILIENT, INCLUSIVE AND SUSTAINABLE ACTIONS”*, 2022. **Proceedings of the 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology: “Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions”**. [S. l.]: Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2022. Disponível em: <https://laccei.org/LACCEI2022-BocaRaton/meta/FP545.html>. Acesso em: 9 out. 2024.
- ALVARENGA, R. A. F. D. *et al.* The recycling of oyster shells: An environmental analysis using Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 106, p. 102–109, 2012.

AMINI, Y.; HAMIDI, A. Triaxial shear behavior of a cement-treated sand–gravel mixture. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 455–465, 2014.

ANBURUVEL, A. *et al.* Characteristic evaluation of geopolymer based lateritic soil stabilization enriched with eggshell ash and rice husk ash for road construction: An experimental investigation. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 387, p. 131659, 2023.

ANDREÃO, P. V. *et al.* Beneficiation of Sugarcane Bagasse Ash: Pozzolanic Activity and Leaching Behavior. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 11, n. 8, p. 4393–4402, 2020.

ANDREÃO, P. V. *et al.* Sustainable use of sugarcane bagasse ash in cement-based materials. **Green Materials**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 61–70, 2019.

ANTUNES, V.; SIMÃO, N.; FREIRE, A. C. A Soil-Cement Formulation for Road Pavement Base and Sub Base Layers: a Case Study. **Transportation Infrastructure Geotechnology**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 126–141, 2017.

ARAÚJO, L. M. S. de. **A atividade de mariscagem na comunidade pesqueira de Chaval, Ceará, Nordeste do Brasil**. 2020. - Universidade Federal do Ceará, [s. l.], 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/54432>. Acesso em: 18 nov. 2024.

ARAÚJO, M. T. D. *et al.* Environmental, economic, and social impacts of sugar cane bagasse and eggshell wastes for soil stabilization. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 31, n. 10, p. 15973–15985, 2024.

ARAÚJO, M. T. D. *et al.* Mechanical and Environmental Performance of Eggshell Lime for Expansive Soils Improvement. **Transportation Geotechnics**, [s. l.], v. 31, p. 100681, 2021.

ARAÚJO, M. T. de *et al.* Strength, Mineralogy, Microstructure, and Statistical Analysis of Alkali-Activated Sugarcane Bagasse Ash–Eggshell Lime Pastes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 35, n. 6, p. 04023107, 2023.

ARCHIBONG, G. A. *et al.* A Review of the Principles and Methods of Soil Stabilization. **International Journal of Advanced Academic Research**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 89–115, 2020.

ASTM. ASTM. **ASTM C977-18: Standard Specification for Quicklime and Hydrated Lime for Soil Stabilization**. , 2018. Disponível em: <https://www.astm.org/c0977-18.html>. Acesso em: 4 nov. 2024.

ASTM. ASTM. **Practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System) - ASTM D2487**. ASTM International, , 2017. Disponível em: <https://www.astm.org/d2487-17.html>. Acesso em: 3 out. 2024.

ASTM. **Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil-ASTM D2166**. ASTM International, , 2024. Disponível em: https://store.astm.org/d2166_d2166m-24.html. Acesso em: 13 jul. 2026.

ASTM. **Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization.** , 2019. Disponível em: <https://www.astm.org/d6276-19.html>. Acesso em: 20 nov. 2024.

ASTM. **Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))- ASTM D698.** ASTM International, , 2021. Disponível em: <https://www.astm.org/d0698-12r21.html>. Acesso em: 3 out. 2024.

AZAIEZ, H. *et al.* Shear characteristics of fly ash improved sand as an embankment material for road infrastructure purpose. **Innovative Infrastructure Solutions**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 148, 2021.

BAGHERI, Y.; AHMAD, F.; ISMAIL, M. A. M. Strength and mechanical behavior of soil–cement–lime–rice husk ash (soil–CLR) mixture. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 47, n. 1–2, p. 55–66, 2014.

BAHURUDEEN, A.; SANTHANAM, M. Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 56, p. 32–45, 2015.

BALDOVINO, J. D. J. A. *et al.* Optimizing the evolution of strength for lime-stabilized rammed soil. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 882–891, 2019.

BALDOVINO, J. D. J. A. *et al.* Variáveis que influenciam na resistência à tração e à compressão simples de dois solos sedimentares estabilizados com cimento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. e-12615, 2020.

BALDOVINO, J. D. J. A.; DOS SANTOS IZZO, R. L.; EKINCI, A. Strength, durability, and microstructure of lime production residue glass powder binder-based geomaterial. **Acta Geotechnica**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 1593–1606, 2023.

BALDOVINO, J. de J.; EKINCI, A.; BRUSCHI, G. J. Novel Porosity-Water/Binder Index for Strength Prediction of Artificially Cemented Soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 36, n. 2, p. 04023585, 2024.

BALDOVINO, J. A.; LA ROSA, Y. E. N. de la; CALABOKIS, O. P. Analysis of Novel Porosity–Water-to-Binder Index for Prediction of Strength, Stiffness and Durability for Cemented Soils. **Materials**, [s. l.], v. 16, n. 19, p. 6354, 2023.

BALDOVINO, J. de J. A.; ROSA, Y. E. N. de la; CALABOKIS, O. P. Effect of Porosity/Binder Index on Strength, Stiffness and Microstructure of Cemented Clay: The Impact of Sustainable Development Geomaterials. **Materials**, [s. l.], v. 17, n. 921, 2024.

BARCELO, L. *et al.* Cement and carbon emissions. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 47, n. 6, p. 1055–1065, 2014.

BARMAN, D.; DASH, S. K. Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 1319–1342, 2022.

BECK, K. *et al.* On the use of eggshell lime and tuffeau powder to formulate an appropriate mortar for restoration purposes. **Geological Society, London, Special Publications**, [s. l.], v. 331, n. 1, p. 137–145, 2010.

BECKETT, C.; CIANCIO, D. Effect of compaction water content on the strength of cement-stabilized rammed earth materials. **Canadian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 51, n. 5, p. 583–590, 2014.

BEHAK, L.; MUSSO, M. Performance of Low-Volume Roads with Wearing Course of Silty Sand Modified with Rice Husk Ash and Lime. **Transportation Research Procedia**, [s. l.], v. 18, p. 93–99, 2016.

BENSAIFI, E. *et al.* Influence of crushed granulated blast furnace slag and calcined eggshell waste on mechanical properties of a compacted marl. **Transportation Geotechnics**, [s. l.], v. 20, p. 100244, 2019.

BHATTACHARJA, S.; BHATTY, J. I.; TODRES, H. A. Stabilization of clay soils by Portland cement or lime—a critical review of literature. **PCA R&D Serial**, [s. l.], v. 60, n. 1, p. 124–33, 2003.

