



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

**EFEITO DO REJEITO DE CAULIM NA ESTABILIZAÇÃO DE
SOLO/CIMENTO**

Pedro Raimundo Santana Junior

CAMPINA GRANDE

2026

PEDRO RAIMUNDO SANTANA JUNIOR

**REJEITO DE CAULIM COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA
ESTABILIZAÇÃO DE SOLO**

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Civil e Ambiental da Universidade Federal de
Campina Grande UFCG, em cumprimento às
exigências para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotecnia
Orientador(a): Prof. Dra. Carina Silvani

CAMPINA GRANDE PB
2026

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

S232e

Santana Junior, Pedro Raimundo.

Efeito do rejeito de caulim na estabilização de solo/cimento / Pedro Raimundo Santana Junior. – 2026.

94 f. : il. color.

Dissertação (bacharelado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Tecnologia e Recursos Naturais, 2026.

“Orientação: Profa. Dra. Carina Silvani”.

Referências.

1. Geotecnia. 2. Melhoramento do Solo. 3. Efeito Filler. 4. Resistência a Flexão. 5. Durabilidade. 6. Condutibilidade Hidráulica. I. Silvani, Carina. II. Título.

UFCG/BC

CDU 624.131(04)

PEDRO RAIMUNDO SANTANA JUNIOR

**EFEITO DO REJEITO DE CAULIM NA ESTABILIZAÇÃO DE
SOLO/CIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovado em: 03 de março de 2026

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Carina Silvani

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Orientadora

Prof.^a Dr.^a Aline Figueiredo Nóbrega

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Examinadora Interna

Prof. Dr. Lucas Festugato

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - 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 MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

2. **ALUNO(A): PEDRO RAIMUNDO SANTANA JÚNIOR / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.^a CARINA SILVANI - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR.^a ALINE FIGUEIREDO DA NÓBREGA – PPGECA/UFCG – EXAMINADORA INTERNA, DR. LUCAS FESTUGATO – UFRGS – EXAMINADOR EXTERNO, (PORTARIA 09/2026). / TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “EFEITO DO REJEITO DE CAULIM NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLO/CIMENTO” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INÍCIO: 09:30 HORAS / SALA DE VIDEOCONFERÊNCIA DO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS, BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFCG, DE FORMA HÍBRIDA.**

3. **EM SESSÃO REALIZADA DE FORMA HÍBRIDA, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA 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 DISSERTAÇÃO, 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, 03 DE MARÇO DE 2026.**

5.

6.

7.

8.

9.

LUCAS FESTUGATO - EXAMINADOR EXTERNO

Documento assinado digitalmente
LUCAS FESTUGATO
Data: 04/03/2026 11:22:01-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Raimundo Santana Junior, Usuário Externo**, em 03/03/2026, às 16:43, 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 03/03/2026, às 16:46, 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 03/03/2026, às 18:09, 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 04/03/2026, às 07:50, 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 **6263029** e o código CRC **4BC3337B**.

AGRADECIMENTOS

À minha família, Lucilene, Florzinha (Josefa) e Pedro, pelo suporte incondicional ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Obrigado pelo amor, por acreditarem no meu potencial e pela compreensão diante das minhas ausências, especialmente nesta intensa reta final.

À minha orientadora, Profa. Dra. Carina Silvani, pela confiança depositada desde o início desta jornada. Agradeço pela paciência, pela constante disponibilidade e pelas incontáveis horas dedicadas ao delineamento, execução e escrita desta dissertação. Sou imensamente grato por todo o conhecimento compartilhado.

Aos amigos do cotidiano de laboratório, em especial Arthur (Feijão), Arthur (Químico), Alisson, Brenda, Vitor, Luana, Manoel Leandro, Daniel, Jadilson, Joseildo e Ladjane. Vocês tornaram esta jornada mais leve, seja pelo auxílio direto nos complexos ensaios de durabilidade e permeabilidade, seja pelas conversas que trouxeram leveza aos dias de bancada.

Aos amigos de longa data, Vinícius, Paulo, Bruce, Roberto, Lucas, Talisson e David, pela amizade sólida e pela atenção dedicada ao longo desses anos.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA), pela excelência no ensino e pela estrutura laboratorial que viabilizou a parte experimental deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, recurso fundamental para a viabilização e dedicação exclusiva a este mestrado.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão das disciplinas e para a consolidação desta dissertação.

RESUMO

A gestão de resíduos sólidos industriais constitui um dos principais desafios contemporâneos para o desenvolvimento sustentável. No contexto da mineração, o beneficiamento do caulim na região do Seridó (PB/RN) gera expressivo volume de rejeitos, frequentemente dispostos de forma inadequada, resultando em passivos ambientais significativos. Paralelamente, a escassez de agregados naturais e a demanda por soluções geotécnicas de baixo impacto ambiental impulsionam a busca por materiais alternativos. Esta pesquisa avaliou o desempenho técnico do Resíduo de Beneficiamento de Caulim (RBC) como material de preenchimento de vazios (*filler*) em um solo arenoso estabilizado com cimento Portland. O programa experimental consistiu na caracterização física, química e mineralógica dos materiais, seguida da moldagem de corpos de prova com teores de RBC de 0%, 10%, 20% e 30% (em substituição ao solo), teores de cimento CP V-ARI de 3%, 5% e 7%, e diferentes pesos específicos secos de compactação (17,5; 18,0 e 18,5 kN/m³). Inicialmente, todas as combinações foram submetidas a ensaios de resistência à compressão simples (7 dias de cura) para identificação das variáveis de maior influência. A partir destes resultados, selecionou-se o teor de 5% de cimento e o peso específico seco de 18,0 kN/m³ como condição de referência para os ensaios complementares de resistência à tração na flexão, durabilidade (12 ciclos de molhagem e secagem) e condutividade hidráulica, permitindo avaliar o comportamento das misturas nos cenários de maior relevância prática. Os resultados demonstraram que a adição de RBC promoveu ganhos de resistência à compressão de até 40% para misturas com 3% de cimento. Este incremento decorre da ação sinérgica entre os constituintes: o cimento atua como aglomerante químico, formando pontes de C-S-H entre os grãos; a compactação adequada (γ_d) reduz o volume de vazios, aproximando as partículas; e o RBC, por meio do efeito *filler*, preenche os macroporos residuais, refinando a microestrutura e otimizando os pontos de contato cimentados. Considerando a resistência a tração na flexão, o incremento atingiu 78% com 30% de RBC (322 kPa), elevando a razão resistência à tração/compressão de 18,8% para 30,1%, indicando maior tenacidade do compósito. A durabilidade foi expressivamente melhorada, com redução da perda de massa acumulada de 56,06% (mistura controle) para 8,51% (30% RBC), representando uma diminuição de 85%. A condutividade hidráulica reduziu-se em aproximadamente 800 vezes (de $3,24 \times 10^{-4}$ m/s para $3,99 \times 10^{-7}$ m/s), comprovando o efeito *filler* na obstrução dos canais capilares. A metodologia de dosagem baseada no índice porosidade/teor volumétrico de cimento (η/Civ) mostrou-se aplicável, com elevados coeficientes de correlação ($R^2 > 0,90$). Conclui-se que o teor ótimo global é de 30% de RBC, por maximizar tenacidade, durabilidade e impermeabilidade, transformando um passivo ambiental em insumo de alto valor agregado para aplicações geotécnicas sustentáveis, alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 9, 12, 13 e 15).

Palavras-chave: Melhoramento de solo, Efeito *Filler*. Resistencia a Flexão, Durabilidade, Condutibilidade Hidráulica

ABSTRACT

The management of industrial solid waste is one of the main contemporary challenges for sustainable development. In the mining context, kaolin processing in the Seridó region (PB/RN, Brazil) generates a significant volume of waste, often improperly disposed of, resulting in substantial environmental liabilities. Simultaneously, the scarcity of natural aggregates and the demand for low environmental impact geotechnical solutions drive the search for alternative materials. This research evaluated the technical performance of Kaolin Processing Waste (KPW) as a filler material in sandy soil stabilized with Portland cement. The experimental program consisted of physical, chemical, and mineralogical characterization of the materials, followed by molding specimens with KPW contents of 0%, 10%, 20%, and 30% (replacing soil), CP V-ARI cement contents of 3%, 5%, and 7%, and different dry unit weights (17.5, 18.0, and 18.5 kN/m³). Initially, all combinations were subjected to unconfined compressive strength tests (7 days curing) to identify the most influential variables. Based on these results, the 5% cement content and dry unit weight of 18.0 kN/m³ were selected as reference conditions for the complementary tests of flexural tensile strength, durability (12 wetting and drying cycles), and hydraulic conductivity, allowing the evaluation of mixture behavior in scenarios of greater practical relevance. The results demonstrated that KPW addition promoted compressive strength gains of up to 40% for mixtures with 3% cement. This increase results from the synergistic action among constituents: cement acts as a chemical binder, forming C-S-H bridges between grains; adequate compaction (γ_d) reduces void volume, bringing particles closer together; and KPW, through the filler effect, fills residual macropores, refining the microstructure and optimizing cemented contact points. In tension, the increase reached 78% with 30% KPW (322 kPa), raising the tensile/compressive strength ratio from 18.8% to 30.1%, indicating greater composite toughness. Durability was significantly improved, with accumulated mass loss reduced from 56.06% (control mixture) to 8.51% (30% KPW), representing an 85% reduction. Hydraulic conductivity decreased by approximately 800 times (from 3.24×10^{-4} m/s to 3.99×10^{-7} m/s), proving the filler effect in clogging capillary channels. The dosage methodology based on the porosity/cement volumetric content index (η/C_{iv}) proved applicable, with high correlation coefficients ($R^2 > 0.90$). It is concluded that the optimal global content is 30% KPW, as it maximizes toughness, durability, and impermeability, transforming an environmental liability into a high-value input for sustainable geotechnical applications, aligned with the Sustainable Development Goals (SDG 9, 12, 13, and 15).

Keywords: Kaolin Waste. Soil Stabilization. Soil-cement. Filler Effect. Durability. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama simplificado do beneficiamento de caulim, via úmida.....	8
Figura 2: Material na entrada da planta de beneficiamento.....	9
Figura 3: Lavagem do material para o moinho giratório.....	10
Figura 4: Rejeito primário após britagem e separação por peneira giratória.....	11
Figura 5: Estocagem temporária do rejeito de caulim.....	12
Figura 6: Pilha de RBC espalhada pela estrada.....	13
Figura 7: Placa da cidade com pilhas de RBC ao fundo	13
Figura 8: Depósitos próximos a corpos d'água.....	14
Figura 9: Granulometria dos materiais	31
Figura 10: DRX das amostras de RBC passante na peneira #100.....	33
Figura 11: Ensaio de Compactação	36
Figura 12: RBC 0%: Mostra o comportamento do solo-cimento puro.....	42
Figura 13: RBC 10%: Efeito da adição inicial de caulim como material de preenchimento (<i>filler</i>)	43
Figura 14: RBC 20%: Comportamento com teor intermediário de RBC.....	44
Figura 15: RBC 30%: Avaliação da mistura com maior teor de substituição/adição de finos.....	45
Figura 16: Resistência à Compressão Simples (q_u) em função do teor de RBC para misturas com 3% de cimento	47
Figura 17: Resistência à Compressão Simples (q_u) em função do teor de RBC para misturas com 5% de cimento	48
Figura 18: Resistência à Compressão Simples (q_u) em função do teor de RBC para misturas com 7% de cimento	49
Figura 19: Comportamento do solo-cimento convencional (0% RBC)	52
Figura 20: Influência da compactação com 10% de RBC.....	53
Figura 21: Desempenho mecânico das misturas com 20% de RBC	54
Figura 22: Comportamento das misturas com 30% de RBC.....	55
Figura 23: Relação entre a resistência à compressão simples (q_u) e a porosidade (η) para a mistura de referência (0% RBC) com teores de cimento de 3%, 5% e 7% aos 7 dias de cura	56
Figura 24: Relação entre a resistência à compressão simples (q_u) e a porosidade (η) para a mistura com 10% de RBC e teores de cimento de 3%, 5% e 7% aos 7 dias de cura	57
Figura 25: Relação entre a resistência à compressão simples (q_u) e a porosidade (η) para a mistura com 20% de RBC e teores de cimento de 3%, 5% e 7% aos 7 dias de cura	58

Figura 26: Relação entre a resistência à compressão simples (q_u) e a porosidade (η) para a mistura com 30% de RBC e teores de cimento de 3%, 5% e 7% aos 7 dias de cura	59
Figura 27: Resistência à Compressão Simples (q_u) em função da relação porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}).....	60
Figura 28: Correlação entre q_u e o parâmetro de dosagem η/C_{iv} para todos os teores de RBC	61
Figura 29: Módulo de Ruptura à tração na flexão em função do teor de RBC	63
Figura 30: Resistência à compressão simples (q_u) x tração na flexão (q_t)	64
Figura 31: Evolução das propriedades mecânicas (q_u e q_t) para diferentes teores de substituição por RBC.....	65
Figura 32: Perda de massa acumulada longo dos ciclos e molhagem e secagem para corpos de prova moldados com 5% de cimento, $\gamma_d = 18,0 \text{ kN/m}^3$ e cura de 7 dias	67
Figura 33: Evolução da condutividade hidráulica com o incremento de RBC	70
Figura 34: Comparativo DRX: Solo + Cimento + RBC.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ensaio de caracterização física e química dos materiais.....	30
Tabela 2: Massa específica real do Caulim segundo diferentes autores.....	32
Tabela 3: Composição química comparativa de caulins e metacaulins (% em massa).....	35
Tabela 4: Resultados dos ensaios de compactação (Proctor Normal) das misturas Solo-RBC37	
Tabela 5: Ensaio de desempenho mecânico, durabilidade e condutividade hidráulica.	38
Tabela 6: Resultados de Perda de Massa Acumulada (PMA) para corpos de prova moldados com 5% de cimento, $\gamma_d = 18,0 \text{ kN/m}^3$ e cura de 7 dias.	66
Tabela 7: Coeficientes de condutividade hidráulica (k) para mistura com 5% de cimento e 18 kN/m^3 em função do teor de RBC	70
Tabela 8: Resumo consolidado dos parâmetros de engenharia vs. Teor de RBC para amostras com 7 dias de cura; Teor de Cimento: 5%; $\gamma_d: 18,0 \text{ kN/m}^3$	76

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Expoente de ajuste do modelo de dosagem (η/C_{iv}^b) adimensional
C	Teor de cimento %
C_{iv}	Teor volumétrico de cimento %
$C-S-H$	Silicato de Cálcio Hidratado -
G_0	Módulo de cisalhamento inicial MPa
k	Coefficiente de condutividade hidráulica (permeabilidade) m/s
K	Teor de Resíduo de Beneficiamento de Caulim (RBC) %
q_u	Resistência à compressão simples kPa
q_t	Resistência à tração na flexão kPa
R^2	Coefficiente de determinação (ajuste de curva) adimensional
w_{ot}	Umidade ótima de compactação %
γ_d	Peso específico seco aparente kN/m ³
$\gamma_{d,max}$	Peso específico seco aparente máximo kN/m ³
γ_s	Peso específico real dos grãos kN/m ³
$\gamma_{d,min}$	Peso específico seco aparente mínimo kN/m ³
$\gamma_{d,max}$	Peso específico seco aparente máximo kN/m ³
η	Porosidade %
η/C_{iv}	Relação porosidade/teor volumétrico de cimento -
η/C_{iv}^b	Relação porosidade/teor volumétrico de cimento ajustada pelo expoente b -
q_c	Resistência à compressão simples kPa
q_t	Resistência à tração na flexão kPa
2θ	Ângulo de difração (DRX) graus

SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABMT	Adsorção de Azul de Metileno
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFt	Etringita (produto de hidratação do cimento)
ANM	Agência Nacional de Mineração
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAGEPA	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio (Portlandita)
CPM	Modelo de Empacotamento Compressível
CP V-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CTB	Cement Treated Base (Base Tratada com Cimento)
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difração de Raios X
EDS	Espectroscopia por Energia Dispersiva
FRX	Fluorescência de Raios X
LOI	Loss on Ignition (Perda ao Fogo)
MAA	Modelo de Andreasen e Andersen Modificado
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Ms	Monossulfato (produto de hidratação do cimento)
NBR	Norma Brasileira
NP	Não Plástico
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PB	Paraíba
PCA	Portland Cement Association
PMA	Perda de Massa Acumulada
PPB	Província Pegmatítica da Borborema
PPGECA	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental
PSD	Particle Size Distribution (Distribuição de Tamanho de Partículas)
RBC	Resíduo de Beneficiamento de Caulim
RCS	Resistência à Compressão Simples

RFC	Resíduo Fino de Caulim
RGC	Resíduo Granulado de Caulim
RN	Rio Grande do Norte
RSS	Residual Sum of Squares (Soma dos Resíduos Quadrados)
SGB	Serviço Geológico do Brasil
SiO ₂	Dióxido de Silício (Sílica)
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio (Alumina)
TEP	Teoria do Empacotamento de Partículas
UCS	Unconfined Compressive Strength (Resistência à Compressão Simples)
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS.....	5
1.1.1	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>5</i>
1.1.2	<i>Objetivo específico</i>	<i>5</i>
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1	CAULIM: DEFINIÇÃO, PRODUÇÃO E RESÍDUOS	6
2.1.1	<i>O caulim da região Borborema-Seridó.....</i>	<i>8</i>
2.1.2	<i>Potencial de reaproveitamento do RBC.....</i>	<i>14</i>
2.2	ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM CIMENTO	15
2.2.1	<i>Processos Físicos, Mecanismos e Químicos da Estabilização com Cimento</i>	<i>15</i>
2.2.2	<i>Estabilização em Solos Arenosos e Metodologia Racional</i>	<i>16</i>
2.3	USO DE ADIÇÃO DE MINERAIS (FILLERS).....	17
2.3.1	<i>A Teoria do Empacotamento de Partículas na Estabilização de Solos</i>	<i>18</i>
2.3.2	<i>Efeito Físico e Teoria do Empacotamento</i>	<i>19</i>
2.3.3	<i>Microestrutura e Efeito de Preenchimento (Filler) do RBC.....</i>	<i>20</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	24
3.2	MATERIAIS	26
3.2.1	<i>Solo Arenoso.....</i>	<i>26</i>
3.2.2	<i>Resíduo de Beneficiamento de Caulim (RBC).....</i>	<i>26</i>
3.2.3	<i>Cimento.....</i>	<i>26</i>
3.2.4	<i>Água.....</i>	<i>27</i>
3.3	MÉTODOS.....	27
3.3.1	<i>Solo Arenoso.....</i>	<i>27</i>

3.3.2	<i>RBC</i>	28
3.3.3	<i>Caracterização dos Materiais</i>	29
3.3.4	<i>Programa de Ensaios Resposta</i>	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	42
4.1.1	<i>Influência do Teor de Cimento Portland</i>	42
4.1.2	<i>Adição de RBC</i>	47
4.1.3	<i>Peso específico seco (γ_d)</i>	52
4.1.4	<i>Análise da Porosidade (η) e Efeito do Preenchimento de Vazios</i>	56
4.1.5	<i>Relação η/C_{iv}</i>	60
4.2	DEFINIÇÃO DO CENÁRIO PARA ENSAIOS DE TRAÇÃO E DURABILIDADE 62	
4.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO	63
4.4	DURABILIDADE (CICLOS DE MOLHAGEM E SECAGEM)	66
4.4.1	<i>Análise da Perda de Massa Acumulada (PMA)</i>	66
4.5	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (PERMEABILIDADE)	70
4.6	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA (DRX).....	73
4.7	MICROESTRUTURA E EFEITO DE PREENCHIMENTO (<i>FILLER</i>) DO RBC	75
4.8	DISCUSSÃO INTEGRADA E COMPORTAMENTO SISTÊMICO	76
4.8.1	<i>Conclusão sobre o Teor Ótimo Global</i>	78
5	CONCLUSÕES	79
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
7	REFERENCIAS	83
8	ANEXOS	92
8.1	RESULTADOS MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)	92
8.2	RESULTADOS MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	93
8.3	RESULTADOS MÉDIOS DE PERDA DE MASSA ACUMULADA(PMA)	94

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico acelerado ao longo do último século impulsionou a produção de bens industrializados e a extração de recursos minerais aos níveis históricos mais elevados. Paralelamente a essa expansão produtiva, verificou-se um crescimento expressivo na geração de resíduos urbanos e industriais, o que torna a gestão de resíduos um dos principais desafios para a sustentabilidade do desenvolvimento humano. Por exemplo, Barata & Angélica (2012) estimam que até 2012, somente no Estado do Pará, a quantidade de resíduo de caulim processado e depositado ultrapasse 10 milhões de toneladas. Esses números são expressivos e representam um problema de natureza financeira e ambiental. Nesse contexto, surge a preocupação com a promoção de um desenvolvimento sustentável, no qual a reutilização e a valorização de resíduos se apresentam como alternativas viáveis para redirecionar esses materiais. Esse processo visa reduzir o consumo de recursos não renováveis, minimizar os impactos ambientais e atenuar os custos associados à disposição final em aterros sanitários.

O caulim é um minério que desempenha um papel estratégico no setor mineral devido à sua versatilidade física e química, atendendo a diversos segmentos industriais. Sua principal aplicação concentra-se na indústria de papel e celulose, que demanda cerca de 94% da produção global para funções de carga mineral e revestimento, visando à melhoria de propriedades como opacidade e brilho (Luz; Lins, 2008; DNPM, 2010). A carga mineral é adicionada à polpa de celulose (a massa de fibras) antes da formação da folha de papel. Os minerais, como o caulim, o carbonato de cálcio e o talco, são misturados às fibras em suspensão na água, já a função de revestimento é uma camada de uma tinta especial à base de minerais e adesivos que é aplicada sobre a superfície da folha de papel já formada e seca. Este minério também é indispensável na fabricação de cerâmicas brancas, isolantes térmicos e tintas, onde atua no controle da viscosidade e da pigmentação, além de compor produtos nas indústrias de borracha, plásticos, cosméticos e fármacos, graças à sua notável inércia química, o RBC é quimicamente estável e pouco reativo. Em outras palavras, ele tende a não reagir com outras substâncias presentes no meio, como ácidos, bases ou solventes comuns, mantendo sua composição e estrutura inalteradas.

A atividade de beneficiamento do caulim no Seridó, situado no Nordeste do país, é permeada por entraves operacionais severos, decorrentes de processos rudimentares e de carência de embasamento técnico-científico, o que gera desperdícios vultosos e produção excessiva de rejeitos (Silva *et al.*, 2010). A magnitude dessa ineficiência é refletida em um aproveitamento médio de apenas 25% do material lavrado, o que significa que cerca de 75% do

caulim extraído e processado na localidade é transformado em resíduo (Almeida; Vidal; Castro, 2016). Esse baixo rendimento está diretamente ligado à estrutura limitada das plantas de beneficiamento da região, que geralmente operam apenas com fases de desagregação, peneiramento, desaguamento e secagem. Nessas etapas, o peneiramento destaca-se como o principal ponto de perda mineral (Vidal *et al.*, 2017). Esse fluxo inadequado resultou, ao longo de décadas, no armazenamento de grandes volumes de rejeitos nos pátios das empresas da região (Silva *et al.*, 2010). O problema é intensificado pela granulometria micrométrica das partículas de caulim, cuja facilidade de dispersão aérea representa ameaças ambientais consideráveis. Atualmente, o Seridó enfrenta as consequências de um passivo ambiental que acumula milhões de toneladas de resíduos, gerados ao longo de sucessivas gerações (Vidal *et al.*, 2017).

Considerando a crescente escassez de agregados naturais, impulsionada pela superexploração de reservas de minerais nas últimas décadas, tem resultado em danos ambientais severos e na exaustão de recursos finitos. Conforme apontam Kazmi *et al.*, (2022), esse cenário exige a busca por alternativas sustentáveis em aplicações geotécnicas que promovam a transição para uma economia circular. Nesse contexto, a valorização de resíduos industriais não biodegradáveis, como o Resíduo de Beneficiamento de Caulim (RBC), emerge como uma solução estratégica.

A utilização do RBC alinha-se às práticas de "engenharia verde", permitindo melhorar o desempenho de solos de baixa capacidade de suporte por meio de técnicas de estabilização. De acordo com Kazmi *et al.*, (2022), o uso desses materiais alternativos como *backfill* (material de enchimento) oferece benefícios multifacetados, além de mitigar o impacto ambiental causado pelo descarte em aterros, contribui diretamente para a preservação de ecossistemas ao reduzir a demanda por extração mineral. Assim, o aproveitamento do RBC não apenas soluciona o passivo ambiental da indústria mineral, mas também confere novas propriedades mecânicas ao solo, sendo essencial para o desenvolvimento de infraestruturas resilientes e sustentáveis. Kazmi *et al.*, (2024) reforçam que a valorização de subprodutos industriais, como o RBC, apoia a transição para um modelo de economia circular e contribui para a descarbonização da indústria da construção civil.

Destaca-se que o Brasil é um dos seis maiores produtores mundiais de caulim, ao lado dos Estados Unidos, Uzbequistão, Alemanha, República Tcheca e Turquia. Na China, estima-se uma produção de 3,5 bilhões de toneladas de minério de caulim e consequente geração de cerca de 2 bilhões de toneladas de rejeitos como subproduto do beneficiamento do caulim. O

volume de resíduo gerado no beneficiamento do caulim varia conforme a natureza dos depósitos e os processos de exploração e beneficiamento adotados. Em alguns casos, como nos caulins primários de Mogi das Cruzes, SP, esse volume pode alcançar até 85% do material bruto extraído (Luz; Lins, 2008).

A magnitude da geração de RBC no Brasil é evidenciada pela presença da maior planta de processamento do mineral no mundo, localizada na região amazônica. Conforme destacado por (Schwanke *et al.*, 2022), o volume massivo desses rejeitos impõe custos elevados e impactos ambientais severos, demandando abordagens tecnológicas inovadoras para sua redução e valorização, transformando o que antes era passivo em insumo para novas cadeias produtivas.

Dentro dessa perspectiva, este trabalho busca explorar o potencial do RBC, para a estabilização de solos. A proposta consistiu em avaliar o desempenho do RBC como material fino (*filler*) para otimização granulométrica, visando à melhoria das propriedades mecânicas (compressão e tração), de durabilidade e hidráulicas de um solo arenoso estabilizado com cimento Portland (CP V-ARI). O solo arenoso apresenta uma estrutura granular com macroporos evidentes, sendo o cenário perfeito para avaliar como a adição de um material fino (o RBC) preenche esses vazios. O cimento Portland, por sua vez, atua como um ligante de hidratação rápida, formando uma matriz rígida que cimenta os grãos de areia nos pontos de contato. Essa combinação cria um sistema relativamente simples, onde a contribuição de cada componente é mais facilmente identificada, o cimento dá a resistência química e o RBC, a densificação física.

Essa abordagem não só contribui para a mitigação de passivos ambientais e a valorização de resíduos industriais, como também visa proporcionar soluções sustentáveis para obras de infraestrutura. Alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (ONU, 2015) o estudo busca promover inovação na engenharia geotécnica (ODS 9), incentivar prática, reduzir o consumo de recursos naturais e a necessidade de extração de novos materiais (ODS 12), e contribuir para a mitigação de impactos ambientais, como emissões de CO₂ e descarte inadequado de resíduos (ODS 13 e ODS 15). Dessa forma, a estabilização de solos utilizando RBC representa uma solução inovadora e sustentável, com potencial para tornar a engenharia geotécnica mais eficiente e ambientalmente responsável.

A gestão de resíduos de mineração passa por uma mudança de paradigma global e nacional, motivada pela necessidade de mitigar riscos ambientais e sociais associados às barragens convencionais. Nesse contexto, a substituição de materiais virgens por subprodutos

da mineração em misturas estabilizadas surge como uma estratégia de economia circular fundamental para reduzir a exploração de recursos não renováveis. Por exemplo, Saldanha *et al.*, (2023), cita que o reaproveitamento desses resíduos pode reduzir em média 40% dos impactos ambientais em categorias como esgotamento abiótico e oxidação fotoquímica. Além de representarem uma alternativa técnica viável transformam passivos em insumos de alto valor agregado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho técnico do Rejeito de Beneficiamento de Caulim (RBC) como material de preenchimento de vazios (*filler*) em solo arenoso estabilizado com Cimento Portland.

1.1.2 Objetivo específico

- Quantificar a influência do teor de RBC, teor de cimento Portland e peso específico seco de compactação na resistência à compressão simples (q_u) da mistura solo-RBC-cimento;
- Avaliar as melhorias na resistência à flexão de um solo arenoso cimentado com a adição de RBC;
- Determinar a eficácia do RBC na mitigação da degradação física frente a ciclos severos de umedecimento, secagem e abrasão;
- Analisar a evolução da condutividade hidráulica (k) em função da adição de finos, correlacionando a redução da permeabilidade com a obstrução dos canais capilares pelo efeito *filler*;
- Estabelecer um modelo matemático de dosagem baseado no índice porosidade/teor volumétrico de ligante (η/C_{iv}), verificando sua aplicabilidade na previsão do comportamento mecânico e de durabilidade para misturas contendo RBC.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fundamentação teórica desta dissertação baseia-se na interseção de três grandes áreas do conhecimento geotécnico e de materiais: composição e mineralogia do caulim e seu resíduo, a físico-química da estabilização solo-cimento e a micromecânica de materiais particulados.

2.1 CAULIM: DEFINIÇÃO, PRODUÇÃO E RESÍDUOS

O caulim é o termo utilizado para designar a rocha composta predominantemente por caulinita, também conhecida como *China Clay*. Sua descoberta remonta às regiões montanhosas de Jauchou Fu, na China, e o nome "caulim" tem origem na palavra chinesa *kauling*, que significa "cume alto" (Silva *et al.*, 2008). Os caulins resultam da alteração de silicatos de alumínio, especialmente feldspatos, e podem ser encontrados em dois tipos principais de depósitos: primários (eluvial) e secundários (transportados ou sedimentares) (Silva *et al.*, 2008).

Guerra (2008) define caulim como argila pura, de cor branca, resultante da decomposição dos feldspatos por efeito da hidratação. O caulim é explorado, por vezes, em veios de pegmatito formando material para a produção de porcelanas. Cerca de 96% da produção nacional é destinada ao mercado internacional, conforme aponta o Relatório de Reavaliação do Patrimônio Mineral, Projeto Rio Capim, elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB) (Grissolia *et al.*, 2021). Em 2022, foram exportadas para os Estados Unidos da América 1,2 milhão de toneladas de caulim beneficiado (National Minerals Information Center, 2024).

Em 2016, conforme demonstrado pelo sumário mineral (ANM, 2017) a produção global de caulim atingiu aproximadamente 36,9 milhões de toneladas (Mt), representando um crescimento de 1,4% em relação ao ano anterior. Os Estados Unidos lideraram a produção mundial, com cerca de 5,7 Mt, seguidos pela Índia (4,8 Mt), Alemanha (4,3 Mt), República Tcheca (3,5 Mt) e China (3,2 Mt). O Brasil ocupou a 7ª posição no ranking, com uma produção de 1,7 Mt, equivalente a 4,7% da produção mundial naquele ano. As principais reservas de caulim no Brasil estão localizadas nos estados do Amazonas (AM), Amapá (AP) e Pará (PA), totalizando, em 2016, aproximadamente 7,1 bilhões de toneladas de reservas lavráveis.

Os depósitos naturais de caulim frequentemente contêm impurezas que impedem seu uso direto na indústria. Dessa forma, é necessário submetê-los a processos de beneficiamento para atender às exigências do mercado (Luz *et al.*, 2005; Prasad; Reid; Murray, 1991). O

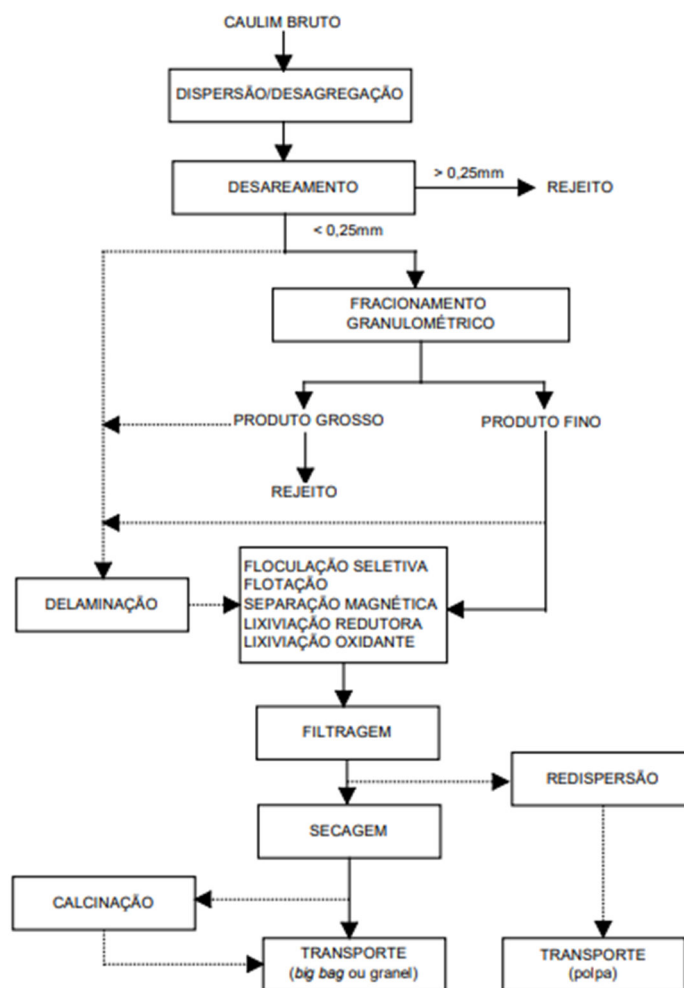
método de beneficiamento escolhido depende da aplicação desejada, sendo os dois principais processos a via seca e a via úmida.

