

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS E
PROCESSOS INDUSTRIAIS**

LÁILA RAILA LEAL DIAS

**ESTUDO DAS FORMULAÇÕES DE TIJOLO SOLO – CIMENTO POR
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DA CAL HIDRATADA OU RESÍDUO DO
PROCESSAMENTO DA CAL**

**TERESINA
2025**

LÁILA RAILA LEAL DIAS

**ESTUDO DAS FORMULAÇÕES DE TIJOLO SOLO – CIMENTO POR
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DA CAL HIDRATADA OU RESÍDUO DO
PROCESSAMENTO DA CAL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e processo industriais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais e Processos Industriais.

Área de concentração: Processamento e caracterização de materiais.

Linha de Pesquisa: Tecnologias Ambientais

Orientador: Prof. Dr. Gilvan Moreira da Paz

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Arruda Lima Soares

**TERESINA
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Dias, Láila Raila Leal

D541e Estudo das formulações de tijolo solo - cimento por substituição parcial da cal hidratada ou resíduo do processamento da cal / Láila Raila Leal Dias. - 2025.

122 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, 2025.

Orientador : Prof Dr. Gilvan Moreira da Paz.

Coorientador : Prof Dr. Roberto Arruda Lima.

1. Solo - cimento. 2. Materiais alternativos. 3. Sustentabilidade. 4. Engenharia dos materiais. I. Título.

CDD - 620.1

Elaborado por Tanize Maria Sales CRB 3/1024

ESTUDO DAS FORMULAÇÕES DE TIJOLO SOLO – CIMENTO POR
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DA CAL HIDRATADA OU RESÍDUO DO
PROCESSAMENTO DA CAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais e Processos Industriais.

Aprovada em:19/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gilvan Moreira da Paz (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Erico Rodrigues Gomes
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. José Milton Elias de Matos
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Com amor e profunda gratidão, dedico este trabalho aos meus pais, Elizabete Borges (in memoriam) e José Ribamar, que são raízes de minha força e inspiração eterna. Aos meus irmãos, por cada gesto de apoio, por acreditarem no meu potencial e por serem minha fortaleza nos momentos de dúvida. Aos amigos que caminharam ao meu lado, fortalecendo-me com palavras de incentivo, e também àqueles que não acreditaram, pois em sua descrença encontrei a motivação para superar limites e me reinventar a cada dia. Esta jornada é reflexo de todos vocês.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, elevo minha mais profunda gratidão a Deus, cuja presença constante em minha vida foi farol e guia em cada passo dessa jornada. Foi Ele quem me fortaleceu nos momentos de incerteza, quem soprou ao meu coração que tudo daria certo e que jamais deveria desistir. Obrigada, Pai, por ser a essência de minha fé e perseverança.

Sou imensamente grata ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI) por me oferecer a oportunidade de realizar o sonho de cursar o Mestrado. Estendo minha gratidão aos professores do programa de pós-graduação, cuja generosidade e dedicação enriqueceram minha formação acadêmica e ampliaram minha visão de mundo.

Minha mais profunda gratidão ao estimado orientador, Dr. Gilvan Moreira da Paz, e coorientador Dr. Roberto Arruda. Seus ensinamentos, dedicação e paciência foram fundamentais nesta jornada. Sua orientação firme e encorajadora, sempre acompanhada de palavras de conforto, como “calma, vai dar tudo certo”, foi essencial para superar os desafios e seguir em frente. Obrigado por acreditarem em mim e por todo o conhecimento compartilhado. Sou eternamente grata!

Com afeto e apreço, agradeço à estimada Francisca Oliveira: sua devoção, suporte contínuo e altruísmo foram fundamentais nesta trajetória. Agradeço por toda a paciência e por estar sempre pronto a auxiliar nos períodos mais desafiadores. Seu zelo e compromisso fizeram toda a diferença. As minhas amigas Lucileide Aquino, Jainara Cardoso, Sandra Maria Borges e Ana Cristina e a todos os meus companheiros de turma por toda a colaboração, saberes compartilhados.

Dedico este trabalho com todo o meu amor à minha família, que é a base, o alicerce que me sustenta em cada passo dessa jornada. Obrigada por sempre estar ao meu lado, oferecendo amor, apoio incondicional e força nos momentos de dificuldade. Cada conquista é também de vocês, pois sem a confiança, o carinho e a motivação que recebi de todos, nada disso seria possível. Sou eternamente grato por tudo que me deram e continuam a me oferecer. Vocês são a razão de minha perseverança e a minha constância.

“A imaginação é
mais importante que
a ciência, porque a
ciência é limitada, ao
passo que a
imaginação abrange
o mundo inteiro”.

Albert Einstein

RESUMO

Atualmente, há uma crescente demanda por materiais de construção favoráveis ao meio ambiente, e os tijolos de solo-cimento surgem como uma alternativa para edificações cada vez mais sustentáveis, pois podem ser utilizados no reaproveitamento de materiais e não requerem queima em sua produção, o que contribui para a redução dos gases lançados na atmosfera. Entretanto, é importante destacar que a produção do cimento utilizado como aglutinante libera CO_2 , de modo que a sustentabilidade do solo-cimento está associada ao balanço entre a economia de emissões pela ausência da queima e o impacto ambiental da fabricação do cimento. Este estudo investigou as propriedades tecnológicas dos corpos de prova de solo-cimento obtidas a partir da substituição parcial da cal ou resíduos da cal em suas formulações (1%, 3%, 5%, 7% e 10%). A matéria-prima (solo), proveniente da jazida localizada na Serra do Gavião em Teresina-PI foi analisada por meio dos ensaios de análise granulométrica, limite de Atterberg, Fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX), análises termogravimétrica (TGA), ensaio de compactação, análise residual, ensaio de consistência. Os resultados sugerem que o solo utilizado é adequado para a fabricação de tijolos solo-cimento e que a cal e o resíduo de cal, atua como um aglomerante eficaz na estabilização de solos, contribuindo para a melhoria das propriedades mecânicas do material final. Nos corpos de prova foram realizados ensaios tecnológicos, físicos e mecânicos, incluindo índice de atividade pozolânica, absorção de água, resistência à compressão simples e durabilidade, a fim de garantir a qualidade do material e sua adequação ao uso na construção civil. Os resultados, com base nas análise estatística ANOVA, indicaram que a substituição parcial 3% de cal e 3% resíduos de cal contribuiu para o aumento da resistência mecânica e diminuição da absorção de água. Também apresentou boa durabilidade na porcentagem de 3% dos corpos de prova tanto na variação do volume, como na perda de massa, tornando viável a substituição parcial do cimento pela cal e resíduo da cal na porcentagem de 3% para produção de tijolos solo – cimento. Além disso, demonstraram vantagens ambientais como o reaproveitamento do resíduo da cal e a diminuição do uso do cimento, que pode contribuir com a redução da produção do clínquer.

Palavras-chave: solo-cimento; materiais alternativos; sustentabilidade; Engenharia de materiais.

ABSTRACT

Currently, there is a growing demand for environmentally friendly building materials, and soil-cement bricks are emerging as an alternative for increasingly sustainable buildings, as they can be used to reuse materials and do not require burning in their production, which contributes to the reduction of gases released into the atmosphere. However, it is important to note that the production of cement used as a binder releases CO₂, so the sustainability of soil-cement bricks is associated with the balance between the emissions savings from the absence of burning and the environmental impact of cement manufacturing. This study investigated the technological properties of soil-cement specimens obtained from the partial replacement of lime or lime residues in their formulations (1%, 3%, 5%, 7%, and 10%). The raw material (soil), sourced from the Serra do Gavião quarry in Teresina, Piauí, was analyzed using particle size analysis, Atterberg limit, X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TGA), compaction test, residual analysis, and consistency test. The results suggest that the soil used is suitable for the manufacture of soil-cement bricks and that lime and lime residue act as an effective binder in soil stabilization, contributing to improving the mechanical properties of the final material. Technological, physical, and mechanical tests were performed on the specimens, including pozzolanic activity index, water absorption, simple compressive strength, and durability, to ensure the quality of the material and its suitability for use in civil construction. The results, based on ANOVA statistical analysis, indicated that the partial replacement of 3% lime and 3% lime residue contributed to increased mechanical strength and decreased water absorption. It presented good durability at the 3% percentage of the specimens, both in terms of volume variation and mass loss, making the partial replacement of cement with lime and lime residue at the 3% percentage feasible for the production of soil-cement bricks. Furthermore, they demonstrated environmental advantages such as the reuse of lime residue and the reduced use of cement, which can contribute to the reduction of clinker production.