BLOIS, L.; LAY-EKUAKILLE, A. Environmental impacts from atmospheric emission of heavy metals: A case study of a cement plant. **Measurement: Sensors**, [s. l.], v. 18, p. 100313, 2021.

BÖKE, H. *et al.* Characteristics of lime produced from limestone containing diatoms. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 22, n. 5, p. 866–874, 2008.

BOLTON, M. D. The strength and dilatancy of sands. **Géotechnique**, [s. l.], v. 36, n. 1, p. 65–78, 1986.

BONNARD, M.; BOURY, B.; PARROT, I. Key Insights, Tools, and Future Prospects on Oyster Shell End-of-Life: A Critical Analysis of Sustainable Solutions. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 54, n. 1, p. 26–38, 2020.

BROOKS, R. M. Soil stabilization with Flyash and Corn Waste Ash – Improvements in Engineering Characteristics. [s. l.], v. 14, n. 4, 2019.

BRUSCHI, G. J. *et al.* Green Stabilization of Bauxite Tailings: Mechanical Study on Alkali-Activated Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 33, n. 11, p. 06021007, 2021.

BRUSCHI, G. J. *et al.* Leaching assessment of cemented bauxite tailings through wetting and drying cycles of durability test. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 29, n. 39, p. 59247–59262, 2022.

BURRIS, L. E. *et al.* Alternative Cementitious Materials: Challenges And Opportunities. **American Concrete Institute, ACI Special Publication**, [s. l.], p. 1–10, 2015.

CABRERA, M. *et al.* Characterisation and technical feasibility of using biomass bottom ash for civil infrastructures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 58, p. 234–244, 2014.

CABRERA, M. *et al.* Feasibility of using olive biomass bottom ash in the sub-bases of roads and rural paths. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 181, p. 266–275, 2018.

CALDAS, A. A. Uso de conchas de marisco na fabricação de blocos vazados de concreto simples para alvenaria. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [s. l.], v. 9, n. 5, p. 248–257, 2018.

CAMARGO, M.; ESTUPINAN, R. A. O RENASCER DO MARISCO: UM RELATO DE EXPERIÊNCIA. **Revista Práxis: saberes da extensão**, [s. l.], v. 10, n. 21, p. 64, 2022.

CESCON, A. P.; BRUSCHI, G. J.; KORF, E. P. Urban Mining of Bivalve Shell Waste as a Sustainable Alternative to Limestone Exploitation: A Review on Alkali-Activated Cements and Mortars. **Mining**, [s. l.], v. 5, n. 4, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-6489/5/4/69>. Acesso em: 15 abr. 2026.

CHANG, T.-S.; WOODS, R. D. Effect of Particle Contact Bond on Shear Modulus. **Journal of Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 118, n. 8, p. 1216–1233, 1992.

CHINDAPRASIRT, P. *et al.* Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. **Waste Management**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 539–543, 2009.

CHOI, S. H. *et al.* Toward transformation of bivalve shell wastes into high value-added and sustainable products in South Korea: A review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, [s. l.], v. 129, p. 38–52, 2024.

CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 23, n. 11, p. 3352–3358, 2009.

CLOUGH, G. W. *et al.* Cemented Sands under Static Loading. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, [s. l.], v. 107, n. 6, p. 799–817, 1981.

CONAB. **Produção de cana-de-açúcar na safra 2025/26 é atualizada para 668,8 milhões de toneladas — Companhia Nacional de Abastecimento**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-cana-de-acucar-na-safra-2025-26-e-atualizada-para-668-8-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 3 dez. 2025.

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

CONSOLI, N. C. *et al.* Assessing Failure Envelopes of Soil–Fly Ash–Lime Blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 27, n. 5, p. 04014174, 2015a.

CONSOLI, N. C. *et al.* Assessing Failure Envelopes of Soil–Fly Ash–Lime Blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 27, n. 5, p. 04014174, 2015b.

CONSOLI, N. C. *et al.* Behavior of Compacted Soil-Fly Ash-Carbide Lime Mixtures. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 127, n. 9, p. 774–782, 2001.

CONSOLI, N. C. *et al.* Circular-Plate Load Tests on Bounded Cemented Layers above Weak Cohesive-Frictional Soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 145, n. 10, p. 06019011, 2019a.

CONSOLI, N. C. *et al.* Coal Bottom Ash as a Geomaterial: Influence of Particle Morphology on the Behavior of Granular Materials. **Soils and Foundations**, [s. l.], v. 47, n. 2, p. 361–373, 2007a.

CONSOLI, N. C. *et al.* Control factors for the long term compressive strength of lime treated sandy clay soil. **Transportation Geotechnics**, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 129–136, 2014.

CONSOLI, N. C. *et al.* Durability, Strength, and Stiffness of Green Stabilized Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 144, n. 9, p. 04018057, 2018.

CONSOLI, N. C. *et al.* Eggshell Produced Limes: Innovative Materials for Soil Stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 32, n. 11, p. 06020018, 2020.

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

CONSOLI, D. N. C. Increasing Density and Cement Content in Expansive Soils Stabilization: Conflicting or Complementary Procedures for Reducing Swelling?. **Can. Geotech. J.**, [s. l.],

CONSOLI, N. C. *et al.* Influence of Molding Moisture Content and Porosity/Cement Index on Stiffness, Strength, and Failure Envelopes of Artificially Cemented Fine-Grained Soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 29, n. 5, p. 04016277, 2017.

CONSOLI, N. C. *et al.* Key parameters dictating strength of lime/cement-treated soils. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 162, n. 2, p. 111–118, 2009.

CONSOLI, N. C. *et al.* Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 133, n. 2, p. 197–205, 2007b.

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

CONSOLI, N. C. *et al.* Key parameters for tensile and compressive strength of silt–lime mixtures. **Géotechnique Letters**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 81–85, 2012.

CONSOLI, N. C. *et al.* Loading tests on compacted soil, bottom-ash and lime layers. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 161, n. 1, p. 29–38, 2008.

CONSOLI, N. C. *et al.* Parameters Controlling Tensile and Compressive Strength of Artificially Cemented Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 136, n. 5, p. 759–763, 2010.

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

CONSOLI, N. C.; DA ROCHA, C. G.; SILVANI, C. Devising dosages for soil–fly ash–lime blends based on tensile strength controlling equations. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 55, p. 238–245, 2014.

CONSOLI, N. C.; GRAVINA DA ROCHA, C.; SILVANI, C. Effect of Curing Temperature on the Strength of Sand, Coal Fly Ash, and Lime Blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 26, n. 8, p. 06014015, 2014.

CONSOLI, N. C.; LOPES JÚNIOR, L. da S.; HEINECK, K. S. Key Parameters for the Strength Control of Lime Stabilized Soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 21, n. 5, p. 210–216, 2009.