O beneficiamento a seco é um método mais simples, utilizado quando o caulim já apresenta coloração e distribuição granulométrica adequadas, além de baixos teores de quartzo. Nessa abordagem, o material bruto passa primeiro por uma etapa de britagem, reduzindo seu tamanho para menos de 2,54 cm (1"). Em seguida, o material é seco em equipamentos rotativos e depois moído em moinhos de rolo. A última etapa consiste na classificação das partículas por tamanho, utilizando um processo chamado flotação com ar (*air flotation*), no qual uma corrente de ar quente transporta as partículas mais finas para o topo do aerosseparador, promovendo sua separação. Entretanto, é raro encontrar caulins naturais que atendam a esses requisitos, o que torna o beneficiamento via úmida o mais utilizado (Luz *et al.*, 2005).

O processo de beneficiamento úmido envolve diversas etapas, como dispersão, remoção de areia, separação por hidrociclones ou centrífugas, separação magnética, floculação seletiva, alveamento químico, filtragem e secagem (Luz; Costa; Chaves, 1995; Sampaio; Luz; Lins, 2001). Na dispersão, o caulim bruto é misturado com água em tanques agitadores (*blungers*), juntamente com dispersantes químicos, como hexametáfosfato de sódio ou poliacrilatos, além de reguladores de pH, como hidróxido ou carbonato de sódio. A concentração de sólidos varia entre 20% e 50%, dependendo das etapas posteriores. Concentrações mais baixas requerem menos dispersantes, mas aumentam o tempo necessário para a secagem, reduzindo a eficiência do processo (Luz *et al.*, 2005).

Após a dispersão, ocorre a remoção de partículas maiores que 0,25 mm (#60), em uma etapa chamada de desareamento. Esse processo utiliza tanques de sedimentação, peneiras ou classificadores hidráulicos para separar impurezas, como quartzo, mica e alguns óxidos de ferro e titânio, que possuem granulometria ou peso específico seco superior à do caulim. As indústrias que utilizam caulim demandam um material com distribuição granulométrica uniforme. Para garantir essa uniformidade, é comum empregar técnicas de separação das partículas com base no princípio da sedimentação. Esse processo pode ocorrer por meio da ação da gravidade, utilizando tanques de sedimentação ou hidroclassificadores, ou por meio de forças centrífugas, empregando hidrociclones ou centrífugas (Sampaio; Luz; Lins, 2001). O diagrama do processo de beneficiamento do caulim por via úmida é mostrado na Figura 1.

Figura 1: Diagrama simplificado do beneficiamento de caulim, via úmida



Fonte: Sampaio; Luz; Lins, (2001)

2.1.1 O caulim da região Borborema-Seridó

O caulim da região Borborema-Seridó tem origem primária, sendo o resultado direto da alteração de pegmatitos. De acordo com as análises por difratometria de raios X realizadas em amostras brutas, o material apresenta picos característicos de caulinita e quartzo, além de picos secundários de muscovita, o que demonstra que o mineral é essencialmente caulínítico (Araújo *et al.*, 2012). Esses achados corroboram as investigações de Almeida, (2006) sobre os resíduos de caulim da Província Pegmatítica da Borborema (PPB). Esta província, cuja denominação foi sugerida por Scorza, (1944), é considerada uma das maiores do mundo e abrange uma área de aproximadamente 75 x 150 km entre os estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte.

A região é particularmente rica em depósitos associados ao Grupo Seridó, datado do período Pré-Cambriano. Nestas formações, especialmente nas áreas de Junco do Seridó (PB) e Equador (RN), os pegmatitos caulinizados apresentam grande variação dimensional, com

algumas estruturas atingindo dezenas de metros de largura (Silva; Dantas, 1997). A gênese desses depósitos está ligada a eventos tectônicos complexos e ao magmatismo do Neoproterozoico, com idades de cristalização dos pegmatitos situadas entre 509 e 525 milhões de anos (Müller *et al.*, 2021).

O processo de exploração mineral gera o chamado RBC. Este resíduo é produzido especificamente durante a etapa de beneficiamento, onde ocorre a separação granulométrica para a obtenção do caulim comercializável, resultando no descarte das frações de quartzo e mica não aproveitadas (Araújo, 2016). A Figura 2 mostra estágio inicial: minério de caulim em seu estado bruto, recém-extraído, aguardando o início do processo de separação e purificação na planta de beneficiamento.

Figura 2: Material na entrada da planta de beneficiamento



Fonte: Autor (2025)

O processo de desintegração do caulim é fundamental para o beneficiamento do mineral, e ocorre através do uso de jatos de água que auxiliam diretamente na alimentação do britador rotativo (Figura 3). Essa etapa é responsável por facilitar o transporte do caulim bruto até o equipamento, promovendo a quebra inicial dos aglomerados do material extraído. Além de garantir uma alimentação contínua do britador, o emprego dos jatos de água contribui para a homogeneização do caulim, permitindo que ele seja misturado adequadamente e dando início à formação da polpa mineral. Essa polpa é essencial para as etapas subsequentes do beneficiamento, pois condiciona o material para processos de separação, classificação e purificação.

Figura 3: Lavagem do material para o moinho giratório



Fonte: Autor (2025)

Na etapa ilustrada na Figura 4, ocorre a separação dos resíduos gerados no processamento do caulim. O RBC, constituído predominantemente por areia e partículas de maior granulometria, é removido do processo após a passagem do material pelas peneiras giratórias. Esse descarte corresponde à fração que não apresenta as características desejadas para o produto final, sendo, portanto, segregada e encaminhada para disposição apropriada. A classificação granulométrica realizada pelas peneiras é fundamental para garantir que apenas o caulim de maior pureza e finura siga para as próximas etapas de beneficiamento, ao passo que o RBC, por não atender aos critérios de qualidade, é separado e descartado.

Figura 4: Rejeito primário após britagem e separação por peneira giratória



Fonte: Autor

O processo de beneficiamento do caulim gera uma quantidade expressiva de resíduos, correspondendo a cerca de 75% do volume extraído (Rezende, 2013). Nos municípios paraibanos de Juazeirinho, Junco do Seridó e Tenório, as empresas de beneficiamento de caulim geram mensalmente cerca de 6.800 toneladas de resíduos segundo Rezende *et al.*, (2008). Esses rejeitos são frequentemente descartados a céu aberto, acumulando-se nos pátios das empresas, às margens de rodovias ou em terrenos baldios sobre a vegetação nativa. Ainda segundo o autor, o volume total desse material já ultrapassa dois milhões de metros cúbicos. Esses rejeitos são frequentemente descartados de maneira inadequada, acumulando-se em pátios industriais, terrenos baldios e áreas de vegetação nativa, o que resulta em impactos ambientais expressivos (Almeida, 2018).

Embora o RBC não apresente características de toxicidade, ele é classificado pela NBR 10004 (ABNT, 2004a) como um resíduo de Classe IIA (não inerte) (Rezende *et al.*, 2008). Esta classificação exige que o descarte seja realizado em aterros sanitários controlados; contudo, na prática regional, o descarte adequado muitas vezes é negligenciado. Na Figura 5 é mostrado o

grande volume de RBC acumulados no pátio industrial da indústria de coleta, evidenciando a escala de subprodutos gerados durante o processamento do caulim.

Figura 5: Estocagem temporária do rejeito de caulim



Fonte: Autor

O resultado é um acúmulo significativo de rejeitos a céu aberto que perdura por décadas, gerando preocupações ambientais e de saúde pública. Entre os principais riscos apontados estão a alteração da paisagem natural (Moraes, 2007) e os danos à saúde humana causados pela inalação de partículas finas suspensas no ar (Williams et al., 2008).

A presença do RBC disperso ao longo das vias de transporte representa um desafio logístico significativo. Este material pode comprometer a segurança viária, dificultando o trânsito de veículos e aumentando o risco de acidentes, especialmente em regiões onde há movimentação intensa de caminhões e máquinas pesadas (Figura 6).

Figura 6: Pilha de RBC espalhada pela estrada



Fonte: Google Earth (2026)

Além do impacto direto nas condições das estradas, a dispersão dos resíduos favorece a formação de poeira mineral nas áreas adjacentes. Esta poeira pode ser transportada pelo vento, atingindo zonas residenciais e ambientes naturais próximos, o que agrava problemas ambientais

A proximidade da indústria é evidenciada pelas pilhas de RBC que dominam a paisagem na entrada do município, ilustrando a convivência entre o perímetro urbano e a atividade mineradora (Figura 7). Essa configuração revela um cenário onde o desenvolvimento urbano e as operações industriais coexistem de maneira direta, trazendo à tona questões sobre o impacto visual e ambiental desses rejeitos no cotidiano da população local.

Figura 7: Placa da cidade com pilhas de RBC ao fundo



Fonte: Google Earth (2026)

O monitoramento ambiental realizado por meio de imagens orbitais evidencia a vulnerável proximidade entre os depósitos de RBC e as bacias hidrográficas locais. Essa observação é fundamental para a avaliação de riscos ambientais, como o assoreamento dos corpos d'água ou a contaminação dos recursos hídricos (Figura 8). Além de causar efeitos visuais e atmosféricos, a presença desses depósitos em regiões de clima semiárido e solos rasos pode comprometer significativamente a dinâmica ambiental local. Os sistemas de drenagem natural tornam-se especialmente suscetíveis a alterações, agravando o potencial de impactos negativos para o ecossistema da área adjacente.

Figura 8: Depósitos próximos a corpos d'água



Fonte: Google Earth (2026)

A busca por soluções sustentáveis tem impulsionado pesquisas sobre a reutilização de resíduos industriais na engenharia. A incorporação desses subprodutos em misturas estabilizadas favorece a economia circular, reduzindo o impacto ambiental e a necessidade de descarte (Arruda Junior *et al.*, 2021). No contexto da estabilização de solos, o uso de resíduos como constituintes de misturas cimentícias busca não apenas a valorização do material, mas também a melhoria de propriedades mecânicas e de fluxo.

2.1.2 Potencial de reaproveitamento do RBC

O RBC pode apresentar características favoráveis, dependendo de sua estrutura cristalina. Além da finura e da pureza, a quantidade de defeitos na estrutura cristalina é um fator

crucial na escolha da caulinita como matéria-prima. Isso implica em um menor custo energético no processo de ativação térmica (calcinação) (Barata; Angélica, 2012). No contexto do RBC, a presença de uma caulinita com maior grau de amorficidade pode torná-lo economicamente mais viável para a produção de pozolanas em comparação com caulinitas bem cristalizadas.

A eficiência de materiais de base caulinítica em misturas cimentícias está diretamente ligada à sua finura e composição mineralógica. Conforme discutido por (Mermerdaş *et al.*, 2012), a presença de partículas finas ricas em sílica e alumina altera as características de resistência do compósito final. No caso do RBC, mesmo sem reatividade química significativa (quando não calcinado), sua contribuição ocorre fundamentalmente via efeito *filler*, promovendo o refinamento microestrutural. Esse processo resulta em uma matriz mais densa e homogênea, possibilitando ganhos expressivos de resistência mecânica pela otimização do empacotamento granular.

2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM CIMENTO

O solo-cimento é definido tecnicamente como uma mistura endurecida de solo, cimento Portland e água, devidamente compactada e submetida a um processo de cura, resultando em um material com propriedades de engenharia substancialmente superiores às do solo natural (ACI Committee 230, 2009).

Embora a técnica seja amplamente consolidada Ingles & Metcalf, (1973), ressaltam que o termo abrange uma vasta família de materiais, desde solos modificados com baixos teores de cimento, visando à melhoria da trabalhabilidade, até bases cimentadas de alta resistência (*CTB - Cement Treated Base*).

2.2.1 Processos Físicos, Mecanismos e Químicos da Estabilização com Cimento

O mecanismo de estabilização com cimento Portland ocorre por meio de processos físico-químicos simultâneos. A fase física é governada primordialmente pela compactação, que promove o arranjo das partículas e o intertravamento (*interlocking*) do esqueleto granular (Ikeagwuani; Nnonyelu; Alexander, 2024; Mehdaoui *et al.*, 2023; Onyelowe *et al.*, 2021). Nesse contexto, o encapsulamento físico surge como mecanismo fundamental (Bolan *et al.*, 2023; Li, H. *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2024). Mecanismos como macro e microencapsulação, adsorção e absorção diminuem a área superficial disponível e o contato entre grãos reativos e agentes oxidantes (Elghali *et al.*, 2022). O endurecimento gradativo forma uma barreira densa e durável (Park, 2000).

O comportamento geomecânico de rejeitos compactados é fortemente influenciado pelo arranjo das partículas e pelo grau de saturação. Em sistemas estabilizados, essa densificação física atua em conjunto com a cimentação química para transformar um material originalmente sem coesão em uma estrutura capaz de suportar carregamentos significativos em obras de infraestrutura.

A fase química inicia-se com a hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio após o contato com a água (Maskell; Heath e Walker, 2014). Segundo Prusinski & Bhattacharja, (1999), as reações produzem o Silicato de Cálcio Hidratado (gel C-S-H) e o Hidróxido de Cálcio $[Ca(OH)_2]$, a portlandita. O gel C-S-H atua como uma "cola" mineral, sendo o principal responsável pelo ganho de resistência (Hongmei *et al.*, 2024; Li, H. *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2024). Adicionalmente, formam-se produtos como a etringita (AFt) e o monossulfato (Ms), que auxiliam na estruturação da matriz (Guo *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2023).

2.2.2 Estabilização em Solos Arenosos e Metodologia Racional

Em solos arenosos, a resistência mecânica depende fundamentalmente da cimentação nos pontos de contato entre os grãos de quartzo e do preenchimento parcial dos vazios pela pasta ligante (Maskell; Heath; Walker, 2014; Mitchell; Soga; O'Sullivan, 2025). A eficácia dessa pasta reside na formação de produtos de reação que promovem a redução da porosidade, criando uma estrutura mais densa e menos permeável (Provis, 2014). Sob o ponto de vista teórico, a compreensão desse fenômeno evoluiu para modelos baseados na superposição de fases: a força do solo estabilizado resulta da contribuição combinada da matriz granular (regida pela mecânica dos solos em estado crítico) e da fase cimentante, cuja ruptura pode ser descrita pelo critério de Drucker-Prager (Diambra *et al.*, 2018).

A consolidação dessa fundamentação teórica permitiu o desenvolvimento de uma metodologia racional de dosagem, análoga à relação água/cimento da tecnologia do concreto. Proposta e expandida por Consoli *et al.*, (2023, 2007, 2009), esta abordagem demonstra que as propriedades de engenharia de solos estabilizados quimicamente (mesmo aqueles contendo resíduos industriais ou "cimentos verdes") são governadas pelo índice porosidade/teor volumétrico de ligante (η/B_{iv}). Este parâmetro estabelece que a porosidade (η) e o teor de ligante (C_{iv} ou L_{iv}) não devem ser analisados isoladamente, mas como uma relação intrínseca onde, para um mesmo volume de cimento, a redução da porosidade maximiza a formação das pontes de cimentação. Assim, o índice η/C_{iv} torna-se a variável chave, permitindo que diferentes

combinações de peso específico seco e teores de ligante resultem na mesma resistência, desde que a proporção vazios/ligante seja mantida constante.

A robustez do índice η/C_{iv} permite prever não apenas a resistência à compressão simples (q_u), mas também o comportamento à tração (q_t) e a rigidez a pequenas deformações. Segundo Festugato *et al.*, (2018), a modelagem da resistência à tração, parâmetro crucial para prever o trincamento em pavimentos, é governada pela mesma base microestrutural e eficiência de cimentação que os esforços de compressão. Adicionalmente, o módulo de cisalhamento inicial (G_0) também pode ser caracterizado através de relações de potência baseadas no índice η/C_{iv} (Diambra *et al.*, 2021). Essa convergência permite uma caracterização mecânica completa do material com um número reduzido de ensaios laboratoriais.

Para garantir o desempenho de longo prazo em obras submetidas a variações climáticas, a avaliação da durabilidade é indispensável. A resistência mecânica isolada, medida logo após a cura, pode não refletir a real capacidade de campo, sendo necessário submeter os espécimes a ciclos de molhagem e secagem para verificar a estabilidade da matriz ligante (Goldoni *et al.*, 2023). Estudos recentes (Consoli *et al.*, 2018; Diambra *et al.*, 2021; Tonini de Araújo *et al.*, 2023) confirmam que o índice η/C_{iv} possui forte correlação com a perda de massa acumulada (PMA) e com a retenção de resistência: quanto menor o índice, maior a integridade física do compósito. Nesse cenário, o uso de ligantes alternativos derivados de resíduos minerais apresenta resultados promissores; o incremento no teor de ligante muitas vezes exerce uma influência mais proeminente no ganho de resistência do que o próprio tempo de cura, consolidando a eficácia da valorização de subprodutos na estruturação da matriz (Saldanha *et al.*, 2023).

2.3 USO DE ADIÇÃO DE MINERAIS (*FILLERS*)

Sedran & Delarrard, (1999) mostram que o desempenho de misturas cimentadas com adições é governado por dois efeitos principais: o físico (*filler*) e o químico (pozolânico).

A influência da adição de materiais finos na estrutura interna de compósitos cimentícios é um fator determinante para o controle da porosidade. Segundo Pouhet; Cyr; Bucher, (2019), a porosidade total de matrizes baseadas em aluminossilicatos apresenta uma correlação direta e proporcional com o volume de água e a proporção de sólidos introduzidos inicialmente na mistura. Além disso, pequenas variações no conteúdo desses materiais podem levar a modificações significativas na rede de poros, o que justifica a análise do empacotamento granulométrico para otimização do peso específico seco do material.

A utilização de resíduos provenientes do processamento de caulim em matrizes cimentícias tem se mostrado uma alternativa promissora tanto do ponto de vista ambiental quanto tecnológico. Conforme destacam Rodrigues *et al.*, (2021), esse material possui características físico-químicas que, quando incorporadas de forma otimizada, não apenas mitigam passivos ambientais de grandes polos mineradores, mas também contribuem para o desenvolvimento de novos compósitos. Sgarlata *et al.*, (2021) mostram que a granulometria fina desse resíduo favorece o preenchimento de vazios e a continuidade da matriz sólida

2.3.1 A Teoria do Empacotamento de Partículas na Estabilização de Solos

A Teoria do Empacotamento de Partículas (TEP) constitui um conceito fundamental para a otimização da composição e do desempenho de materiais cimentícios, sendo amplamente aplicada em misturas de solo-cimento e solos estabilizados com cimento (Chu *et al.*, 2024; Srinath *et al.*, 2021). O princípio central da TEP reside no arranjo estratégico de partículas de diferentes dimensões para maximizar o peso específico seco da mistura, minimizar o volume de vazios e, conseqüentemente, elevar as propriedades mecânicas por meio da otimização granulométrica (Galetakis *et al.*, 2016; Malkanthi & Perera, 2019). O mecanismo de funcionamento baseia-se na premissa de que os vazios existentes entre as partículas maiores devem ser progressivamente preenchidos por partículas de menor escala, aumentando a fração sólida e reduzindo a porosidade total da matriz (Snehal & Das, 2021).

A eficiência desse arranjo é mensurada pelo peso específico seco de empacotamento, definida como a razão entre o volume de sólidos e o volume total ocupado (Srinath *et al.*, 2021). De acordo com a literatura, um elevado peso específico seco de empacotamento resulta em uma série de benefícios técnicos, incluindo a redução da demanda por aglomerantes e água, melhoria da trabalhabilidade e incremento da resistência mecânica (Chu *et al.*, 2024; Yu; Spiesz & Brouwers, 2015). Para alcançar tal estado, utiliza-se a otimização da Distribuição de Tamanho de Partículas (PSD), fundamentada em modelos matemáticos como o modelo de *Andreasen e Andersen Modificado* (MAA) e a abordagem de *Funk e Dinger* (Essam *et al.*, 2023; Tahwia *et al.*, 2022). Estes modelos visam projetar misturas com graduação contínua, assegurando que todas as faixas granulométricas estejam representadas para um empacotamento ideal (Li, J. *et al.*, 2025).

Na aplicação prática em solos estabilizados, a TEP é implementada através do ajuste da graduação do solo para que esta se aproxime das curvas de otimização teóricas. Em blocos de solo comprimido (*Compressed Stabilized Earth Blocks - CSEB*), por exemplo, isso

frequentemente envolve a redução dos teores de argila e silte, complementando a mistura com partículas maiores ou resíduos de construção para atingir a PSD desejada (Malkanthi; Wickramasinghe; Perera, 2021). Adicionalmente, a incorporação de materiais finos suplementares, como cinzas volantes, atua no preenchimento dos vazios intersticiais entre as partículas de solo, resultando em uma matriz mais compacta e em um aumento do peso específico seco máxima (Hoy *et al.*, 2026).

Os impactos da otimização pelo empacotamento estendem-se de forma crítica à durabilidade e às propriedades hidráulicas das misturas. A modificação da PSD pode elevar a resistência à compressão em mais de 50%, enquanto a redução da porosidade permeável minimiza a absorção de água e a vulnerabilidade a ambientes agressivos (Malkanthi & Perera, 2019; Snehal & Das, 2021). Este aspecto é vital para a resistência aos ciclos de molhagem e secagem, uma vez que uma estrutura de poros refinada reduz a permeabilidade e aumenta a estabilidade volumétrica do material estabilizado (Essam *et al.*, 2023). Contudo, a aplicação da TEP enfrenta desafios práticos, como a irregularidade da forma das partículas e limitações econômicas na obtenção de materiais específicos, exigindo o uso de ferramentas computacionais e métodos estatísticos, como a soma dos resíduos quadrados (RSS), para minimizar as divergências entre a graduação real e a ideal (K; Om, 2024; Li, J. *et al.*, 2025).

2.3.2 Efeito Físico e Teoria do Empacotamento

Sob a ótica física, a teoria do empacotamento de partículas de Sedran & Delarrard, (1999) demonstra que o peso específico seco máximo de um compósito é obtida preenchendo-se os vazios das partículas maiores (areia) com partículas sucessivamente menores (*filler* e cimento). Em solos arenosos uniformes com presença de macroporos, conforme a lógica de refinamento microestrutural proposta por Horpibulsuk & Raksachon, (2010), a introdução de materiais finos em solos estabilizados promove a dispersão de agrupamentos de solo-cimento, o que otimiza a distribuição das partículas e a formação de produtos cimentantes, potencialmente reduzindo a porosidade e a permeabilidade da mistura. Além disso, Isaia; Gastaldini; Moraes, (2003) explicam que essas adições atuam como pontos de nucleação heterogênea, as partículas finas funcionam como "sementes" que aceleram a precipitação dos produtos de hidratação do cimento, preenchendo os espaços vazios com maior eficiência do que o cimento puro.

A otimização do esqueleto granular é a base para a melhoria de compósitos cimentícios. De acordo com Sedran & Delarrard, (1999), a compacidade de uma mistura depende da

distribuição granulométrica e da forma das partículas. O Modelo de Empacotamento Compressível (CPM) demonstra que a introdução de partículas sucessivamente menores (como o RBC em relação à areia) permite que o material mais fino preencha os vazios deixados pelo esqueleto maior. Esse aumento no peso específico seco de empacotamento (*packing density*) reduz o volume de vazios que precisaria ser preenchido pela pasta de cimento, aumentando a eficiência do aglomerante e a estabilidade estrutural da mistura.

A introdução de materiais finos de base caulinitica, como o RBC, em solos arenosos promove um refinamento da microestrutura através do preenchimento físico de macroporos, transformando-os em poros de menor dimensão (Wang *et al.*, 2018). Esse mecanismo de empacotamento granulométrico resulta em uma matriz mais densa, homogênea e coesa, reduzindo a porosidade total e otimizando a interface entre os grãos de solo e a pasta de cimento (Sgarlata *et al.*, 2021; Vilela *et al.*, 2020). De acordo com Rodrigues *et al.* (2021), essa reorganização da rede porosa é crucial para limitar a absorção de água e potencializar a eficiência do aglomerante, uma vez que o cimento se concentra nos vazios residuais, aumentando a área de contato efetiva e garantindo um ganho significativo na estabilidade e resistência mecânica do compósito.

2.3.3 Microestrutura e Efeito de Preenchimento (*Filler*) do RBC

O termo técnico amplamente aceito na literatura internacional para o RBC é Kaolin Processing Waste (KPW). Este material é composto majoritariamente por caulinita, mica e quartzo, podendo ser segmentado em frações distintas conforme a etapa do processamento: Resíduo Granulado de Caulim (RGC) e Resíduo Fino de Caulim (RFC) (Gomes *et al.*, 2012; Menezes *et al.*, 2007, 2008, 2009; Varela *et al.*, 2009).

O efeito *filler* do RBC fundamenta-se na contribuição física de suas partículas dentro de matrizes cimentícias, cerâmicas ou poliméricas. Diferente da reatividade química pozolânica, este mecanismo atua primordialmente através do preenchimento de vazios e da otimização da compactação do material. Devido à sua estrutura lamelar e alta razão de aspecto, onde a razão de aspecto é a relação matemática entre as dimensões principais de uma partícula, ou seja, a divisão entre a maior dimensão e a menor dimensão, o RBC proporciona um reforço mecânico eficaz e uma melhor transferência de carga na interface da matriz (Anam *et al.*, 2023; Avadiar *et al.*, 2014; Drobny, 2014; Hamzaoui *et al.*, 2015).

A incorporação deste resíduo em materiais cimentícios reduz significativamente a absorção de água e a porosidade. Esse fenômeno ocorre porque as partículas agem como um micropreenchimento que obstrui os poros, dificultando a migração de umidade e a entrada de agentes agressores (Fode; Chande Jande; Kivevele, 2023). Já em compósitos poliméricos, essa característica reflete-se na melhoria do módulo de elasticidade, resistência ao impacto e estabilidade térmica (Anam *et al.*, 2023; Drobny, 2014).

A adição de RBC promove um refinamento da microestrutura, caracterizado pela transformação de macroporos em microporos, resultando em matrizes mais densas. Análises de Difração de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) indicam que a presença do resíduo favorece uma distribuição homogênea de fases e, em aplicações cerâmicas submetidas a altas temperaturas, auxilia na formação de estruturas cristalinas como a mulita (Alves *et al.*, 2016; Menezes *et al.*, 2007, 2008, 2009).

Embora o efeito físico seja predominante, o potencial pozolânico do RBC pode ser ativado mediante tratamento térmico (calcinação). Nesses casos, a reatividade química complementa o efeito *filler*, contribuindo para a formação de produtos secundários de hidratação que aumentam ainda mais a densidade da matriz e a resistência à compressão e tração (da Silva *et al.*, 2021; Gomes *et al.*, 2012; Rocha *et al.*, 2008).

A durabilidade das misturas contendo RBC é uma consequência direta do refinamento microestrutural. A redução da conectividade entre os poros minimiza a permeabilidade e aumenta a resistência ao ataque de sulfatos, ácidos e à penetração de íons cloreto (Fode; Chande Jande; Kivevele, 2023; Menezes *et al.*, 2008).

No contexto de solicitações ambientais severas, como os ciclos de molhagem e secagem (*wetting and drying*), a estabilidade conferida pelo RBC é promissora. Embora a literatura específica sobre esses ciclos ainda seja emergente, os mecanismos de preenchimento e redução da porosidade total sugerem que o RBC atua na mitigação de danos como a fissuração e a perda de massa. Ao criar uma matriz mais estável e com menor capacidade de absorção, o resíduo tende a minimizar as variações volumétricas e o estresse interno causados pela variação cíclica de umidade, preservando a integridade estrutural do material ao longo do tempo (Anam *et al.*, 2023; Fode; Chande Jande; Kivevele, 2023; Menezes *et al.*, 2009).

O termo técnico amplamente aceito na literatura internacional para o RBC é *Kaolin Processing Waste* (KPW). Este material é composto majoritariamente por caulinita, mica e quartzo, podendo ser segmentado em frações distintas conforme a etapa do processamento:

Resíduo Granulado de Caulim (RGC) e Resíduo Fino de Caulim (RFC) (Gomes *et al.*, 2012; Menezes *et al.*, 2007, 2008, 2009; Varela *et al.*, 2009).

O efeito *filler* do RBC fundamenta-se na contribuição física de suas partículas dentro de matrizes cimentícias, cerâmicas ou poliméricas. Diferente da reatividade química pozolânica, este mecanismo atua primordialmente através do preenchimento de vazios e da otimização da compactação do material. Devido à sua estrutura lamelar e alta razão de aspecto, onde a razão de a razão de aspecto é a relação matemática entre as dimensões principais de uma partícula ou objeto. De forma simplificada, é a divisão entre a maior dimensão e a menor dimensão, o RBC proporciona um reforço mecânico eficaz e uma melhor transferência de carga na interface da matriz (Anam *et al.*, 2023; Avadiar *et al.*, 2014; Drobny, 2014; Hamzaoui *et al.*, 2015).

A incorporação deste resíduo, em materiais cimentícios, reduz significativamente a absorção de água e a porosidade. Esse fenômeno ocorre porque as partículas agem como um micropreenchimento que obstrui os poros, dificultando a migração de umidade e a entrada de agentes agressores (Fode; Chande Jande; Kivevele, 2023). Já em compósitos poliméricos, essa característica reflete-se na melhoria do módulo de elasticidade, resistência ao impacto e estabilidade térmica (Anam *et al.*, 2023; Drobny, 2014).

A adição de RBC promove um refinamento da microestrutura, caracterizado pela transformação de macroporos em microporos, resultando em matrizes mais densas. Análises de Difração de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) indicam que a presença do resíduo favorece uma distribuição homogênea de fases e, em aplicações cerâmicas submetidas a altas temperaturas e auxilia na formação de estruturas cristalinas como a mulita (Alves *et al.*, 2016; Menezes *et al.*, 2007, 2008, 2009).

Embora o efeito físico seja predominante, o potencial pozolânico do RBC pode ser ativado mediante tratamento térmico (calcinação). Nesses casos, a reatividade química complementa o efeito *filler*, contribuindo para a formação de produtos secundários de hidratação que aumentam ainda mais o peso específico seco da matriz e a resistência à compressão e tração (da Silva *et al.*, 2021; Gomes *et al.*, 2012; Rocha *et al.*, 2008).

A durabilidade das misturas contendo RBC é uma consequência direta do refinamento microestrutural. A redução da conectividade entre os poros minimiza a permeabilidade e aumenta a resistência ao ataque de sulfatos, ácidos e penetração de íons cloreto (Fode; Chande Jande; Kivevele, 2023; Menezes *et al.*, 2008).

No contexto de solicitações ambientais severas, como os ciclos de molhagem e secagem (*wetting and drying*), a estabilidade conferida pelo RBC é promissora. Embora a literatura

específica sobre esses ciclos ainda seja emergente, os mecanismos de preenchimento e redução da porosidade total sugerem que o RBC atua na mitigação de danos como a fissuração e a perda de massa. Ao criar uma matriz mais estável e com menor capacidade de absorção, o resíduo tende a minimizar as variações volumétricas e o estresse interno causados pela variação cíclica de umidade, preservando a integridade estrutural do material ao longo do tempo (Anam *et al.*, 2023; Fode; Chande Jande; Kivevele, 2023; Menezes *et al.*, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico abordará os materiais e métodos empregados na pesquisa.