Keywords: soil-cement; alternative materials; sustainability; materials Engineering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Aplicação prática de tijolos de solo-cimento na construção civil	24
Figura 2 - Tijolo solo-cimento pronto para uso	27
Figura 3 - Fluxograma do Procedimento Experimental	31
Figura 4 - localização da Jazida de argila da Serra do Gavião em Teresina-PI	32
Figura 5 - Ensaio de caracterização de solo: Preparo da amostra (A); Fração fina do solo obtida após peneiramento (B).....	33
Figura 6 - Conjunto de peneiras e agitador mecânico	35
Figura 7 - Análise residual do solo: solo em repouso por 24 horas(A); processo de lavagem utilizando peneira (B)	36
Figura 8 - Execução do ensaio de Casagrande.....	37
Figura 9 - Compactação do solo: cilindro de compactar o solo com um soquete (A), solo compactado (B).....	38
Figura 10 - Misturador mecânico (A); Consistência da argamassa utilizando a mesa de consistência(B).....	39
Figura 11 - Cimento, areia, hidróxido de cálcio, resíduo de cal.....	40
Figura 12 - Desmolde do corpo de prova (A); Rompimento dos corpos de prova (B)	41
Figura 13 - Corpos de prova moldados.....	43
Figura 14 - Cura úmida dos corpos de provas.....	44
Figura 15 - Corpos de prova após o processo de cura e identificados por teor de cal e resíduo de cal	45
Figura 16 - Secagem dos corpos de prova em estufa a 110 °C por 24 horas para determinação da massa.....	46
Figura 17 - Ensaio de compressão dos corpos de prova: (A) antes e (B) durante a ruptura	47
Figura 18 - Ensaio de durabilidade: corpos de prova imersos em água durante o ciclo de molhagem	50
Figura 19 - Curva granulométrica do solo.....	52
Figura 20 - Curva granulométrica da cal	52
Figura 21 - Curva granulométrica do resíduo de cal	53
Figura 22 - Curva de umidade em função do número de golpes para determinação do limite de liquidez	55

Figura 23 - Curva de compactação do solo	56
Figura 24 - Análise de TG e suas respectivas perdas de massas.....	64
Figura 25 - Análise da DTG e suas respectivas Temperaturas	64
Figura 26 - Curva de Análise Térmica (TGA) da Cal Hidratada	66
Figura 27 - Curvas das análises térmicas (TGA e DTG)	66
Figura 28 - Perfil Térmico do Resíduo de Cal.....	68
Figura 29 - Análises térmicas e suas curvas de (TGA E DTG) do resíduo.....	68
Figura 30 - Absorção de Água com Desvio Padrão para Diferentes Teores de Substituição por Cal.....	71
Figura 31 - Absorção de Água para Diferentes Teores de Substituição por Resíduo de Cal	71
Figura 32 - Teste de Tukey- Diferenças entres Grupos de Absorção de Água (Cal)	76
Figura 33 - Gráfico do teste de Tukey- Diferenças entre Grupos de Absorção de Água (Resíduo de Cal)	80
Figura 34 - Boxplot da Absorção de Água para Diferentes Teores de substituição Cal vs. Resíduo de Cal	80
Figura 35 - Resistência à compressão simples média com desvio padrão aos 7 e 28 dias, em função do teor de cal nos tijolos solo-cimento	83
Figura 36 - Distribuição da resistência à compressão simples aos 7 dias – Cal	88
Figura 37 - Distribuição da resistência à compressão simples aos 28 dias – Cal	89
Figura 38 - Resistência à compressão simples (RCS) aos 7 e 28 dias.....	91
Figura 39 - Distribuição da resistência à compressão simples (RCS) aos 7 dias para diferentes teores de RC	97
Figura 40 - Distribuição da Resistência à Compressão Simples aos 28 Dias para Diferentes Teores de Substituição por RC	98
Figura 41 - Boxplot da RCS (7 e 28 dias) – (cal vs resíduo de cal)	99
Figura 42 - Gráfico da Variação de Volume - Comparativo entre Cal e Resíduo de Cal	100
Figura 43 - Gráfico Comparativo da perda de massa entre amostras com cal e resíduo de cal	102
Gráfico 1 - Difratograma de Raio – X do Solo	62
Gráfico 2 - DRX da Cal Hidratada e do Resíduo de Cal	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Propriedades padrão dos tijolos de solo-cimento.....
Tabela 2	– Parâmetros Físico-Químicos para a Caracterização do Cimento....
Tabela 3	– Parâmetros da NBR 8491: 2012.....
Tabela 4	– Proporções das misturas para fabricação dos corpos de prova.....
Tabela 5	– Granulometria do solo, Cal Hidratada e Resíduo de cal, Fração Passante nas Diferentes Malhas
Tabela 6	– Determinação do resíduo retido na peneira n° 325 da ABNT.....
Tabela 7	– Relação entre o número de golpes e os teores de umidade para determinação do limite de liquidez.....
Tabela 8	– Limites de consistência de Atterberg do solo.....
Tabela 9	– Resistências à compressão para atividade pozolânica.....
Tabela 10	– Distribuição dos Principais Óxidos nas Matérias-Primas Analisadas (% em massa)
Tabela 11	– Eventos de perda de Massa do solo identificados por Análise Termogravimétrica (TG).....
Tabela 12	– Eventos de Perda de Massa da cal hidratada identificados por Análise Termogravimétrica (TG).....
Tabela 13	– Eventos de Perda de Massa do resíduo de cal, identificados por Análise Termogravimétrica (TG).....
Tabela 14	– Absorção de água aos 60 dias com corpos de prova com cal (CPC) e corpos de prova com resíduo de cal (CPR).....
Tabela 15	– Teste de normalidade dos dados de absorção de água aos 60 dias para as formulações com cal, utilizando o teste de Shapiro-Wilk.....
Tabela 16	– Resultado do teste de Levene para verificar a homogeneidade das variâncias nas formulações com cal.....
Tabela 17	– Resultados da ANOVA para Comparação dos Teores de Substituição de Cimento por Cal na Absorção de Água dos Corpos de Prova.....
Tabela 18	– Resultados do teste de Tukey para comparação dos teores de cal hidratada (CPC) nas médias de absorção de água aos 60 dias...
Tabela 19	– Teste de normalidade dos dados de absorção de água aos 60 dias para as formulações com Resíduo, utilizando o teste de Shapiro-Wilk.....
Tabela 20	– Resultado do teste de Levene para verificar a homogeneidade das variâncias nas formulações Resíduo.....

Tabela 21	– Resultados da ANOVA para Comparação dos Teores de Substituição de Cimento por Resíduo de Cal na Absorção de Água dos Corpos de Prova.....
Tabela 22	– Resultados do Teste de Tukey para Comparação das Médias de Resistência à Compressão entre Diferentes Teores de Substituição de Cimento por Resíduo de Cal (60 dias)
Tabela 23	– Resistência à Compressão Simples (RCS) da cal aos 7 dias.....
Tabela 24	– Resistência à Compressão Simples (RCS) Cal aos 28 dias.....
Tabela 25	– Teste de Shapiro-Wilk para os corpos de prova com diferentes porcentagens de cal (CPR), 7 dias.....
Tabela 26	– Teste de Shapiro-Wilk para os corpos de prova com diferentes porcentagens de cal (CPR), para 28 dias.....
Tabela 27	– Teste de Levene aplicado aos dados de resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias para Cal.....
Tabela 28	– Análise de variância (ANOVA) para os valores de resistência à compressão simples dos corpos de prova com adição de cal, avaliados aos 7 e 28 dias de cura.....
Tabela 29	– Resultados do teste de Tukey aplicados às médias de resistência à compressão simples dos corpos de prova após 7 dias de cura para cal.....
Tabela 30	– Resultados do teste de Tukey aplicados às médias de resistência à compressão simples dos corpos de prova após 28 dias de cura.....
Tabela 31	– Resistência à Compressão Simples (RCS) da cal aos 7 dias.....
Tabela 32	– Resistência à Compressão Simples (RCS) aos 28 dias.....
Tabela 33	– Teste de Shapiro-Wilk para os corpos de prova com diferentes porcentagens de Resíduo de cal (CPR), 7 dias.....
Tabela 34	– Teste de Shapiro-Wilk para os corpos de prova com diferentes porcentagens de Resíduo de cal (CPR), para 28 dias.....
Tabela 35	– Teste de Levene aplicado aos dados de resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias para Resíduo de cal.....
Tabela 36	– Análise de variância (ANOVA) para os valores de resistência à compressão simples dos corpos de prova com adição de Resíduo de cal, avaliados aos 7 dias de cura.....
Tabela 37	– Análise de variância (ANOVA) para os valores de resistência à compressão simples dos corpos de prova com adição de Resíduo de cal, avaliados aos 28 dias de cura.....
Tabela 38	– Resultados do teste de Tukey aplicados às médias de resistência à compressão simples dos corpos de prova após 7 dias de cura para resíduo de cal.....

- Tabela 39 – Resultados do teste de Tukey aplicados às médias de resistência à compressão simples dos corpos de prova após 28 dias de cura para resíduo de cal.....
- Tabela 40 – Variação da Perda de Massa (%) por Ciclos de Secagem e Molhagem nos Corpos de Prova com Diferentes Teores de Cal...¹
- Tabela 41 – Variação da Perda de Massa (%) por Ciclos de Secagem e Molhagem nos Corpos de Prova com Diferentes Teores de Resíduo de Cal.....¹

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Decomposição térmica do carbonato de cálcio	27
Equação 2 – Determinação do percentual de resíduo retido (%R)	36
Equação 3 – Cálculo do Índice de Plasticidade (IP).	37
Equação 4 – Índice de desempenho com o Cimento Portland	40
Equação 5 – Cálculo da absorção de água (%).	46
Equação 6 – Cálculo da quantidade relativa de água.....	49
Equação 7 – Cálculo da massa final corrigida dos corpos de prova (M _{fcp}).	49
Equação 8 – Perda de massa dos corpos de prova 2 e 3 em relação à massa seca inicial (%).	49
Equação 9 – Modelo matemático da curva de compactação (ensaio Proctor)	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
Al_2O_3	Óxido de alumínio
ANOVA	Análise de Variância
ANITECO	Associação Nacional da Indústria do Tijolo Ecológico
CaO	Óxido de cálcio
CaOH_2	Hidróxido de cálcio
Cm	Centímetro
CO_2	Dióxido de carbono
CP	Corpo de prova
CPC	Corpo de prova Cal
Cu	Cobre
CPR	Corpo de Prova Resíduo
DRX	Difração de Raios –X
Fe_2O_3	Óxido de ferro (III)
FRX	Fluorescência de raios X
IFPI	Instituto Federal do Piauí
IP	Índice de Plasticidade
Kv	Quilovolts
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
M	Média
mA	Miliampère
Min	Minutos
Mm	Milímetro
MgO	Óxido de magnésio
Mpa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
PH	Potencial Hidrogeniônico
PI	Piauí
PPGEM	Programa de Pós-graduação em Engenharia de materiais
RCC	Resíduo da Construção civil
RCS	Resistência à Compressão Simples
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SiO_2	Óxido de silício
So_3	Trióxido de enxofre
TGA	Análise térmica por termogravimétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
=	Igualdade
°C	Grau Celsius
>	Maior que
<	Menor que
≤	Menor ou igual a
≥	Maior ou igual a
Θ	Teta
Λ	Lambda
#	Hashtag
±	Mais ou menos
+	Mais