CONSOLI, N. C.; ROSA, A. D.; SALDANHA, R. B. Variables Governing Strength of Compacted Soil–Fly Ash–Lime Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 432–440, 2011.

CONSOLI, N. C.; SALDANHA, R. B.; SCHEUERMANN FILHO, H. C. Short and Long-Term Effect of Sodium Chloride on Strength and Durability of Coal Fly Ash Stabilised with Carbide Lime. **Short and Long-Term Effect of Sodium Chloride on Strength and Durability of Coal Fly Ash Stabilised with Carbide Lime**, [s. l.], v. 56, n. 12, 2019.

CORDEIRO, G. C. *et al.* Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 30, n. 5, p. 410–418, 2008.

CORDEIRO, G. C.; BARROSO, T. R.; TOLEDO FILHO, R. D. Enhancement the Properties of Sugar Cane Bagasse Ash with High Carbon Content by a Controlled Re-calcination Process. **KSCE Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 1250–1257, 2018.

CORDEIRO, G. C.; LINHARES, B. D. F. F.; LEMOS, M. N. Production of a highly pozzolanic sugarcane bagasse ash via densimetric fractionation and ultrafine grinding. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 22, p. 49–58, 2022.

CORDEIRO, G. C.; TAVARES, L. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 89, p. 269–275, 2016.

CORTE, M. B. *et al.* Cemented sand under hollow cylinder multiaxial loading. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement**, [s. l.], p. 1–32, 2024.

CREE, D.; RUTTER, A. Sustainable Bio-Inspired Limestone Eggshell Powder for Potential Industrialized Applications. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, [s. l.], v. 3, n. 5, p. 941–949, 2015.

CUCCOVILLO, T.; COOP, M. R. On the mechanics of structured sands. **Géotechnique**, [s. l.], v. 49, n. 6, p. 741–760, 1999.

DA FONSECA, A. V.; CRUZ, R. C.; CONSOLI, N. C. Strength Properties of Sandy Soil–Cement Admixtures. **Geotechnical and Geological Engineering**, [s. l.], v. 27, n. 6, p. 681–686, 2009.

DE LIMA, S. S.; CHOTOLI, F. F. Análise química de cal para construção civil por espectrometria de fluorescência de raios X. **Revista IPT | Tecnologia e Inovação**, [s. l.], v. 4, 2020. Disponível em: https://revista.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/view/73/116?utm_source=chatgpt.com.

DE LIMA, C. P. F.; CORDEIRO, G. C. Evaluation of corn straw ash as supplementary cementitious material: Effect of acid leaching on its pozzolanic activity. **Cement**, [s. l.], v. 4, p. 100007, 2021.

DE REZENDE, I. M. *et al.* Mechanical Behavior of Microbially Induced Calcite Precipitation Cemented Sand. **Geotechnical and Geological Engineering**, [s. l.], v. 40, n. 4, p. 1997–2008, 2022.

DEMIRBAŞ, A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 42, n. 11, p. 1357–1378, 2001.

DEMIS, S.; TAPALI, J. G.; PAPADAKIS, V. G. An investigation of the effectiveness of the utilization of biomass ashes as pozzolanic materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 68, p. 291–300, 2014.

DIAMBRA, A. *et al.* Modelling tensile/compressive strength ratio of artificially cemented clean sand. **Soils and Foundations**, [s. l.], v. 58, n. 1, p. 199–211, 2018.

DIAMBRA, A. *et al.* Stiffness of artificially cemented sands: insight on characterisation through empirical power relationships. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 1469–1479, 2021.

DIAMBRA, A. *et al.* Theoretical derivation of artificially cemented granular soils strength. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 5, n. 143, p. 00001646, 2017.

DÍAZ-LÓPEZ, J. L. *et al.* Evaluation of geotechnical, mineralogical and environmental properties of clayey soil stabilized with different industrial by-products: A comparative study. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 449, p. 138497, 2024.

DÍAZ-LÓPEZ, J. L. *et al.* Geotechnical and engineering properties of expansive clayey soil stabilized with biomass ash and nanomaterials for its application in structural road layers. **Geomechanics for Energy and the Environment**, [s. l.], v. 36, p. 100496, 2023.

DNIT. **Pavimentação – Solo-Cal – Cal Virgem e Cal Hidratada – Especificação de material - 418/2019 - EM.**, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-material-em/dnit_418_2019_em-1.pdf.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. **Highway research record**, [s. l.], n. 139, 1966. Disponível em: <https://trid.trb.org/View/121708>. Acesso em: 18 nov. 2024.

EBNEYAMINI, A. *et al.* Effect of calcination temperature and extent on the multi-cycle CO₂ carrying capacity of lime-based sorbents. **Journal of CO₂ Utilization**, [s. l.], v. 49, p. 101546, 2021.

EKINCI, A.; HANAFI, M.; AYDIN, E. Strength, Stiffness, and Microstructure of Wood-Ash Stabilized Marine Clay. **Minerals**, [s. l.], v. 10, n. 9, p. 796, 2020.

EL-EMAM, M. *et al.* Clay Soil Stabilization Using Sugarcane Ash and Lime. In: THE 10TH WORLD CONGRESS ON CIVIL, STRUCTURAL, AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING, 2025. **Anais [...]**. [S. l.]: [s. d.], 2025. Disponível em: https://avestia.com/CSEE2025_Proceedings/files/paper/ICGRE/ICGRE_209.pdf. Acesso em: 10 nov. 2025.

ETIM, R. K. *et al.* Evaluation on Stabilization Role of Lime and Cement in Expansive Black Clay–Oyster Shell Ash Composite. **Transportation Infrastructure Geotechnology**, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 729–763, 2022a.

ETIM, R. K. *et al.* Influence of Periwinkle Shell Ash on the Strength Properties of Cement-Stabilized Lateritic Soil. **International Journal of Pavement Research and Technology**, [s. l.], v. 15, n. 5, p. 1062–1078, 2022b.

ETIM, R. K.; ATTAH, I. C.; YOHANNA, P. Experimental study on potential of oyster shell ash in structural strength improvement of lateritic soil for road construction. **International Journal of Pavement Research and Technology**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 341–351, 2020.

EWA, D. E. *et al.* Sustainable subgrade improvement using limestone dust and sugarcane bagasse ash. **Sustainable Technology and Entrepreneurship**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 100028, 2023.

FERRAZ, E. *et al.* A Starting Point on Recycling Land and Sea Snail Shell Wastes to Manufacture Quicklime, Milk of Lime, and Hydrated Lime. **Materials**, [s. l.], v. 17, n. 23, p. 5683, 2024.