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O programa experimental foi estruturado de forma a correlacionar as propriedades intrínsecas dos materiais com o desempenho macroscópico das misturas compactadas, seguindo cinco etapas fundamentais:

- Etapa I: Caracterização dos Materiais

Nesta fase inicial, realizou-se a caracterização completa do solo arenoso, do RBC e do Cimento Portland CP V-ARI. Além dos ensaios físicos tradicionais, como granulometria e massa específica, procedeu-se à microcaracterização mineralógica via DRX, essencial para compreender o papel do RBC como material inerte e seu potencial efeito de preenchimento (*filler*).

- Etapa II: Definição do Escopo de Moldagem

A partir dos ensaios de compactação na energia Proctor Normal, determinaram-se os parâmetros de referência: umidade ótima (w_{ot}) e peso específico seco aparente máximo ($\gamma_{d,max}$). As condições de compactação foram definidas a partir do ensaio de Proctor Normal NBR 7182 (ABNT, 2025b), cujos parâmetros ótimos para o solo arenoso serviram de referência para a moldagem das misturas. Os valores de massa específica seca aparente (γ_d) e umidade ótima (w_{ot}) estão detalhados na Tabela 4. A escolha dos teores de cimento (3%, 5% e 7%) fundamentou-se em estudos consolidados de estabilização de solos arenosos, visando cobrir diferentes níveis de resistência (ABCP, 2004; ABNT, 2012a, p. 12253; Guedes *et al.*, 2024). Quanto ao RBC, os teores de 10%, 20% e 30% foram selecionados para avaliar o potencial do resíduo como extensor de matriz (efeito *filler*) (Poon; Chan, 2007; Vilela *et al.*, 2020), baseando-se em pesquisas que demonstram a otimização do esqueleto sólido e a redução de vazios com adições de materiais finos nesta faixa.

- Etapa III: Aplicação da Dosagem Racional (η/C_{iv})

Utilizando a metodologia proposta por Consoli *et al.* (2007), os corpos de prova foram moldados com controle porosidade (η) e do teor volumétrico de cimento (C_{iv}). Após a

moldagem estática, os espécimes foram submetidos a 7 dias de cura e 24 horas de imersão para saturação.

- Etapa IV: Ensaios de Resposta (Outputs)

As misturas foram submetidas a uma bateria de ensaios de desempenho para avaliar:

- Comportamento Mecânico: Através de ensaios de Compressão Simples (UCS) e Flexão em viga quatro pontos
- Comportamento Hidráulico: Determinação da Condutividade Hidráulica em permeâmetro de parede flexível.
- Durabilidade: Avaliação da integridade física via 12 ciclos de molhagem, secagem e abrasão.

- Etapa V: Análise de Dados

A análise de dados fundamenta-se na aplicação do modelo de dosagem racional baseado no índice porosidade/teor volumétrico de cimento (η/Civ), conforme metodologia consolidada por Consoli *et al.*, (2007). O procedimento analítico consiste no ajuste de curvas de potência aos dados experimentais de resistência à compressão simples (q_u) obtidos para todas as combinações de teores de RBC, teores de cimento e pesos específicos secos de compactação.

3.2 MATERIAIS

Neste item são apresentados os materiais utilizados na realização desta pesquisa.

3.2.1 Solo Arenoso

O solo arenoso utilizado nesta pesquisa é proveniente de uma jazida localizada na região de Campina Grande - PB. Para os ensaios laboratoriais, o solo foi seco ao ar livre, destorroado e peneirado na peneira de abertura 2,0 mm.

3.2.2 Resíduo de Beneficiamento de Caulim (RBC)

O Resíduo de Beneficiamento de Caulim (RBC) utilizado nesta pesquisa é proveniente de uma indústria situada no município de Junco do Seridó (PB). A viabilidade do uso deste resíduo na estabilização de solos arenosos é sustentada por diversas investigações prévias anteriores (Moraes, 2007; Barata; Angélica, 2012; Rezende, 2013; Nascimento *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2018; Arruda Junior *et al.*, 2021; Sousa *et al.*, 2023).

3.2.3 Cimento

Foi utilizado o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) da empresa Comento Nacional, adquirido no comércio local de Campina Grande - PB. A escolha deste tipo de cimento justificou-se por sua composição ser constituída essencialmente por clínquer, com reduzido teor de adições, conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018). Essa característica é fundamental para simplificar o entendimento das reações químicas envolvidas, uma vez que minimiza interferências externas na análise da interação entre o cimento, o solo e o RBC.

3.2.4 Água

A água, amplamente utilizada na pesquisa, principalmente para a correção da umidade durante a moldagem dos corpos de prova e para os ensaios de resistência e durabilidade, foi a proveniente do abastecimento público da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA).

3.3 MÉTODOS

A seguir, são descritos os métodos utilizados para caracterização e ensaios de resistência das misturas.

3.3.1 Solo Arenoso

Para os ensaios laboratoriais, o solo foi inicialmente seco ao ar livre até constância de massa, visando eliminar a umidade higroscópica sem provocar alterações na estrutura dos minerais constituintes. Em seguida, procedeu-se ao destorroamento manual com o auxílio de um almofariz e mão de gral, cuidadosamente executado para desagregar os torrões sem promover a quebra dos grãos individuais, preservando assim a distribuição granulométrica original do material.

O material destorroadado foi então submetido ao peneiramento na peneira de abertura 2,0 mm (malha nº 10 da série ABNT). Esta etapa de preparação fundamenta-se nos seguintes critérios técnicos e normativos:

- a) Padronização granulométrica: A peneira de 2,0 mm constitui o limite convencional entre as frações de areia (passante) e pedregulho (retido), conforme estabelecido pela NBR 6502 (ABNT, 2022a) (Rochas e solos – Terminologia). A utilização exclusiva da fração passante garante que os ensaios sejam realizados em um material com granulometria controlada, eliminando partículas grosseiras que poderiam introduzir heterogeneidades nas amostras.

- b) Compatibilidade com ensaios de caracterização: As normas técnicas para determinação de limites de consistência NBR 6459 (ABNT, 2016a) e NBR 7180 (ABNT, 2016b), massa específica dos grãos NBR 17212 (ABNT, 2025c) e compactação NBR 7182 (ABNT, 2025b) estabelecem que os ensaios devem ser realizados com a fração do solo que passa na peneira 2,0 mm, garantindo a reprodutibilidade e a comparabilidade dos resultados.
- c) Adequação às dimensões dos corpos de prova: Considerando as dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência mecânica (50 mm de diâmetro para compressão simples e vigas de 41,75 mm × 41,75 mm × 175 mm para ensaios de flexão), a presença de partículas superiores a 2,0 mm poderia exceder a relação máxima recomendada entre diâmetro da partícula e dimensão do corpo de prova (usualmente 1:10), comprometendo a representatividade dos resultados e introduzindo planos de fraqueza preferenciais.
- d) Foco na interação matriz-finos: Para os objetivos desta pesquisa, que visa avaliar o efeito *filler* do RBC em uma matriz arenosa, a padronização na fração passante em 2,0 mm assegura que a interação entre os grãos de areia (partículas estruturais) e os finos do resíduo ocorra de forma controlada, sem a interferência de partículas grossas que atuariam como elementos inertes de grande dimensão, mascarando o fenômeno de preenchimento de vazios em estudo.

Após o preparo inicial, amostras representativas do solo foram submetidas aos ensaios de caracterização física e mineralógica descritos na Seção 3.3.3, cujos resultados fundamentaram a definição das proporções de mistura e das condições de moldagem adotadas no programa experimental.

3.3.2 RBC

A amostragem do RBC foi realizada diretamente na área de descarte da empresa, adotando-se os procedimentos preconizados pela NBR 10007 (ABNT, 2004b) (Amostragem de resíduos sólidos) para garantia da representatividade. Foram coletados pontos distintos da pilha de estocagem, em diferentes profundidades, totalizando aproximadamente 100 kg de material, posteriormente homogeneizados para compor a amostra de trabalho.

O processamento laboratorial seguiu as seguintes etapas sequenciais:

- a) Secagem: O material foi espalhado em bandejas metálicas e mantido ao ar livre por 72 horas, com revolvimentos periódicos, até atingir massa constante. Este procedimento visa eliminar a umidade higroscópica sem submeter o material a temperaturas elevadas que pudessem alterar suas propriedades mineralógicas ou físicas.
- b) Peneiramento primário (2,0 mm): O material seco foi submetido a peneiramento na malha de abertura 2,0 mm (malha nº 10 da série ABNT) para remoção de frações grosseiras (agregados de quartzo, fragmentos de rocha e impurezas de maior dimensão) e garantia da homogeneidade da amostra. Esta etapa elimina partículas que poderiam atuar como elementos inertes de grande porte, interferindo na avaliação do efeito *filler* e comprometendo a representatividade dos corpos de prova, especialmente considerando suas dimensões reduzidas.
- c) Peneiramento secundário (0,150 mm): Posteriormente, o material passante na peneira de 2,0 mm foi submetido a novo peneiramento na peneira de abertura 0,150 mm (malha nº 100 da série ABNT) para obtenção da fração fina, caracterizada como *filler*. Esta abertura foi selecionada por representar o limite convencional entre as frações areia fina (retida) e silte (passante) na classificação granulométrica brasileira. A utilização da fração passante em 0,150 mm garante que as partículas do RBC apresentem dimensões compatíveis com o preenchimento dos microporos existentes entre os grãos de areia, otimizando o empacotamento granular.

3.3.3 Caracterização dos Materiais

A coleta das amostras foi realizada conforme a norma NBR 6457 (ABNT, 2024) para posterior caracterização. A Tabela 1 mostra os ensaios utilizados para a caracterização dos materiais.

Tabela 1: Ensaios de caracterização física e química dos materiais

Ensaios	Solo	RBC	Solo+RBC	Normas
Análise Granulométrica	X	X	X	NBR 7181 (ABNT, 2025a) D6913 (ASTM, 2019) D7928 (ASTM, 2021c)
Massa Específica dos grãos	X	X		NBR 17212 (ABNT, 2025c) D854 (ASTM, 2023)
Limites de Atterberg	X	X		NBR 6459 (ABNT, 2016a) NBR 7180 (ABNT, 2016b) D4318 (ASTM, 2018)
Difração de Raios X (DRX)	X	X	X	-
Fluorescência de Raios X (FRX)	X	X		NBR 16137 (ABNT, 2016c) D5381 (ASTM, 2021b)
Compactação (Proctor Normal)			x	NBR 7182 (ABNT, 2025b)

A análise da distribuição granulométrica dos materiais foi realizada com o objetivo de caracterizar o perfil das partículas presentes em cada amostra. Esse procedimento é fundamental para avaliar o comportamento do solo e do RBC em processos de substituição e mistura, pois influencia diretamente propriedades como compactação, permeabilidade e resistência.

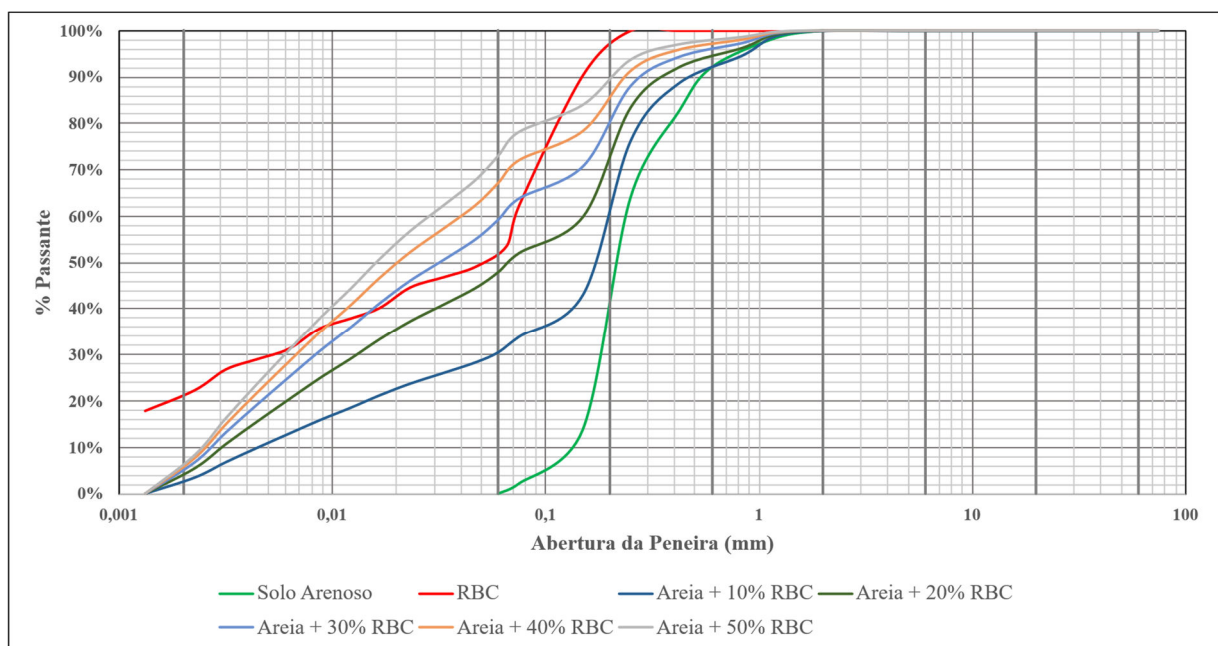
O ensaio foi conduzido conforme as diretrizes da ABNT NBR 7181 (2025) , que estabelece o método para análise granulométrica de solos por meio da combinação de peneiramento e sedimentação . Para a fração grossa (partículas com diâmetro superior a 0,075 mm, correspondentes a pedregulhos e areias), utilizou-se o peneiramento com agitação mecânica em peneiras padronizadas . Para a fração fina (partículas inferiores a 0,075 mm, correspondentes a siltes e argilas), empregou-se o método da sedimentação contínua, que se baseia na Lei de Stokes para determinação do diâmetro das partículas a partir de suas velocidades de decantação .

Na etapa de sedimentação, foi utilizado defloculante (solução de hexametáfosfato de sódio com concentração de 45,7 g por 1000 cm³ de água destilada, tamponada para pH entre 8 e 9) para promover a dispersão completa das partículas finas, evitando a formação de flocos que poderiam sedimentar como se fossem partículas maiores e distorcer os resultados . As leituras foram realizadas com densímetro de bulbo simétrico nos tempos prescritos pela norma, em ambiente com temperatura controlada . Este procedimento assegura a correta caracterização tanto da fração arenosa do solo quanto da fração fina do RBC, permitindo avaliar com precisão o efeito *filler* do resíduo na otimização granulométrica das misturas.

Os ensaios foram realizados separadamente para o solo arenoso e para o RBC, permitindo a caracterização individual de cada material. A partir desses resultados, foram modeladas curvas granulométricas teóricas correspondentes a misturas solo-RBC com teores de substituição de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de RBC em massa. Este procedimento fundamenta-se nos princípios da Teoria do Empacotamento de Partículas (TEP) e teve como objetivo avaliar, em termos teóricos, o efeito da incorporação progressiva do resíduo na distribuição granulométrica do sistema, auxiliando na definição das proporções a serem investigadas experimentalmente.

A Figura 9 apresenta a curva obtida para a distribuição granulométrica dos materiais estudados, permitindo a comparação entre as proporções de diferentes faixas de tamanho dos grãos de solo arenoso e do RBC. Essa análise auxilia na verificação da compatibilidade entre os materiais e na definição das proporções adequadas para as misturas.

Figura 9: Granulometria dos materiais



A massa específica real dos grãos (γ_s) é definida como a relação entre o peso dos sólidos e o volume exclusivamente ocupado por esses sólidos, excluindo-se todos os vazios. Este parâmetro é fundamental para cálculos de porosidade, índice de vazios e grau de saturação, além de ser indispensável na análise granulométrica conjunta (peneiramento e sedimentação) para determinação do diâmetro das partículas por meio da Lei de Stokes.

Os resultados obtidos indicaram valores de 27,0 kN/m³ para ambos os materiais. Esta equivalência no peso específico real dos grãos dos dois componentes é tecnicamente relevante por duas razões principais:

- Consistência volumétrica nas misturas: A substituição em massa do solo pelo RBC resulta na manutenção do volume de sólidos da mistura. Em outras palavras, para uma mesma massa de material, o volume ocupado pelos grãos (excluindo vazios) permanece inalterado. Esta característica isola a variável "volume de sólidos" durante a análise dos resultados, permitindo que as diferenças de comportamento observadas nos ensaios de compactação, resistência e permeabilidade sejam atribuídas exclusivamente ao efeito *filler* do RBC (preenchimento de vazios e refinamento microestrutural) e não a variações na densidade real das partículas.
- Simplificação dos cálculos de dosagem: A equivalência de massas específicas permite que as proporções em massa adotadas no programa experimental (0%, 10%, 20% e 30% de RBC) correspondam diretamente às proporções em volume de sólidos, facilitando o controle e a reprodutibilidade das misturas.

A Tabela 2 apresenta, para fins comparativos, os valores de massa específica real de grãos de diferentes caulins reportados na literatura nacional e internacional. Observa-se que os valores encontrados para o RBC (27,0 kN/m³) situam-se dentro da faixa típica para materiais caulíníticos, que varia entre 26,0 kN/m³ (caulins mais puros) e 27,8 kN/m³ (caulins com presença de minerais acessórios mais densos, como pirita ou óxidos de ferro). Esta compatibilidade com a literatura reforça a representatividade do material estudado e a validade das comparações com outros trabalhos da área.

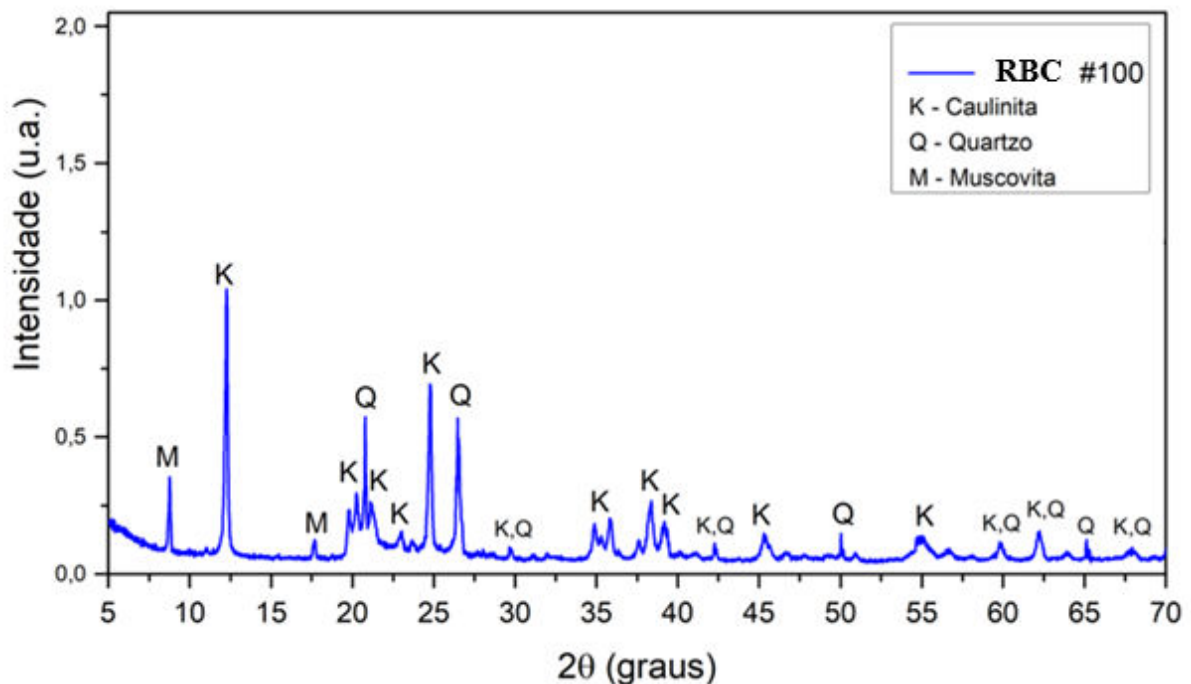
Tabela 2: Massa específica real do Caulim segundo diferentes autores

Material	Peso específico seco (kN/m ³)	Autores
Caulim	26,0	(Hatefi <i>et al.</i> , 2024)
Caulim	26,1	(Consoli <i>et al.</i> , 2021)
Caulim	27,8	(Chandrasekhar; Ramaswamy, 2007)
Caulim	26,7	(Castro, 2008)
Caulim	27,2	(Araújo, 2016)

No âmbito desta pesquisa, foram realizados ensaios para a determinação dos limites de consistência tanto para os materiais isolados quanto para as misturas de solo arenoso com o RBC. Contudo, observou-se que todas as misturas ensaiadas apresentaram comportamento Não Plástico (NP). Este resultado é atribuído à natureza granular do solo de base (solo arenoso) e à quantidade de RBC utilizado. Embora o RBC seja composto por partículas finas, a predominância da fração arenosa na mistura impediu a formação de uma massa moldável que permitisse a execução dos ensaios de acordo com as normas NBR 6459 (ABNT, 2016a) e NBR 7180 (ABNT, 2016b). A ausência de plasticidade indica que o RBC atua primariamente como um *filler* inerte, contribuindo para o preenchimento de vazios e aumento do peso específico seco, sem alterar a natureza não coesiva do solo arenoso original.

A análise de Difração de Raios X (DRX) realizada nas amostras de RBC, evidenciou a presença de picos característicos de caulinita, quartzo e muscovita e uma estrutura cristalina que reforça a ação do RBC como *filler*.

Figura 10: DRX das amostras de RBC passante na peneira #100



A caracterização mineralógica e química é fundamental para compreender o comportamento do Resíduo de Beneficiamento de Caulim (RBC) como material de preenchimento. Segundo Chandrasekhar & Ramaswamy, (2007), análises de Difração de Raios X (DRX) em rejeitos de caulim identificam a caulinita como fase mineral majoritária, acompanhada de quartzo e pirita como impurezas acessórias.

Essa composição mineralógica influencia diretamente as propriedades físicas do material; enquanto a caulinita pura apresenta peso específico real dos grãos em torno de 26,0 kN/m³, a presença de minerais mais densos, como a pirita (peso específico seco $\approx$ 51,0 kN/m³), pode elevar o peso específico seco dos grãos para patamares próximos a 27,8 kN/m³, justificando os valores encontrados na caracterização física deste estudo.

A análise de DRX realizada na amostra de RBC revelou a presença de picos característicos de caulinita, quartzo e muscovita, confirmando a natureza predominantemente caulínica do resíduo, porém com frações significativas de minerais não plásticos. Esta composição mineralógica explica o comportamento observado por três mecanismos:

- Presença de quartzo livre: O quartzo é um mineral silicático de estrutura cristalina tridimensional, caracterizado por sua dureza, inércia química e ausência de plasticidade. Quando presente em misturas com água, o quartzo não desenvolve coesão entre partículas, atuando como elemento desagregante.
- Natureza da caulinita: A caulinita é um argilomineral do tipo 1:1, com estrutura constituída por uma folha tetraédrica de sílica e uma folha octaédrica de alumina, fortemente ligadas entre si por pontes de hidrogênio. Esta configuração confere à caulinita uma superfície específica relativamente baixa (em torno de 10-30 m²/g) e capacidade de troca catiônica reduzida (3-15 meq/100g), quando comparada a outros argilominerais como as esmectitas. Em termos práticos, a caulinita apresenta plasticidade baixa a moderada, mesmo quando pura, e sua capacidade de formar massa coesa com água é limitada.
- Presença de muscovita: A muscovita é um mineral do grupo das micas, com estrutura lamelar, mas comportamento não plástico, atuando de forma similar ao quartzo na desagregação da matriz.

A combinação destes fatores, solo granular + RBC composto por caulinita (baixa plasticidade natural), quartzo e muscovita (minerais não plásticos), resulta na ausência de plasticidade observada em todas as misturas.

Este comportamento tem implicações diretas para a presente pesquisa: a ausência de plasticidade indica que o RBC atua primariamente como um *filler* inerte, contribuindo para o preenchimento de vazios e aumento do peso específico seco, sem alterar a natureza não coesiva do solo arenoso original. Esta constatação é fundamental para a hipótese central do trabalho, pois confirma que as melhorias de desempenho observadas nos ensaios mecânicos, de

durabilidade e de permeabilidade decorrem essencialmente do efeito físico de empacotamento granular (preenchimento de vazios e refinamento microestrutural) e não de interações físico-químicas que alterassem a plasticidade do sistema.

- Espectrômetro de Fluorescência de Raios X (FRX):

A Tabela 3 apresenta a composição química de diferentes materiais de base caulínica reportados na literatura recente. Observa-se que tanto o RBC quanto o metacaulim são compostos predominantemente por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). No entanto, é fundamental distinguir que, enquanto o metacaulim é obtido por calcinação e apresenta reatividade pozolânica, o RBC utilizado nesta pesquisa não foi submetido a qualquer tratamento térmico, mantendo sua estrutura cristalina original. Neste contexto, a presença de SiO_2 e Al_2O_3 no RBC não indica reatividade química esperada, mas tão somente a confirmação de sua natureza como material silicático estável. A contribuição do resíduo para as misturas estudadas dar-se-á, portanto, exclusivamente por meio do efeito físico de preenchimento (*filler*), conforme hipótese central deste trabalho, atuando na otimização do empacotamento granular e no refinamento da microestrutura, sem participação em reações pozolânicas secundárias.

Tabela 3: Composição química comparativa de caulins e metacaulins (% em massa)

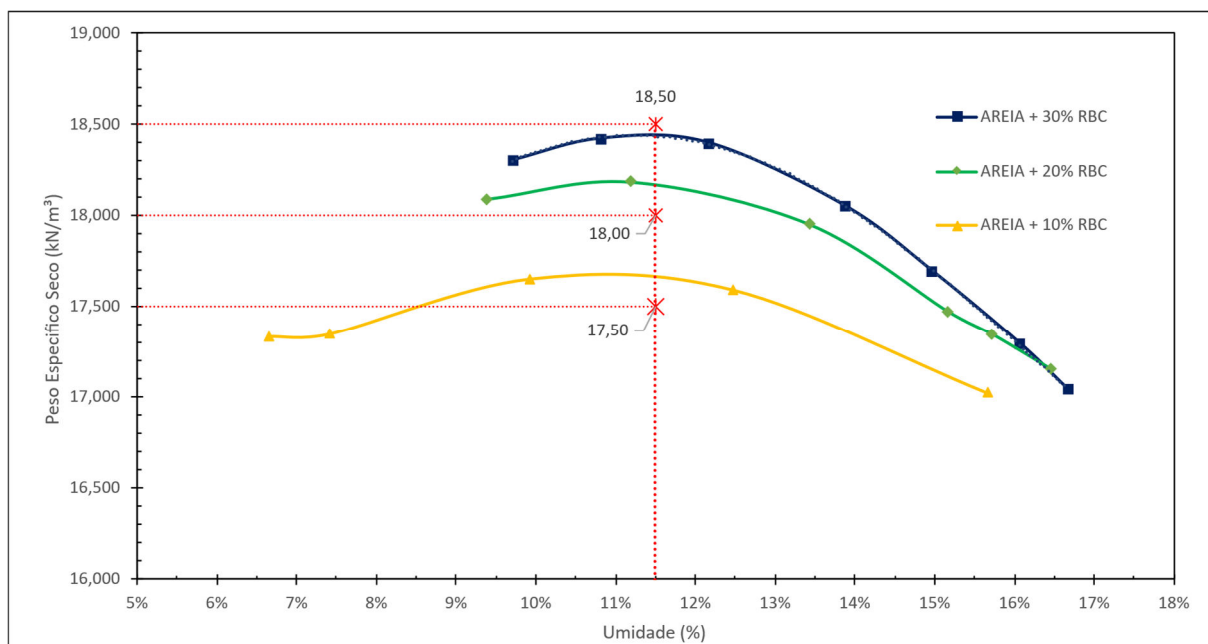
Symbol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	LOI	Referência
Caulim	64,45	20,07	5,99	1,40	3,4	(Hatefi <i>et al.</i> , 2024)
Metacaulim	59,19	36,94	1,2	0,07	1,11	(Longhi <i>et al.</i> , 2022)
Metacaulim	57,24	18,87	4,56	2,45	9,94	(Ho <i>et al.</i> , 2018)
Caulim	58,8	36	0,2	1,6	0,8	(Rodrigues <i>et al.</i> , 2021)
Caulim	52,50	31,75	1,44	0,40	13,76	(Consoli <i>et al.</i> , 2021)
Metacaulim	46,53	41,20	8,85	3,00	16,25	(Araújo, 2016)

- Compactação das Mistura

Foram realizados ensaios de compactação utilizando a energia Proctor Normal em misturas de solo arenoso contendo diferentes teores de RBC, especificamente 10%, 20% e 30% em massa. A escolha da energia Proctor Normal, em detrimento das energias Intermediária ou Modificada, fundamenta-se em critérios técnicos e no escopo da pesquisa. A energia Normal é representativa do esforço de compactação gerado por equipamentos convencionais de campo,

aplicáveis a obras de pavimentação de menor porte, aterros e camadas de reforço de subleito (Ogunsanwo, 1989). Adicionalmente, para os fins desta investigação, que visa avaliar o efeito *filler* do RBC no preenchimento de vazios, a utilização de uma energia mais baixa é estrategicamente vantajosa, pois resulta em uma estrutura inicial com maior volume de vazios, permitindo que a contribuição do resíduo no refinamento microestrutural seja observada com maior clareza. A energia Modificada, por sua vez, é indicada para simular o esforço de equipamentos pesados e obras de grande porte, como barragens e pavimentos de tráfego intenso (Scott; Jaksa; Kuo, 2012), não se aplicando ao escopo desta pesquisa. Por fim, a adoção da energia Normal está alinhada com grande parte dos estudos da literatura especializada em estabilização de solos com resíduos e cimento, permitindo a comparabilidade dos resultados. Esses ensaios, ilustrados na Figura 11, tiveram como objetivo principal avaliar o comportamento das misturas frente à compactação, considerando a influência crescente da adição do RBC nas propriedades físicas do solo arenoso.

Figura 11: Ensaio de Compactação



Fonte: Autor

Aumento da Umidade Ótima (w_{ot}): O teor de água necessário para atingir a compactação máxima subiu de 10,5% para 11,5%. Esse comportamento é decorrente da maior área superficial específica do RBC em comparação ao solo arenoso. Como o RBC possui partículas mais finas (conforme a curva granulométrica da Figura 9), demanda-se uma maior quantidade

de água para lubrificar a superfície dos grãos e permitir o rearranjo das partículas durante a compactação.

O objetivo desta etapa foi determinar os parâmetros ótimos de compactação (massa específica aparente seca máxima e umidade ótima) e, principalmente, compreender o efeito físico da adição do RBC na estrutura do solo arenoso. Os resultados obtidos para as diferentes misturas são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados dos ensaios de compactação (Proctor Normal) das misturas Solo-RBC

Teor de RBC (%)	Peso específico seco máximo ($\gamma_{d,max}$) (kN/m ³)	Umidade Ótima (w_{ot}) (%)
10	17,7	10,5
20	18,2	11,0
30	18,4	11,5

Fonte: Autor

Os resultados obtidos nos ensaios de compactação (Proctor Normal) indicam que a incorporação do RBC exerce uma influência direta nos parâmetros de compactação da mistura Solo-RBC. Observou-se uma tendência de crescimento na peso específico seco ($\gamma_{d,max}$) à medida que o teor de resíduo foi elevado de 10% para 30%, atingindo o valor de 18,4 kN/m³. Paralelamente, a Umidade Ótima (w_{ot}) apresentou um incremento inicial ao passar de 10% para 20% de RBC, estabilizando-se em 11,5% para as dosagens subsequentes. Este comportamento sugere que a granulometria ou a natureza do resíduo favorece um melhor rearranjo das partículas, permitindo o alcance de estados mais densos, embora demande um teor de água ligeiramente superior para a lubrificação dos grãos durante o processo de compactação.

Os valores de peso específico seco aparente selecionados para a moldagem dos corpos de prova, 17,5; 18,0 e 18,5 kN/m³, foram definidos de modo a abranger toda a faixa de densidades obtidas nos ensaios de compactação Proctor Normal ($\gamma_{d,max}$ entre 17,7 e 18,4 kN/m³, conforme Tabela 4), incluindo condições de compactação abaixo, próxima e acima da ótima. Esta variação permite avaliar a influência do grau de compactação no desempenho mecânico, na durabilidade e na permeabilidade das misturas, além de fornecer dados essenciais para a aplicação do modelo de dosagem baseado no índice η/Civ e para a análise do efeito *filler* do RBC em diferentes cenários de densidade.