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	OBJETIVO GERAL.....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3	REFERENCIAL TEÓRICO	20
3.1	SOLO	20
3.2	CIMENTO.....	21
3.3	TIJOLO SOLO – CIMENTO	24
3.4	VANTAGENS DOS TIJOLOS SOLO – CIMENTO	26
3.5	CAL HIDRATADA: $\text{Ca}(\text{OH})_2$	27
3.6	USO DE CAL NO TIJOLO SOLO - CIMENTO	28
3.7	RESÍDUOS DA MINERAÇÃO	28
3.8	SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1	MATERIAIS.....	31
4.2	COLETAS DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	31
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	33
4.4	MÉTODOS	34
4.4.1	Caracterização dos materiais (solo, cal hidratada e resíduo de cal).	34
4.4.2	Análise Granulométrica	34
4.4.3	Análise Residual	35
4.4.4	Limites de Plasticidade	37
4.4.5	Ensaio de Compactação.....	38
4.4.6	Ensaio de consistência (Flow Table)	38
4.4.7	Índice de Atividade Pozolânica.....	39
4.4.8	Fluorescência de raios X - FRX	41
4.4.9	Difração de raios X- DRX.....	41
4.4.10	Análises Termogravimétricas –TG	42
4.4.11	Formulações dos Corpos de Prova.....	42
4.4.12	Confecção dos Corpos de Provas	43
4.4.13	Processo de Cura	43
4.4.14	Ensaio de Absorção de Água	45

4.4.15	Resistência à compressão simples – RCS.....	47
4.4.16	Análises Estatísticas	47
4.4.17	Ensaio de durabilidade por imersão e secagem	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1	CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	51
5.1.1	Análise Granulométrica do solo, Cal Hidratada e Resíduo de Cal	51
5.2	ANÁLISE RESIDUAL	53
5.3	LIMITES DE PLASTICIDADE.....	54
5.4	ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	56
5.5	ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA.....	57
5.6	ATIVIDADE POZOLÂNICA.....	58
5.7	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS (SOLO, CAL HIDRATADA, RESÍDUO DE CAL	59
5.8	DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X (DRX), DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	62
5.8.1	DRX do solo	62
5.8.2	DRX da cal hidratada e do resíduo de cal.....	63
5.9	ANÁLISES TERMOGRAVIMÉTRICA TG E DTG DO SOLO	64
5.10	ANÁLISES TERMOGRAVIMÉTRICA TG E DTG DA CAL HIDRATADA.....	65
5.11	ANÁLISES TERMOGRAVIMÉTRICA TG E DTG DO RESÍDUO DE CAL ...	68
5.12	ABSORÇÃO DE ÁGUA	69
5.12.1	Análises estatísticas para ensaio de absorção de água – Cal.....	72
5.12.2	Análises estatísticas para ensaio de absorção de água – Resíduo de Cal	76
5.13	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS) – CAL.....	81
5.13.1	Análise estatística para resistência à compressão simples – Cal.....	84
5.14	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS) – RESÍDUO DE CAL...90	
5.14.1	Análise Estatística para Resistência à Compressão Simples – Resíduo de Cal	92
5.15	ENSAIO DE DURABILIDADE POR IMERSÃO E SECAGEM	100
6	CONCLUSÃO	104
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	106
	REFERÊNCIAS	107
	APÊNDICES.....	Erro! Indicador não definido.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil, além de ser um setor estratégico para o desenvolvimento econômico, caracteriza-se pelo intenso consumo de matérias-primas não renováveis e de energia em todas as etapas produtivas, desde a extração de insumos até a fabricação e o transporte de materiais. Esse processo resulta em grande volume de resíduos, reforçando a urgência de práticas mais sustentáveis e inovadoras (MASUERO, 2021).

Diante desse panorama, cresce a necessidade de soluções que conciliem desempenho técnico e responsabilidade ambiental. Nesse contexto, os tijolos de solo-cimento destacam-se pela fabricação simplificada, pelo menor impacto ecológico e pela possibilidade de incorporar resíduos sólidos, consolidando-se como opção construtiva sustentável e economicamente acessível (DANTAS, 2020).

Produzidos pela compactação de solo, cimento e água, esses tijolos dispensam o processo de queima, o que resulta em significativa redução nas emissões de gases de efeito estufa e no consumo energético, quando comparados aos blocos cerâmicos tradicionais (ANITECO, 2020). Para aprimorar suas propriedades mecânicas e aumentar a durabilidade, a adição de estabilizantes como cal e resíduos industriais tem sido objeto de estudo, revelando-se eficaz na melhoria do desempenho estrutural.

A cal, amplamente estudada como estabilizante, interage com os constituintes argilosos do solo por meio de reações pozolânicas, originando compostos cimentantes secundários que conferem maior coesão à matriz, promovendo aumento da resistência mecânica e estabilidade dimensional. Além disso, sua utilização viabiliza o aproveitamento de solos mais plásticos, ampliando suas propriedades de aplicação dos tijolos (JOHANN, 2013).

Paralelamente, o reaproveitamento de resíduos provenientes da mineração surge como uma estratégia ambientalmente viável, dada sua composição química rica em óxidos como dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), compatíveis com a matriz cimentante. A substituição parcial de ligantes convencionais por esses resíduos pode contribuir positivamente para a resistência, durabilidade e desempenho térmico dos tijolos, ao mesmo tempo em que reduz impactos ambientais e fomenta a economia circular. No entanto, a variabilidade na composição dos resíduos exige controle rigoroso nas proporções utilizadas, a fim de evitar perdas de desempenho ou patologias, como fissuração precoce.

A formulação de tijolos solo-cimento com substituições parciais de cal e resíduos da mineração configura-se, assim, como uma alternativa promissora para a produção de materiais de construção mais sustentáveis. Essa abordagem não apenas contribui para o reaproveitamento de subprodutos industriais e redução de passivos ambientais, mas também potencializa o desempenho físico e mecânico das peças.

Dessa forma, o presente estudo justifica-se pela busca por soluções construtivas que integrem sustentabilidade, viabilidade econômica e desempenho técnico. O objetivo geral desta dissertação é produzir tijolos de solo-cimento com substituição parcial de cal e de resíduos da mineração em suas formulações, contribuindo para o desenvolvimento de composições mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Produzir tijolos de solo-cimento, obtidos a partir da substituição parcial do cimento por cal ou por resíduos do processamento da cal em suas formulações.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as características físicas, químicas e mineralógicas da matéria-prima por meio de ensaios físicos e técnicas de difração de raios X e fluorescência de raios X;
- Produzir os corpos de prova de solo-cimento (ABNT NBR 12023:2012);
- Analisar as propriedades físicas como: Análise Granulométrica, Limites de Atterberg e Ensaio de Consistência e mecânicas como resistência à compressão simples dos corpos de provas produzidos;
- Comparar as propriedades de resistência à compressão e absorção de água das amostras com substituição parcial do cimento por cal ou resíduo de cal e o corpo de prova solo-cimento;
- Verificar estatisticamente a viabilidade técnica de se produzir o tijolos solo-cimento com substituição parcial do cimento por cal ou resíduo de cal.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 SOLO

Desde dos primórdios, o solo tem sido amplamente empregado como material de construção. (BAUER,2025). Civilizações antigas, como os gregos e romanos, já utilizavam solo há pelo menos dez mil anos, e muitas de suas edificações continuam firmes e bem conservadas até hoje. Um exemplo notável desse solo estabilizado é a Grande Muralha da China, construída no século III, onde uma mistura de solo e cal foi utilizada para conferir resistência e durabilidade.

Atualmente o solo tem se consolidado como um dos materiais mais utilizados na construção civil, destacando-se pelo seu conhecimento e previsões econômicas. Sua aplicação possibilita a redução ou até mesmo a substituição de outros insumos, contribuindo para a diminuição dos custos na execução de obras. (NASCIMENTO *et al.*, 2018).

Conforme estabelece a norma técnica Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 10833/12, o solo utilizado na produção de tijolos solo-cimento não deve apresentar teores de matéria orgânica que interfiram no processo de hidratação do cimento. Dessa forma, é essencial que ele atenda às especificações recomendadas, conforme consta na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades padrão dos tijolos de solo-cimento

Características	Requisitos
% passante na peneira com abertura na malha de 4,75mm	100
% passante na peneira com abertura na malha de 75 mm	10 a 50
Limite de liquidez (LL)	≤ 45
Limite de plasticidade (LP)	≤ 18

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 10833/12

SOUSA (2018) descreve que os limites de Atterberg são determinados pelos valores de liquidez e plasticidade do solo. O LL representa a quantidade de água necessária para que o solo perca a coesão entre suas partículas e passe a se comportar como um fluido. Já o LP corresponde ao estágio em que, com a remoção gradual da umidade, o solo deixa de apresentar plasticidade e passa a um estado semissólido, tornando-se não moldável.