FERRAZ, E. *et al.* Eggshell waste to produce building lime: calcium oxide reactivity, industrial, environmental and economic implications. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 51, n. 5, p. 115, 2018a.

FERRAZ, E. *et al.* Eggshell waste to produce building lime: calcium oxide reactivity, industrial, environmental and economic implications. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 51, n. 5, p. 115, 2018b.

FERRAZ, E. *et al.* Recycling Waste Seashells to Produce Calcitic Lime: Characterization and Wet Slaking Reactivity. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 10, n. 8, p. 2397–2414, 2019.

FERRAZZO, S. T. *et al.* Mechanical and environmental behavior of waste foundry sand stabilized with alkali-activated sugar cane bagasse ash-eggshell lime binder. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 383, p. 131313, 2023.

FERREIRA, F. A. **Desenvolvimento de um ligante álcali-ativado produzido a partir de cal de casca de ovo e cinza de casca de arroz para aplicação em elementos pré-fabricados**. 2022. Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/256557>. Acesso em: 18 nov. 2024.

FERREIRA, F. A. *et al.* Evaluation of mechanical and microstructural properties of eggshell lime/rice husk ash alkali-activated cement. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 364, p. 129931, 2023.

FESTUGATO, L. *et al.* Multiaxial Behavior of Compacted Artificially Lightly Cemented Sands. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 149, n. 12, p. 04023118, 2023.

FIROOZI, Ali Akbar *et al.* Fundamentals of soil stabilization. **International Journal of Geo-Engineering**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 26, 2017.

FLOSS, M. F. **Parâmetros de controle da resistência e rigidez de solos granulares artificialmente cimentados**. 2012. Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2012. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/75906>. Acesso em: 18 nov. 2024.

FU, Y. *et al.* Laboratory Study and Modeling of the Strength Evolution of Dredged Soil Stabilization Using Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag. **International Journal of Geomechanics**, [s. l.], v. 24, n. 4, p. 04024034, 2024.

GALVÁN-RUIZ, M. *et al.* Characterization of Calcium Carbonate, Calcium Oxide, and Calcium Hydroxide as Starting Point to the Improvement of Lime for Their Use in Construction. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 21, n. 11, p. 694–698, 2009.

GANI, A. *et al.* Proximate and ultimate analysis of corncob biomass waste as raw material for biocoke fuel production. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, [s. l.], v. 8, p. 100525, 2023.

GARCÍA LODEIRO, I. *et al.* Effect on fresh C-S-H gels of the simultaneous addition of alkali and aluminium. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 40, n. 1, p. 27–32, 2010.

GOMES, L. M. B. **O manuseio da concha do anomalocardia brasiliana para a autonomia econômica das mulheres do município de Arez/RN**. 2022. B.S. thesis - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/46257>. Acesso em: 18 nov. 2024.

GOMEZ-VAZQUEZ, O. M. *et al.* Eggshells from agro-industrial waste for the recovery of lime, portlandite, and calcite nanoparticles through the lime cycle: A circular economic approach. **Sustainable Chemistry for the Environment**, [s. l.], v. 5, p. 100073, 2024.

GUEDES, J. P. C. *et al.* Mechanical Behaviour of Fibre-Reinforced Cemented Iron Ore Tailings Across the Compaction Curve. **Geotechnical and Geological Engineering**, [s. l.], v. 42, n. 5, p. 3421–3432, 2024.

GUTHRIE, W. S. *et al.* Effects of Environmental Factors on Construction of Soil–Cement Pavement Layers. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s. l.], v. 2104, n. 1, p. 71–79, 2009.

GUTIÉRREZ, A. S. *et al.* Evaluation of the environmental performance of lime production in Cuba. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 31, p. 126–136, 2012.

- HABERT, G. *et al.* Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 40, n. 5, p. 820–826, 2010.
- HAN, H. G. *et al.* Preparation of CaCO₃-Containing Geopolymers for Green Concrete. **Advanced Materials Research**, [s. l.], v. 97–101, p. 2265–2268, 2010.
- HARDIN, B. O.; DRNEVICH, V. P. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, [s. l.], v. 98, n. 7, p. 667–692, 1972.
- HASAN, H. *et al.* Remediation of Expansive Soils Using Agricultural Waste Bagasse Ash. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 143, Advances in Transportation Geotechnics III, p. 1368–1375, 2016.
- HER, S. *et al.* Synthesis and characterization of cement clinker using recycled pulverized oyster and scallop shell as limestone substitutes. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 278, p. 123987, 2021.
- HINOJOSA, M. J. R. *et al.* Potential use of biomass bottom ash as alternative construction material: Conflicting chemical parameters according to technical regulations. **Fuel**, [s. l.], v. 128, p. 248–259, 2014.
- HIPÓLITO, V. M.; ILDEFONSO, J. S. Functional and structural assessment of an experimental section gap graded modified with sugarcane bagasse ash. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 18436, 2024.
- HORPIBULSK, S. *et al.* Strength Development in Cement Admixed Bangkok Clay: Laboratory and Field Investigations. **Soils and Foundations**, [s. l.], v. 51, n. 2, p. 239–251, 2011.
- HORPIBULSUK, S.; RACHAN, R.; SUDDEEPONG, A. Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 25, n. 4, p. 1521–1531, 2011.
- HOSSAIN, M. M. *et al.* Long-term durability properties of alkali-activated binders containing slag, fly ash, palm oil fuel ash and rice husk ash. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 251, p. 119094, 2020.
- HUANG, B. *et al.* A Life Cycle Thinking Framework to Mitigate the Environmental Impact of Building Materials. **One Earth**, [s. l.], v. 3, n. 5, p. 564–573, 2020.
- HUANG, J. *et al.* A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 305, p. 124685, 2021.
- HUANG, Y. *et al.* Numerical simulation of mitigation for liquefaction-induced soil deformations in a sandy ground improved by cement grouting. **Environmental Geology**, [s. l.], v. 55, n. 6, p. 1247–1252, 2008.
- HUNTZINGER, D. N.; EATMON, T. D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 17, n. 7, p. 668–675, 2009.

IBITOYE, S. E. *et al.* Improving the Combustion Properties of Corncob Biomass via Torrefaction for Solid Fuel Applications. **Journal of Composites Science**, [s. l.], v. 5, n. 10, p. 260, 2021.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization principles and practice**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 1972. Disponível em: <https://trid.trb.org/View/137528>. Acesso em: 18 nov. 2024.

IOANNIDOU, O. *et al.* Investigating the potential for energy, fuel, materials and chemicals production from corn residues (cobs and stalks) by non-catalytic and catalytic pyrolysis in two reactor configurations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 750–762, 2009.

IPCC. **National Greenhouse Gas Inventories**. [S. l.]: [s. d.], 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>. Acesso em: 6 set. 2025.