3.3.4 Programa de Ensaio Resposta

Para avaliar o comportamento macroscópico das misturas e validar a eficácia da estabilização com RBC e cimento, foi estabelecido um programa de ensaios resposta, assim

denominados por quantificarem as variáveis dependentes do estudo, ou seja, as propriedades de engenharia que se espera sejam influenciadas pelas variáveis independentes (teores de RBC, cimento e γ_d). Estes ensaios contemplam três pilares fundamentais:

- (i) Desempenho mecânico, por meio da resistência à compressão simples e à tração na flexão;
- (ii) Integridade frente ao intemperismo, via ciclos de molhagem e secagem; e
- (iii) Comportamento hidráulico, por meio da condutividade hidráulica.

A Tabela 5 consolida os métodos e as respectivas referências normativas empregadas.

Tabela 5: Ensaios de desempenho mecânico, durabilidade e condutividade hidráulica.

Ensaios	Normas
Resistência à Compressão Simples (UCS)	NBR 12770 (ABNT, 2022b) D2166 (ASTM, 2010)
Durabilidade	NBR 13554 (ABNT, 2012b) D559 (ASTM, 2024a)
Resistência à Flexão por Viga 4 pontos	D1635/D1635M (ASTM, 2021a)
Condutividade hidráulica	ASTM D5084 (ASTM, 2024b)
DRX (Pós ruptura)	-

3.3.4.1 Ensaio de Resistência à Compressão Simples (UCS)

Para a definição das misturas com melhor desempenho mecânico, foram realizados ensaios de Resistência à Compressão Simples (UCS), seguindo as diretrizes das normas NBR 12770 (ABNT, 2022b) e D2166 (ASTM, 2010). As amostras foram submetidas a um período de cura de 7 dias e, antecedendo os ensaios, as amostras permaneceram submersas em água por 24 horas. Este procedimento visa mitigar os efeitos da sucção (Consoli; Rosa; Saldanha, 2011) e simular a condição de saturação, que representa o cenário mais desfavorável e crítico para a estabilidade do material em campo.

3.3.4.2 Ensaios de Durabilidade

A durabilidade das misturas foi avaliada por meio de ensaios de perda de massa, seguindo as prescrições das normas NBR 13554 (ABNT, 2012b) e D559 (ASTM, 2024a). O procedimento consistiu na exposição dos corpos de prova a 12 ciclos sucessivos de molhagem (imersão por 5 horas) e secagem (estufa a 71°C por 42 horas). Após cada etapa de secagem, as amostras foram submetidas à abrasão mecânica com escova de aço, aplicando-se uma força

padronizada de 13,34 N (aproximadamente 1,36 kgf ou 3 libras). Esses ciclos permitem analisar a estabilidade da matriz cimentante formada pela interação entre o solo arenoso, o RBC e o cimento sob condições simuladas de intemperismo acelerado.

3.3.4.3 Ensaio de Resistência à Flexão

A determinação da resistência à flexão é fundamental para materiais destinados a camadas de pavimentos, uma vez que o trincamento estrutural é governado por tensões na fibra inferior da camada. Para esta pesquisa, adotou-se o ensaio de tração por flexão em quatro pontos conforme as diretrizes da norma ASTM D1635 (ASTM, 2021a). Foram moldados corpos de prova prismáticos (vigas) com dimensões de 41,67 x 41,67 x 175 mm conforme as diretrizes da norma ASTM D1635 (ASTM, 2021a). O ensaio permite calcular o módulo de ruptura do material. Assim como no ensaio de compressão, as vigas foram submetidas a 7 dias de cura em câmara úmida com 24 horas de imersão em água antes do rompimento, visando a saturação e a anulação do efeitos de sucção.

3.3.4.4 Ensaio de Condutividade Hidráulica

Para avaliar o impacto da introdução de finos (RBC) na rede porosa e na capacidade de fluxo da mistura, foram realizados ensaios de condutividade hidráulica utilizando o permeâmetro de parede flexível, seguindo a norma ASTM D5084 (ASTM, 2024c). A escolha da parede flexível justifica-se pela possibilidade de aplicar uma tensão de confinamento ao corpo de prova, garantindo o selamento lateral e impedindo o surgimento de fluxos preferenciais entre o solo e a parede do molde, erro comum em ensaios de parede rígida para solos estabilizados com finos. Devido à expectativa de baixos coeficientes de permeabilidade resultantes do efeito *filler*, utilizou-se o método C de carga variável (*falling head*), que oferece maior precisão para medir fluxos em matrizes de baixa condutividade (frequentemente atingindo ordens de 10^{-7} m/s ou inferiores).

3.3.4.5 Dosagem da Mistura Solo/RBC/Cimento

A predição da resistência mecânica e a definição das misturas para a estabilização do solo arenoso com RBC e cimento fundamentam-se na correlação entre a porosidade e o teor volumétrico de ligante. Essa abordagem utiliza o índice porosidade/teor volumétrico cimento (η/C_{iv}), ou sua variação ajustada por um expoente de potência (η/C_{iv}^b), como parâmetro principal de dosagem (Consoli *et al.*, 2007). O uso do expoente de ajuste b é essencial para equalizar a influência da porosidade e do teor de aglomerante, permitindo que a performance

mecânica da mistura seja estimada de forma independente das variáveis isoladas de moldagem (Hoch *et al.*, 2022). De acordo com Diambra *et al.*, (2017), a relação entre o volume de vazios e o conteúdo de cimento assume a forma de uma lei de potência e conforme demonstrado por (Moreira *et al.*, 2019), o uso deste parâmetro racional permite a normalização de dados experimentais obtidos com diferentes pesos específicos e dosagens de aglomerante.

A adoção desta correlação única, conforme preconizado por Consoli *et al.*, (2017) e reforçado por Corte *et al.*, (2024) para misturas cimentadas, reduz a necessidade de ensaios laboratoriais exaustivos, pois permite estimar o desempenho mecânico para diversas combinações de massa específica e conteúdo de cimento. Seguindo essa premissa, a calibração do modelo permite que a metodologia seja estendida a materiais alternativos, como o RBC, garantindo que as equações reflitam a sinergia entre o efeito *filler* e a estruturação química. Assim, os parâmetros de compressão e tração tornam-se indicadores primários para validar o modelo, servindo como ferramenta para o dimensionamento de camadas de pavimento, conforme a aplicabilidade discutida por Corte *et al.*, (2024).

3.3.4.6 Caracterização Mineralógica Pós-Ruptura (DRX)

A fim de compreender as modificações na microestrutura da mistura solo-RBC-cimento e correlacionar o desempenho macroscópico observado nos ensaios de durabilidade e permeabilidade, realizou-se a análise de Difração de Raios-X (DRX) em amostras coletadas após o ensaio de Resistência à Compressão Simples (UCS) aos 7 dias de cura. Esta etapa visa identificar as fases cristalinas presentes na matriz estabilizada e verificar a interação física e química entre os componentes.

O procedimento experimental para a análise mineralógica consistiu em:

- **Paralisação da Hidratação:** Imediatamente após a ruptura aos 7 dias, fragmentos representativos do núcleo dos corpos de prova foram submetidos à técnica de interrupção de hidratação por imersão em álcool isopropílico, seguida de secagem em dessecador, garantindo que a mineralogia observada reflita exatamente o estado do material na idade de ensaio.
- **Preparação da Amostra:** O material foi pulverizado manualmente em almofariz de ágata até a granulometria passante na peneira #200 (0,075 mm), visando a obtenção de um pó homogêneo para a difração.
- **Identificação de Fases:** A análise dos difratogramas focou na identificação dos picos característicos dos minerais constituintes do solo arenoso

(predominantemente Quartzo), do RBC (Caulinita e Quartzo) e dos produtos de hidratação do Cimento Portland, como a Portlandita (Ca(OH)_2) e a Etringita.

Diferentemente de materiais pozolânicos, espera-se que o RBC mantenha seus picos de caulinita e quartzo preservados, indicando sua atuação primária como um agente de preenchimento (*filler*). Essa ocupação física dos espaços interparticulares pelo RBC, aliada à formação da rede cristalina de produtos de hidratação do cimento, é o mecanismo responsável pela redução da condutividade hidráulica e pelo incremento da integridade da mistura frente aos ciclos de molhagem e secagem. A manutenção de picos de Portlandita em idades iniciais (7 dias) confirma a disponibilidade de ligante para a estruturação da matriz, sem o consumo químico característico de reações pozolânicas secundárias.

Dessa forma, a análise mineralógica confirma a inércia química do RBC na matriz estabilizada. A detecção nítida da Portlandita aos 7 dias, sem evidências de formação de novos silicatos hidratados além dos provenientes da hidratação primária do cimento, ratifica que o incremento de resistência e a redução da permeabilidade decorrem da densificação física da rede porosa (efeito *filler*) e não de reações pozolânicas secundárias, as quais não seriam esperadas dada a natureza mineralógica do resíduo e a idade inicial de cura analisada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

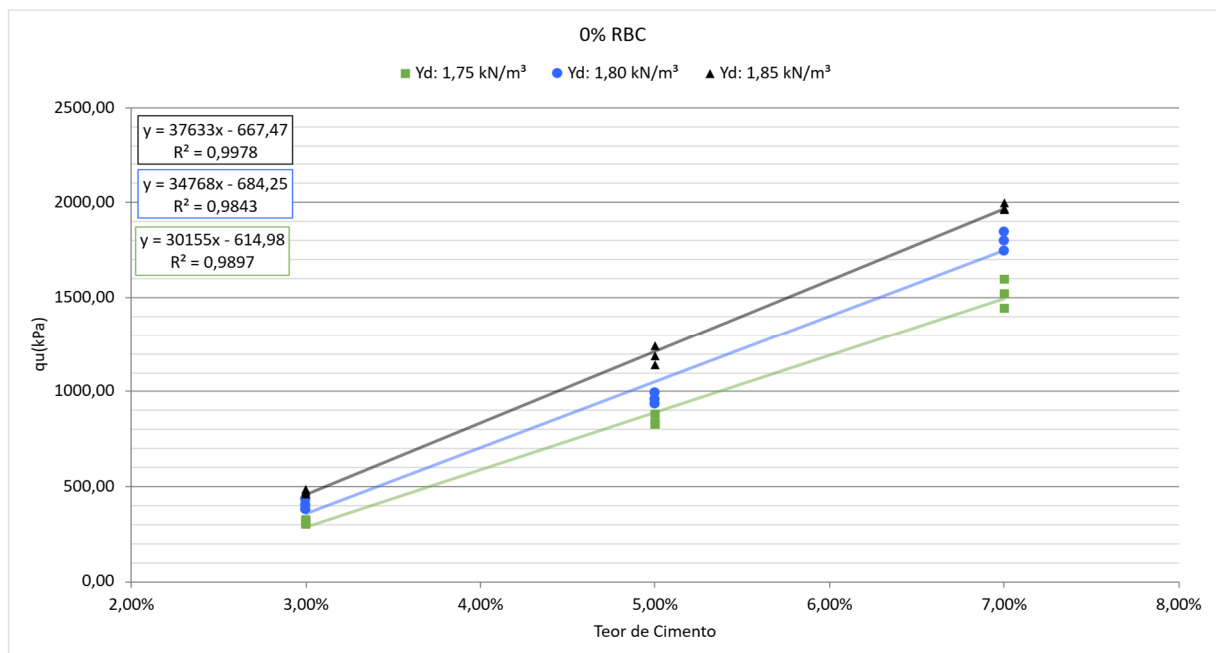
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Nesta seção, é avaliada a influência dos principais parâmetros de dosagem, teor de cimento, teor de rejeito de caulim (RBC) e peso específico seco (γ_d), na resistência à compressão simples (RCS) das misturas, curadas aos 7 dias.

4.1.1 Influência do Teor de Cimento Portland

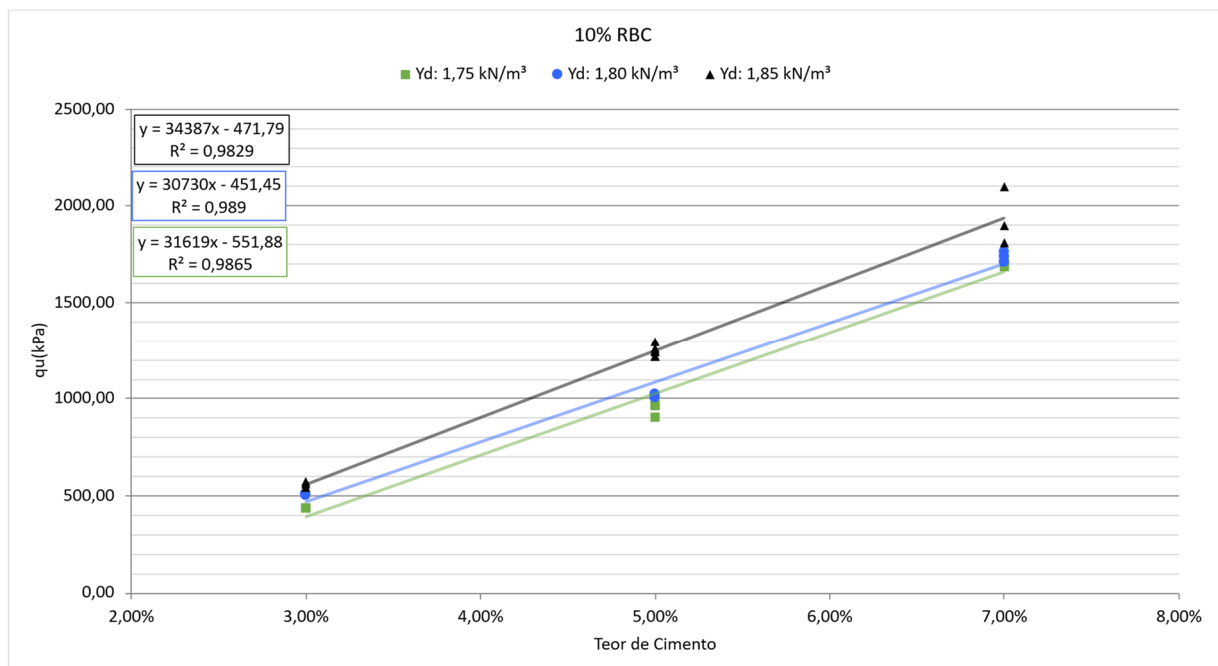
A Figura 12 apresenta o comportamento mecânico do solo arenoso estabilizado apenas com cimento (0% de RBC), servindo como referência para as demais misturas. Observa-se que, para um mesmo peso específico seco (γ_d), a resistência à compressão simples (q_u) aumenta com o teor de cimento Portland. Os valores variam de aproximadamente 312 kPa (3% de cimento, $\gamma_d = 17,5$ kN/m³) a 1978 kPa (7% de cimento, $\gamma_d = 18,5$ kN/m³). Para um mesmo teor de cimento, a resistência é diretamente dependente do grau de compactação: amostras moldadas com $\gamma_d = 18,5$ kN/m³ apresentam resistências sistematicamente superiores às aquelas compactadas com $\gamma_d = 17,5$ kN/m³. Por exemplo, para 5% de cimento, as resistências são 847 kPa ($\gamma_d = 17,5$), 961 kPa ($\gamma_d = 18,0$) e 1192 kPa ($\gamma_d = 18,5$).

Figura 12: RBC 0%: Mostra o comportamento do solo-cimento puro



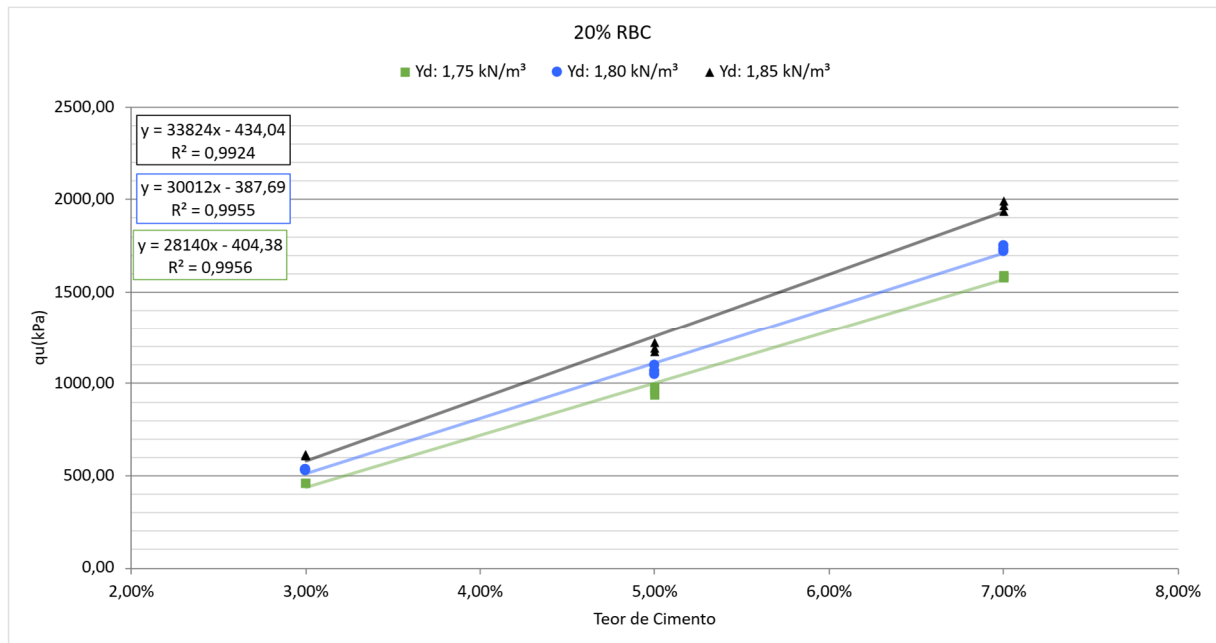
Com a introdução de 10% de RBC (Figura 13), observa-se um incremento na resistência mecânica em relação à mistura controle (Figura 12), indicando que a adição do rejeito de caulim começa a atuar no preenchimento dos vazios intergranulares da areia. Para o teor de 5% de cimento e $\gamma_d = 18,5 \text{ kN/m}^3$, a resistência atinge 1247 kPa, superando os 1192 kPa da mistura sem RBC, o que representa um ganho de aproximadamente 4,6%. Para $\gamma_d = 18,0 \text{ kN/m}^3$, os valores são 1013 kPa (10% RBC) contra 961 kPa (controle), um aumento de 5,4%. Esse ganho decorre da ação combinada entre o refinamento da porosidade, promovido pelo efeito *filler* do RBC, e a formação dos géis de hidratação do cimento (portlandita e etringita), cuja presença foi confirmada por DRX aos 7 dias (Seção 4.6 abaixo). Observa-se ainda que a relação direta entre γ_d e resistência se mantém, com as curvas para $\gamma_d = 18,5 \text{ kN/m}^3$ sempre posicionadas acima das demais.

Figura 13: RBC 10%: Efeito da adição inicial de caulim como material de preenchimento (*filler*)



A Figura 14 apresenta os resultados para a mistura com 20% de RBC. As curvas de resistência para os três teores de cimento mostram-se bem definidas e ascendentes.

Figura 14: RBC 20%: Comportamento com teor intermediário de RBC



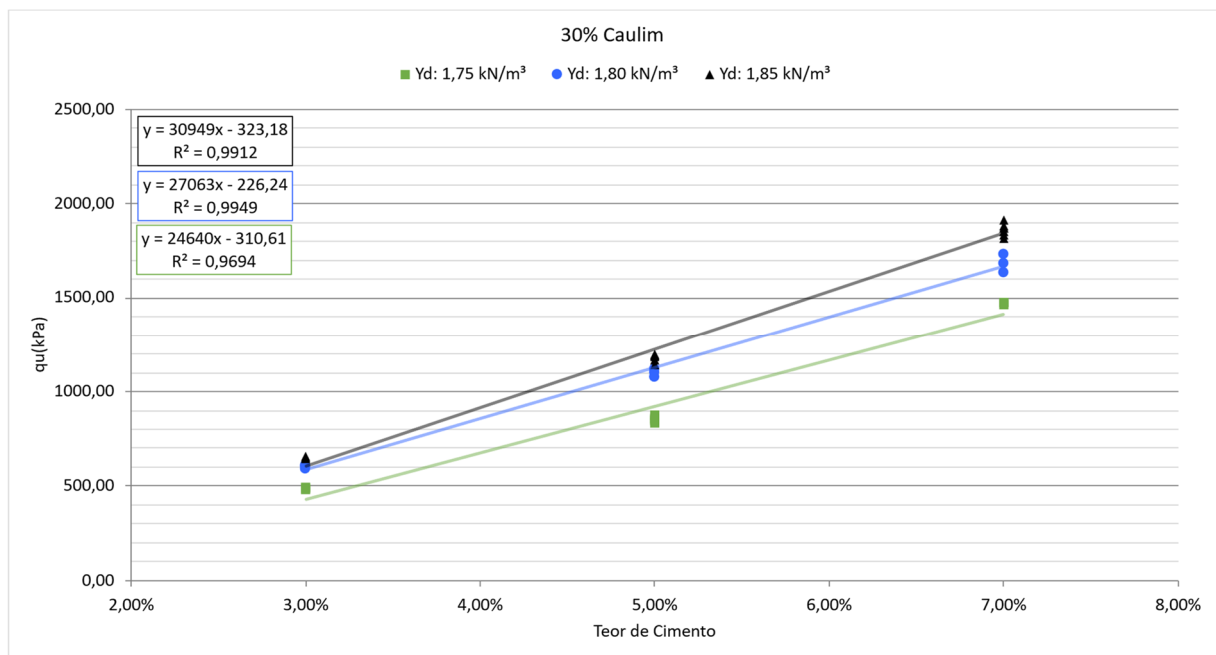
A análise dos dados revela comportamentos distintos conforme o teor de cimento:

- Para 3% de cimento, as resistências com 20% de RBC são superiores às das demais dosagens em todos os γ_d : 460 kPa ($\gamma_d = 17,5$), 534 kPa ($\gamma_d = 18,0$) e 612 kPa ($\gamma_d = 18,5$), comparados a 437, 507 e 560 kPa para 10% RBC e 312, 405 e 473 kPa para o controle.
- Para 5% de cimento, a mistura com 20% RBC apresenta resistências de 962 kPa ($\gamma_d = 17,5$), 1071 kPa ($\gamma_d = 18,0$) e 1194 kPa ($\gamma_d = 18,5$). Em $\gamma_d = 18,0$ e $17,5$, esses valores superam tanto o controle (961 e 847 kPa) quanto a mistura com 10% RBC (1013 e 882 kPa). Entretanto, em $\gamma_d = 18,5$, a mistura com 10% RBC atinge 1247 kPa, sendo ligeiramente superior à de 20% (1194 kPa) e ao controle (1192 kPa).
- Para 7% de cimento, as resistências com 20% RBC são 1586 kPa ($\gamma_d = 17,5$), 1734 kPa ($\gamma_d = 18,0$) e 1965 kPa ($\gamma_d = 18,5$). Neste teor, o controle ainda apresenta os maiores valores (1519, 1796 e 1978 kPa, respectivamente), enquanto a mistura com 20% RBC supera a de 10% em $\gamma_d = 18,5$ (1965 vs 1935 kPa), mas fica abaixo em $\gamma_d = 17,5$ (1586 vs 1702 kPa).

Esses resultados indicam que o teor de 20% RBC proporciona ganhos consistentes de resistência para teores mais baixos de cimento (3% e 5%), especialmente em compactações intermediárias. Para 7% de cimento, o efeito é menos pronunciado, e a mistura controle ainda se destaca. Assim, o equilíbrio granulométrico promovido por 20% de RBC é particularmente vantajoso quando se deseja otimizar o desempenho com menores consumos de cimento.

A Figura 16 ilustra o comportamento das misturas com 30% de RBC. Observa-se que a tendência de crescimento da resistência com o aumento do teor de cimento e do peso específico seco se mantém. No entanto, os valores absolutos são, em geral, inferiores aos observados para 20% RBC na maioria das condições. Por exemplo, para 5% de cimento e $\gamma_d = 18,5 \text{ kN/m}^3$, a resistência é de 1178 kPa (30% RBC) contra 1194 kPa (20% RBC) e 1247 kPa (10% RBC). Para 7% de cimento e $\gamma_d = 18,5$, o valor é de 1852 kPa (30% RBC), inferior aos 1965 kPa (20% RBC) e 1978 kPa (controle)..

Figura 15: RBC 30%: Avaliação da mistura com maior teor de substituição/adição de finos



Essa redução pode ser atribuída ao elevado volume de finos do RBC, que aumenta significativamente a área superficial a ser coberta pelos produtos de hidratação do cimento. Conforme discutido por Lade; Liggió; Yamamuro, (1998) e Wei; Liu; Ku, (2021), a partir de um teor crítico, os finos deixam de atuar apenas como preenchimento e passam a separar os grãos maiores, alterando a cadeia de transmissão de tensões e tornando as ligações cimentícias mais delgadas e suscetíveis a variações na compactação. A maior sensibilidade da mistura com

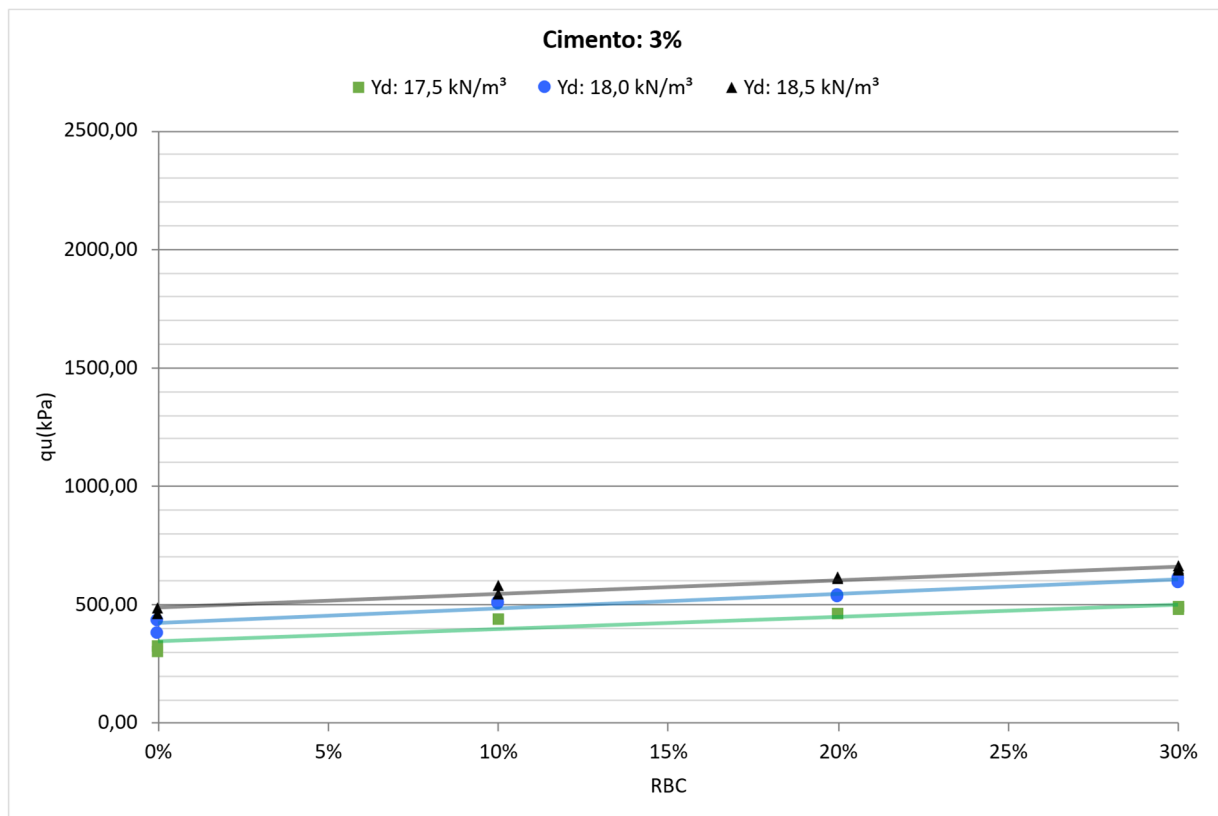
30% RBC à variação de γ_d reflete-se na inclinação mais acentuada das curvas, indicando que pequenas alterações na compactação podem provocar variações significativas na resistência.

Apesar do desempenho mecânico ligeiramente inferior, a elevada presença de finos é particularmente relevante para a durabilidade e a condutividade hidráulica, conforme será discutido nas Seções 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 abaixo. O preenchimento mais eficiente dos vazios e o refinamento da rede porosa contribuem para reduzir a permeabilidade e aumentar a resistência aos ciclos de molhagem e secagem, tornando a mistura com 30% de RBC uma opção atraente quando esses requisitos são prioritários.

4.1.2 Adição de RBC

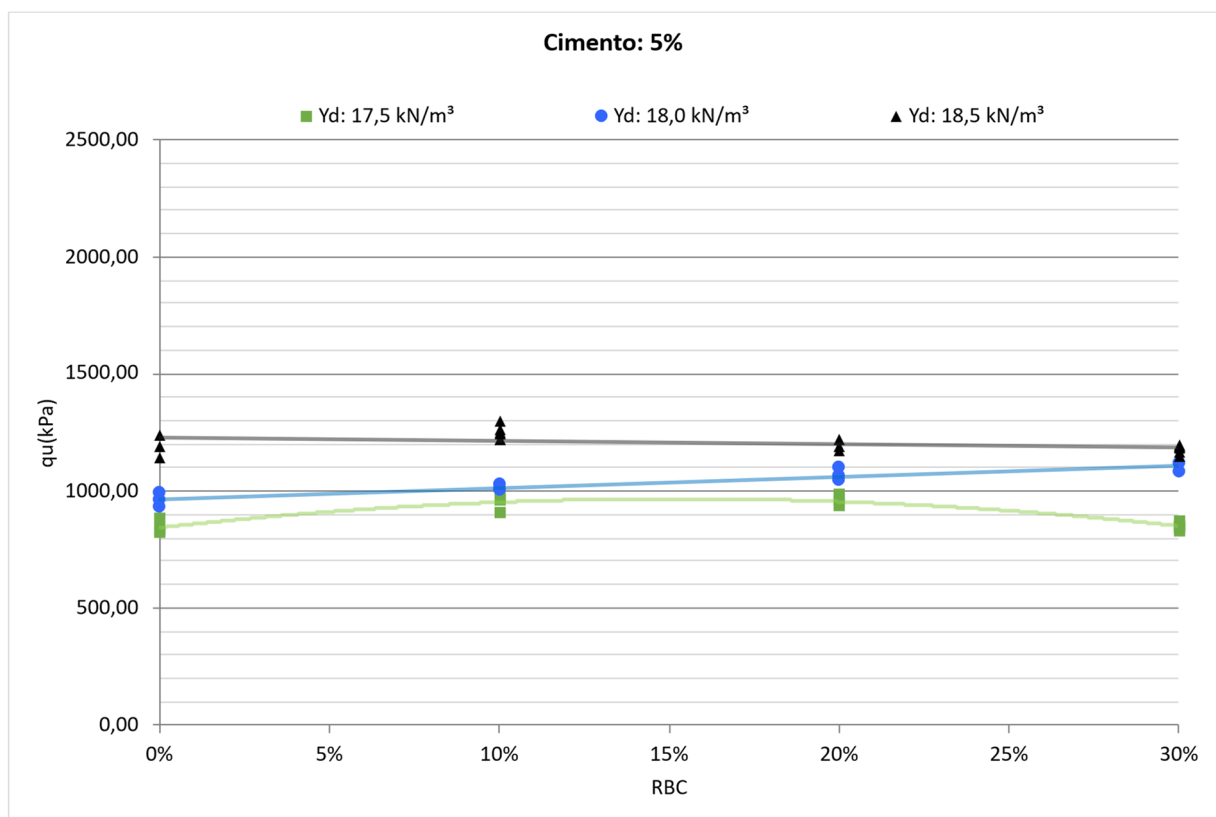
A Figura 16 apresenta a evolução da resistência com o aumento do teor de RBC para as misturas estabilizadas com 3% de cimento. Observa-se que a inclusão do rejeito promove um ganho de resistência em todos os níveis de compactação analisados. Para o peso específico seco de 18,5 kN/m³, a resistência eleva-se de 473 kPa (0% RBC) para 652 kPa (30% RBC), representando um incremento de aproximadamente 38%. Esse comportamento indica que, em teores baixos de cimento, o RBC atua como *filler*, reduzindo os vazios e otimizando os pontos de contato entre os grãos de areia, o que permite que o aglomerante seja mais eficiente na ligação entre as partículas.