O LL, é obtido por meio de ensaios experimentais utilizando o aparelho Casa-Grande, em conformidade com as diretrizes previstas pela NBR 6459/17. Por sua vez, a determinação do LP, é realizada com o auxílio do vidro esmerilhado, obedecendo às normas descritas na NBR 7180/16 (SOUSA, 2018).

De acordo com os critérios estabelecidos pelas normas técnicas, a seleção de solos para a produção de tijolos de solo-cimento deve considerar sua granulometria e composição química. Nem todos os tipos de solo são adequados para essa aplicação, tornando-se necessariamente a realização de ensaios laboratoriais para determinar parâmetros essenciais. (PINTO, 2015).

3.2 CIMENTO

O cimento é classificado como um material inorgânico que, ao entrar em contato com a água, desenvolve propriedades aglutinantes, conforme estabelecido pela NBR (2018). Embora sua aplicação remonte às antigas civilizações, com indícios de uso há mais de 4.500 anos, o cimento na forma atual teve sua origem entre os séculos XVIII

e XIX. Esse avanço se deve aos experimentos conduzidos por pesquisadores como John Smeaton, Louis Vicat e Joseph Aspdin. Este último foi o responsável por nomear o produto como cimento Portland, em referência à semelhança de sua aparência endurecida com as pedras naturais extraídas da Ilha de Portland, segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (2009).

Atualmente o cimento Portland consolidou-se como um dos insumos mais relevantes da construção civil, especialmente na produção de concreto, o material mais utilizado em escala global. Contudo, sua fabricação envolve elevado consumo de recursos naturais e energia, além da necessidade de altas temperaturas e da queima de combustíveis fósseis, fatores que acarretam impactos ambientais expressivos (MOHAMAD et al., 2021). Estima-se que a indústria cimenteira seja responsável por cerca de 8% das emissões globais de dióxido de carbono (CO_2), liberando ainda outros poluentes como óxidos de nitrogênio (NO_2), dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO) e traços de metais pesados (BLOIS; LAY-EKUAKILLE, 2021; MADIRISHA; DADA; IKOTUN, 2024).

De acordo com a NBR 16697/18, o cimento é um material aglomerante hidráulico, obtido a partir da moagem do clínquer com adições minerais e gesso, que, ao entrar em contato com a água, forma uma pasta capaz de desenvolver resistência mecânica tanto em ambientes úmidos quanto secos.

Sua composição, predominantemente contida por silicatos e aluminatos de cálcio, influencia diretamente suas propriedades físicas e reológicas, sendo um elemento essencial na engenharia civil, especialmente na produção de concretos, argamassas estruturais e tijolos solo – cimento.

Nesse contexto, o uso do cimento na fabricação de tijolos solo-cimento merece atenção, uma vez que sua dosagem impacta diretamente a resistência, a estabilidade e o custo do material. Embora o aumento da quantidade de cimento possa melhorar a resistência do tijolo, é necessário buscar um equilíbrio para evitar custos excessivos na construção. Além disso, um relatório do *Energy Technology Perspectives* (2020) aponta que a produção de cimento é responsável por aproximadamente 8% das emissões globais de CO_2 . Diante desse cenário, pesquisadores têm direcionado esforços para o aproveitamento de resíduos da construção civil e subprodutos industriais como aditivos sustentáveis.

O cimento Portland CP V-ARI foi selecionado para esta dissertação devido à sua capacidade de desenvolver resistência elevada nos primeiros dias após a

aplicação. Esse desempenho é obtido por meio de uma formulação distinta de calcário e argila na produção do clínquer, além de uma moagem mais fina, o que acelera sua ocorrência com a água e resulta em um ganho de resistência mais rápido.

Embora o clínquer seja o mesmo utilizado em cimentos convencionais, no caso do CP V-ARI, ele passa por um tempo de moagem prolongado. Essa particularidade permite que o CP V-ARI atinja resistência à variação de até 26 megapascal (Mpa), em apenas um dia de idade, sendo consideravelmente utilizado na fabricação industrial de artefatos onde se exige desforma rápida. Adicionalmente, o CP V-ARI atende aos requisitos físicos e químicos estabelecidos pela norma NBR 5733/18, conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros Físico-Químicos para a Caracterização do Cimento

CIMENTO CP V-ARI

Ensaios Físicos	Limites das normas	Valores do cimento
<i>Blaine (cm²/g)</i>	≥ 3000	<i>NBR NM 76/1998</i>
<i>Tempo de início de pega (min)</i>	≥ 60	<i>NBR NM 65/2003</i>
<i>Tempo de fim de pega (min)</i>	≤ 600	<i>NBR NM 65/2003</i>
<i>Finura na peneira # 200 (%)</i>	≤ 6,0	<i>NBR 11579/2012</i>
<i>Finura na peneira # 325 (%)</i>	—	<i>NBR 11579/2012</i>
<i>Expansibilidade a quente (mm)</i>	≤ 5,0	<i>NBR 11582/2016</i>
<i>Consistência normal (%)</i>	—	<i>NBR NM 43/2003</i>
<i>Resistência à compressão 1 dia (MPa)</i>	≥ 14,0	<i>NBR 7215/1997</i>
<i>Resistência à compressão 3 dias (MPa)</i>	≥ 24,0	<i>NBR 7215/1997</i>
<i>Resistência à compressão 7 dias (MPa)</i>	≥ 34,0	<i>NBR 7215/1997</i>
<i>Resistência à compressão 28 dias (MPa)</i>	—	<i>NBR 7215/1997</i>
<i>Densidade</i>	—	<i>NBR NM 23/2001</i>
Ensaio Químicos		
<i>Perda ao fogo (%)</i>	≤ 4,5	<i>NBR 5743/1989</i>
<i>Resíduo insolúvel (%)</i>	≤ 1,0	<i>NBR 5744/1989</i>
<i>Trióxido de Enxofre - (SO₃) (%)</i>	5	<i>NBR 5745/1989</i>
<i>Óxido de Cálcio - (CaO) (%)</i>	-	<i>NBR 9203/1985</i>
<i>Óxido de Magnésio - (MgO) (%)</i>	≤ 6,5	<i>NBR 9203/1985</i>
<i>Óxido de Alumínio - (Al₂O₃) (%)</i>	-	<i>NBR 9203/1985</i>
<i>Óxido de Silício - (SiO₂) (%)</i>	-	<i>NBR 9203/1985</i>
<i>Óxido de Ferro - (Fe₂O₃) (%)</i>	-	<i>NBR 9203/1985</i>

Fonte: Adaptado pela Autora (2025).

3.3 TIJOLO SOLO – CIMENTO

O tijolo de solo-cimento é reconhecido como uma opção ambientalmente sustentável, pois seu processo produtivo não envolve a etapa de queima, eliminando, assim, o consumo de combustíveis fósseis ou biomassa. Esse fator reduz significativamente a emissão de gases poluentes associados ao efeito estufa e minimiza a extração de recursos naturais, como a madeira, contribuindo para a preservação ambiental (CARVALHO, 2019). A Figura 1, ilustra uma edificação construída com tijolos de solo-cimento, destacando a aplicação prática desse material.

Figura 1 - Aplicação prática de tijolos de solo-cimento na construção civil



Fonte: connect eco tijolos (2025).

Além disso, estudos recentes destacam que a utilização de tijolos solo-cimento impacta positivamente na redução das emissões de carbono, uma vez que dispensa

o processo de queima, essencial na produção de materiais cerâmicos tradicionais (MOURA *et al.*, 2021; FERRARI *et al.*, 2014).

O desempenho do tijolo solo-cimento está diretamente ligado às características do solo, como granulometria, plasticidade e teor de matéria orgânica. A adição de 5% a 10% de cimento age como aglutinante, elevando a resistência e a durabilidade. Além de reduzir custos, estudos indicam que esse material melhora a eficiência térmica das edificações, favorecendo o conforto ambiental (THOMAS *et al.*, 2020).

A NBR 10833/12 estabelece diretrizes para a fabricação de tijolos de solo-cimento, abrangendo procedimentos específicos para o uso de prensas manuais ou hidráulicas. A norma define critérios técnicos essenciais para garantir a qualidade e o desempenho dos blocos, incluindo requisitos sobre composição do solo, umidade ideal, resistência mecânica e absorção de água. Entre as recomendações da norma, destacam-se os valores limites para as principais características do solo utilizado, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros da NBR 8491: 2012

Parâmetros da NBR 8491:2012		
Nº	Parâmetro	Valor recomendado
1	Resistência mínima à compressão (MPa)	$\geq 2,0$ MPa após 28 dias de cura
2	Absorção máxima de água (%)	≤ 20 %
3	Granulometria adequada	Faixa adequada para a compactação
4	Teor máximo de matéria orgânica (%)	≤ 2 %

Fonte: Adaptado pela Autora (2024).

Esses parâmetros incluem granulometria adequada, teor de matéria orgânica, plasticidade e limite de contração volumétrica, garantindo que o solo seja compatível com o processo de estabilização com cimento. Além disso, a norma NBR 8491/12 determina que os tijolos devem atingir resistência mínima à compressão de 2,0 MPa após 28 dias de cura, bem como absorção de água inferior a 20%, assegurando durabilidade e estabilidade estrutural.

Dessa forma, a NBR 10833/12 é fundamental para padronizar a produção de tijolos de solo-cimento, assegurando sua qualidade, segurança e viabilidade técnica na construção civil.

3.4 VANTAGENS DOS TIJOLOS SOLO – CIMENTO

A facilidade de obtenção dos insumos para a fabricação do tijolo de solo-cimento é um dos benefícios desse material, pois o solo utilizado pode ser produzido diretamente do próprio local da obra, contribuindo assim para a sustentabilidade.