JAHANZAIB KHALIL, M.; ASLAM, M.; AHMAD, S. Utilization of sugarcane bagasse ash as cement replacement for the production of sustainable concrete – A review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 270, p. 121371, 2021.

JAMES, A. K. *et al.* Ash Management Review—Applications of Biomass Bottom Ash. **Energies**, [s. l.], v. 5, n. 10, p. 3856–3873, 2012.

JHA, A. K.; SIVAPULLAIAH, P. V. Lime Stabilization of Soil: A Physico-Chemical and Micro-Mechanistic Perspective. **Indian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 50, n. 3, p. 339–347, 2020.

JIA, L. *et al.* Experimental Investigation on Shear Strength Parameters of Lime Stabilized Loess. **Sustainability**, [s. l.], v. 11, n. 19, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/19/5397>. Acesso em: 9 jun. 2026.

JIN, W.; LI, Y. Cementation State of Sand Judged by the Stress–Dilatancy Relationship from a Single Drained Triaxial Test. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 151, n. 5, p. 04025027, 2025.

JITTIN, V.; BAHURUDEEN, A.; AJINKYA, S. D. Utilisation of rice husk ash for cleaner production of different construction products. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 263, p. 121578, 2020.

JULPHUNTHONG, P. *et al.* Evaluation of calcium carbide residue and fly ash as sustainable binders for environmentally friendly loess soil stabilization. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 671, 2024.

KANG, S.-H.; HONG, S.-G.; MOON, J. The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 115, p. 389–400, 2019.

KARIM, M. R. *et al.* Characterization of palm oil clinker powder for utilization in cement-based applications. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 135, p. 21–29, 2017.

KHAN, M. D. *et al.* Removal of Phosphorus from an Aqueous Solution by Nanocalcium Hydroxide Derived from Waste Bivalve Seashells: Mechanism and Kinetics. **ACS Omega**, [s. l.], v. 5, n. 21, p. 12290–12301, 2020.

KONG, D. L. Y.; SANJAYAN, J. G. Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 30, n. 10, p. 986–991, 2008.

KORF, E. P. *et al.* **Environmental Geotechnics: Waste and Geotechnical Stabilization**. New York: Nova Science Publishers, 2024. (Environmental Science, Engineering and Technology). Disponível em: <https://novapublishers.com/shop/environmental-geotechnics-waste-and-geotechnical-stabilization/>. Acesso em: 28 out. 2024.

KROGEL, M. *et al.* Novel Alkali-Activated Binder from Photovoltaic Module Glass and Oyster Shells: Insights into Mechanical, Chemical, and Molecular Properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. Pre-Proof, 2026.

KUL, E. *et al.* Mechanical Properties of Polymer-Infiltrated Fluorapatite Glass Ceramics Fabricated from Clam Shell and Soda Lime Silicate Glass. **Materiale Plastice**, [s. l.], v. 60, n. 1, p. 128–136, 2023.

LA ROCHELLE, P. *et al.* Observational Approach to Membrane and Area Corrections in Triaxial Tests. In: DONAGHE, R.; CHANEY, R.; SILVER, M. (org.). **Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock**. [S. l.]: ASTM International, 1988. v. STP977-EB, p. 0. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/STP29110S>. Acesso em: 3 dez. 2025.

LADE, P. V.; TRADS, N. The role of cementation in the behaviour of cemented soils. **Geotechnical Research**, [s. l.], v. 1, n. 4, p. 111–132, 2014.

LAVEGLIA, A. *et al.* Decarbonizing the lime-based construction materials industry: A practical guide for cradle-to-gate life-cycle inventory. **Sustainable Production and Consumption**, [s. l.], v. 40, p. 194–209, 2023.

LEE, M.; TSAI, W.-S.; CHEN, S.-T. Reusing shell waste as a soil conditioner alternative? A comparative study of eggshell and oyster shell using a life cycle assessment approach. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 265, p. 121845, 2020.

LEITE, L. P. *et al.* Desenvolvimento e caracterização de concreto sustentável com resíduos de conchas marinhas. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 24, p. e131502, 2024.

LEONTAKIANAKOS, G. *et al.* A comparative study of the physicochemical properties of Mg-rich and Ca-rich quicklimes and their effect on reactivity. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 48, n. 11, p. 3735–3753, 2015.

LEVANDOSKI, W. M. K. *et al.* Mechanical and microstructural properties of iron mining tailings stabilized with alkali-activated binder produced from agro-industrial wastes. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 15754, 2023.

LI, Q. *et al.* Effect of waste corn stalk ash on the early-age strength development of fly ash/cement composite. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 303, p. 124463, 2021.

LI, T. *et al.* Research Progress on the Applications of Seashell Adsorption Behaviors in Cement-Based Materials. **Buildings**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 1289, 2023.

LI, D.; LIU, Xinrong; LIU, Xianshan. Experimental Study on Artificial Cemented Sand Prepared with Ordinary Portland Cement with Different Contents. **Materials**, [s. l.], v. 8, n. 7, p. 3960–3974, 2015.

LIANG, X. *et al.* A review on the characteristics of wood biomass fly ash and their influences on the valorization in cementitious materials. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 97, p. 110927, 2024.

LIGUORI, B. *et al.* Pozzolanic Activity of Zeolites: The Role of Si/Al Ratio. **Materials**, [s. l.], v. 12, n. 24, p. 4231, 2019.

LIN, W. *et al.* Macro-micro mechanical behavior of saturated cemented sands during drained triaxial shearing. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 434, p. 136787, 2024.

MA, C. *et al.* Carbonatação de cal viva durante o resfriamento em atmosferas de CO₂ moderado e alto. **Thermochimica Acta**, [s. l.], v. 750, p. 180022, 2025.

MAFESSOLI, M. *et al.* Response of Artificially Cemented Iron Ore Tailings for Dry Stacking Disposal over a Wide Range of Stresses. **Indian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 53, n. 4, p. 904–915, 2023.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious Materials**. Boca Raton, Florence: CRC Press LLC Taylor & Francis Group [distributor], 2017.

MARTÍNEZ-GARCÍA, C. *et al.* Impact of mussel shell aggregates on air lime mortars. Pore structure and carbonation. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 215, p. 650–668, 2019.

MATTHEW, U. O. *et al.* Biomass Renewable Energy Production from Corn Cobs Feedstock Gasifier as Energy Constituent in Internal Combustion Engines (ICEs). **American Journal of Modern Energy**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 25–35, 2022.

MCLELLAN, B. C. *et al.* Renewable energy in the minerals industry: a review of global potential. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 32, p. 32–44, 2012.