Figura 16: Resistência à Compressão Simples (q_u) em função do teor de RBC para misturas com 3% de cimento



A Figura 17 apresenta o comportamento das misturas estabilizadas com 5% de cimento. Diferente do observado com teores menores de aglomerante, o incremento de RBC não promove um ganho linear de resistência. Para o peso específico seco de 18,5 kN/m³, a resistência apresenta pequenas variações em torno de 1200 kPa: 1192 kPa (0% RBC) , 1247 kPa (10% RBC) , 1194 kPa (20% RBC) e 1178 kPa (30% RBC) . Observa-se um leve pico em 10% de RBC, seguido de declínio, indicando que o benefício do *filler* atinge um limite de saturação próximo a esse teor.

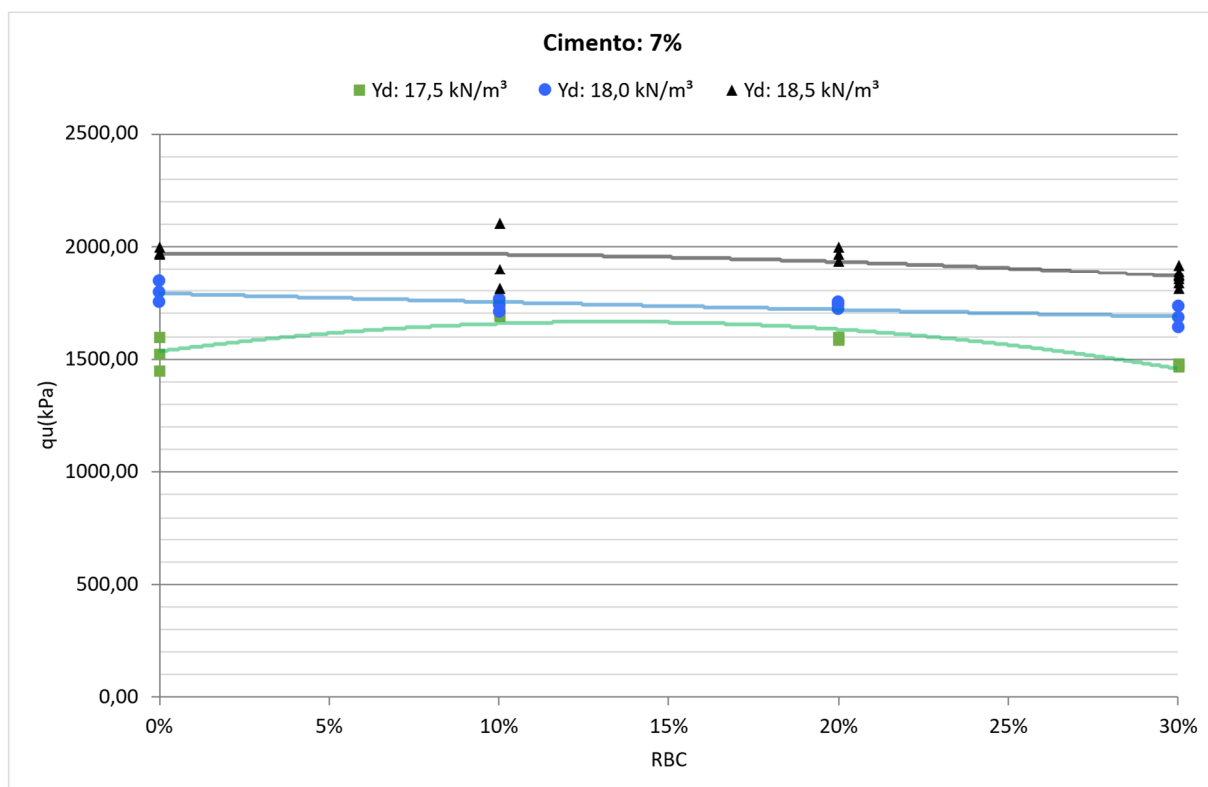
Figura 17: Resistência à Compressão Simples (q_u) em função do teor de RBC para misturas com 5% de cimento



Notadamente, para a menor peso específico seco de compactação (17,5 kN/m³), a resistência aumenta até 20% RBC (962 kPa) e depois sofre queda acentuada para 840 kPa em 30% RBC. Este comportamento sugere que o elevado volume de finos do RBC, nessas condições de baixa compactação, passa a interferir negativamente na cimentação, possivelmente devido à insuficiência de aglomerante para cobrir a vasta área superficial das partículas de caulim.

A Figura 18 apresenta os resultados para as misturas estabilizadas com 7% de cimento, que atingiram os maiores patamares de resistência da série experimental, com valores próximos a 2000 kPa na condição de maior compactação (1978 kPa para 0% RBC e 1965 kPa para 20% RBC, ambos com $\gamma_d = 18,5 \text{ kN/m}^3$)

Figura 18: Resistência à Compressão Simples (q_u) em função do teor de RBC para misturas com 7% de cimento



O comportamento em relação ao teor de RBC revela uma tendência distinta da linearidade esperada, evidenciando um ponto de eficiência máxima onde o incremento de resistência ocorre de forma expressiva apenas até teores intermediários, situados entre 10% e 20% de substituição. Nesse intervalo, o rejeito atua eficientemente como *filler*, otimizando o contato entre os grãos e potencializando a ação química do cimento na matriz. Por exemplo, para $\gamma_d = 18,5 \text{ kN/m}^3$, as resistências são 1978 kPa (0%) , 1935 kPa (10%) , 1965 kPa (20%) e 1852 kPa (30%) . Para $\gamma_d = 18,0 \text{ kN/m}^3$: 1796 kPa (0%) , 1736 kPa (10%) , 1734 kPa (20%) e 1683 kPa (30%) . Ao atingir o teor de 30%, observa-se uma queda sistemática na resistência em todos os níveis de compactação, fenômeno que indica um declínio por saturação de finos. Esse cenário sugere que o excesso de partículas de RBC gera uma área superficial tão elevada que a quantidade de aglomerante, mesmo no patamar de 7%, torna-se insuficiente para envolver todas as partículas, resultando em ligações cimentícias mais frágeis.

A análise do comportamento mecânico das misturas revela que o limite de eficiência da adição de RBC encontra explicação fundamental na teoria do empacotamento granular. Conforme Sedran e Delarrard, (1999), o excesso de finos em relação ao volume de vazios disponível pode gerar um efeito de afastamento (*looseness*), onde as partículas menores "empurram" as maiores, reduzindo o empacotamento global. Esse fenômeno altera a distribuição de tensões na microestrutura, substituindo os contatos diretos grão-a-grão da areia por uma camada de finos que, se em excesso, passa a atuar como um agente de separação entre os grãos cimentados.

Este cenário é particularmente crítico sob altas dosagens de aglomerante (7% de cimento). Modelos teóricos, como o proposto por Diambra *et al.*, (2017), que descrevem a resistência de solos cimentados pela superposição das contribuições da matriz granular e da fase cimentante, sugerem que a eficiência da fase ligante é otimizada quando há um balanço entre o volume de vazios e o teor de cimento. O excesso de finos, ao aumentar a área superficial, pode deslocar este balanço, tornando a resistência mais dependente da qualidade das ligações cimentícias, as quais podem ser comprometidas se a demanda por produtos de hidratação superar a capacidade do cimento em formá-las de maneira robusta. Estudos sobre solos granulares com finos Thevanayagam *et al.*, (2002) indicam que a presença de finos pode alterar a cadeia de transmissão de tensões, um efeito que, em solos cimentados, se soma à fragilização das pontes de cimento.

Sob a ótica dos modelos de superposição de falhas (Diambra *et al.*, 2017; Festugato *et al.*, 2018), a resistência total do compósito pode ser decomposta nas contribuições da matriz granular (atrito e intertravamento) e da fase cimentante (coesão das pontes de cimento). Em ensaios de compressão simples, ambas as contribuições atuam simultaneamente. Já na resistência à tração, a contribuição da matriz granular é desprezível, de modo que a resistência é governada quase que exclusivamente pela fase cimentante. Neste contexto, o refinamento microestrutural promovido pelo efeito *filler* do RBC, que preenche vazios, aumenta a área de contato entre partículas e permite uma distribuição mais homogênea das pontes cimentícias, potencializa de forma mais expressiva a resistência à tração do que a compressão simples. Isso explica por que os ganhos relativos observados na tração (78% com 30% de RBC) superam aqueles obtidos na compressão (até 40%) para as mesmas condições de dosagem e compactação.

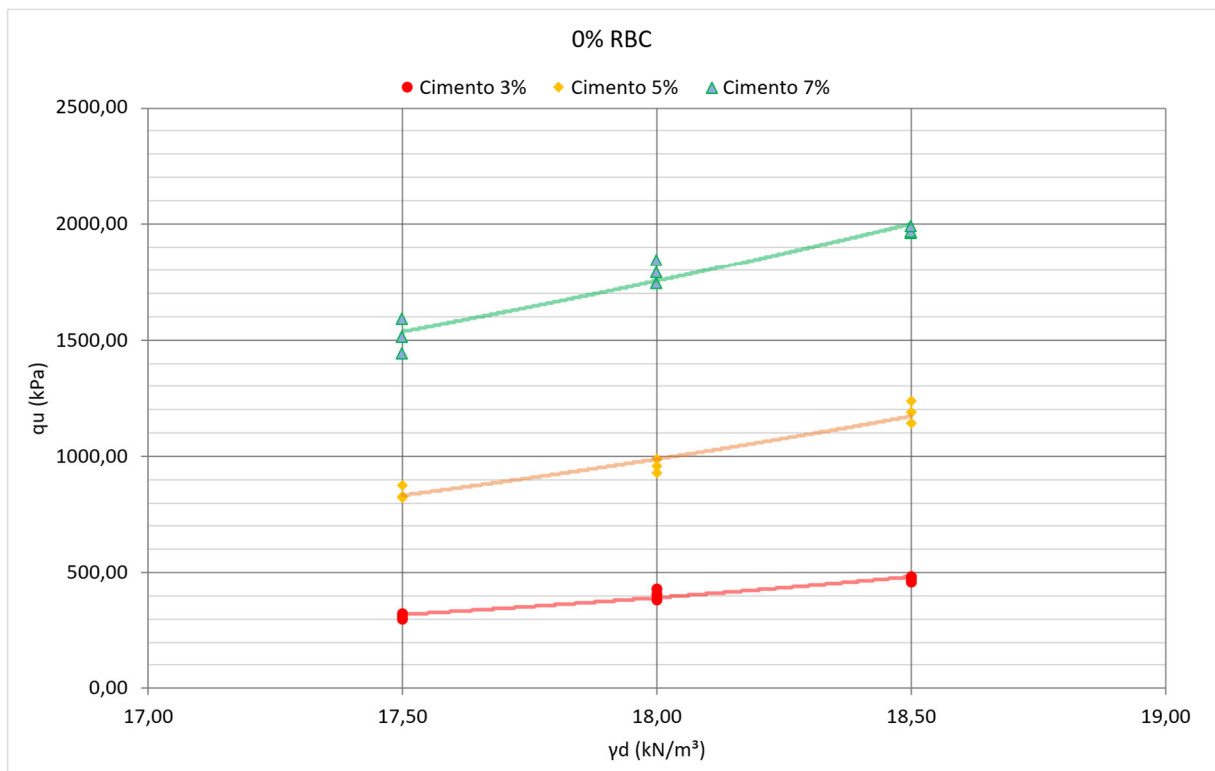
Contudo, é fundamental considerar que a resistência a compressão simples não é o único indicador de desempenho para a vida útil do material. Embora ocorra um decréscimo na carga

de ruptura nos teores de 30% de RBC, esse elevado volume de finos desempenha um papel crucial no selamento dos poros. Tal refinamento da porosidade tende a favorecer a durabilidade e a redução da condutividade hidráulica, tornando a mistura mais resiliente aos ataques ambientais e ciclos de molhagem e secagem. Dessa forma, conforme demonstrado por Consoli *et al.*, (2023), a utilização desses subprodutos em substituição a agregados naturais permite o desenvolvimento de soluções de engenharia mais sustentáveis (*green alternatives*), conciliando o atendimento aos requisitos técnicos normativos com a redução do impacto ambiental.

4.1.3 Peso específico seco (γ_d)

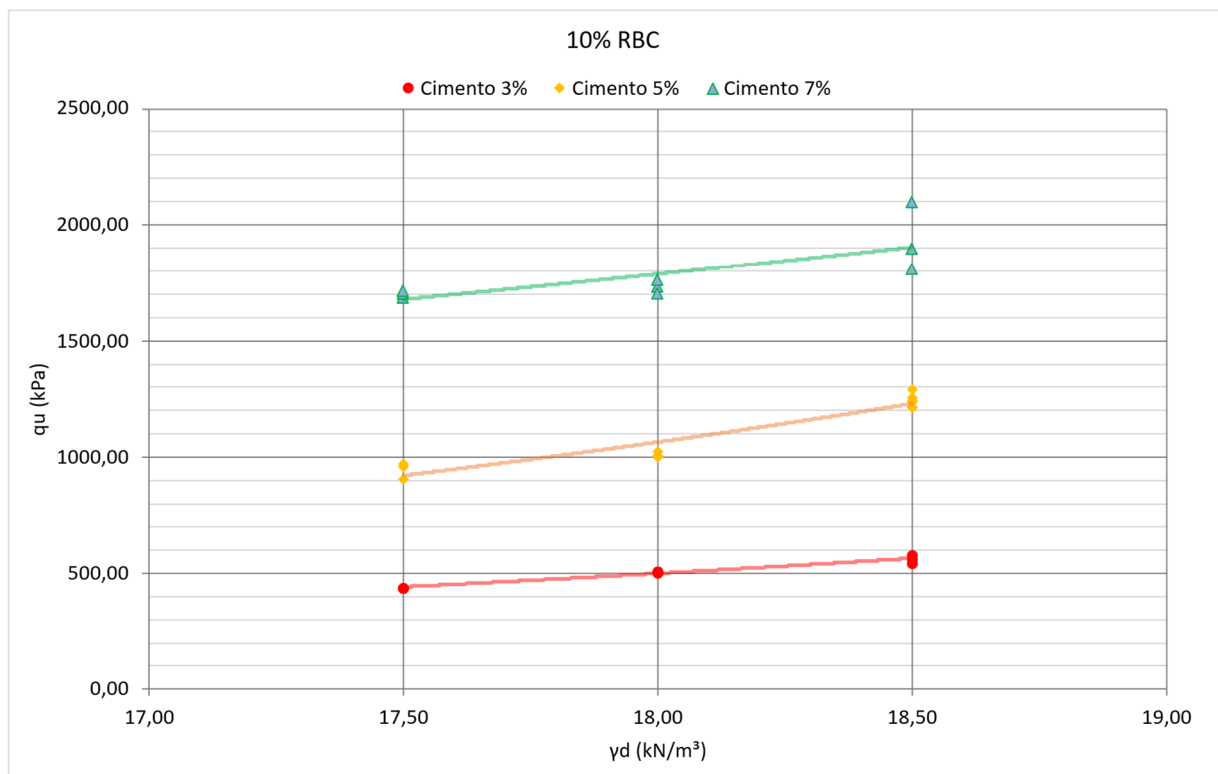
Na Figura 19, observa-se o comportamento do solo arenoso estabilizado apenas com cimento (0% RBC). Verifica-se uma dependência direta entre o peso específico seco e a resistência à compressão simples (q_u). O incremento de γ_d de 17,5 kN/m³ para 18,5 kN/m³ resulta em ganhos de resistência de 161 kPa para o teor de 3% de cimento, 345 kPa para 5% e 459 kPa para 7%, evidenciando que a compactação potencializa a eficiência do cimento, especialmente nos teores mais elevados. Esse resultado válida a premissa de que, em solos arenosos, a compactação é o principal agente de redução de vazios, sendo vital para garantir que os pontos de cimentação não fiquem isolados em uma estrutura fofa (Arrieta Baldovino; Ekinci e Bruschi, 2024; Stracke *et al.*, 2012).

Figura 19: Comportamento do solo-cimento convencional (0% RBC)



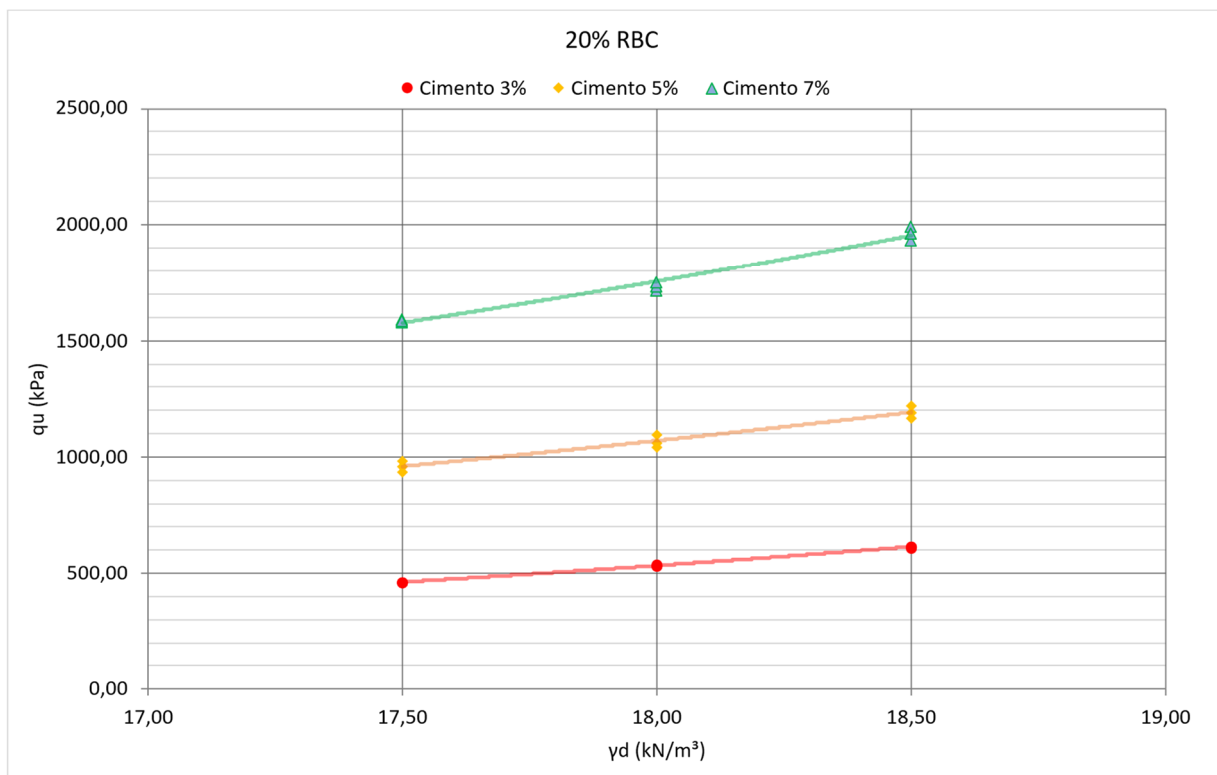
A Figura 20 ilustra o efeito da compactação nas misturas com 10% de RBC. Comparativamente ao solo puro, as curvas de resistência deslocam-se para patamares superiores em todos os teores de cimento, mantendo a tendência de crescimento com o aumento de γ_d . Para o teor de 3% de cimento, a resistência eleva-se de 437 kPa ($\gamma_d = 17,5 \text{ kN/m}^3$) para 560 kPa ($\gamma_d = 18,5 \text{ kN/m}^3$); para 5%, de 882 kPa para 1247 kPa; e para 7%, de 1702 kPa para 1935 kPa. Observa-se que, nos teores de 3% e 7%, os ganhos relativos com a compactação são menores do que os observados na mistura controle (0% RBC), sugerindo que a adição de finos pode reduzir a sensibilidade da resistência a variações de γ_d , especialmente quando há excesso de cimento.

Figura 20: Influência da compactação com 10% de RBC



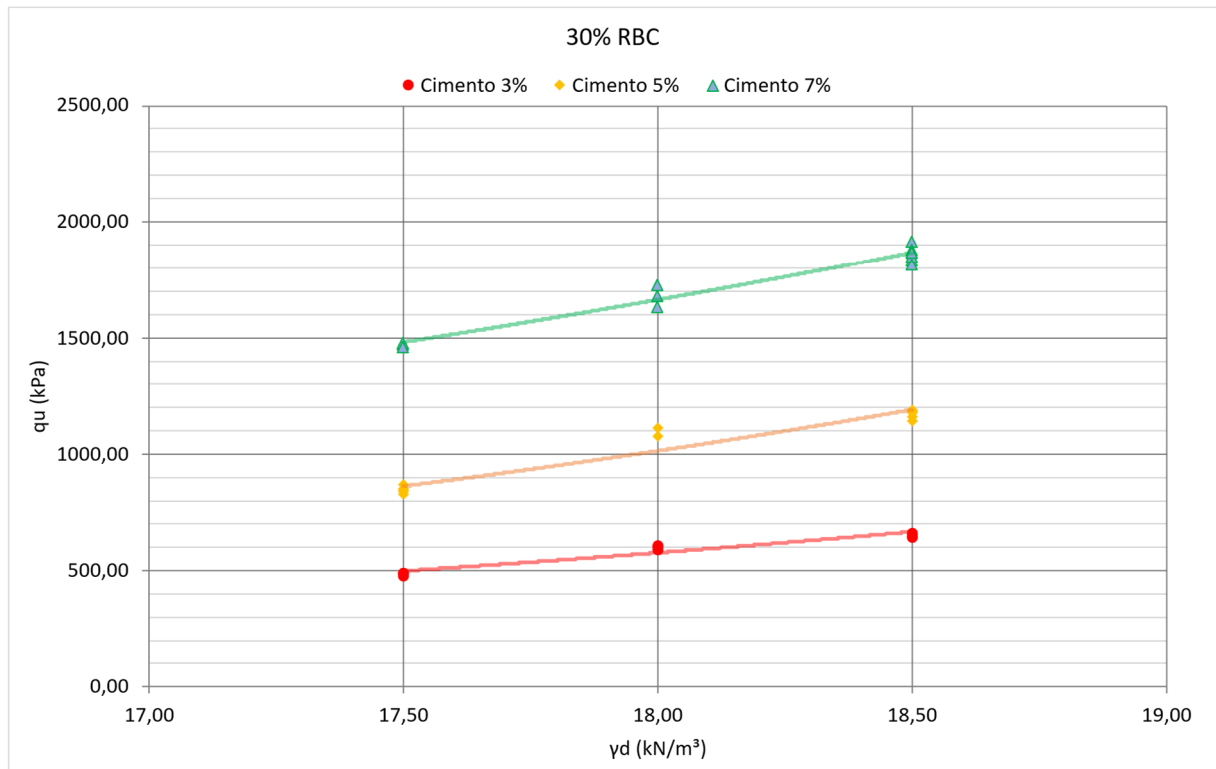
Os resultados para 20% de RBC, apresentados na Figura 21, indicam uma configuração de elevado empacotamento granular. O aumento de γ_d força o RBC a preencher os vazios intergranulares, criando uma matriz densa (Lade; Liggio e Yamamuro, 1998). Para o teor de 3% de cimento, a resistência atinge 612 kPa em $\gamma_d = 18,5 \text{ kN/m}^3$, valor 29% superior ao obtido com a mesma dosagem de cimento na mistura controle (473 kPa), demonstrando que a adição de finos potencializa o ganho de resistência mesmo com baixo consumo de cimento. Para 5% e 7%, as resistências máximas são, respectivamente, 1194 kPa e 1965 kPa, mantendo a tendência de crescimento com a compactação.

Figura 21: Desempenho mecânico das misturas com 20% de RBC



A Figura 22 apresenta o comportamento das misturas com 30% de RBC. Embora a resistência continue aumentando com o incremento de γ_d , observa-se que as curvas para os teores de 5% e 7% de cimento encontram-se mais próximas entre si do que nas demais dosagens. A diferença entre as resistências desses dois teores em $\gamma_d = 18,5 \text{ kN/m}^3$ é de 674 kPa, inferior às diferenças observadas para 0% (786 kPa), 10% (688 kPa) e 20% (771 kPa).

Figura 22: Comportamento das misturas com 30% de RBC

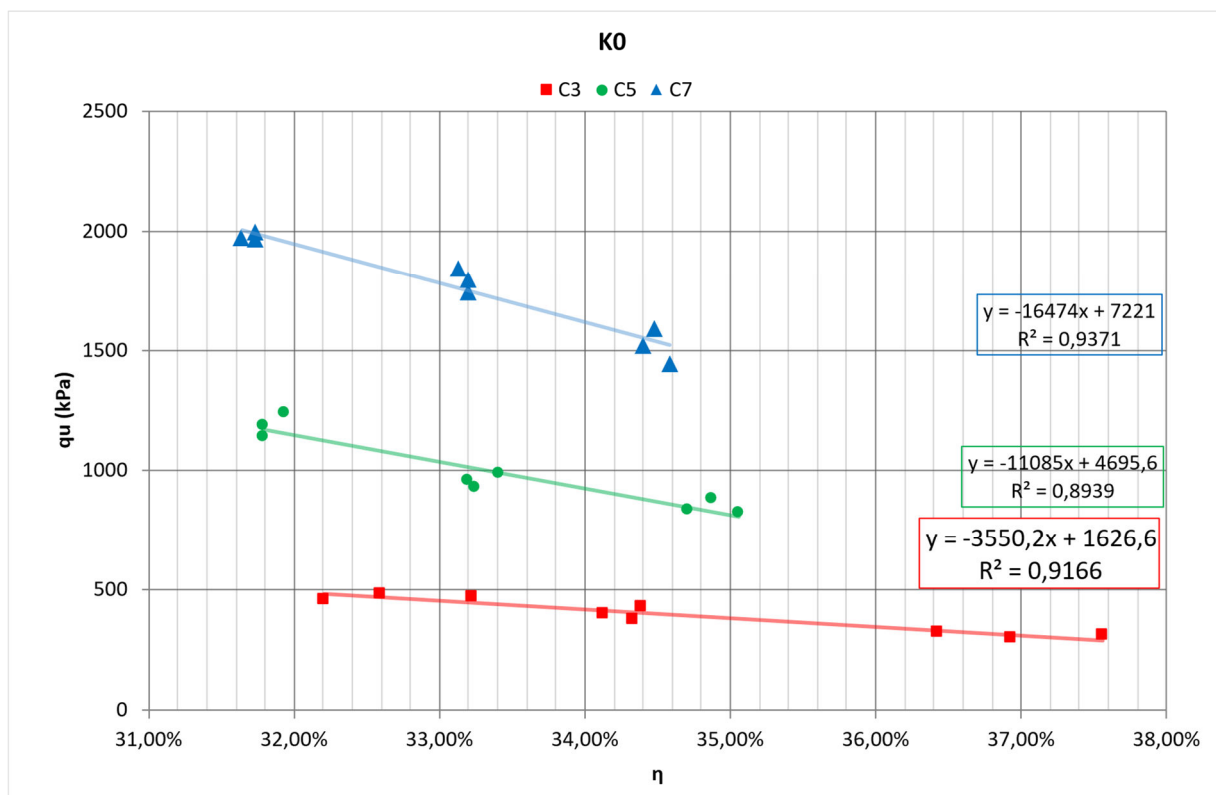


O peso específico seco de moldagem demonstrou ser um fator decisivo para a eficiência do RBC. Valores mais elevados de γ_d resultam em estruturas mais compactas, favorecendo o contato entre os grãos de solo, as partículas de cimento e os finos do resíduo. O efeito *filler* do RBC é intensificado pela compactação, pois a redução do volume de vazios permite que o material fino contribua de forma mais eficaz para a continuidade da matriz sólida e para a formação de pontes cimentícias.

4.1.4 Análise da Porosidade (η) e Efeito do Preenchimento de Vazios

A Figura 23 apresenta a correlação entre a resistência à compressão simples e a porosidade para o solo estabilizado sem adição de RBC (série K0). Os resultados indicam que, para todos os teores de cimento, a resistência aumenta linearmente à medida que a porosidade é reduzida pela compactação. A mistura com 7% de cimento atinge os maiores valores de resistência (1978 kPa) nas porosidades mais baixas (aproximadamente 31,5%).

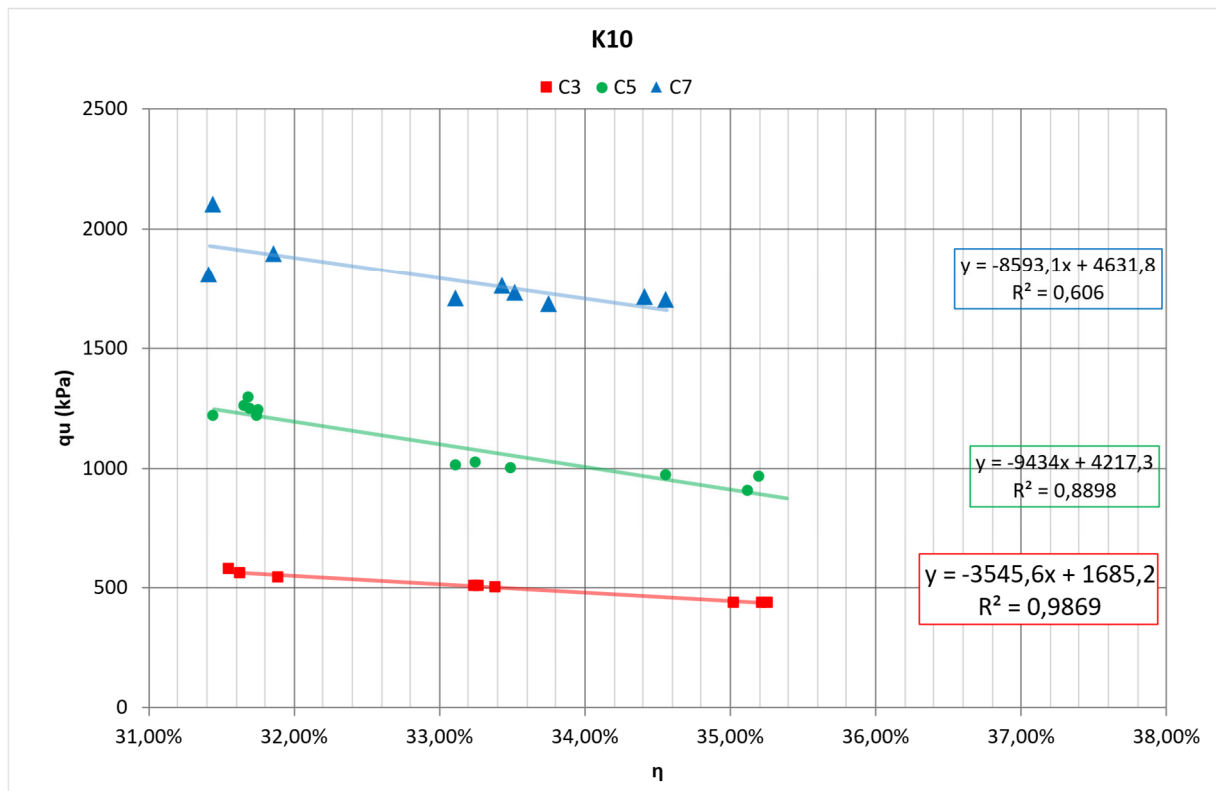
Figura 23: Relação entre a resistência à compressão simples (q_u) e a porosidade (η) para a mistura de referência (0% RBC) com teores de cimento de 3%, 5% e 7% aos 7 dias de cura



Observa-se elevada sensibilidade à variação de vazios: um acréscimo na porosidade de 31,5% para 34,5% resulta em queda de resistência de 1978 kPa para 1796 kPa (7% cimento); para 37% de porosidade, a resistência reduz-se para 1519 kPa. Esta forte dependência indica que falhas na compactação em campo podem comprometer significativamente a integridade da mistura.

Na Figura 24, com a incorporação de 10% de RBC (série K10), observa-se a manutenção do comportamento exponencial, porém com suavização das curvas. Para o teor de 3% de cimento, as resistências variam entre 437 kPa ($\eta \approx 35,0\%$) e 560 kPa ($\eta \approx 31,5\%$). A redução da porosidade de 35% para 31,5% proporciona ganhos de 123 kPa, 365 kPa e 233 kPa para os teores de 3%, 5% e 7% de cimento, respectivamente.