Neste contexto, o tijolo solo-cimento, também conhecido como tijolo ecológico, apresenta - se como uma alternativa eficiente, sustentável e econômica em um setor cada vez mais preocupado com a escolha de materiais inovadores. De acordo com (CARVALHO 2019 e SOARES, 2024). As principais vantagens dos tijolos de solo-cimento incluem:

- Maquinário de baixo custo
- Redução do impacto ambiental e diminuição de entulhos gerais
- Menor volume de resíduos no canteiro de obras;
- Dispensa da mão de obra especializada
- Propriedades biodegradáveis e bom acabamento estético;
- Facilitação da organização no canteiro

Além disso, outra vantagem é o seu design auto encaixável que simplifica o assentamento, reduzindo o consumo de argamassa e eliminando a necessidade de diversos acabamentos, como reboco, massa niveladora, pintura e rejuntas. O mais indicado seria apenas a aplicação de um impermeabilizante nas paredes protegendo da ação do tempo.

Ao analisar os benefícios e desafios do tijolo solo-cimento, percebe-se a sua importância como uma alternativa sustentável e acessível na construção civil. Este estudo propõe ampliar essa abordagem, incorporando resíduos da construção civil à sua composição, reduzindo custos e minimizando impactos ambientais. Dessa forma, o tijolo solo-cimento se consolida como uma solução viável e inovadora para os desafios contemporâneos do setor. Na Figura 2, a seguir, observa-se um tijolo solo-cimento pronto para uso.

Figura 2 - Tijolo solo-cimento pronto para uso



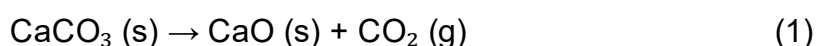
Fonte: Eco Máquinas (2025).

3.5 CAL HIDRATADA: Ca(OH)_2

A produção da cal tem como matéria-prima as rochas calcárias, que, após serem retiradas das minas, passam por um processo inicial de fragmentação para redução granulométrica. Em sequência, essas rochas são submetidas a temperaturas em torno de 900°C em um forno, onde ocorre a liberação de dióxido de carbono (CO_2) e a consequente formação de óxido de cálcio, denominado cal virgem. De acordo com (MARTINS, 2022), esse material é, posteriormente, moído para atingir uma granulometria ainda mais fina e indicado ao processo de hidratação, originando, assim, uma cal hidratada.

A concentração térmica do carbonato de cálcio pode ser representada pela seguinte equação química:

Equação 1: Decomposição térmica do carbonato de cálcio



Nesse contexto, o óxido de cálcio formado é um material sólido amplamente utilizado em processos industriais, enquanto o dióxido de carbono liberado pode ser capturado ou disperso no ambiente, dependendo do controle ambiental adotado no

sistema. Essa ocorrência é típica de processos industriais, como a produção de cal e cimento, onde o controle de temperatura e a eficiência da construção são fundamentais.

Conforme FONSECA (2018), a cal é usada de maneira extensiva em vários setores industriais, incluindo as indústrias de siderurgia, papel e celulose, farmacêutica e alimentícia. Ademais, sua utilização se amplia para o tratamento de água, sendo fundamental no ajuste do pH, além de ser aplicada no tratamento de solos, onde ajuda a aprimorar suas características.

3.6 USO DE CAL NO TIJOLO SOLO - CIMENTO

O cimento e a cal são considerados os principais aglomerantes empregados na estabilização de solos, sendo amplamente utilizados para aprimorar as propriedades naturais do material. Essa técnica visa garantir que o solo atenda às especificações obrigatórias para sua aplicação, ajustando-o às condições (OJURI; ADAVI; OLUWATUYI, 2017).

O processo de estabilização de solos visa aumentar sua resistência e estabilidade, empregando técnicas como compactação e a adição de substâncias aglutinantes que conferem coesão às partículas. A cal, nesse contexto, atua como um estabilizador químico, promovendo reações pozolânicas e melhorando a coesão entre as partículas (GÓIS, 2012), além de reduzir a expansividade de solos argilosos, minimizando o risco de fissurações e deformidades nos blocos.

Estudos recentes mostram que a combinação de cal e cimento melhora a resistência à compressão e a durabilidade dos tijolos, além de aumentar sua resistência à água. A cal também contribui para a plasticidade do solo, facilitando o processo de moldagem dos blocos. Entretanto, a proporção de cal utilizada deve ser cuidadosamente controlada para evitar problemas como fragilidade excessiva e alta porosidade, que podem comprometer a qualidade do produto final.

3.7 RESÍDUOS DA MINERAÇÃO

A incorporação de resíduos da mineração na fabricação de tijolos solo- cimento tem ganhado destaque como uma solução sustentável e economicamente viável. Esses resíduos, que incluem rejeitos de barragens, poeiras e lamas provenientes de

processos de beneficiamento mineral, são fontes potenciais de materiais cimentícios e agregados.

De modo complementar, a atividade da construção civil, estimulada pelo avanço da urbanização e pelo crescimento econômico, também se apresenta como uma das principais geradoras de resíduos. Esses resíduos, denominados Resíduos da Construção Civil (RCC), englobam materiais provenientes de obras novas, reformas, reparos, demolições, além de processos de movimentação e escavação de solos (ZHANG *et al.*, 2023a). Nesse contexto, as práticas de reduzir, reutilizar e reciclar destacam - se como alternativas eficazes para o manejo ambientalmente adequado dos resíduos de construção (RCC) (QUEIROZ *et al.*, 2021).

Vale ressaltar que a mineração gera grandes volumes de resíduos, que representam riscos ambientais e sociais. De acordo com GIULIO e GÜNTHER (2019), a responsabilidade pela gestão desses resíduos recai sobre o gerador. Para garantir a sustentabilidade, é essencial buscar continuamente a melhoria na gestão, para aumentar a eficiência.

Diversas pesquisas apontam que a adição de resíduos minerais ao solo melhora as propriedades mecânicas dos tijolos, aumentando a resistência à compressão e reduzindo a porosidade. Além disso, o reaproveitamento desses resíduos contribui para a mitigação de impactos ambientais, como a contaminação de solos e corpos hídricos, e reduz os custos de produção. No entanto, é essencial realizar análises químicas detalhadas para garantir que os resíduos não contenham substâncias tóxicas que possam comprometer a segurança do material e do meio ambiente.

3.8 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A construção civil é um dos setores que mais gera resíduos sólidos, muitos dos quais são descartados de forma prejudicial, causando impactos ambientais prejudiciais. A adoção de práticas sustentáveis, como reaproveitamento de materiais e a implementação de processos ecologicamente responsáveis, contribui para a redução desses impactos e favorece a obtenção de certificações ambientais, como os selos verdes. Essas certificações confirmam empresas que adotam estratégias sustentáveis, promovendo a responsabilidade ambiental e minimizando os danos ao meio ambiente, promovendo a sustentabilidade (LIMA *et al.*, 2020).

Nos países desenvolvidos, a reciclagem de resíduos na construção civil vem se

consolidando como um setor promissor e lucrativo, economizando custos com matéria-prima e incentivando a economia circular. Resíduos que antes eram descartados agora são transformados em novos materiais, ampliando suas aplicações na indústria (DALVI, 2014).

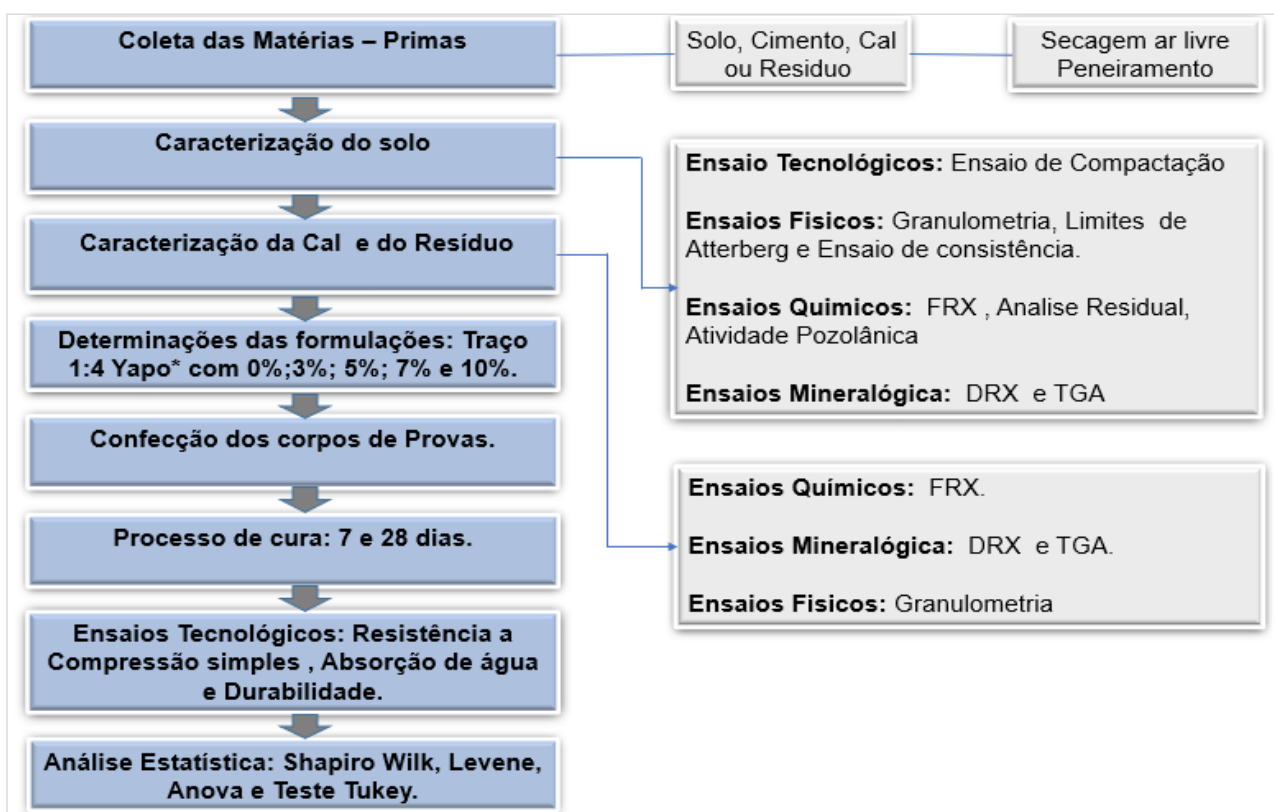
O reaproveitamento de resíduos industriais e da mineração, o uso de materiais de baixo impacto ambiental e a busca por eficiência energética em edificações têm sido cada vez mais incentivados por políticas públicas e certificações ambientais. Além disso, tecnologias inovadoras, como a incorporação de materiais reciclados e métodos construtivos sustentáveis, desempenham um papel fundamental na transição para uma construção civil mais ecológica. Pesquisas recentes indicam que, além dos benefícios ambientais, a sustentabilidade agrega valor econômico ao setor, tornando-o mais competitivo e empenhado na obtenção de certificações ambientais e selos de qualidade construtiva são ascendência favoráveis a esse progresso (FONTOLAN *et al.*, 2022)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Neste estudo, são detalhadas as matérias-primas, a metodologia de fabricação dos corpos de prova e as técnicas de caracterização empregadas. Foram utilizados solo, cal hidratada e resíduos provenientes do processamento da cal como matérias-primas para a produção dos tijolos de solo-cimento. O procedimento experimental foi sistematizado em um fluxograma, apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma do Procedimento Experimental