MEDIARMAN, G. N. *et al.* Potentials of CaO powder result of calcination from green shells (*Perna viridis*), scallops (*Placuna placenta*), and blood clams (*Anadara granosa*) as antibacterial agent. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s. l.], v. 890, n. 1, p. 012043, 2021.

MEDINA UZCÁTEGUI, L. U.; VERGARA, K.; MARTÍNEZ BORDES, G. Sustainable alternatives for by-products derived from industrial mussel processing: A critical review. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [s. l.], v. 40, n. 2, p. 123–138, 2022.

MEMON, S. A. *et al.* Evaluating the Effect of Calcination and Grinding of Corn Stalk Ash on Pozzolanic Potential for Sustainable Cement-Based Materials. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 2020, p. 1–13, 2020.

MIRZAEI, L.; GHEBRAB, T.; FEDLER, C. B. Review and Evaluation of Agricultural Biomass Ashes as Supplementary Cementitious Materials for Sustainable Concrete. **Processes**, [s. l.], v. 13, n. 11, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/13/11/3571>. Acesso em: 29 maio 2026.

MITCHELL, J. K. Soil improvement-state of the art report. 1981. **Proc., 11th Int. Conf. on SMFE**. [S. l.]: [s. d.], 1981. p. 509–565. Disponível em: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1571698599501822848>. Acesso em: 18 nov. 2024.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. [S. l.]: John Wiley & Sons/John Wiley & Sons, LTD, 2005.

MITURSKI, M. Novel Proposal for Strength Prediction of Cement-Stabilized Soils Considering Porosity, Cement Index, and Curing Time. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 15, n. 21, p. 11448, 2025.

MO, K. H. *et al.* Recycling of seashell waste in concrete: A review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 162, p. 751–764, 2018.

MOGHIMI, F.; NOORZAD, R.; SHIRVANI, R. A. Stabilization of Amol fat clay using seashell ash. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [s. l.], v. 81, n. 8, p. 326, 2022.

MOHAMAD, N. *et al.* Environmental impact of cement production and Solutions: A review. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 48, p. 741–746, 2022.

MONTEIRO, P. J. M.; MILLER, S. A.; HORVATH, A. Towards sustainable concrete. **Nature Materials**, [s. l.], v. 16, n. 7, p. 698–699, 2017.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. [S. l.]: John wiley & sons, 2017. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=Py7bDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=montgomery+2017+design+of+experiment&ots=X8s0k-MT_3&sig=Ks2iec7acUvemr-yY5QcHxHwE-U. Acesso em: 18 nov. 2024.

MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; AGGELAKOPOULOU, E. The effects of limestone characteristics and calcination temperature to the reactivity of the quicklime. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 31, n. 4, p. 633–639, 2001.

MOSHER, S. *et al.* Effects of lead on Na^+ , K^+ -ATPase and hemolymph ion concentrations in the freshwater mussel *Elliptio complanata*. **Environmental Toxicology**, [s. l.], v. 27, n. 5, p. 268–276, 2012.

MOUBARAK, A. H. Enhancing the Strength of Soft Clay Using Date Seed Ash. **Geotechnical and Geological Engineering**, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10706-024-02958-3>. Acesso em: 4 nov. 2024.

MUNAWAR, M. A. *et al.* Challenges and opportunities in biomass ash management and its utilization in novel applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 150, p. 111451, 2021.

MUÑOZ-CASTILLO, A.; BUENO-RODRÍGUEZ, S.; ELICHE-QUESADA, D. Circular Alkali-Activated Cements Based on EAF Slags and Biomass Bottom Ash Using Rice Husk Ash-Derived Sodium Silicate. **Journal of the American Ceramic Society**, [s. l.], v. 109, n. 3, p. e70632, 2026.

NICHOLSON, P. G. **Soil Improvement and Ground Modification Methods**. [S. l.]: Butterworth-Heinemann, 2015.

OATES, J. A. H. **Lime and Limestone: Chemistry and Technology, Production and Uses**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2008.

OCHOA GEORGE, P. A. *et al.* Cleaner production in a small lime factory by means of process control. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 18, n. 12, p. 1171–1176, 2010.

OK, Y. S.; LIM, J. E.; MOON, D. H. Stabilization of Pb and Cd contaminated soils and soil quality improvements using waste oyster shells. **Environmental Geochemistry and Health**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 83–91, 2011.

OLIVEIRA, B. M. C. de. **A gestão dos resíduos da mariscagem pernambucana**. 2016. Master's Thesis - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/19606>. Acesso em: 18 nov. 2024.

ONU. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. [S. l.]: ONU, 2018. Disponível em: http://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/Brasil_Amigo_Pesso_Idosa/Agenda2030.pdf. Acesso em: 15 out. 2024.

OUEDRAOGO, M. *et al.* Characterization of sugar cane bagasse ash from Burkina Faso for cleaner cement production: *Influence of calcination temperature and duration*. **Results in Materials**, [s. l.], v. 14, p. 100275, 2022.

PAYÁ, J. *et al.* Auto-Combustion of Corn Straw: Production and Characterization of Corn Straw Ash (CSA) for Its Use in Portland Cement Mortars. **Materials**, [s. l.], v. 17, n. 17, p. 4374, 2024.

PEREIRA NETO, A. *et al.* Evaluation of Microsurfacing Dosage with Incorporation of Textile Fibers and Sugarcane Bottom Ash. **International Journal of Pavement Research and Technology**, [s. l.], v. 18, n. 5, p. 1157–1174, 2025.

PETTI, R. *et al.* Use of shells for the mechanical stabilisation of sediments: a valuable geomechanical perspective?. **Géotechnique**, [s. l.], p. 1–20, 2024.

PORCINO, D. D.; MARCIANÒ, V. Bonding degradation and stress–dilatancy response of weakly cemented sands. **Geomechanics and Geoengineering**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 221–233, 2017.

POURAKBAR, S. *et al.* Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement. **Transportation Geotechnics**, [s. l.], v. 3, p. 24–35, 2015.

PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARJA, S. Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s. l.], v. 1652, n. 1, p. 215–227, 1999.

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

PUERTAS, F.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; BLANCO-VARELA, M. T. Pore solution in alkali-activated slag cement pastes. Relation to the composition and structure of calcium silicate hydrate. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 139–148, 2004.

PUNTHUTAECHA, K. *et al.* Volume Change Behaviors of Expansive Soils Stabilized with Recycled Ashes and Fibers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 295–306, 2006.

RAFIEI, H.; MALEKI, M. An experimental study to investigate the mechanical behaviour of low plasticity fine-grained soil stabilized with different contents of lime and fly ash. **International Journal of Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 249–261, 2024.

RAJAMMA, R. *et al.* Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 172, n. 2–3, p. 1049–1060, 2009.