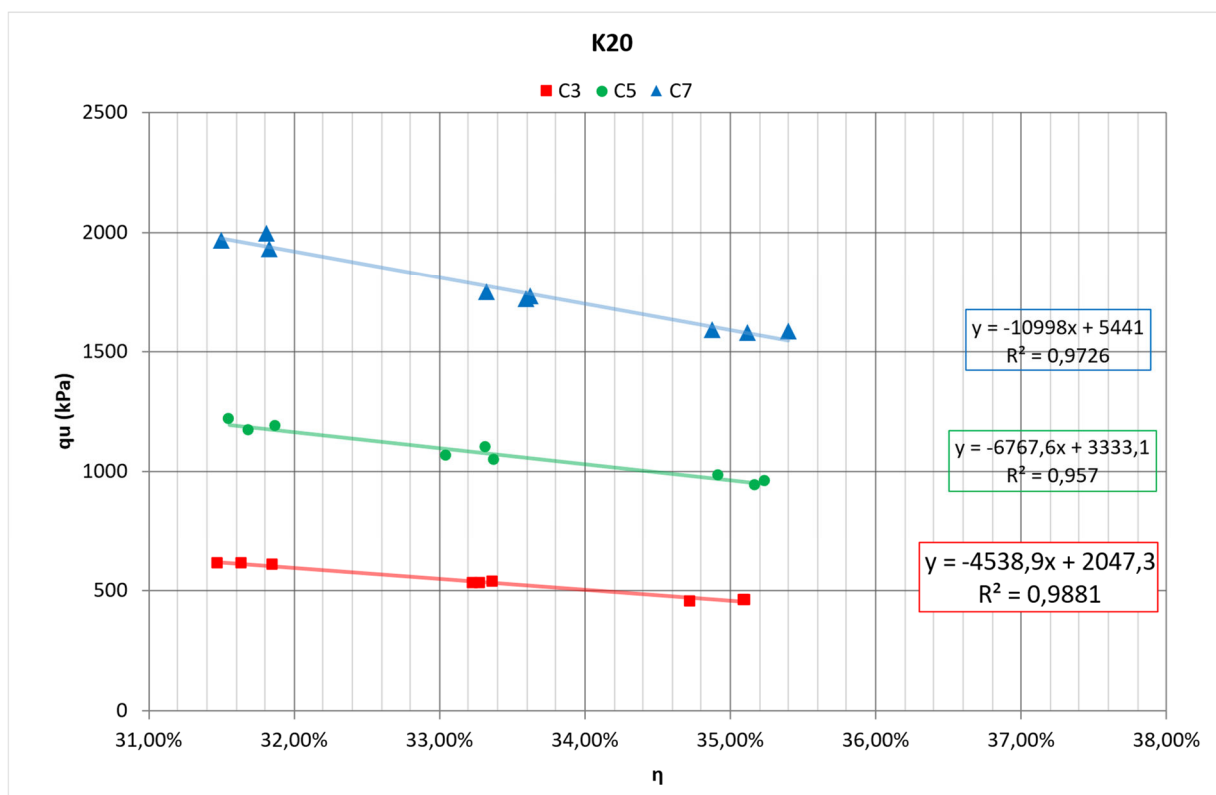
Figura 24: Relação entre a resistência à compressão simples (q_u) e a porosidade (η) para a mistura com 10% de RBC e teores de cimento de 3%, 5% e 7% aos 7 dias de cura



A análise dos dados das amostras com 10% de adição de rejeito de caulim revela que a introdução do resíduo inicia o refinamento da estrutura porosa. Embora a dispersão no teor de 7% seja visível em porosidades intermediárias, a resistência final permanece competitiva. Para a permeabilidade, essa dosagem é interessante, pois o RBC inicia o preenchimento dos vazios intergranulares.

A Figura 25 apresenta os resultados para a série com 20% de RBC (K20). As retas de tendência para cada teor de cimento apresentam ajustes com elevado coeficiente de determinação. Para uma mesma faixa de porosidade (31,5% a 35,0%), as perdas de resistência com o aumento da porosidade são menos acentuadas que nas séries anteriores. Por exemplo, para 5% de cimento, a redução de resistência entre as porosidades extremas é de 232 kPa, inferior aos 302 kPa observados na série K10. Este comportamento indica que o efeito *filler* do RBC confere maior robustez à matriz, tornando-a menos sensível a variações de compactação.

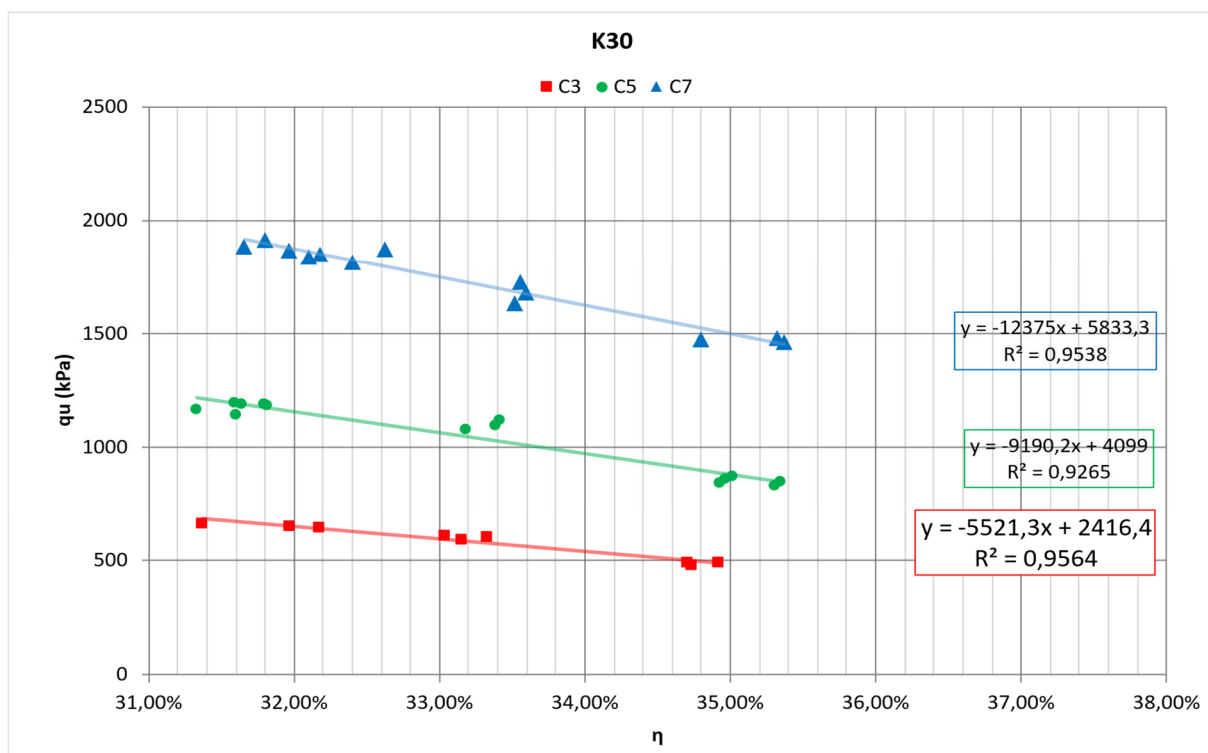
Figura 25: Relação entre a resistência à compressão simples (q_u) e a porosidade (η) para a mistura com 20% de RBC e teores de cimento de 3%, 5% e 7% aos 7 dias de cura



Diferente da série de referência, a mistura K20 demonstra que a resistência é menos penalizada por pequenos aumentos na porosidade. Isso indica que o efeito *filler* do RBC tornou a matriz mais robusta.

A Figura 26 ilustra o comportamento da mistura com 30% de RBC (série K30). As curvas para os teores de 5% e 7% de cimento apresentam proximidade, especialmente nas porosidades mais baixas: em $\eta \approx 31,5\%$, as resistências são 1178 kPa (5% cimento) e 1852 kPa (7% cimento). A diferença entre estes dois teores (674 kPa) é inferior à observada na série K0 (786 kPa) e K10 (688 kPa), sugerindo que o elevado teor de finos reduz a influência relativa do cimento na resistência. A alta concentração de RBC atua no fechamento dos microcanais de fluxo, o que impacta diretamente na redução da condutividade hidráulica, conforme será discutido na Seção 4.5 abaixo.

Figura 26: Relação entre a resistência à compressão simples (q_u) e a porosidade (η) para a mistura com 30% de RBC e teores de cimento de 3%, 5% e 7% aos 7 dias de cura

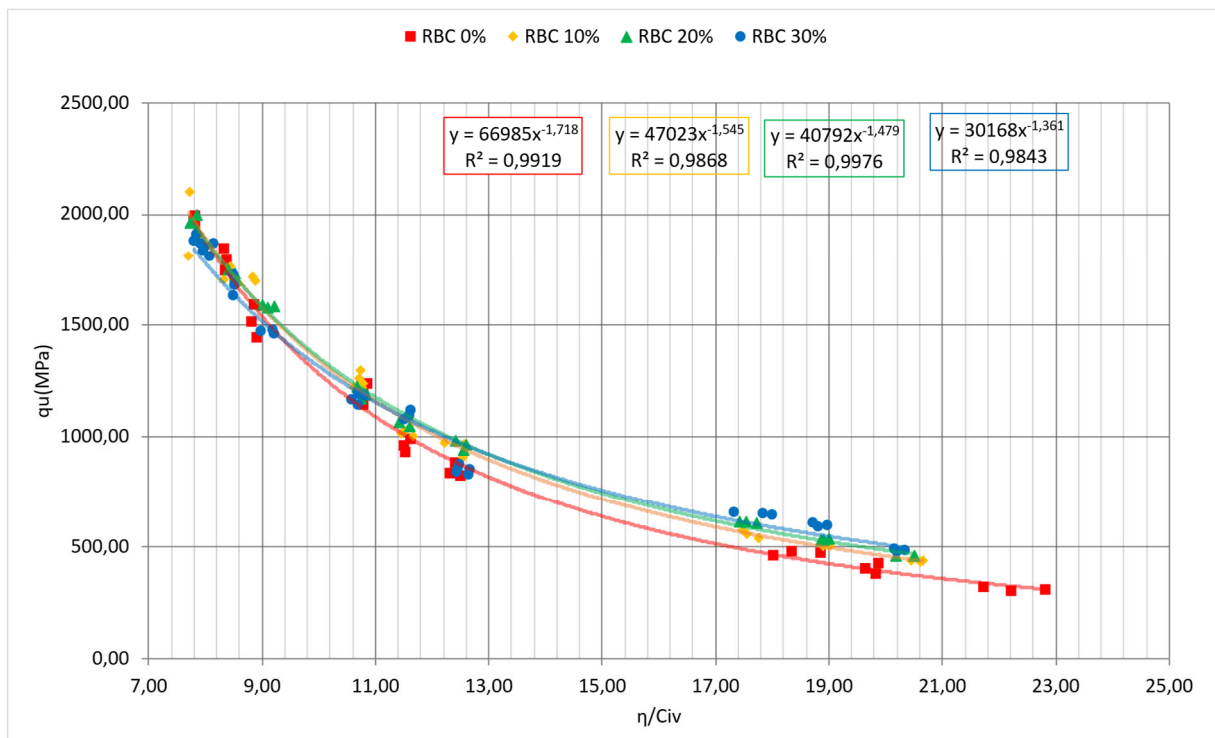


A comparação das Figuras 24 a 27 revela que a inclinação das curvas (taxa de variação da resistência com a porosidade) diminui progressivamente com o aumento do teor de RBC. Enquanto na série K0 a resistência reduz-se em média 45 kPa por ponto percentual de acréscimo de porosidade (para 5% cimento), na série K30 esta taxa cai para aproximadamente 30 kPa/%. Este comportamento evidencia que a substituição por 30% de RBC produz um material mais homogêneo e menos sensível a variações de porosidade, característica particularmente vantajosa para aplicações onde a durabilidade e o controle da permeabilidade são requisitos prioritários.

4.1.5 Relação η/C_{iv}

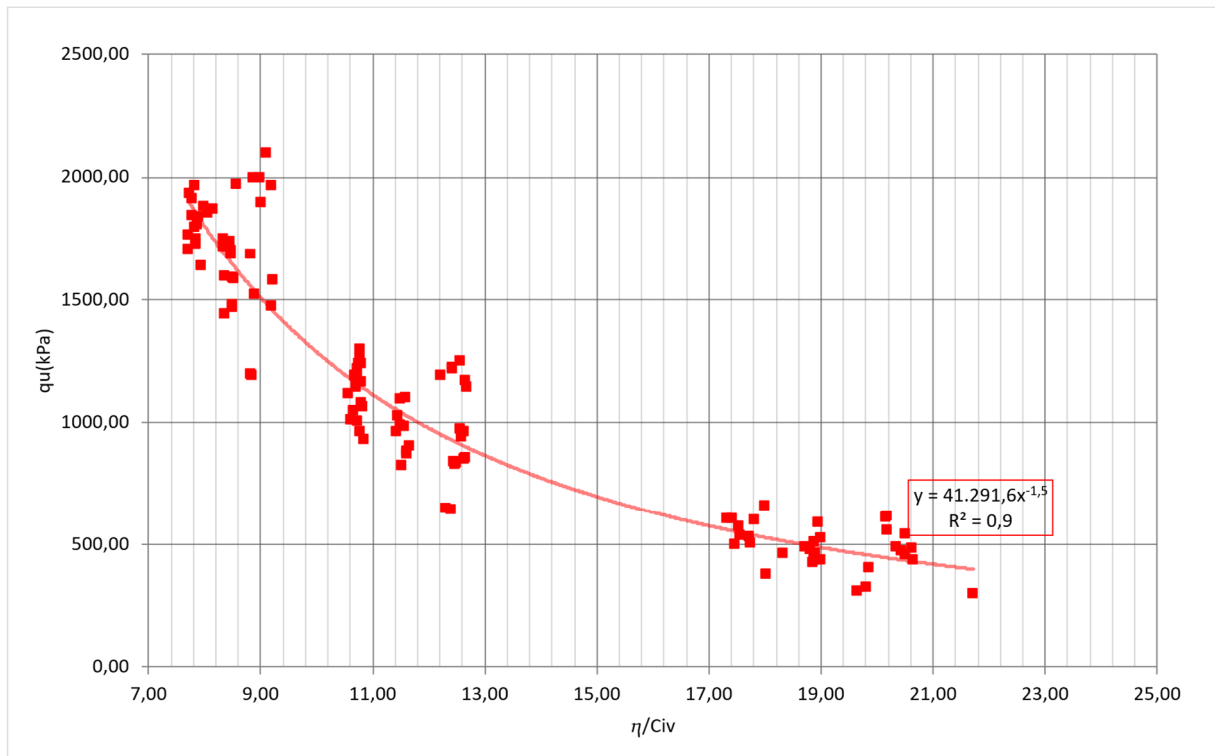
A Figura 27 apresenta a relação entre a resistência à compressão simples (q_u) e o índice porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}) para todas as misturas estudadas, com pontos diferenciados por teor de RBC. Observa-se que a resistência decresce à medida que a relação η/C_{iv} aumenta, comportamento coerente com a teoria de que maiores volumes de vazios ou menores quantidades de cimento resultam em uma matriz estabilizada menos resistente. Para um mesmo valor de η/C_{iv} , as misturas com diferentes teores de RBC apresentam resistências próximas, indicando que o parâmetro η/C_{iv} é capaz de normalizar, ainda que parcialmente, o efeito da adição do resíduo.

Figura 27: Resistência à Compressão Simples (q_u) em função da relação porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv})



A Figura 28 apresenta a sistematização de todos os dados experimentais obtidos para as misturas (K0, K10, K20 e K30) correlacionando a resistência à compressão simples (q_u) com o índice η/C_{iv} . A utilização deste modelo permite unificar a influência da porosidade e do teor de agente cimentante em uma única variável independente, independentemente do teor de RBC incorporado.

Figura 28: Correlação entre q_u e o parâmetro de dosagem η/C_{iv} para todos os teores de RBC



A análise gráfica revela uma excelente correlação para todas as séries estudadas, com ajuste de potência apresentando coeficiente de determinação $R^2 = 0,9$. Observa-se que os pontos experimentais das diferentes dosagens de RBC convergem para uma mesma linha de tendência, descrita pela equação:

Este comportamento confirma que a resistência à compressão é governada fundamentalmente pela relação entre o volume de vazios e o volume de cimento, e que o efeito do RBC é capturado indiretamente por meio da alteração da porosidade e da distribuição dos vazios. A validação do modelo para misturas contendo resíduo de caulim demonstra a robustez da metodologia racional de dosagem e sua aplicabilidade a materiais alternativos.

4.2 DEFINIÇÃO DO CENÁRIO PARA ENSAIOS DE TRAÇÃO E DURABILIDADE

A seleção dos parâmetros para as etapas subsequentes da pesquisa, ensaios de tração por flexão (viga de 4 pontos), condutividade hidráulica e durabilidade (ciclos de molhagem e secagem), fundamentou-se no desempenho mecânico observado nos ensaios de compressão simples (qu). Optou-se por fixar o teor de 5% de cimento e a massa específica seca de 18,0 kN/m³. Essa escolha estratégica justifica-se pelos seguintes critérios técnicos:

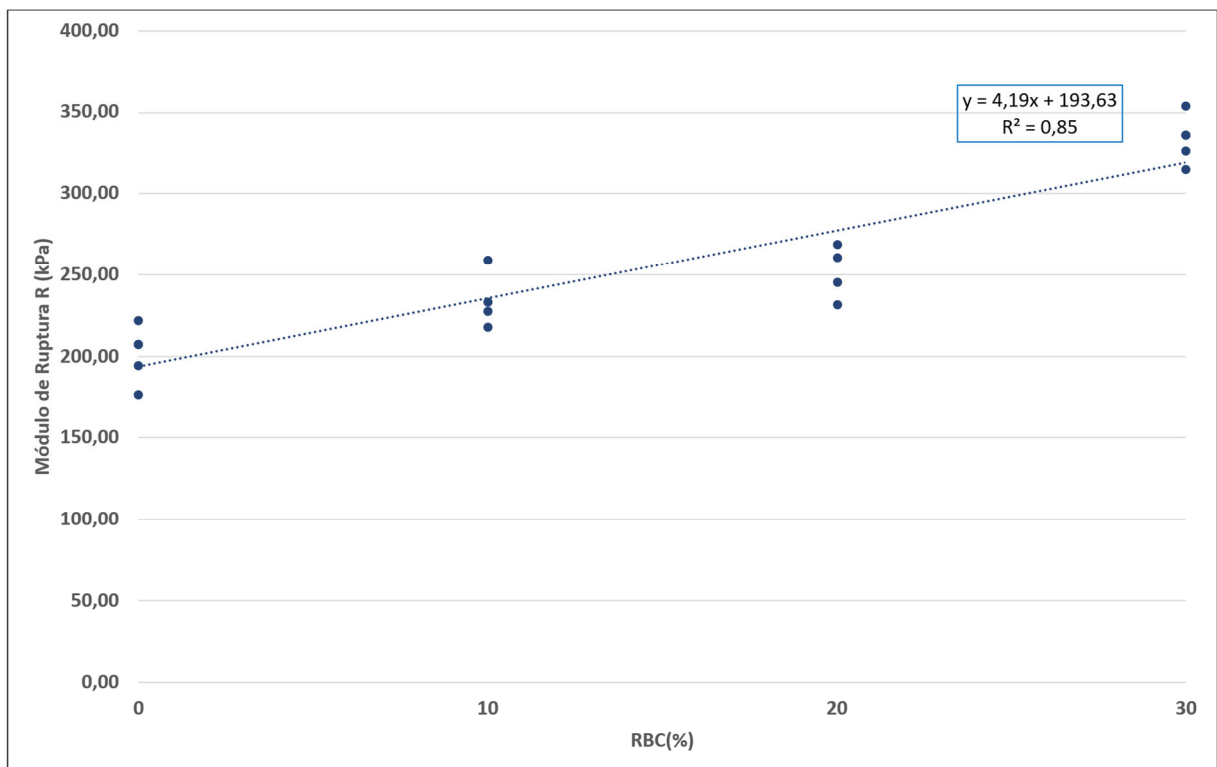
- Sinergia e otimização da matriz: A avaliação da sinergia entre os constituintes foi realizada por meio da análise comparativa dos ganhos de resistência em relação à mistura controle (0% RBC). O teor de 5% de cimento destacou-se como a condição de maior sinergia, pois, para $\gamma_d = 18,0 \text{ kN/m}^3$, a adição de 20% de RBC proporcionou um incremento de resistência de 961 kPa para 1071 kPa (ganho de 11,4%). Este comportamento indicou que, neste teor, o efeito *filler* do RBC otimiza o preenchimento de vazios sem comprometer a formação das ligações cimentícias, potencializando a ação do aglomerante de forma mais eficiente do que nos teores de 3% e 7%.
- Robustez da matriz para solicitações severas: A dosagem de 5% de cimento garantiu um compósito com estabilidade estrutural suficiente para suportar as solicitações impostas pelos ensaios de durabilidade (12 ciclos de molhagem e secagem com abrasão) e de tração por flexão. Diferentemente do teor de 3%, que apresentava resistências absolutas mais modestas (inferiores a 600 kPa) e poderia não resistir à desagregação física induzida pelos ciclos, a matriz com 5% de cimento (resistências entre 1000-1200 kPa) mostrou-se coesa o bastante para preservar sua integridade durante os ensaios, o que foi posteriormente confirmado pelos baixos valores de perda de massa (Seção 4.4).
- Representatividade geotécnica e controle de compactação: O peso específico seco de 18,0 kN/m³ reflete um nível de compactação intermediário, compatível com a energia Proctor Normal NBR 7182 (ABNT, 2025b), que é comumente aplicada em obras de pavimentação, aterros e camadas de subleito em projetos de infraestrutura convencionais no Brasil. Sob esta condição de compactidade, o teor de RBC com melhor desempenho mecânico (20%) foi claramente identificado, tornando este cenário o foco ideal para avaliar como a otimização

microestrutural promovida pelo resíduo impacta as demais propriedades de engenharia do material.

4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO

A determinação da resistência à tração é um parâmetro crítico para materiais cimentícios destinados a camadas de base e sub-base de pavimentos, uma vez que o mecanismo de falha estrutural é comumente governado pelo trincamento por fadiga na fibra inferior da camada. Para quantificar essa propriedade, foram realizados ensaios de flexão em quatro pontos, seguindo as diretrizes da norma ASTM D1635 (ASTM, 2021a) para determinação da resistência à tração (σ_t). Os resultados, obtidos para o cenário de 5% de cimento e 18 kN/m³, revelam um incremento de desempenho superior ao observado nos ensaios de compressão simples. Conforme apresentado na Figura 29.

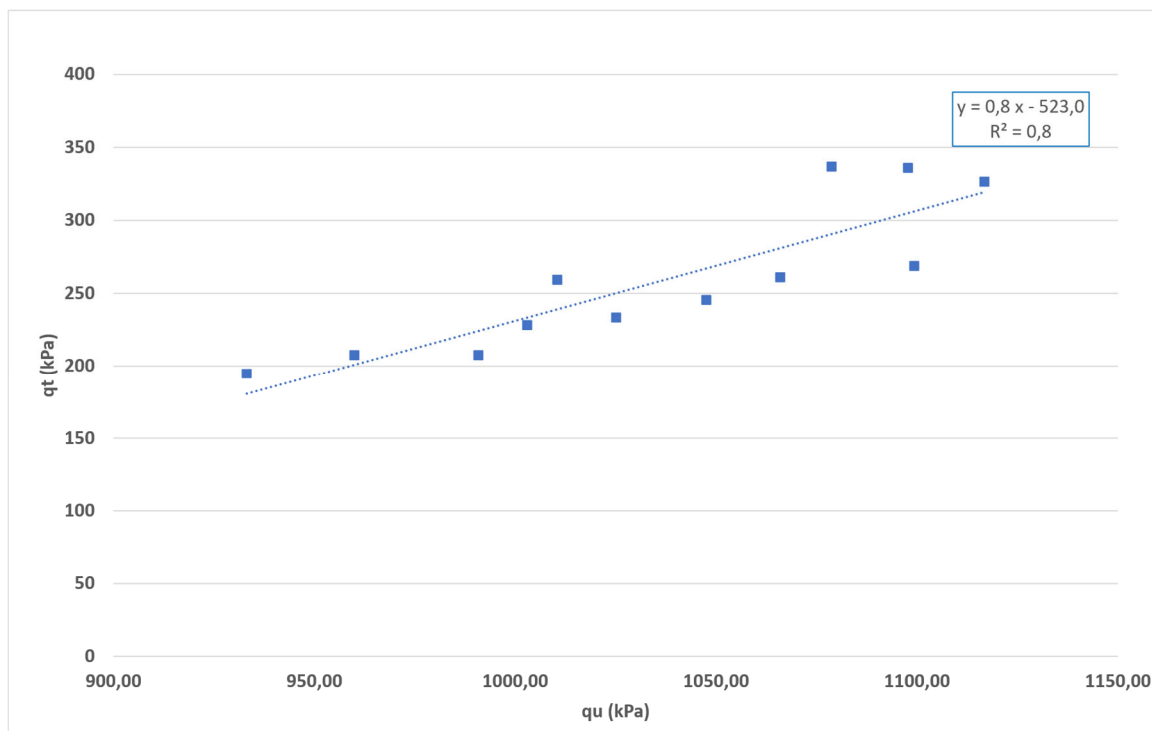
Figura 29: Módulo de Ruptura à tração na flexão em função do teor de RBC



Diferente da resistência à compressão (Seção 4.2), que tendeu a um patamar de estabilização a partir de 20% de Resíduo de Beneficiamento de Caulim (RBC), a resistência à tração apresentou um crescimento contínuo até o teor de 30% de resíduo. A incorporação de 30% de RBC resultou em uma resistência média de 181,05 kPa, representando um ganho de 78% em relação a mistura controle (322,18 kPa).

A Figura 30 ilustra a correlação entre a resistência à compressão simples (q_u) e a resistência à tração na flexão (q_t) para as diversas misturas de solo-RBC-cimento analisadas. Os dados mostram uma relação diretamente proporcional entre ambos os parâmetros, indicando que o incremento de cimento e a redução da porosidade promovem simultaneamente o ganho de resistência à tração do material.

Figura 30: Resistência à compressão simples (q_u) x tração na flexão (q_t)

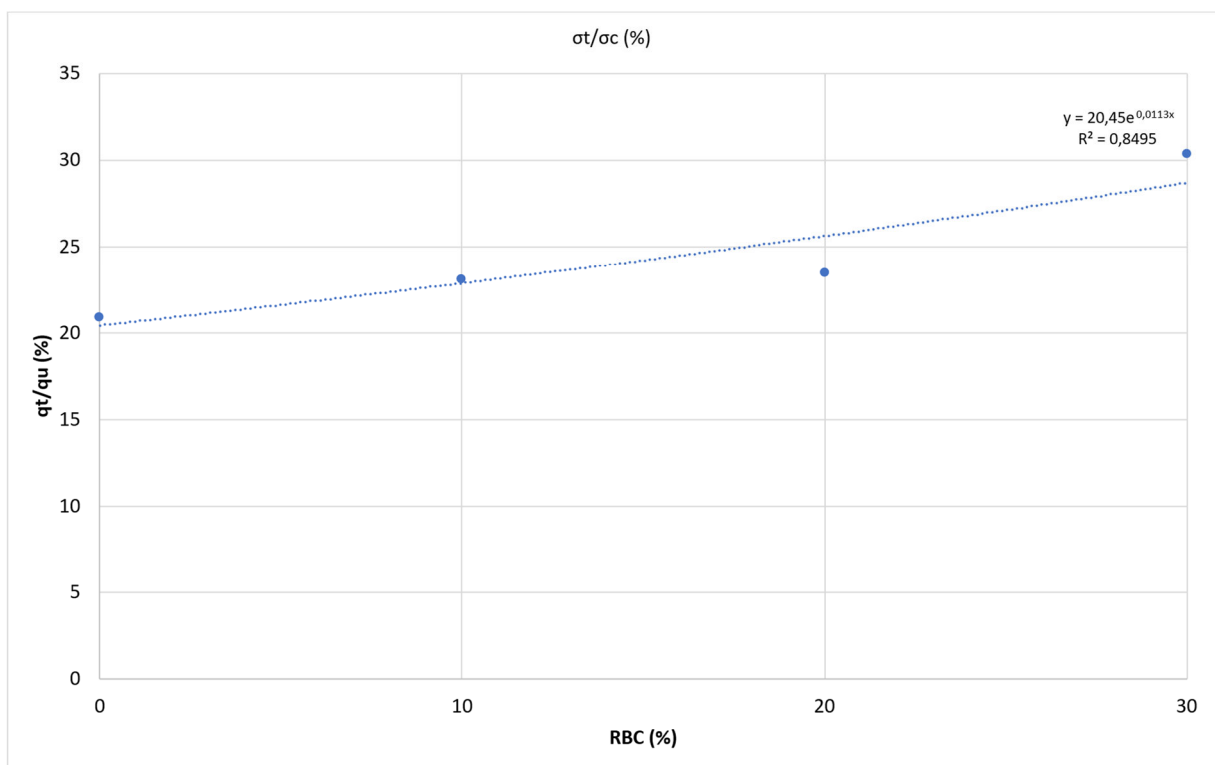


A análise desta correlação é essencial para compreender a tenacidade da matriz estabilizada. Observa-se que a resistência à tração na flexão representa, em média, uma fração constante da resistência à compressão, comportamento típico de materiais frágeis cimentados. A presença do Resíduo de Beneficiamento de Caulim (RBC) atua na melhoria desta interface, uma vez que o efeito *filler* do resíduo proporciona uma matriz mais densa, reduzindo pontos de concentração de tensões que poderiam levar ao surgimento de fissuras prematuras.

Do ponto de vista da durabilidade, essa relação é um indicativo da integridade estrutural do sistema. Misturas que mantêm uma boa proporcionalidade entre q_u/q_t são menos suscetíveis à degradação física durante os ciclos de molhagem e secagem (Consoli *et al.*, 2018; Festugato *et al.*, 2018). Uma maior resistência à tração confere ao solo estabilizado uma melhor capacidade de resistir às tensões de origem térmica e higroscópica (expansão e contração), minimizando a perda de massa e a propagação de microfissuras que elevariam a condutividade hidráulica do material ao longo do tempo (Consoli; Rosa; Saldanha, 2011; Goldoni *et al.*, 2023).

Um achado relevante desta etapa é a evolução da razão entre a resistência à tração na flexão (q_t) e a resistência à compressão simples (q_u). Essa razão foi calculada utilizando os valores médios de q_t e q_u obtidos para cada teor de RBC, considerando a condição de referência (5% de cimento e $\gamma_d = 18,0 \text{ kN/m}^3$). Para a mistura controle (0% RBC), a razão q_t/q_u resultou em 18,8%; para 10% RBC, 23,1%; para 20% RBC, 23,5%; e para 30% RBC, atingiu 30,4%. Enquanto a literatura para areias cimentadas puras, baseada em ensaios de resistência à tração por compressão diametral, reporta que a tração representa aproximadamente 10 a 15% da resistência à compressão (Consoli *et al.*, 2010). É ressaltado-se que essa referência de 10–15% advém, majoritariamente, de ensaios tração na compressão diametral. A divergência nos percentuais encontrados nesta pesquisa pode ser atribuída à natureza distinta das solicitações impostas pelo ensaio de flexão em quatro pontos, o qual tende a produzir valores de resistência à tração superiores aos obtidos em ensaios diametrais, conforme também observado por Silva, (2017).

Figura 31: Evolução das propriedades mecânicas (q_u e q_t) para diferentes teores de substituição por RBC



Esse aumento na razão q_t/q_u , que passou de 20,9% (0% RBC) para 30,4% (30% RBC), indica que a adição do resíduo altera a distribuição das tensões na matriz cimentada, conferindo

ao compósito um comportamento menos frágil e potencialmente mais tenaz. Estudos como o de Corte *et al.*, (2024) demonstram que o índice porosidade/teor volumétrico de cimento (η/Civ) é um parâmetro robusto para correlacionar não apenas as resistências à compressão e à tração, mas também a rigidez inicial de solos cimentados, confirmando a aplicabilidade dos modelos teóricos de superposição de fases (Diambra *et al.*, 2017; Festugato *et al.*, 2018) para descrever o comportamento mecânico desses materiais. O incremento na razão q_t/q_u observado com 30% de RBC sugere que o material pode apresentar maior absorção de energia antes da fratura, o que é particularmente relevante para aplicações em pavimentos, onde a resistência à tração governa o trincamento por fadiga, uma hipótese que merece investigação específica em trabalhos futuros.

4.4 DURABILIDADE (CICLOS DE MOLHAGEM E SECAGEM)

A durabilidade é um parâmetro fundamental para avaliar a capacidade de um solo estabilizado em resistir à degradação por intemperismo e variações cíclicas de umidade ao longo de sua vida útil. Neste estudo, o comportamento frente à exposição ambiental foi avaliado por meio do ensaio de molhagem e secagem, conduzido conforme as diretrizes da NBR 13554 (ABNT, 2012b), quantificando-se a Perda de Massa Acumulada (PMA) após 12 ciclos térmicos e de umidificação.