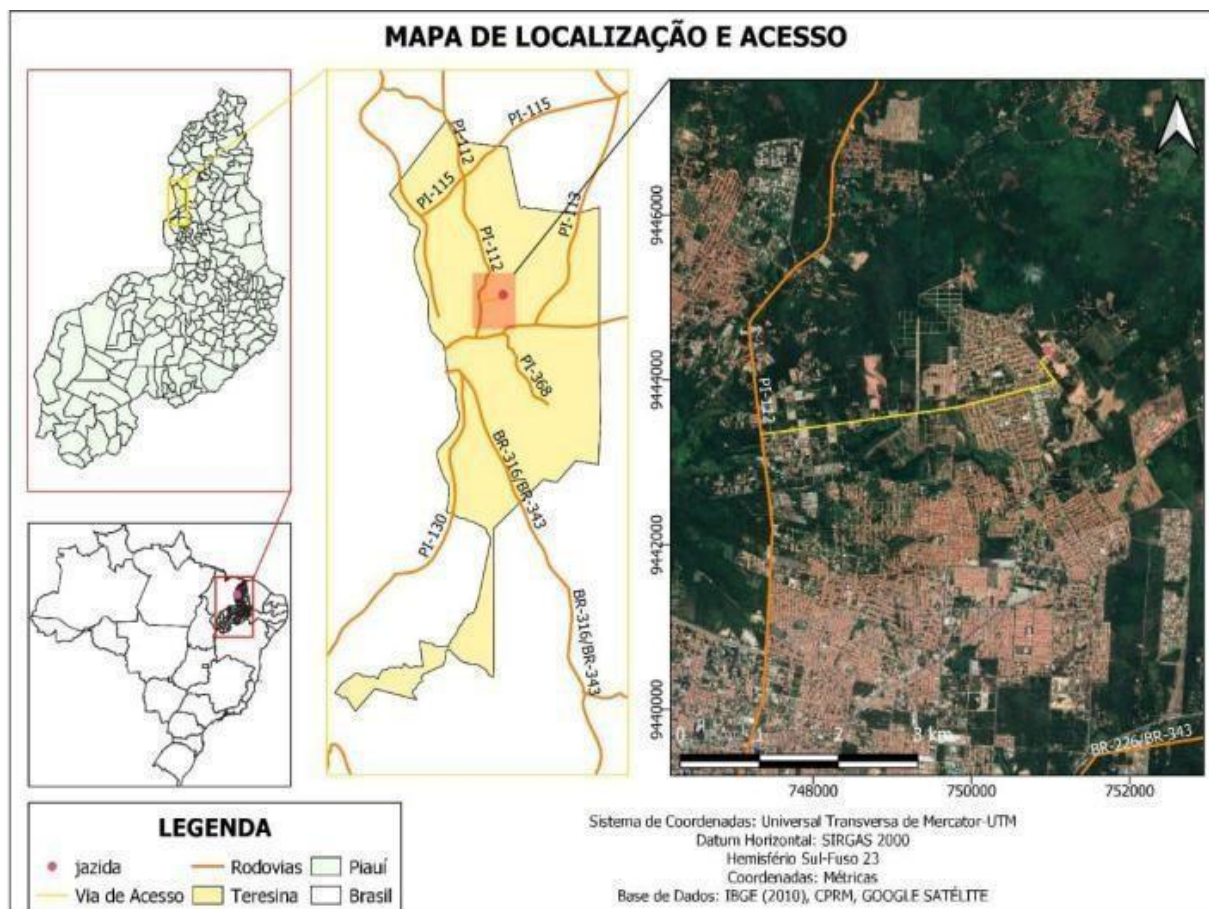


Fonte: Autora (2025) *Yapo Tijolos Ecológicos

4.2 COLETAS DAS MATÉRIAS-PRIMAS

O solo utilizado neste estudo foi extraído da jazida da Serra do Gavião, em Teresina-PI (Figura 4). A cal (CH II) e o cimento CP V-ARI, ambos foram adquiridos no comércio local, enquanto a extração de resíduo de cal de mineração foi obtida na indústria localizada em Teresina.

Figura 4 - Localização da Jazida de argila da Serra do Gavião em Teresina-PI



Fonte: Oliveira (2019).

A caracterização física e química do solo, a produção dos corpos de prova, o período de cura e os ensaios tecnológicos foram realizados no Laboratório do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais (PPGEM) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI), em Teresina. O solo foi submetido a ensaios físicos conforme as normas da ABNT, incluindo granulometria (ABNT NBR 7181:2016), limite de liquidez (ABNT NBR 6459:2017), limite de plasticidade (ABNT NBR 7180:2016) e ensaio de compactação para obtenção dos valores de umidade ótima e massa específica seca aparente máxima (ABNT NBR 7182:2016). Além disso, foram conduzidos ensaios de mesa para determinação do índice de consistência (Flow Table – ABNT NBR 13276:2016) e análises químico-mineralógicas de fluorescência de raios - x (FRX), difração de raios - x (DRX) e análise termogravimétrica (TGA). Da mesma forma, a cal hidratada e o resíduo de cal foram submetidos a ensaios de granulometria, por peneiramento, e à determinação da atividade pozolânica, conforme a NBR 5751:2015.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Após a coleta, o solo foi seco ao ar livre para reduzir a umidade por evaporação. Em seguida, foi desagregado em um triturador forrageiro, que reduziu os torrões e promoveu uma distribuição granulométrica mais homogênea. Na etapa de quarteamento, obteve-se uma amostra representativa para garantir a confiabilidade dos resultados (SOUZA, 2015).

Para o ensaio de granulometria, realizado conforme a norma NBR 7181:2016, foram pesadas amostras de aproximadamente 100 g de solo, cal hidratada e resíduo de cal. As amostras foram secas em estufa a 110 °C e, em seguida, submetidas ao peneiramento em agitador de peneiras da marca Granutest®, com aberturas de 0,710 mm, 0,600 mm, 0,355 mm, 0,300 mm, 0,150 mm e 0,075 mm.

Adicionalmente, para a análise do solo, uma amostra de 500 g foi seca em estufa a 110 °C por 24 h, triturada em almofariz e pistilo de porcelana e peneirada. O material passou por peneiras de malha #65 (0,212 mm), #70 (0,210 mm), #80 (0,180 mm) e #200 (0,075 mm), sendo estas utilizadas, respectivamente, para determinação do índice de plasticidade (IP) e para análises químicas e mineralógicas. A Figura 5 apresenta a preparação do solo.

Figura 5 - Ensaio de caracterização de solo: Preparo da amostra (A); Fração fina do solo obtida após peneiramento (B)



Fonte: Autora (2024).

4.4 MÉTODOS

4.4.1 Caracterização dos materiais (solo, cal hidratada e resíduo de cal).

A matéria-prima utilizada na fabricação dos corpos de prova de solo-cimento, composta por solo, cal hidratada e resíduo, foi submetida a uma série de ensaios de caracterização químicas, mineralógicas e físicas. A análise química foi realizada por meio de fluorescência de raios X (FRX), enquanto a caracterização mineralógica utilizou a técnica de difração de raios X (DRX) e a térmica por análise termogravimétrica.

Além disso, foram realizadas análises granulométricas por peneiramento, análise residual e a determinação do limite de plasticidade. Os ensaios foram conduzidos nos Laboratórios do Instituto Federal do Piauí (IFPI), em Teresina-PI, e no Serviço Nacional de Aprendizagem e Indústria (SENAI), assegurando a precisão e a confiabilidade dos resultados.

4.4.2 Análise Granulométrica

No presente estudo, utilizou-se uma amostra de 100 gramas de solo, previamente seca em estufa a 110 °C, para a realização da análise de distribuição granulométrica. Os resultados obtidos a partir desse ensaio permitiram a construção da curva de distribuição granulométrica, bem como a determinação das percentagens relativas às diferentes frações granulométricas da amostra demonstrada. Fizemos três amostras o solo, Cal hidratada e Resíduo de Cal.