RAUT, A. N. *et al.* Effects of agro-industrial by-products as alumina-silicate source on the mechanical and thermal properties of fly ash based-alkali activated binder. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 18, p. e02070, 2023.

REDDY, K. R.; JANGA, J. K.; KUMAR, G. Sustainability and Resilience: A New Paradigm in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. **Indian Geotechnical Journal**, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s40098-024-00899-5>. Acesso em: 10 jun. 2024.

REDDY, K. R.; SAXENA, S. K. Effects of Cementation on Stress-Strain and Strength Characteristics of Sands. **Soils and Foundations**, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 121–134, 1993.

REIS, J. B. *et al.* Experimental investigation of binder based on rice husk ash and eggshell lime on soil stabilization under acidic attack. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 7542, 2022.

REZAEIAN, M.; FERREIRA, P. M. V.; EKINCI, A. Mechanical behaviour of a compacted well-graded granular material with and without cement. **Soils and Foundations**, [s. l.], v. 59, n. 3, p. 687–698, 2019.

REZAEIMALEK, S.; HUANG, J.; BIN-SHAFIQUE, S. Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 146, p. 210–220, 2017.

RIOS, S.; VIANA DA FONSECA, A.; BAUDET, B. A. On the shearing behaviour of an artificially cemented soil. **Acta Geotechnica**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 215–226, 2014.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Experimental design and process optimization**. [S. l.]: Crc Press, 2014. Disponível em: <https://books.google.com/books?hl=pt-BR&lr=&id=fHBYBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Experimental+design+and+process+>

optimization&ots=1lydYXH5HE&sig=y5ZsS2PIexdsKEImXQSN-uineg0. Acesso em: 18 fev. 2025.

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S.; ROFF, T. E. J. Lime modification of clay soils for construction expediency. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 125, n. 4, p. 242–249, 1997.

ROMÁN MARTÍNEZ, C. *et al.* Strength, Stiffness, and Microstructure of Stabilized Marine Clay-Crushed Limestone Waste Blends: Insight on Characterization through Porosity-to-Cement Index. **Materials**, [s. l.], v. 16, n. 14, p. 4983, 2023.

RUSLAN, H. N. *et al.* Oyster shell waste as a concrete ingredient: A review. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 48, p. 713–719, 2022.

SAHARUDIN, S. H. *et al.* Recovering value from waste: biomaterials production from marine shell waste. **Bulletin of Materials Science**, [s. l.], v. 41, n. 6, p. 162, 2018.

SALDANHA, R. B. *et al.* Physical–Mineralogical–Chemical Characterization of Carbide Lime: An Environment-Friendly Chemical Additive for Soil Stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 30, n. 6, p. 06018004, 2018.

SALDANHA, R. B. *et al.* Technical and environmental performance of eggshell lime for soil stabilization. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 298, p. 123648, 2021.

SALES, A.; LIMA, S. A. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. **Waste Management**, [s. l.], v. 30, n. 6, p. 1114–1122, 2010.

SANTOS, L. A. A. dos. **Problemática e perspectivas dos resíduos sólidos das conchas de mariscos originados da mariscagem nas comunidades tradicionais em Salinas da Margarida-BA. 2013. 144 f.** 2013. PhD Thesis - Dissertação (Mestrado em Geografia)–Universidade Federal da Bahia, [s. l.], 2013.

SARIDE, S. *et al.* Evaluation of Fly ash Treated Reclaimed Asphalt Pavement for Base/Subbase Applications. **Indian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 45, n. 4, p. 401–411, 2015.

SCHEUERMANN FILHO, H. C. *et al.* Sustainable Binders Stabilizing Dispersive Clay. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 06020026, 2021.

SCHEUERMANN FILHO, H. C.; DIAS MIGUEL, G.; CONSOLI, N. C. Porosity/Cement Index over a Wide Range of Porosities and Cement Contents. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 06021011, 2022.

SCHLUPP, F. *et al.* Use of Biomass Bottom Ash as an Alternative Solution to Natural Aggregates in Concrete Applications: A Review. **Materials**, [s. l.], v. 17, n. 18, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/18/4504>. Acesso em: 6 abr. 2026.

SCHNAID, F.; PRIETTO, P. D. M.; CONSOLI, N. C. Characterization of Cemented Sand in Triaxial Compression. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 127, n. 10, p. 857–868, 2001a.

SCHNAID, F.; PRIETTO, P. D. M.; CONSOLI, N. C. Characterization of Cemented Sand in Triaxial Compression. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 127, n. 10, p. 857–868, 2001b.

SCHOFIELD, A.; WROTH, P. **Critical State Soil Mechanics**. Londres: McGraw-Hill, 1986 [1986].

SEBESTA, S. Use of Microcracking to Reduce Shrinkage Cracking in Cement-Treated Bases. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s. l.], v. 1936, n. 1, p. 2–11, 2005.

SERVI, S. *et al.* Mechanical response of filtered and compacted iron ore tailings with different cementing agents: Focus on tailings-binder mixtures disposal by stacking. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 349, p. 128770, 2022.

SHAKOURI, M.; HU, J.; STOLLE, C. Assessing regional variability in chemical composition and pozzolanic reactivity of corn stover ash in the United States. **CEMENT**, [s. l.], v. 14, p. 100086, 2023.

SHARMA, S. S.; FAHEY, M. Deformation characteristics of two cemented calcareous soils. **Canadian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 41, n. 6, p. 1139–1151, 2004.

SHARMA, N. K.; SWAIN, S. K.; SAHOO, U. C. Stabilization of a Clayey Soil with Fly Ash and Lime: A Micro Level Investigation. **Geotechnical and Geological Engineering**, [s. l.], v. 30, n. 5, p. 1197–1205, 2012.

SHEHATA, N.; SAYED, E. T.; ABDELKAREEM, M. A. Recent progress in environmentally friendly geopolymers: A review. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 762, p. 143166, 2021.

SHI, Z.; LOTHENBACH, B. The role of calcium on the formation of alkali-silica reaction products. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 126, p. 105898, 2019.

SILVA, A. L. da; SILVA, S. R. da; LAFAYETTE, K. P. V. Análise espaço-temporal da deposição do resíduo da pesca de moluscos bivalves na Ilha de Deus, Recife - PE. **Geografia Ensino & Pesquisa**, [s. l.], v. 28, p. e84281–e84281, 2024.

SILVANI, C. *et al.* Brackish water in swelling soil stabilization with lime and sugarcane bagasse ash (SCBA). **Soils and Rocks**, [s. l.], v. 46, n. 3, p. e2023010022, 2023.

SILVANI, C. *et al.* Sand-Fly Ash-Lime Blends: Mechanical Behavior under Multiaxial Stress Condition. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 34, n. 5, p. 04022059, 2022.