4.4.1 Análise da Perda de Massa Acumulada (PMA)

Os resultados obtidos para a durabilidade representam dados sobre a influência do Resíduo de Beneficiamento de Caulim (RBC) na estabilidade da matriz solo-cimento. Tabela 6 apresenta a síntese dos valores de perda de massa e a respectiva redução percentual em relação à mistura de referência.

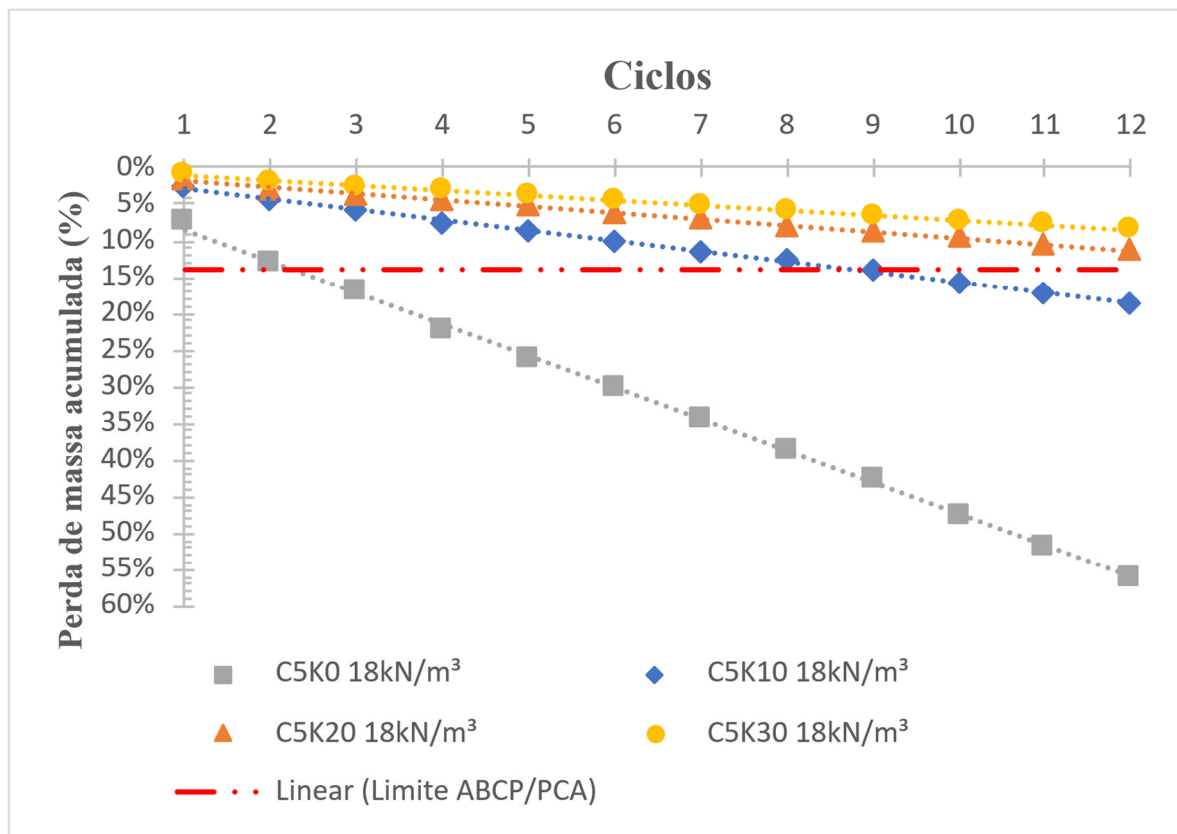
Tabela 6: Resultados de Perda de Massa Acumulada (PMA) para corpos de prova moldados com 5% de cimento, $\gamma_d = 18,0 \text{ kN/m}^3$ e cura de 7 dias.

Teor de Caulim	Perda de Massa	Redução da Perda de Massa (%)
(RBC) (%)	(M. Loss) (%)	(vs. 0% RBC)
0 (Controle)	56,06%	-
10	18,56%	66,89%
20	11,33%	79,79%
30	8,51%	84,82%

A mistura controle (0% RBC) apresentou uma perda de massa de 56,06%. Este valor excede significativamente o limite de 14% estabelecido pela ABCP/PCA no seu manual de dosagem das misturas de solo-cimento (ABCP, 2004) para solos arenosos, evidenciando que a areia pura, sob as condições de moldagem adotadas, não desenvolve uma matriz cimentada com coesão suficiente para suportar a abrasão e as tensões dos ciclos de molhagem e secagem.

Em contrapartida, a incorporação progressiva do RBC promoveu uma redução na PMA (Figura 32). Com a adição de 10% de resíduo, a perda de massa reduziu para 18,56%, aproximando-se do critério normativo. Ao atingir o teor de 30% de RBC, o índice de perda caiu para 8,51%, representando uma redução de aproximadamente 85% na perda de material em comparação à mistura controle. As siglas utilizadas nas legendas dos gráficos referem-se à composição das misturas, onde C indica o teor de cimento (3%, 5% ou 7%) e K indica o teor de Resíduo de Beneficiamento de Caulim (RBC) em substituição ao solo (0%, 10%, 20% ou 30%). Por exemplo, a sigla C5K10 identifica uma amostra composta por 5% de cimento e 10% de resíduo de caulim.

Figura 32: Perda de massa acumulada longo dos ciclos e molhagem e secagem para corpos de prova moldados com 5% de cimento, $\gamma_d = 18,0 \text{ kN/m}^3$ e cura de 7 dias



A melhoria da durabilidade observada com a adição de RBC decorre fundamentalmente da redução dos vazios e do refinamento da microestrutura promovidos pelo efeito *filler* do resíduo. O preenchimento dos poros intergranulares pelo RBC diminui a porosidade e a conectividade da rede de vazios, resultando em uma matriz mais densa e estanque. Conforme detalhado na Seção 4.5, a redução de até 800 vezes na condutividade hidráulica é a evidência física desse efeito. Este desempenho superior pode ser compreendido através dos seguintes fundamentos científicos:

- a) A matriz densificada pelo efeito *filler* do RBC que reduz os poros e a interconectividade dos poros. Conforme detalhado na seção de condutividade hidráulica (Seção 4.5), a redução de até 800 vezes na permeabilidade é a evidência física desse efeito. De acordo com Pouhet; Cyr; Bucher, (2019), o RBC atua obstruindo os canais capilares, transformando o solo de um meio drenante para uma matriz praticamente impermeável. Isso limita a entrada de água durante a fase de molhagem, mitigando as tensões internas de expansão e retração (sucção) causadas pelos ciclos térmicos.
- b) O preenchimento de vazios pelo RBC protege as pontes cimentícias (gel C-S-H) formadas entre as partículas de areia. Conforme observado por Mandolini; Diambra; Ibraim, (2021), a manutenção da resistência sob solicitações repetitivas depende da estabilidade da rede de poros. Embora a visualização direta desse preenchimento demande futuras análises via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), os dados macroscópicos indicam que o RBC evita a desintegração física superficial causada pelo escovamento, mantendo a integridade mecânica após os 12 ciclos severos.
- c) Segundo Gerasimov; Ustinov e Zyryanova, (2023), o uso de rejeitos contendo silicatos auxilia na redução da pressão de disjunção (*disjoining pressure*) durante o endurecimento, diminuindo a probabilidade de microfissuração interna. Além disso, a formação de uma rede densa de produtos de reação potencializada pelo RBC mitiga os efeitos deletérios do intemperismo, que normalmente resultam em queda de resistência (Goldoni et al., 2023).

Os resultados corroboram a hipótese de que a perda de massa é inversamente proporcional à eficiência do empacotamento. A redução da PMA com o incremento de RBC

valida modelos onde a durabilidade é correlacionada à relação entre porosidade e teor de cimento (η/C_{iv}), conforme proposto por (Consoli *et al.*, 2018).

Em suma, a transição de uma mistura com falha severa para um compósito de alta performance demonstra que o ajuste granulométrico transforma a durabilidade em um reflexo da estanqueidade da matriz cimentícia. Essa preservação da estrutura é fundamental para garantir a vida útil de camadas de pavimentação, onde a durabilidade a longo prazo é um critério de projeto rigoroso (Almeida *et al.*, 2025).

Embora os ensaios de compressão simples (Figura 19) indiquem um declínio na resistência para o teor de 30% de RBC com 5% de cimento, esta mistura apresentou o desempenho superior nos ensaios de durabilidade. Este fenômeno sugere que, para a preservação da integridade da mistura frente aos ciclos de molhagem e secagem, o refinamento da rede de poros promovido pelo elevado teor de finos é mais determinante do que a magnitude da resistência mecânica inicial. O RBC atuou reduzindo a condutividade hidráulica e protegendo a matriz contra a percolação de água, resultando em menor perda de massa e maior estabilidade volumétrica ao longo do tempo.

4.5 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (PERMEABILIDADE)

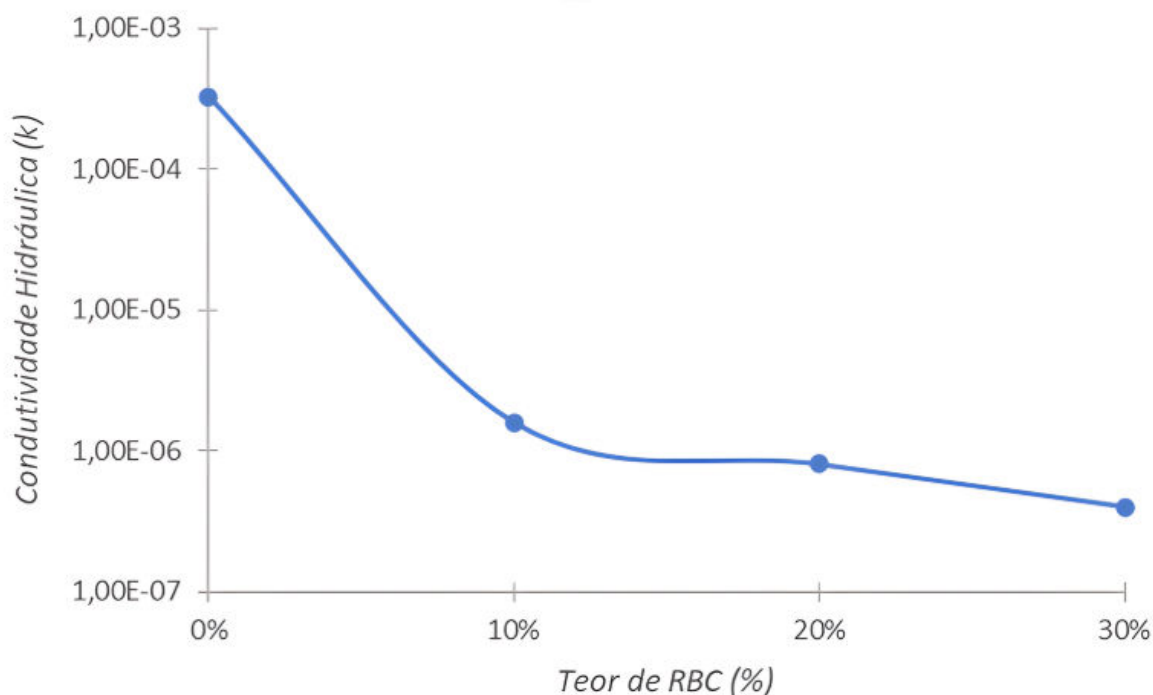
Para validar fisicamente a hipótese de preenchimento de vazios e refinação da microestrutura. O refinamento da microestrutura consiste na transformação da arquitetura interna do material, caracterizada pela redução do diâmetro médio dos poros, aumento da tortuosidade dos canais capilares e melhor distribuição das fases sólidas. No presente estudo, esse refinamento é promovido pelo efeito *filler* do RBC, cujas partículas finas ocupam os espaços intergranulares, bloqueando caminhos preferenciais de fluxo e criando uma matriz mais densa, homogênea e estanque, conforme evidenciado pela drástica redução da condutividade hidráulica (de $3,24 \times 10^{-4}$ para $3,99 \times 10^{-7}$ m/s) e pela melhoria expressiva na durabilidade (redução de 85% na perda de massa), foram realizados ensaios de condutividade hidráulica utilizando permeâmetro de parede flexível. Devido à expectativa de redução drástica da permeabilidade pela adição de finos, utilizou-se o método de carga variável, garantindo a sensibilidade necessária para medir fluxos em ordens de magnitude reduzidas. Os resultados, obtidos para as amostras com 5% de cimento e peso específico seco de 18 kN/m^3 , estão consolidados na Tabela 7 e Figura 33

Tabela 7: Coeficientes de condutividade hidráulica (k) para mistura com 5% de cimento e 18 kN/m^3 em função do teor de RBC

Teor de Caulim (RBC) (%)	Condutividade Hidráulica (k) (m/s)	Ordem de Magnitude (vs. Controle)
0 (Controle)	$3,24 \times 10^{-4}$	Referência
10	$1,58 \times 10^{-6}$	~200x menor
20	$7,99 \times 10^{-7}$	~400x menor
30	$3,99 \times 10^{-7}$	~800x menor

Fonte: Autor

Figura 33: Evolução da condutividade hidráulica com o incremento de RBC



Os dados de condutividade hidráulica (k) fornecem a evidência física mais direta do efeito *filler* promovido pelo resíduo. A mistura controle (0% RBC) apresentou um coeficiente de $3,24 \times 10^{-4}$ m/s, valor característico de materiais arenosos com comportamento drenante (Terzaghi *et al.*, 1996). Com a incorporação progressiva do RBC, observa-se uma redução na permeabilidade, atingindo três ordens de magnitude. Para a dosagem de 20% de RBC, o coeficiente k declinou para $7,99 \times 10^{-7}$ m/s, atingindo o patamar de $3,99 \times 10^{-7}$ m/s com a adição de 30% de resíduo. Essa transição altera a classificação técnica do material de "drenante" para "semi-impermeável", aproximando-o do comportamento típico de barreiras argilosas compactadas ou selos de vedação (Terzaghi *et al.*, 1996).

A expressiva redução da condutividade hidráulica, de $3,24 \times 10^{-4}$ m/s (0% RBC) para $3,99 \times 10^{-7}$ m/s (30% RBC), constitui uma evidência indireta, porém robusta, do efeito *filler* do RBC. Mantendo-se constantes o teor de cimento (5%) e o peso específico seco (18 kN/m^3), a queda de três ordens de grandeza na permeabilidade só pode ser atribuída à obstrução dos macroporos e à descontinuidade da rede de vazios promovida pelas partículas finas do resíduo. Enquanto o solo arenoso puro possui uma rede de vazios interconectados que facilita a percolação (comportamento drenante), a introdução do RBC atua na colmatagem desses canais capilares (Pouhet; Cyr e Bucher, 2019), transformando o material em uma matriz semi-impermeável. Este comportamento está em consonância com a lei de Kozeny-Carman, que estabelece a relação entre a condutividade hidráulica, a porosidade e a área superficial

específica do meio poroso. Revisões posteriores, como as de Carrier, (2003) e Chapuis & Aubertin, (2003), consolidaram a aplicação desta equação para solos granulares e compactados.

A expressiva redução da condutividade hidráulica comprova que as partículas finas do RBC obstruíram os caminhos preferenciais (macroporos) da matriz arenosa. Enquanto o solo arenoso puro possui uma rede de vazios interconectados que facilita a percolação, a introdução do RBC atua na colmatagem desses canais capilares.

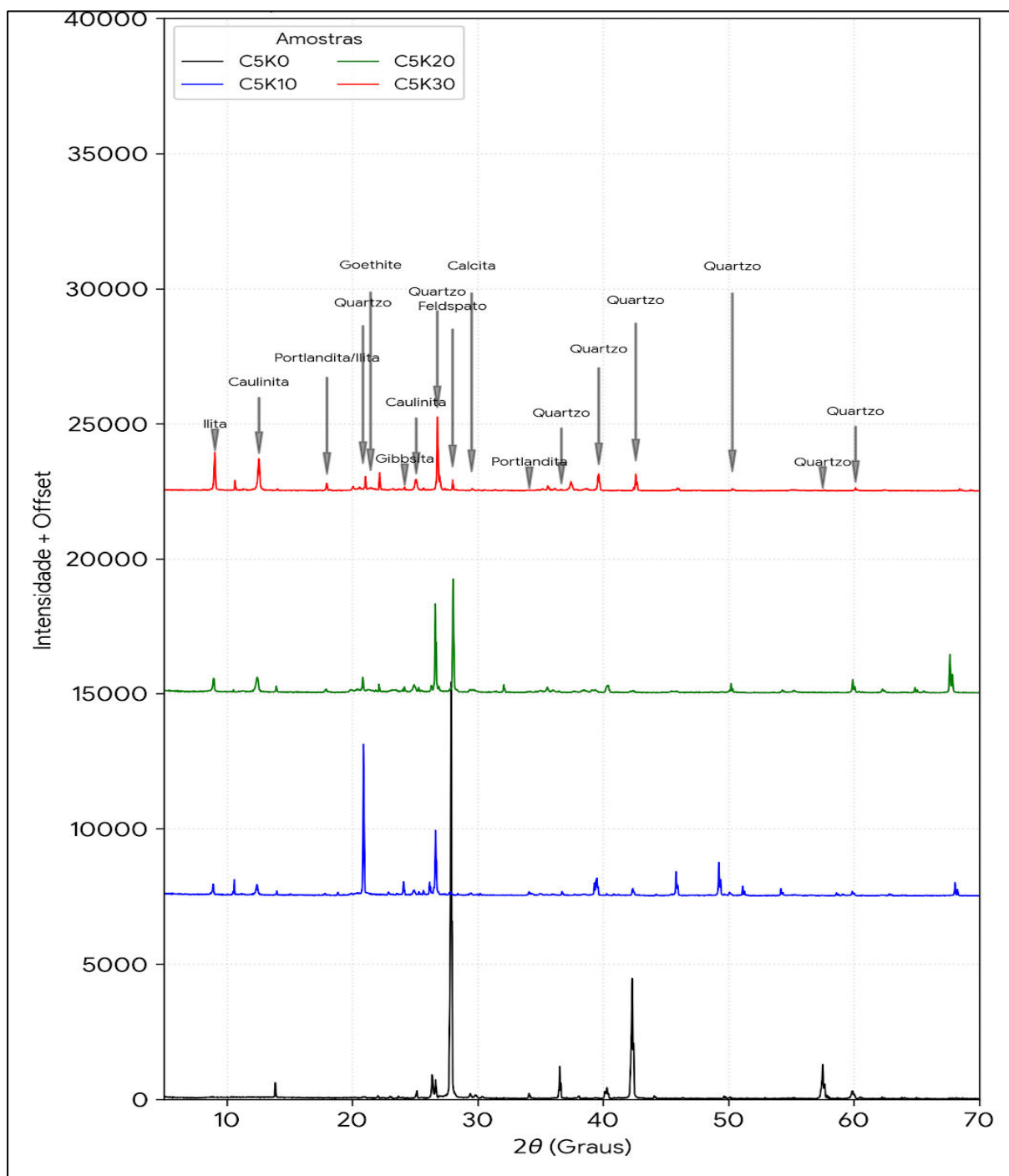
De acordo com Rodrigues *et al.*, (2021), o resíduo de caulim atua como um preenchimento físico que limita a conectividade da rede porosa. Esse fenômeno é determinante para o ganho de durabilidade observado na Seção 4.4, uma vez que a penetração de água nos poros durante o estágio de molhagem é o principal indutor de instabilidade estrutural e perda de massa (Goldoni *et al.*, 2023). Esse fenômeno é corroborado por (Kazmi *et al.*, 2022), que ressaltam como o uso de materiais finos em solos reforçados altera a microestrutura, resultando em uma matriz mais estanque e menos suscetível ao fluxo hídrico. Ao tornar a matriz mais estanque, o RBC preserva as ligações cimentícias contra a lixiviação e pressões hidrostáticas internas.

Além do aspecto hidráulico, a refinação da porosidade impacta a integridade estrutural do compósito. Silvani *et al.*, (2022) ressaltam que *fillers* minerais aumentam a área de contato efetiva entre os grãos de areia, garantindo uma distribuição de tensões mais homogênea. Ademais, o potencial de redução de permeabilidade em até 800 vezes sugere a viabilidade técnica do uso deste compósito em camadas de isolamento ambiental, como em aterros sanitários, onde a baixa condutividade é um requisito de projeto para a proteção do lençol freático (Gerasimov; Ustinov e Zyryanova, 2023).

4.6 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA (DRX)

A análise por Difração de Raios-X (DRX), permitiu identificar as fases cristalinas presentes no solo natural e as alterações mineralógicas decorrentes da incorporação do cimento e do Resíduo de Beneficiamento de Caulim (RBC). Os difratogramas das misturas estudadas, série Cimento 5% e Caulim 0~30% (C5K0~30) estão apresentados na Figura 34.

Figura 34: Comparativo DRX: Solo + Cimento + RBC



Fonte: Autor

Em todas as amostras, o Quartzo (α -SiO₂) foi identificado como a fase mineral predominante, com picos de alta intensidade em 2θ iguais a 26,78°, 20,85°, 42,61° e 50,31°. A proeminência desta fase na amostra C5K0 caracteriza o solo original como predominantemente arenoso, fornecendo a estrutura granular estável para a mistura estabilizada.

Os minerais associados ao RBC foram identificados, especialmente a partir da amostra C5K10. A Caulinita manifestou-se através de seus picos característicos em 12,56° e 25,10°, enquanto a Ilita/Mica foi identificada em 9,05°. Observou-se um aumento progressivo na intensidade desses picos conforme o teor de resíduo foi elevado de 0% para 30% (K0 para K30), o que ratifica a incorporação efetiva de finos argilosos na matriz do solo.

A eficácia da hidratação do cimento foi comprovada pela detecção da Portlandita (Ca(OH)₂) em 17,98° e 34,12°. A portlandita é o subproduto essencial da hidratação do cimento Portland, responsável por fornecer o meio alcalino necessário para o desencadeamento das reações pozolânicas com os argilominerais do RBC.

A manutenção dos picos de portlandita em todas as amostras indica que, no tempo de cura analisado, o sistema ainda apresenta saturação em cal, mantendo o pH em níveis elevados (aproximadamente 12,4). Segundo Little, (1995), a persistência desta reserva alcalina é o fator determinante para a durabilidade, pois garante o ambiente químico necessário para a dissolução das aluminossílicas do solo e a continuidade das reações pozolânicas ao longo do tempo. Embora a cal isoladamente não confira durabilidade, sua presença residual funciona como uma prova química de que o potencial de ganho de resistência ainda não foi exaurido. Conforme observado por Consoli; Da Silva Lopes e Heineck, (2009); Ingles e Metcalf, (1973), a disponibilidade de Ca(OH)₂ permite a formação contínua de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que promovem um refino da porosidade capilar. Este processo é essencial para mitigar a perda de massa e a desintegração física frente aos ciclos de molhagem e secagem, uma vez que uma matriz mais densa e cimentada resiste melhor às tensões internas de expansão e contração hídrica.

A redução na intensidade do pico principal do quartzo (26,78°) na amostra C5K30 em comparação à C5K0 não indica a degradação do mineral, mas sim um efeito de diluição e o preenchimento dos vazios intergranulares pelos finos do RBC e pelos produtos de hidratação do cimento.

Essa reconfiguração da microestrutura mineralógica explica a redução observada na condutividade hidráulica (permeabilidade). A introdução da caulinita e da ilita, somada à cristalização do C-S-H, resulta em uma rede porosa mais tortuosa e menos conectada. Sob o

ponto de vista da durabilidade, a presença dessas fases estáveis garante que a perda de massa durante os ciclos climáticos seja minimizada, visto que a matriz cimentícia envolve os grãos de quartzo, protegendo-os da desintegração física.

4.7 MICROESTRUTURA E EFEITO DE PREENCHIMENTO (*FILLER*) DO RBC

Neste estudo, o RBC é avaliado sob a perspectiva de sua contribuição física, atuando em duas frentes complementares:

- 1) Preenchimento de vazios entre os grãos de areia: As partículas finas do RBC, com dimensões inferiores a 0,150 mm, são capazes de ocupar os espaços intergranulares deixados pelos grãos de areia (que apresentam diâmetros predominantes entre 0,075 mm e 2,0 mm). Este preenchimento segue os princípios da Teoria do Empacotamento de Partículas (TEP), segundo a qual a introdução progressiva de partículas de menor dimensão nos vazios deixados pelas partículas maiores resulta em uma matriz sólida mais densa e com menor porosidade. Conforme (Sedran & Delarrard, 1999), este efeito é maximizado quando a distribuição granulométrica do sistema se aproxima de curvas de empacotamento ótimas (como as de *Fuller e Funk & Dinger*).
- 2) Incremento da compacidade da mistura: O preenchimento dos vazios promove um aumento da massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{d,max}$) da mistura solo-RBC, conforme observado nos ensaios de compactação (Tabela 4). Este aumento de compacidade decorre da redução do índice de vazios (e) e da porosidade (η), criando uma estrutura granular mais intertravada e com maior área de contato entre partículas.

A hipótese central desta pesquisa reside no fato de que o empacotamento físico promovido pelo RBC potencializa a matriz cimentícia formada pela hidratação do cimento Portland. Este fenômeno ocorre por três mecanismos inter-relacionados:

- 1) Concentração da pasta cimentícia: Com a redução do volume de vazios a ser preenchido, a pasta de cimento (produtos de hidratação como C-S-H e portlandita) concentra-se nos espaços intersticiais remanescentes, formando pontes cimentícias mais eficientes entre os grãos de areia.
- 2) Refinamento da rede porosa: O preenchimento dos macroporos pelas partículas de RBC transforma a estrutura porosa original em uma rede de microporos menos conectados, aumentando a tortuosidade dos canais capilares.

- 3) Proteção das ligações cimentícias: A matriz mais densa e com porosidade refinada dificulta a penetração de água e agentes agressivos, protegendo as ligações cimentícias contra processos de lixiviação e degradação.

Estes mecanismos, atuando de forma sinérgica, resultam em uma estrutura mais resistente aos ciclos de molhagem e secagem (conforme demonstrado na Seção 4.4), além de promover a redução drástica da condutividade hidráulica do solo estabilizado (Seção 4.5). Dessa forma, o RBC atua como um extensor de matriz, potencializando os efeitos da cimentação e da compactação sem a necessidade de ativação química prévia, o que torna sua aplicação tecnicamente viável e ambientalmente vantajosa.

4.8 DISCUSSÃO INTEGRADA E COMPORTAMENTO SISTÊMICO

A análise holística dos parâmetros de engenharia permite transcender a observação isolada de variáveis e compreender o comportamento sistêmico promovido pelo Resíduo de Beneficiamento de Caulim (RBC). A Tabela 8 sintetiza essa evolução, revelando que a modificação da matriz solo-cimento pelo RBC não ocorre de forma linear entre as propriedades mecânicas e de transporte.

Tabela 8: Resumo consolidado dos parâmetros de engenharia vs. Teor de RBC para amostras com 7 dias de cura; Teor de Cimento: 5%; γ_d : 18,0 kN/m³.

Teor de RBC (%)	q_u (kPa)	q_t (kPa)	PMA (%)	k (m/s)	q_u/q_t (%)
0	961,51	201,23	56,06%	$3,24 \times 10^{-4}$	20,93
10	1012,95	234,19	18,56%	$1,58 \times 10^{-6}$	23,12
20	1071,13	251,51	11,33%	$7,99 \times 10^{-7}$	23,48
30	1097,91	333,41	8,51%	$3,99 \times 10^{-7}$	30,37

O achado central desta integração reside na divergência dos limiares de desempenho. Enquanto a resistência à compressão (q_u) estabilizou-se após a incorporação de 20% de RBC, os parâmetros de resistência à tração (q_t), durabilidade (PMA) e permeabilidade (k) continuaram a apresentar evoluções incrementais significativas até o teor de 30%.

Essa diferenciação válida a hipótese do RBC como extensor de matriz. Em teores elevados, o resíduo deixa de ser apenas um preenchimento de vazios e passa a atuar na otimização da fase ligante. Conforme o modelo de Consoli; Rosa e Saldanha, (2011), a refinação da porosidade (η) força o cimento Portland a se concentrar nos pontos de contato remanescentes entre os grãos de areia. Como a resistência à tração e a durabilidade são muito

mais sensíveis à qualidade das "pontes" cimentícias do que a compressão simples, esses parâmetros continuam a crescer mesmo quando a q_u atinge um platô.

A transição do comportamento do material é evidenciada pela evolução da razão q_u/q_t , que se elevou de 18,8% para expressivos 30,4% com 30% de RBC. Em areias cimentadas convencionais, essa relação raramente excede os 15% (Consoli *et al.*, 2007), caracterizando uma ruptura frágil. Entretanto a resistência a tração medida por Consoli *et al.*, (2007) foi obtida de ensaio de tração na compressão diametral. Trabalhos como o de Silva, (2017), que estudou a areia de Osório cimentada, demonstram claramente que os resultados de resistência obtidos em ensaios de tração na flexão (RTF) são sistematicamente superiores aos obtidos em ensaios de compressão diametral (RCD). Esta diferença era esperada e decorre de dois fatores principais, de difícil separação:

- Distribuição de Tensões e Volume Solicitado: Na flexão, a região de tração máxima é restrita às fibras inferiores do corpo de prova, reduzindo a probabilidade de que um defeito crítico (macroporo ou ponto frágil) esteja localizado exatamente no ponto de ruptura. Na compressão diametral, um volume muito maior de material está sob tração, aumentando a chance de a ruptura ser iniciada por uma descontinuidade.
- Estado de Tensões: O ensaio diametral impõe um estado de tensões biaxial (tração e compressão), onde a compressão perpendicular ao plano de tração pode influenciar o mecanismo de microfissuração de forma diferente do que ocorre na flexão, onde a região tracionada está livre dessa compressão perpendicular.

O incremento dessa razão indica que o RBC altera a natureza da zona de transição interfacial. A introdução do resíduo distribui a fase aglomerante de forma mais equitativa, reduzindo a concentração de tensões nos macroporos. De acordo com Diambra *et al.*, (2018), essa redistribuição resulta em um material mais tenaz. Para a engenharia de pavimentos, este ganho é crucial: um material com maior razão q_u/q_t é menos suscetível ao trincamento por fadiga sob cargas dinâmicas, permitindo que a camada suporte um número maior de solicitações do tráfego antes da interconexão de microfissuras.

4.8.1 Conclusão sobre o Teor Ótimo Global

Diante da análise integrada, conclui-se que a definição do teor ótimo de RBC não deve restringir-se ao critério convencional da compressão simples. Embora 20% de RBC represente o ponto de saturação para a carga compressiva, a proporção de 30% de RBC demonstrou ser a mais vantajosa para o desempenho global do compósito.

A maximização da tenacidade, aliada à redução de 85% na perda de massa e à transformação do solo de drenante para semi-impermeável, confere ao material uma longevidade superior frente ao intemperismo. Essa mudança de paradigma justifica a aplicação do RBC em obras de infraestrutura de alto desempenho, alinhando estabilidade geomecânica com as premissas de sustentabilidade e economia circular (Payan *et al.*, 2025).

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa avaliou o desempenho técnico do Rejeito de Beneficiamento de Caulim (RBC) como material de preenchimento de vazios (*filler*) em solo arenoso estabilizado com Cimento Portland. A partir dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização, resistência mecânica, durabilidade e condutividade hidráulica, foram estabelecidas as seguintes conclusões:

- A adição do RBC promoveu ganhos significativos de resistência, especialmente para teores mais baixos de cimento. Para misturas com 3% de cimento, o incremento de resistência atingiu cerca de 40% com a incorporação de 30% de RBC, confirmando a atuação do resíduo como *filler*, reduzindo os poros e otimizando os pontos de contato entre os grãos de areia. Para o teor de 5% de cimento, observou-se uma janela de otimização entre 10% e 20% de RBC, onde o ganho de resistência foi mais pronunciado. Já para misturas com 7% de cimento e elevados pesos específicos de moldagem, a adição de RBC mostrou-se menos efetiva ou mesmo contraproducente, indicando que o excesso de finos pode distanciar os grãos de areia e interferir na continuidade da fase cimentícia quando os vazios já estão preenchidos pelo próprio aglomerante.
- A resistência à compressão simples mostrou-se diretamente proporcional ao teor de cimento e ao peso específico seco de moldagem. A compactação mais energética (maior γ_d) potencializou o efeito *filler* do RBC, criando matrizes mais densas e com maior eficiência de cimentação. O controle da porosidade (η) demonstrou ser um parâmetro fundamental para compreender o comportamento mecânico das misturas, com a redução da porosidade correlacionando-se diretamente com o aumento da resistência.
- A incorporação do RBC resultou em ganhos expressivos na resistência à tração na flexão, superiores aos observados nos ensaios de compressão. Com 30% de RBC, a resistência à tração atingiu 322,18 kPa, representando um incremento de 78% em relação à mistura controle (0% RBC). A razão q_u/q_t evoluiu de 18,8% (0% RBC) para 30,1% (30% RBC), indicando uma transição para um comportamento mais tenaz e menos frágil do compósito. Este achado é particularmente relevante para aplicações em pavimentação, onde a resistência à tração governa o trincamento por fadiga.