A análise granulométrica foi efetuada de acordo com as normas técnicas da NBR 7181/25. O peneiramento foi realizado conforme as normas técnicas vigentes, utilizando peneiras com malhas de 0,710 mm, 0,600 mm, 0,355 mm, 0,300 mm, 0,150 mm e 0,075 mm, com o auxílio de um agitador de peneiras. A Figura 6 apresenta o equipamento utilizado e o conjunto de peneiras empregado no ensaio.

Figura 6 - Conjunto de peneiras e agitador mecânico



Fonte: Autora (2025).

4.4.3 Análise Residual

Nesta etapa, adotou-se o termo “análise residual” para se referir à separação e quantificação das partículas não dispersas presentes nas amostras de solo, após processo de imersão e lavagem. Para isso, 100 g de solo seco (a 110 °C) foram imersos em água por 24 horas e posteriormente lavados em peneira com abertura de 0,045 mm (nº 325). O material retido foi analisado como resíduo insolúvel ou não disperso, permitindo avaliar a presença de impurezas resistentes à hidratação ou desagregação. O procedimento adotado foi baseado na etapa de lavagem da fração fina descrita na NBR 7181/25, porém com foco na quantificação dos resíduos retidos, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Análise residual do solo: solo em repouso por 24 horas (A); processo lavagem utilizando peneira (B)



Fonte: Autora (2024)

Após a retenção do material na peneira, este foi cuidadosamente transferido para cápsulas de alumínio e submetido a um processo de secagem em estufa por um período adicional de 24 horas. Em seguida, o resíduo seco foi pesado com precisão, e o cálculo do percentual de resíduo foi realizado empregando a Equação 2, conforme descrito no presente estudo. Esse procedimento visa assegurar a reprodutibilidade e a exatidão na determinação do percentual de resíduo, essencial para a análise das propriedades do material estudado, mostra do na equação 2.

Equação 2 - Determinação do percentual de resíduo retido (%R)

$$\% R = \frac{PF}{PI} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

% R: percentual de resíduo

PI: Peso inicial

PF: Peso final

4.4.4 Limites de Plasticidade

De acordo com as normas NBR 6459:2017 e NBR 7180:2016, o índice de plasticidade da mistura foi determinado com o aparelho de Casa Grande, de modo a caracterizar as propriedades do solo, como granulometria e compressibilidade. Segundo recomendações técnicas da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2014), para uso em tijolos solo-cimento o índice de plasticidade não deve ultrapassar 18%. O índice de plasticidade dos solos, conforme a NBR 7180/ 16, foi obtido utilizando-se a (Equação 3):

Equação 3: Cálculo do Índice de Plasticidade (IP)

$$IP = LL - LP \quad (3)$$

Em que: IP é o índice de plasticidade; LL é o limite de liquidez, determinado através da NBR 6459/ 16; LP é o limite de plasticidade.

A determinação do LL, foi realizada com o auxílio do dispositivo de Casagrande, conforme ilustrado na figura 8. A umidade correspondente a 25 golpes foi obtida por interpolação gráfica a partir da curva que relaciona o número de golpes e os teores de umidade.

Figura 8 - Execução do ensaio de Casagrande.



Fonte: Autora (2025).

4.4.5 Ensaio de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados em conformidade com as normas NBR 7182/16. Os ensaios de compactação visam obter os valores de umidade ótima e de massa específica aparente seca máxima. A umidade ótima é um parâmetro muito importante nos trabalhos realizados com solos, pois propicia melhores condições de trabalhabilidade e compactação máxima do material, proporcionando maiores valores de densidade, resistência e, certamente, maior durabilidade. A Figura 9, ilustra a etapa de compactação manual do solo, realizada para obtenção da densidade máxima seca em condições ideais de umidade.

Figura 9 - Compactação do solo: cilindro de compactar o solo com um soquete (A), solo compactado (B)



Fonte: Autora (2025)

4.4.6 Ensaio de consistência (Flow Table)

Para a realização do ensaio de consistência, foi adotada a norma NBR 7182/16. Os equipamentos necessários para a realização do ensaio são: Balança; proveta; espátula; cronômetro; misturador mecânico (Figura 10A) e mesa de abatimento (Figura 10B). Para a execução do ensaio são necessários 2,5 kg de material.

O material deve ser colocado na argamassadeira e, em seguida, adicionar 75% da água em um tempo de 10 s, misturando por mais 20 s. Posteriormente, a velocidade

foi aumentada e a mistura mantida por 60 s, sendo então interrompida por 90 s. Logo após liga o misturador e adiciona-se o restante da água em 10 s, prosseguindo-se a mistura até completar 60 s.

Em seguida o processo se dá com a moldagem de um corpo de prova em formato de tronco de cone, utilizando três camadas de altura uniforme, sendo aplicados 15 golpes na primeira camada, 10 golpes na segunda e 5 na terceira com uma haste de adensamento. Em seguida, a amostra passa por 30 golpes de queda na mesa, com intervalos de 30 segundos. A consistência do material testado deve corresponder ao diâmetro final do corpo de prova após a realização do ensaio.

Figura 10 - Misturador mecânico (A); Consistência da argamassa utilizando a mesa de consistência(B).



Fonte: Autora (2025).

4.4.7 Índice de Atividade Pozolânica

Pozolana é o material inorgânico, natural ou artificial, silicoso ou alumino-silicoso, que pode apresentar propriedades aglomerantes quando finamente moído e em presença de água e hidróxido de cálcio (SKIBSTED and SNELLINGS, 2019).

A verificação da atividade pozolânica do resíduo da cal foi realizada conforme a NBR 5752/14, determinando o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Foram rompidos 18 corpos de prova cilíndricos (50x100 mm) com dosagens diferentes: cada formulação da argamassa de substituição parcial de resíduo de cal (contendo 0%, 1%, 3%, 5%, 7% e 10% de resíduo da cal em substituição parcial do cimento) composta por cimento, areia, hidróxido de cálcio, resíduo de cal e água em quantidades predeterminadas de acordo com a figura 11.

Figura 11 - Cimento, areia, hidróxido de cálcio, resíduo de cal



Fonte: Autora (2025).

O índice de desempenho com o Cimento Portland é determinado pela equação 4:

Equação 4 - índice de desempenho com o Cimento Portland

$$I_{\text{cimento}} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} * 100 \quad (4)$$

Onde I_{cimento} é o índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias expresso em (%), f_{cB} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com argamassa B e f_{cA} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com argamassa A. O índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle foi comparado com os requisitos estabelecidos pela NBR 12653/14. Cabe ressaltar que o ensaio foi realizado com o cimento Portland CPV ARI, o mesmo utilizado na confecção dos concretos e na verificação de atividade pozzolânica. De acordo com a figura 12 segue o desmolde do corpo de provas e em seguida o rompimento dos corpos de provas.

Figura 12 - Desmolde do corpo de prova (A); Rompimento dos corpos de prova (B)



Fonte: Autora (2025).

A avaliação da atividade pozolânica consiste em medir a capacidade de uma pozolana em reagir com $\text{Ca}(\text{OH})_2$, o que lhe confere características cimentícias. Existem vários métodos disponíveis, incluindo a verificação da resistência à compressão de argamassas e o monitoramento do consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ao longo do tempo.

4.4.8 Fluorescência de raios X - FRX

A análise de fluorescência de raios X (FRX) foi realizada utilizando a técnica de espectrometria de fluorescência de raios X, empregando o espectrômetro modelo Epsilon 3 - XL, da PANalytical, disponível no Laboratório de Materiais do Instituto Federal do Piauí (IFPI). Para a execução do ensaio, a matéria-prima foi previamente moída até atingir uma granulometria inferior a 200 mesh, conforme especificações técnicas. Esse procedimento foi fundamental para identificar e quantificar os elementos químicos presentes no solo, na cal hidratada e no resíduo de cal, fornecendo dados essenciais para a caracterização química da matéria-prima estudada.

4.4.9 Difração de raios X- DRX

A caracterização mineralógica das amostras foi realizada por meio da técnica de difração de raios X (DRX), utilizando o equipamento XRD-600 da Shimadzu, equipado com tubo de Cu ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$). Os parâmetros operacionais empregados

incluíram uma tensão de 40 kV e corrente de 30 mA, com varredura no intervalo de 2° a 80° para 2 θ , a uma velocidade de 2°/min e passo de 0,02°. As análises foram conduzidas com as amostras preparadas em forma de pó, garantindo a uniformidade.

4.4.10 Análises Termogravimétricas –TG

Para a análise termogravimétrica do solo, cal hidratada e resíduo de cal de mineração foi utilizado o equipamento Termogravimétrico TGA-51 Shimadzu. A massa da amostra é colocada no analisador 30 TGA-51, em uma atmosfera de nitrogênio e um fluxo de gás de 50 mL/min. A taxa de aquecimento foi de 10°C/min até uma temperatura de 1000°C.

4.4.11 Formulações dos Corpos de Prova

Após a caracterização das matérias-primas a mistura solo-cimento e cimento com substituição parcial de resíduo de cal e cal hidratada foram homogeneizadas manualmente e com adição de água misturando até a consistência ideal para moldar os corpos de provas de solo-cimento. O traço 1:4 solo-cimento com 0% e solo-cimento com substituição parcial do cimento de 1%, 3%, 5%, 7% e 10% por resíduos de Cal e a Cal hidratada, de acordo com a (tabela 4).

Tabela 4 - Proporções das misturas para fabricação dos corpos de prova.