SILVANI, C.; BENETTI, M.; CONSOLI, N. C. Maximum Tensile Strength of Sand - Coal Fly Ash - Lime Blends for Varying Curing Period and Temperature. **Soils and Rocks**, [s. l.], v. 42, n. 1, p. 83–89, 2019.

SILVANI, C.; DA SILVA, J. C.; GUEDES, J. P. C. Sugarcane Bagasse Ash as a Green Stabilizer for Swelling Soil. **Geotechnical and Geological Engineering**, [s. l.], v. 42, n. 2, p. 1459–1470, 2024.

SINGH, S. Experimental investigation of corn cob ash on silty clay stabilized with calcium carbide. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 37, p. 3658–3660, 2021.

SINGH, S. *et al.* On the modelling of stress-dilatancy behavior in weakly cemented sands. **Soils and Foundations**, [s. l.], v. 63, n. 4, p. 101328, 2023.

SRICHANACHAICHOK, W.; PISSUWAN, D. Micro/Nano Structural Investigation and Characterization of Mussel Shell Waste in Thailand as a Feasible Bioresource of CaO. **Materials**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 805, 2023.

SUBEDI, S. *et al.* Properties of Engineered Cementitious Composites with Raw Sugarcane Bagasse Ash Used as Sand Replacement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 33, n. 9, p. 04021231, 2021.

SUDJANTO, A. T.; SURAJI, A.; SUSILO, S. H. Analysis of soil characteristics on expansive clay stabilization using shell ash. **Eastern-European Journal of Enterprise Technologies**, [s. l.], v. 6, n. 6 (114), p. 58–64, 2021.

SUMMA, D. *et al.* Trends and Opportunities of Bivalve Shells' Waste Valorization in a Prospect of Circular Blue Bioeconomy. **Resources**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 48, 2022.

SUWANNASINGHA, N. *et al.* Effect of calcination temperature on structure and characteristics of calcium oxide powder derived from marine shell waste. **Journal of Saudi Chemical Society**, [s. l.], v. 26, n. 2, p. 101441, 2022.

TIWARI, N.; SATYAM, N.; PUPPALA, A. J. Strength and durability assessment of expansive soil stabilized with recycled ash and natural fibers. **Transportation Geotechnics**, [s. l.], v. 29, p. 100556, 2021.

UNICA. **UNICA Data**. [S. l.], 2026. Disponível em: <https://unicadata.com.br/>. Acesso em: 13 jul. 2026.

VENGALA, J. *et al.* Effect of Sugarcane Bagasse Ash and Lime on Physico-Mechanical Properties of Clayey Soil. **Advances in Civil Engineering**, [s. l.], v. 2024, n. 1, p. 3516016, 2024.

VICENT, M.; CRIADO, M.; GARCÍA-TEN, J. Alkali-activated materials obtained from asphalt fillers and fluorescent lamps wastes. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 215, p. 343–353, 2019.

VIEIRA, B.; COELHO, L. H. G.; DE JESUS, T. A. Phosphate Sorption in Shellfish Shell (*Venerupis pulestra*) Substrates: Development of Green and Low-Cost Technology for Tertiary Treatment of Effluents. **Journal of Environmental Engineering**, [s. l.], v. 145, n. 2, p. 04018137, 2019.

VILASINI; THANGASAMY, L. Comparative long-term stabilization of pond ash using lime and cement: FTIR characterization, strength optimization and sustainable utilization. **Next Materials**, [s. l.], v. 8, p. 100908, 2025.

VILASINI, P. p; THANGASAMY, L.; BALU, S. Analysis on the lime stabilization of pond ash for enhanced strength and environmental impact reduction. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 490, p. 142590, 2025.

VILLIBOR, D. F. Estabilização granulométrica ou mecânica. [s. l.], 1978. Disponível em: <http://repositorio.eesc.usp.br/handle/RIEESC/7613>. Acesso em: 18 nov. 2024.

WALKER, R.; PAVÍA, S. Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime–pozzolan pastes. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 44, n. 6, p. 1139–1150, 2011.

WAN, R. G.; GUO, P. J. Stress Dilatancy and Fabric Dependencies on Sand Behavior. **Journal of Engineering Mechanics**, [s. l.], v. 130, n. 6, p. 635–645, 2004.

WANG, Q. *et al.* Effect of clam shell from kitchen waste on the synthesis, performance, and hydration of cementitious clinker. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 323, p. 126588, 2022.

WANG, H.; LIU, X.; ZHANG, Z. Pozzolanic activity evaluation methods of solid waste: A review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 402, p. 136783, 2023.

WEI, Y.-L. *et al.* Co-sintering oyster shell with hazardous steel fly ash and harbor sediment into construction materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 172, p. 224–232, 2018.

WU, J. Y.; HUANG, K.; SUNGKAR, M. Remediation of Slope Failure by Compacted Soil-Cement Fill. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, [s. l.], v. 31, n. 4, p. 04017022, 2017.

YAMAGUCHI, K.; HASHIMOTO, S. Cold sintering of calcium carbonate derived from seashells. **Open Ceramics**, [s. l.], v. 12, p. 100302, 2022.

YAO, Z. *et al.* Bivalve Shell: Not an Abundant Useless Waste but a Functional and Versatile Biomaterial. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 44, n. 22, p. 2502–2530, 2014.

YAYEK, P.; KOJING, H.; SORUM, N. G. Sustainable Subgrade Soil Stabilization Using Sugarcane Bagasse Ash: A Comprehensive Review on Geotechnical, Microstructural, and Environmental Performance. **Civil and Environmental Engineering**, [s. l.], 2026. Disponível em: <https://reference-global.com/article/10.2478/cee-2026-0078>. Acesso em: 17 mar. 2026.

YIFRU, W. *et al.* Effects of Corn Cob Ash as Partial Replacement of Cement for Stabilization of an Expansive Clay. **Advances in Civil Engineering**, [s. l.], v. 2022, p. 1–13, 2022.

YOON, H. *et al.* Oyster Shell as Substitute for Aggregate in Mortar. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 158–170, 2004.

YUAN, B.; ZHANG, Y. Flexible environmental policy, technological innovation and sustainable development of China's industry: The moderating effect of environment regulatory enforcement. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 243, p. 118543, 2020.

ZAMAN, T. *et al.* Evolution and characterization of eggshell as a potential candidate of raw material. **Cerâmica**, [s. l.], v. 64, n. 370, p. 236–241, 2018.

ZHANG, S. *et al.* Effect of nano-metakaolinite clay on the performance of cement-based materials at early curing age. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 291, p. 123107, 2021.

ZHOU, H. *et al.* Mechanical properties and micro-mechanisms of marine soft soil stabilized by different calcium content precursors based geopolymers. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 305, p. 124722, 2021.