- A durabilidade das misturas foi melhorada com a adição de RBC. A Perda de Massa Acumulada (PMA) reduziu-se de 56,06% (mistura controle, com falha severa) para apenas 8,51% (mistura com 30% de RBC), representando uma redução de aproximadamente 85% na perda de material. Este desempenho evidencia que o refinamento microestrutural promovido pelo *filler* protege as pontes cimentícias (gel C-S-H) contra a desagregação física e as tensões induzidas pelos ciclos térmicos e de umidificação, conferindo ao material uma resiliência superior ao intemperismo acelerado.
- A adição de RBC promoveu redução progressiva da condutividade hidráulica. O coeficiente k diminuiu de $3,24 \times 10^{-4}$ m/s (0% RBC, comportamento drenante) para $3,99 \times 10^{-7}$ m/s (30% RBC, comportamento semi-impermeável), uma redução de aproximadamente 800 vezes. Este resultado constitui a evidência física mais direta do efeito *filler*, confirmando que as partículas finas do RBC obstruem os canais capilares e a conectividade da rede porosa da matriz arenosa, transformando o material em uma barreira hidráulica.
- A metodologia de dosagem fundamentado na relação porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}) mostrou-se plenamente aplicável e robusto para as misturas solo-RBC-cimento. A utilização direta deste índice permitiu a normalização dos dados experimentais com excelentes coeficientes de correlação (R^2 elevados), validando o parâmetro como uma ferramenta preditiva eficaz para a resistência mecânica. Os resultados confirmam que a resistência é governada estritamente pela proporção entre o volume de vazios e o volume de cimento, independentemente das variáveis de moldagem isoladas.
- A análise integrada dos parâmetros revelou uma divergência de limiares de desempenho. Embora a resistência à compressão (q_u) tenha se estabilizado em torno de 20% de RBC, os parâmetros de tração (q_t), durabilidade (PMA) e estanqueidade (k) continuaram a evoluir significativamente até o teor de 30% de RBC. Conclui-se, portanto, que o teor ótimo global para o compósito é de 30% de RBC, pois esta dosagem maximiza a tenacidade, a durabilidade e a impermeabilidade do material, alinhando desempenho geomecânico superior com os princípios de sustentabilidade e economia circular ao incorporar a maior quantidade possível de resíduo industrial.

A pesquisa demonstrou a viabilidade técnica de transformar um passivo ambiental regional, o RBC, em um insumo de alto valor agregado para a engenharia geotécnica. A utilização do resíduo contribui diretamente para a mitigação dos impactos ambientais associados ao seu descarte inadequado, para a redução da extração de recursos naturais não renováveis e para o atendimento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 9, 12, 13 e 15), consolidando uma alternativa técnica e ambientalmente responsável para obras de infraestrutura.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) para visualização direta do efeito *filler* e da distribuição dos produtos cimentícios na microestrutura das misturas otimizadas
- Avaliar o comportamento das misturas em escalas de tempo mais longas, com cura de 28 e 90 dias, para verificar a evolução das reações pozolânicas tardias e seu impacto na resistência e durabilidade.
- Investigar o desempenho mecânico sob carregamentos cíclicos (módulo de resiliência e fadiga) para aplicação mais detalhada em dimensionamento de pavimentos.
- Realizar estudos de lixiviação e solubilização para confirmar a classificação ambiental do compósito final e sua segurança para aplicações em contato com o solo e lençol freático.
- Avaliar a viabilidade econômica e logística da incorporação do RBC em escala industrial, considerando distâncias de transporte e custos de beneficiamento.

7 REFERENCIAS

- ABCP. DOSAGEM DAS MISTURAS DE SOLO-CIMENTO. **DOSAGEM DAS MISTURAS DE SOLO-CIMENTO NORMAS DE DOSAGEM E MÉTODOS DE ENSAIOS**, [s. l.], n. 3º, p. 63, 2004.
- ABNT. **NBR 6457:2024 Solos - Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade**. Rio de Janeiro, 2024.
- ABNT. **NBR 6459:2016 Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016a.
- ABNT. **NBR 6502:2022 - Solos e rochas - Terminologia**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Abnt, 2022a.
- ABNT. **NBR 7180:2016 Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016b.
- ABNT. **NBR 7181:2025 Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2025a.
- ABNT. **NBR 7182:2025 Solos - Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2025b.
- ABNT. **NBR 10004-1:2024 Resíduos sólidos - Classificação Parte 1: Requisitos de classificação**. Rio de Janeiro, 2004a.
- ABNT. **NBR 10007:2004 - Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, RJabnt, , 2004b.
- ABNT. **NBR 12253:2012 - Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento - Procedimentos**. Rio de JaneiroAbnt, , 2012a.
- ABNT. **NBR 12770:2016 - Solo - Determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo**. Rio de Janeiro, RJ, 2022b.
- ABNT. **NBR 13554:2012 Solo-cimento: ensaio de durabilidade por molhagem e secagem: método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012b.
- ABNT. **NBR 16137:2016 Ensaios não destrutivos: identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por fluorescência de raios X e espectrometria por emissão óptica**. Rio de Janeiro, 2016c.
- ABNT. **NBR 16697:2018 - Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiroabnt, , 2018. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/confea/pnm.aspx?Q=dzJ2aGNncWswVDBSQ3MwUnRBcE9Nd2lKV2xlRWZ5bXBzSEYxRStMWHBXZz0=>. Acesso em: 11 fev. 2026.
- ABNT. **NBR 17212:2025 Solos - Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm**. Rio de Janeiro, 2025c.
- ACI COMMITTEE 230. **Report on soil cement (ACI 230.1R-09)**. Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute, 2009.
- ALMEIDA, K. M. de. **Estudo de beneficiamento do caulim do Seridó com a utilização de hidroclone**. [S. l.]: CETEM/MCTIC, 2018-. ISSN 0104-6373. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2167>. Acesso em: 6 fev. 2025.
- ALMEIDA, R. R. de. **Reciclagem de resíduo de caulim e granito para produção de blocos e telhas**. 2006. - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2006. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/12349>. Acesso em: 14 nov. 2024.
- ALMEIDA, M. de S. S. de *et al.* Toward sustainable tailings disposal: a geotechnical overview of Brazilian research. **Soils and Rocks**, [s. l.], v. 48, p. e2025011624, 2025.
- ALMEIDA, K. M. de; VIDAL, F. W. H.; CASTRO, N. F. Estudo do aproveitamento de resíduos de caulim do Seridó na produção de concreto. *In*: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. Rio de Janeiro, RJ: CETEM/MCTIC, 2016. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1895>. Acesso em: 28 jan. 2026.
- ALVES, H. P. A. *et al.* Preparation of mullite based ceramics from clay-kaolin waste mixtures. **Ceramics International**, [s. l.], v. 42, n. 16, p. 19086–19090, 2016.

ANAM, A. *et al.* An overview of kaolin and its potential application in thermosetting polymers. **Materials Today Communications**, [s. l.], v. 36, p. 106827, 2023.

ANM. **SUMÁRIO MINERAL 2017**. [S. l.]: [s. d.], 2017.

ARAÚJO, I. O. *et al.* Caracterização Química de Caulins de Junco do Seridó-PB. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 36–38, 2012.

ARAÚJO, E. H. A. de. **Estudo da amorfização do caulim para aplicação como material pozolânico**. 2016. masterThesis - Brasil, [s. l.], 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/23380>. Acesso em: 5 mar. 2025.

ARRIETA 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.

ARRUDA JUNIOR, E. S. *et al.* Caracterização e avaliação do índice de atividade Pozolânica do resíduo do beneficiamento do caulim para produção de cimentos de baixo impacto ambiental / Characterization and evaluation of the Pozzolanic activity index of kaolin processing waste for the production of low environmental impact cements. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 7, n. 10, p. 98678–98696, 2021.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM D6276 Standard Test Method for Using PH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement**. West Conshohocken, USA.ASTM International, , 2019. Disponível em: <https://www.astm.org/d6276-19.html>. Acesso em: 25 fev. 2025.

ASTM. **D 559 Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures**. West Conshohocken, USAASTM International, , 2024a.

ASTM. **D854 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by the Water Displacement Method**. West Conshohocken, USA, 2023.

ASTM. **D1635 Test Method for Flexural Strength of Soil-Cement Using Simple Beam with Third-Point Loading**. West Conshohocken, USAASTM International, , 2021a. Disponível em: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D1635-00R06>. Acesso em: 27 out. 2025.

ASTM. **D2166 Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil**. West Conshohocken, USAASTM International, , 2010.

ASTM. **D4318 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils**. West Conshohocken, USA, 2018.

ASTM. **D5084 Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter**. West Conshohocken, USAASTM International, , 2024b. Disponível em: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D5084-24>. Acesso em: 27 out. 2025.

ASTM. **D5381 Guide for X-Ray Fluorescence (XRF) Spectroscopy of Pigments and Extenders**. West Conshohocken, USA, 2021b.

ASTM. **D7928 Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis**. West Conshohocken, USA, 2021c.

AVADIAR, L. *et al.* Source of Unimin kaolin rheological variation–Ca²⁺ concentration. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s. l.], v. 459, p. 90–99, 2014.

BARATA, M. S.; ANGÉLICA, R. S. Caracterização dos resíduos caulínicos das indústrias de mineração de caulim da amazônia como matéria-prima para produção de pozolanas de alta reatividade. **Cerâmica**, [s. l.], v. 58, n. 345, p. 36–42, 2012.

BOLAN, S. *et al.* Beryllium contamination and its risk management in terrestrial and aquatic environmental settings. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 320, p. 121077, 2023.

CARRIER, W. D. Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 129, n. 11, p. 1054–1056, 2003.

CASTRO, S. F. Incorporação de resíduos de caulim em solo-cimento para construções civis. [s. l.], 2008. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/2605>. Acesso em: 5 mar. 2025.

CHANDRASEKHAR, S.; RAMASWAMY, S. Investigation on a gray kaolin from south east India. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 37, n. 1–2, p. 32–46, 2007.

CHAPUIS, R. P.; AUBERTIN, M. On the use of the Kozeny Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. **Canadian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 40, n. 3, p. 616–628, 2003.

CHU, S. H. *et al.* Evaluating 3-parameter packing model with discrete element modeling. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 430, p. 136309, 2024.

CONSOLI, N. C. *et al.* A Sole Empirical Correlation Expressing Strength of Fine-Grained Soils - Lime Mixtures. **Soils and Rocks**, [s. l.], v. 40, n. 2, p. 147–153, 2017.

CONSOLI, N. C. *et al.* Compacted Chalk Putty–Cement Blends: Mechanical Properties and Performance. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 04017266, 2018.

CONSOLI, N. *et al.* Dynamic Properties of Reclaimed Asphalt Pavement–Green Cement Blends for Road Base Layer. **Geotechnical and Geological Engineering**, [s. l.], v. 41, p. 1–17, 2023.

CONSOLI, N. C. *et al.* Fundamental Parameters for the Stiffness and Strength Control of Artificially Cemented Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 135, n. 9, p. 1347–1353, 2009.

CONSOLI, N. C. *et al.* Increasing density and cement content in stabilization of expansive soils: Conflicting or complementary procedures for reducing swelling?. **Canadian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 58, n. 6, p. 866–878, 2021.

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, 2007.

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.; DA SILVA LOPES, L.; 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.

CORTE, M. B. *et al.* Assessing the mechanical properties of a cemented sand focusing on experimental and theoretical studies. **E3S Web of Conferences**, [s. l.], v. 544, p. 11001, 2024.

DA SILVA, M. R. C. *et al.* Valorization of kaolin mining waste from the Amazon region (Brazil) for the low-carbon cement production. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 15, p. e00756, 2021.

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 Soil Strength. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 143, n. 5, p. 04017003, 2017.

DNPM, D. N. de P. M. ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO. [s. l.], 2010.

DROBNY, J. G. Additives. *In*: HANDBOOK OF THERMOPLASTIC ELASTOMERS. [S. l.]: Elsevier, 2014. p. 17–32. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978032322136800003X>. Acesso em: 1 fev. 2026.

ELGHALI, A. *et al.* Stabilization/solidification of sediments: challenges and novelties. *In*: LOW CARBON STABILIZATION AND SOLIDIFICATION OF HAZARDOUS WASTES. [S. l.]: Elsevier, 2022. p. 93–112. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926641022000232>. Acesso em: 8 jan. 2026.

ESSAM, A. *et al.* Modified particle packing approach for optimizing waste marble powder as a cement substitute in high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 409, p. 133845, 2023.

FESTUGATO, L. *et al.* Modelling tensile/compressive strength ratio of fibre reinforced cemented soils. **Geotextiles and Geomembranes**, [s. l.], v. 46, n. 2, p. 155–165, 2018.

FODE, T. A.; CHANDE JANDE, Y. A.; KIVEVELE, T. Effects of different supplementary cementitious materials on durability and mechanical properties of cement composite – Comprehensive review. **Heliyon**, [s. l.], v. 9, n. 7, p. e17924, 2023.

GALETAKIS, M. *et al.* Experimental investigation of the utilization of quarry dust for the production of microcement-based building elements by self-flowing molding casting. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 107, p. 247–254, 2016.

GERASIMOV, A.; USTINOV, I.; ZYRYANOVA, O. Use of clay-containing waste as pozzolanic additives. **Journal of Mining Institute**, [s. l.], v. 260, p. 313–320, 2023.

GOLDONI, A. G. *et al.* Durability and mechanical long-term performance of reclaimed asphalt pavement stabilized by alkali-activation. **Soils and Rocks**, [s. l.], v. 46, p. e2023007422, 2023.

GOMES, K. C. *et al.* Activation Alkaline Waste Kaolin for Fabrication of Building Blocks. **Key Engineering Materials**, [s. l.], v. 517, p. 622–627, 2012.

GRISSOLIA, E. M. *et al.* **Projeto de reavaliação do patrimônio mineral: área caulim do Rio Capim, estado do Pará**. [S. l.]: CPRM, 2021. Disponível em: <http://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/22403>. Acesso em: 28 fev. 2025.

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.

GUERRA, A. T. **Novo Dicionário Geológico- Geomorfológico**. [S. l.]: Bertrand Brasil, 2008. (6° ed).

GUO, B. *et al.* The mechanisms of heavy metal immobilization by cementitious material treatments and thermal treatments: A review. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 193, p. 410–422, 2017.

HAMZAOU, R. *et al.* Structural and thermal behavior of proclay kaolinite using high energy ball milling process. **Powder Technology**, [s. l.], v. 271, p. 228–237, 2015.

HATEFI, M. H. *et al.* The influence of volcanic ash (VA) on the mechanical properties and freeze-thaw durability of lime kiln dust (LKD)-stabilized kaolin clayey soil. **Results in Engineering**, [s. l.], v. 24, p. 103077, 2024.

HO, L. S. *et al.* Analysis of strength development in cement-treated soils under different curing conditions through microstructural and chemical investigations. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 166, p. 634–646, 2018.

HOCH, B. Z. *et al.* Strength and stiffness of compacted chalk putty–cement blends. **Acta Geotechnica**, [s. l.], v. 17, n. 7, p. 2955–2969, 2022.

HONGMEI, J. *et al.* Early performance modification of a waste-derived super-sulfated cement from arsenic-containing bio-oxidation waste via calcium aluminate and calcium sulfoaluminate cement. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 441, p. 137529, 2024.

HORPIBULSUK, S.; RAKSACHON, Y. Fly Ash As a Dispersing Material in Cement Stabilization. *In: GEOSHANGHAI INTERNATIONAL CONFERENCE 2010*, 2010, Shanghai, China. **Ground Improvement and Geosynthetics**. Shanghai, China: American Society of Civil Engineers, 2010. p. 137–142. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/41108%28381%2918>. Acesso em: 1 fev. 2026.

HOY, M. *et al.* Utilization of Refused Derived Fuel (RDF) waste in cement-stabilized lateritic soil as a sustainable pavement base material. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 24, p. e05825, 2026.

IKEAGWUANI, C. C.; NNONYELU, C. J.; ALEXANDER, T. C. Improvement of soft clay soil with a combination of pre-gelatinized corn starch and nanoparticle agro waste: A multi-objective grey wolf optimizer approach. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, [s. l.], v. 135, p. 103668, 2024.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization: principles and practice**. New York: Wiley, 1973.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 69–76, 2003.

K, P.; OM, S. A review on the influence of particle packing theory and materials on characteristics of ECC. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 98, p. 111079, 2024.

KAZMI, D. *et al.* Kaolin Clay Reinforced with a Granular Column Containing Crushed Waste Glass or Traditional Construction Sands. **International Journal of Geomechanics**, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 04022030, 2022.

KAZMI, D. *et al.* Shear Strength and Consolidation Behaviour of Kaolin Clay Reinforced with a Granular Column Backfilled with Crushed Waste Glass. **Geotechnical and Geological Engineering**, [s. l.], v. 42, n. 5, p. 3615–3632, 2024.

LADE, P.; LIGGIO, C.; YAMAMURO, J. Effects of Non-Plastic Fines on Minimum and Maximum Void Ratios of Sand. **Geotechnical Testing Journal**, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 336–347, 1998.

LI, J. *et al.* Compositional design of steel slag-based ultra-high performance concrete (UHPC) based on the D-optimal mixture design method: From macroscopic properties to microstructure (I). **Structures**, [s. l.], v. 79, p. 109588, 2025.

LI, H. *et al.* Self-solidification of As-containing bio-oxidation waste into cementitious materials: Performance enhancement via mechanochemical-activated recycled concrete fines. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 115531, 2025.

LITTLE, D. N. **Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime**. Dubuque, Iowa: Kendall/Hunt Pub. Co, 1995.

LONGHI, M. A. *et al.* Kaolin mining waste to produce geopolymers: Physicomechanical properties and susceptibility to efflorescence formation. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 16, p. e00846, 2022.

LUZ, A. B. da *et al.* **Rochas E Minerais Industriais: Usos E Especificações**. [S. l.]: Cetem, 2005. Disponível em: Acesso em: 5 fev. 2025.

LUZ, A. B.; COSTA, L. S. N.; CHAVES, A. P. Aspectos de alguns redutores usados no alveijamento de caulins. *In: XVI ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA*. 1. ed. Rio de Janeiro: [s. d.], 1995. p. 163–179.

LUZ, A. B. da; LINS, F. F. (org.). **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. 2a ed. rev. e ampliada. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2008.

MALKANTHI, S. N.; PERERA, A. a. D. a. J. Particle Packing Application for Improvement in the Properties of Compressed Stabilized Earth Blocks with Reduced Clay and Silt. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 4538–4542, 2019.

MALKANTHI, S. N.; WICKRAMASINGHE, W. G. S.; PERERA, A. A. D. A. J. Use of construction waste to modify soil grading for compressed stabilized earth blocks (CSEB) production. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 15, p. e00717, 2021.

MANDOLINI, A.; DIAMBRA, A.; IBRAIM, E. Stiffness of granular soils under long-term multiaxial cyclic loading. **Géotechnique**, [s. l.], v. 71, n. 9, p. 795–811, 2021.

MASKELL, D.; HEATH, A.; WALKER, P. Inorganic stabilisation methods for extruded earth masonry units. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 71, p. 602–609, 2014.

MEHDAOUI, H. Y. *et al.* Passive treatment residues of mine drainage: Mineralogical and environmental assessment, and management avenues. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 204, p. 108362, 2023.

MENEZES, R. R. *et al.* Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 13, p. 795–801, 2009.

MENEZES, R. R. *et al.* Utilização do resíduo do beneficiamento do caulim para a produção de corpos mulíticos. **Cerâmica**, [s. l.], v. 53, p. 388–395, 2007.

MENEZES, R. R. *et al.* Utilization of kaolin processing waste for the production of porous ceramic bodies. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [s. l.], v. 26, n. 4, p. 362–368, 2008.

MERMERDAŞ, K. *et al.* Strength development of concretes incorporated with metakaolin and different types of calcined kaolins. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 37, Non Destructive Techniques for Assessment of Concrete, p. 766–774, 2012.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K.; O’SULLIVAN, C. **Fundamentals of soil behavior**. Fourth edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2025.

MORAES, M. L. V. N. de. **Aproveitamento de resíduo de beneficiamento do caulim na produção de porcelanato cerâmico**. 2007. doctoral Thesis - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [s. l.], 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/12877>. Acesso em: 5 fev. 2025.

MOREIRA, E. B. *et al.* Effects of porosity, dry unit weight, cement content and void/cement ratio on unconfined compressive strength of roof tile waste-silty soil mixtures. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 369–378, 2019.

MÜLLER, A. *et al.* Quartz chemistry of granitic pegmatites: Implications for classification, genesis and exploration. **Chemical Geology**, [s. l.], v. 584, p. 120507, 2021.

NASCIMENTO, R. M. do *et al.* Estudo do efeito do feldspato e resíduo de caulim na produção de revestimento cerâmico. [s. l.], 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/45658>. Acesso em: 5 mar. 2025.

NATIONAL MINERALS INFORMATION CENTER. U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries 2024 Data Release (ver. 2.0, March 2024). U.S. Geological Survey, , 2024. Disponível em: <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/65a6e45fd34e5af967a46749>. Acesso em: 1 fev. 2026.

OGUNSANWO, O. Some geotechnical properties of two laterite soils compacted at different energies. **Engineering Geology**, [s. l.], v. 26, n. 3, p. 261–269, 1989.

ONU. **THE 17 GOALS | Sustainable Development**. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em: 28 fev. 2025.

ONYELOWE, K. C. *et al.* Morphology and mineralogy of rice husk ash treated soil for green and sustainable landfill liner construction. **Cleaner Materials**, [s. l.], v. 1, p. 100007, 2021.

PARK, C.-K. Hydration and solidification of hazardous wastes containing heavy metals using modified cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 30, n. 3, p. 429–435, 2000.

PAYAN, M. *et al.* Mechanical properties and microstructure of highly expansive clay treated with Waste Glass Powder (WGP) and Waste Tire Textile Fiber (WTTTF). **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, [s. l.], v. 140, p. 104043, 2025.

POON, C.-S.; CHAN, D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 50, n. 3, p. 293–305, 2007.

POUHET, R.; CYR, M.; BUCHER, R. Influence of the initial water content in flash calcined metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 201, p. 421–429, 2019.

PRASAD, M. S.; REID, K. J.; MURRAY, H. H. Kaolin: processing, properties and applications. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 87–119, 1991.

PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 47, n. 1, p. 11–25, 2014.

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.

REZENDE, M. L. de S. **Resíduo de caulim primário como material pozolânico em concreto seco: propriedades físico-mecânicas e durabilidade**. 2013. - Universidade Federal de Campina Grande, [s. l.], 2013. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/8545>. Acesso em: 28 fev. 2025.

REZENDE, M. L. D. S. *et al.* Utilização do resíduo de caulim em blocos de vedação. **Rem: Revista Escola de Minas**, [s. l.], v. 61, n. 3, p. 285–290, 2008.

ROCHA, A. K. A. da *et al.* Argamassas mistas para alvenaria utilizando resíduo de caulim - Parte I: comportamento mecânico. **Rem: Revista Escola de Minas**, [s. l.], v. 61, p. 505–512, 2008.

RODRIGUES, A. M. *et al.* Development of Eco-Friendly Mortars Produced with Kaolin Processing Waste: Durability Behavior Viewpoint. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 20, p. 11395, 2021.

SALDANHA, R. B. *et al.* Potential use of iron ore tailings for binder production: A life cycle assessment. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 365, p. 130008, 2023.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B. D.; LINS, F. A. F. Usinas de beneficiamento de minérios do Brasil. In: **USINAS DE BENEFICIAMENTO DE MINERIOS DO BRASIL**. [S. l.]: CETEM/MCT, 2001. p. 99–106. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2037>. Acesso em: 3 mar. 2025.

SCHWANKE, A. J. *et al.* Sustainable conversion of Brazilian Amazon kaolin mining waste to zinc-based Linde Type A zeolites with antibacterial activity. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 338, p. 130659, 2022.

SCORZA, E. P. **Província Pegmatítica da Borborema**. Rio de Janeiro: DNPM: [s. d.], 1944.

SCOTT, B.; JAKSA, M.; KUO, Y. L. Use of Proctor Compaction Testing for Deep Fill Construction using Impact Rollers. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND IMPROVEMENT & GROUND CONTROL**, 2012. **Proceedings of the International Conference on Ground Improvement & Ground Control**. [S. l.]: Research Publishing Services, 2012. p. 1107–1112. Disponível em: <http://rpsonline.com.sg/proceedings/9789810735777/html/04-0412.xml>. Acesso em: 4 mar. 2026.

- SEDRAN, T.; DELARRARD, F. **Optimization of SCC thanks to packing model**. [S. l.]: [s. d.], 1999. v. 7, p. 332
- SGARLATA, C. *et al.* Effect of the Introduction of Reactive Fillers and Metakaolin in Waste Clay-Based Materials for Geopolymerization Processes. **Molecules**, [s. l.], v. 26, n. 5, p. 1325, 2021.
- SILVA, F. A. N. G. da *et al.* Caracterização e beneficiamento físico-químico do caulim da região Borborema-Seridó. In: [S. l.]: CETEM/UFPE, 2010. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1241>. Acesso em: 29 jan. 2026.
- SILVA, A. da. Comportamento à tração na flexão de solo arenoso cimentado reforçado com fibras. [s. l.], 2017. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/188379>. Acesso em: 23 fev. 2026.
- SILVA, F. A. N. G. da *et al.* **Estudos de caracterização tecnológica e beneficiamento do caulim da Região Borborema - Seridó (RN)**. [S. l.]: CETEM, 2008-. ISSN 1518-9155. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/409>. Acesso em: 14 nov. 2024.
- SILVA, R. de O. *et al.* RESÍDUO DE CAULIM COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE TIJOLOS SOLO-CIMENTO. [s. l.], n. Anais III CONAPESC, 2018. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/42962>. Acesso em: 5 mar. 2025.
- SILVA, M. R.; DANTAS, J. R. A. Província Pegmatítica da Borborema – Seridó, Paraíba e Rio Grande do Norte. In: PRINCIPAIS DEPÓSITOS MINERAIS DO BRASIL. Brasília, DF: DNPM/CVRD: SCHOBENHAUS, C., 1997. v. I, p. 441–467.
- 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.
- SNEHAL, K.; DAS, B. B. Acid, alkali and chloride resistance of binary, ternary and quaternary blended cementitious mortar integrated with nano-silica particles. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 123, p. 104214, 2021.
- SOUSA, P. S. L. D. *et al.* INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE CAULIM NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS. In: 76º CONGRESSO ANUAL DA ABM - INTERNACIONAL, 2023, São Paulo. **ABM Proceedings**. São Paulo: Editora Blucher, 2023. p. 2252–2264. Disponível em: <http://abmproceedings.com.br/ptbr/article/influncia-do-resduo-de-caulim-nas-propriedades-mecnicas-de-compsitos-polimricos>. Acesso em: 5 mar. 2025.
- SRINATH, B. L. N. S. *et al.* A prospective review of alccofine as supplementary cementitious material. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 47, 3rd International Conference on Computational and Experimental Methods in Mechanical Engineering, p. 3953–3959, 2021.
- STRACKE, F. *et al.* The influence of moisture content on tensile and compressive strength of artificially cemented sand. **Soils and Rocks**, [s. l.], v. 35, n. 3, p. 303–308, 2012.
- TAHWIA, A. M. *et al.* Enhancing sustainability of ultra-high performance concrete utilizing high-volume waste glass powder. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 17, p. e01648, 2022.
- TERZAGHI, K. *et al.* **Soil mechanics in engineering practice**. 3. eded. New York: Wiley, 1996.
- THEVANAYAGAM, S. *et al.* Undrained Fragility of Clean Sands, Silty Sands, and Sandy Silts. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 128, n. 10, p. 849–859, 2002.
- TONINI DE ARAÚJO, M. *et al.* Mechanical behavior, mineralogy, and microstructure of alkali-activated wastes-based binder for a clayey soil stabilization. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 362, p. 129757, 2023.

VARELA, M. L. *et al.* Influência da adição de resíduo de caulim nas propriedades tecnológicas de uma massa padrão de porcelanato produzido em escala industrial. **Cerâmica**, [s. l.], v. 55, p. 209–215, 2009.

VIDAL, F. W. H. *et al.* Melhorias no processo de beneficiamento do caulim do Seridó Paraibano. In: RELATÓRIO TÉCNICO ELABORADO PARA O PROGRAMA ENTIDADES ASSOCIADAS CETEM-UFCG (RRM 0040-00-17). Rio de Janeiro, RJ: CETEM, 2017.

VILELA, A. P. *et al.* Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 262, p. 120883, 2020.

WANG, L. *et al.* Effects of coal-metakaolin on the properties of cemented sandy soil and its mechanisms. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 166, p. 592–600, 2018.

WEI, X.; LIU, H.; KU, T. Effects of plastic fines content on the engineering properties of cement-stabilized sands. **Granular Matter**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 46, 2021.

WILLIAMS, H. T. *et al.* Malignancy in kaolin pneumoconiosis found with F-18 FDG positron emission tomography. **Clinical Nuclear Medicine**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 4–7, 2008.

YU, Q. L.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Ultra-lightweight concrete: Conceptual design and performance evaluation. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 61, p. 18–28, 2015.

ZHANG, S. *et al.* Durability and heavy metals leaching behavior of cemented paste backfill using chemical activated binary slag as binder under sulfate attack. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 20, p. e03065, 2024.

ZHAO, Y. *et al.* First-principles investigations of arsenate doping into the ettringite lattice. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 419, p. 138266, 2023.

8 ANEXOS

8.1 RESULTADOS MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

Anexo A: Resultados médios de Resistência à Compressão Simples (RCS) aos 7 dias (em kPa)

Teor de Cimento (%)	Peso específico seco de Moldagem (γ_d) (kN/m ³)	RCS (kPa)			
		0%	10%	20%	30%
3%	~17,5	260	430	450	490
	~18,0	380	500	510	590
	~18,5	440	550	600	650
5%	~17,5	850	910	950	840
	~18,0	960	1010	1070	1070
	~18,5	1140	1250	1190	1180
7%	~17,5	1460	1660	1550	1470
	~18,0	1750	1710	1710	1630
	~18,5	1980	1940	1930	1870

Fonte: Autor

8.2 RESULTADOS MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Anexo B: Resultados médios de Resistência à Tração aos 7 dias (em kPa)

DADOS DE ENTRADA			Módulo de Ruptura R (kPa)	Médias
Cimento	RBC	Cod.		
5%	0	V1	207,08	201,232
	0	V1.1	194,18	
	0	V2	207,08	
	0	V2.1	221,28	
	0	V3	Descartado	
	0	V3.1	176,53	
	10	V4	Descartado	234,1913
	10	V4.1	217,84	
	10	V5	Descartado	
	10	V5.1	232,90	
	10	V6	227,31	
	10	V6.1	258,72	
	20	V7	Descartado	251,5099
	20	V7.1	268,61	
	20	V8	260,44	
	20	V8.1	231,61	
	20	V9	245,38	
	20	V9.1	Descartado	
	30	V10	335,74	333,4132
	30	V10.1	Descartado	
	30	V11	315,08	
	30	V11.1	326,27	
	30	V12	353,81	
	30	V12.1	336,17	

Fonte: Autor

8.3 RESULTADOS MÉDIOS DE PERDA DE MASSA ACUMULADA(PMA)

Anexo C: Resultados médios de Perda de Massa Acumulado (PMA) aos 7 dias (em porcentagem)

	C5K0 18kN/m ³	C5K10 18kN/m ³	C5K20 18kN/m ³	C5K30 18kN/m ³
CICLOS	PMA			
1	7,5%	2,5%	1,6%	1,1%
2	13,1%	4,5%	2,9%	1,9%
3	17,1%	5,8%	3,7%	2,6%
4	22,4%	7,6%	4,5%	3,2%
5	26,1%	8,9%	5,3%	3,9%
6	30,3%	10,3%	6,2%	4,5%
7	34,5%	11,5%	7,0%	5,2%
8	38,6%	12,8%	7,9%	5,9%
9	42,6%	14,1%	8,7%	6,5%
10	47,4%	15,7%	9,6%	7,2%
11	51,7%	17,1%	10,5%	7,8%
12	56,1%	18,6%	11,3%	8,5%

Fonte: Autor