Código	Solo	Cimento	Cal	Resíduo	Observação
CP-REF	1 kg	0,25 kg	0	0	Referência
CP-CAL-1	1 kg	0,2475 kg	0,025 kg	0	1% cal
CP-CAL-3	1 kg	0,2425 kg	0,075 kg	0	3% cal
CP-CAL-5	1 kg	0,2375 kg	0,125 kg	0	5% cal
CP-CAL-7	1 kg	0,2325 kg	0,175 kg	0	7% cal
CP-CAL-10	1 kg	0,225 kg	0,25 kg	0	10% cal
CP-RES-1	1 kg	0,2475 kg	0	0,025 kg	1% resíduo
CP-RES-3	1 kg	0,2425 kg	0	0,075 kg	3% resíduo
CP-RES-5	1 kg	0,2375 kg	0	0,125 kg	5% resíduo
CP-RES-7	1 kg	0,2325 kg	0	0,175 kg	7% resíduo
CP-RES-10	1 kg	0,225 kg	0	0,25 kg	10% resíduo

Fonte: Autora(2025).

4.4.12 Confeção dos Corpos de Provas

Nesta etapa foram moldados 13 corpos de prova prismáticos para cada formulação, conforme a NBR 10833/12 seguida para verificar a mistura (solo, cimento e cal ou resíduo de cal) para moldagem solo – cimento e NBR 5738/15 seguida para o adensamento manual dos corpos de prova prismáticos, sendo que as verificações dos resultados serão validadas através da análise estatística ANOVA. No total, produziram-se 150 corpos de prova, incluindo a amostra padrão (solo, cimento e água) e as formulações com substituição parcial do cimento por cal ou resíduo de cal (1%, 3%, 5%, 7% e 10%). De cada formulação, 7 (sete) corpos de prova foram destinados aos ensaios de resistência à compressão simples, 3 (três) à absorção de água e 3 (três) para durabilidade por secagem e molhagem, conforme apresenta a Figura 13. Os corpos de prova foram moldados em fôrmas prismáticas 4 x 4 x 4, no laboratório da Kalfix, de forma manual e com auxílio de um soquete seguindo as mesmas condições de preparação da mistura do tijolo solo-cimento produzido na empresa YAPO – Teresina - PI, com o traço 1:4 e as mesmas proporções de água, cimento e solo do processo produtivo da empresa.

Figura 13 - Corpos de prova moldados



Fonte: Autora (2025).

4.4.13 Processo de Cura

A cura dos corpos de prova é um procedimento importante para melhorar o endurecimento do material, tornando-o mais resistente e firme. O objetivo principal é atrasar a evaporação da água utilizada na mistura, garantindo que o cimento fique

completamente hidratado e que as reações químicas necessárias aconteçam de forma adequada. De acordo com a norma NBR 5738/15, os corpos de prova foram submetidos à cura úmida, onde foram colocados em uma caixa de isopor com areia molhada por um período de 7 a 28 dias mantendo a caixa fechada e em ambiente onde a temperatura do laboratório era controlada a 18°C durante todo o período de armazenamento de acordo com a figura 14.

Figura 14 - Cura úmida dos corpos de provas



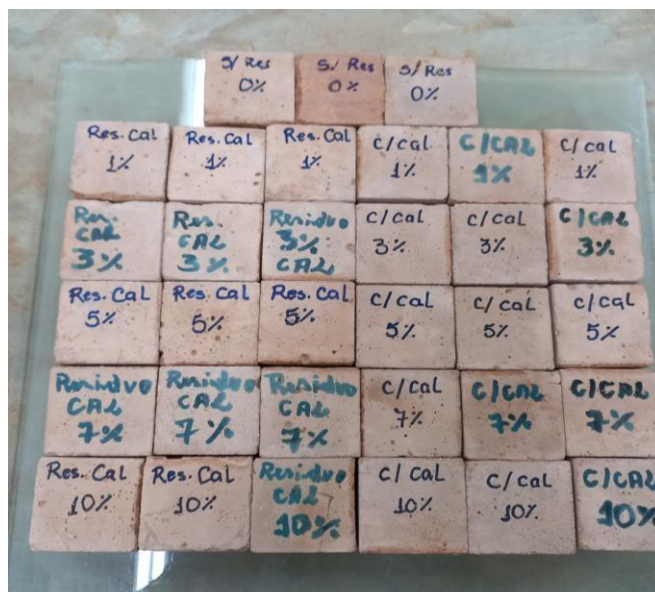
Fonte: Autora (2025).

Para testes de resistência à compressão simples:

- o período de cura foi de 7 e 28 dias
- para verificar a absorção e a durabilidade, o período de cura foi de 60 dias.

A Figura 15 ilustra os corpos de prova prontos para a realização dos ensaios de resistência à compressão, absorção de água e durabilidade.

Figura 15 - Corpos de prova após o processo de cura e identificados por teor de cal e resíduo de cal.



Fonte: Autora (2025).

4.4.14 Ensaio de Absorção de Água

A absorção de água corresponde à capacidade que um material poroso possui de incorporar água em sua estrutura, seja por capilaridade ou por difusão. No contexto da construção civil, a análise dessa propriedade em materiais cerâmicos é de extrema relevância, uma vez que influencia diretamente características como resistência mecânica, durabilidade e desempenho das edificações. Para realizar o ensaio, foram moldados três corpos de prova para cada formulação. Após o período de cura, as amostras foram imersas na água por 24 horas, em seguida os corpos de prova foram retirados do tanque e o excesso de água na superfície foi cuidadosamente removido com um pano levemente umedecido. Após esse procedimento, os corpos de prova foram pesados em balança de precisão para determinar a massa na condição saturada. Posteriormente, foram levados à estufa a 110 °C por 24 horas conforme ilustrado na figura 16. Após a secagem, realizou-se uma nova pesagem para obtenção da massa seca seguindo o mesmo procedimento da norma aplicada para tijolo solo-cimento de acordo com a NBR 8492/12.

Figura 16 - Secagem dos corpos de prova em estufa a 110 °C por 24 horas para determinação da massa



Fonte: Autora(2025).

A absorção de água foi calculada conforme a Equação 5, apresentada a seguir.

Equação 5 - Cálculo da absorção de água (%)

$$AA(\%) = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100 \quad (5)$$

Em que:

- AA = absorção de água em porcentagem
- Pu = massa do corpo de prova úmido (g)
- Ps = massa do corpo de prova seco (g)

Os resultados foram calculados com base na média dos valores obtidos em três amostras diferentes.

4.4.15 Resistência à compressão simples – RCS

Os ensaios de compressão simples dos corpos de prova prismáticos foram realizados aos 7 e 28 dias, conforme o planejamento experimental estabelecido. A ruptura das amostras foi conduzida utilizando uma prensa hidráulica da marca Contenco/Pavitest (figura 17), com capacidade máxima de 100 toneladas-força (≈ 981 kN), conforme indicado na plaqueta de identificação do equipamento. Os procedimentos foram conduzidos de acordo com os critérios das normas NBR 8492/12 e NBR 13279/05, assegurando a padronização e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Figura 17 - Ensaio de compressão dos corpos de prova: (A) antes e (B) durante a ruptura.



Fonte: Autora (2025).

4.4.16 Análises Estatísticas

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e absorção de água dos corpos de prova (CP) foram expressos por meio da média aritmética e desvio padrão, organizados por composição. Inicialmente, foi avaliada a normalidade dos dados por meio do teste de Shapiro-Wilk, a fim de verificar se os dados seguiam uma distribuição normal, condição necessária para a aplicação de testes estatísticos paramétricos.

Em seguida, foi aplicado o teste de Levene, considerando a mediana, para avaliar a homogeneidade das variâncias entre os grupos. Atendidas essas premissas,

procedeu-se à análise de variância (ANOVA), adotando-se um nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$), com o objetivo de identificar possíveis diferenças estatísticas entre os grupos experimentais e foi realizado o teste Tukey para comparar todas as combinações possíveis de pares de médias entre os grupos que foram estudados.

Dessa forma, o método ajuda a identificar quais dessas comparações mostram diferenças que são realmente relevantes, ou seja, que não acontecem por acaso. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o Rstudio para as análises estatística e statistica 7, para plotagem de gráficos.

4.4.17 Ensaio de durabilidade por imersão e secagem

Este ensaio segue a NBR 13554/ 12, específica para para tijolo solo – cimento e atribui a perda de massa como parâmetro indicativo da durabilidade do material. A norma recomenda a preparação de três corpos de prova, serão avaliadas a variação de volume no corpo 1 e a perda de massa nos corpos 2 e 3. Para a execução deste ensaio determinou-se o volume inicial do corpo de prova 1, além da massa e do volume do mesmo após todos os corpos de prova passarem pelo processo de cura durante sete dias. Os corpos de prova foram imersos em água durante cinco horas 42 (figura 18), logo após determinou-se novamente a massa e o volume do corpo 1 após a retirada do excesso superficial de água. Em seguida, os três corpos de prova foram colocados na estufa a uma temperatura de $(71 \pm 2) ^\circ\text{C}$ durante 42 horas e, mais uma vez, obteve-se a massa e o volume do primeiro corpo de prova. Para os corpos de prova 2 e 3 dias procedeu-se com uma escovação total e firme das superfícies dos mesmos, sendo 18 a 20 escovações verticais para a área lateral e quatro escovações para cada uma das bases. O tempo de retirada da estufa e realização das escovações foi de 1 hora. O procedimento a partir da imersão dos corpos de prova em água durante cinco horas até a escovação dos mesmos dura de 48 horas, repetido por cinco vezes. Após os seis ciclos realizados, levam-se os corpos de prova para estufa com temperatura a 110°C .

Para a obtenção da perda de massa nos outros dois corpos de prova, usa-se o cálculo da quantidade relativa de água nos mesmos após atingirem massa constante calculado conforme a Equação 6:

Equação 6 - Cálculo da quantidade relativa de água

$$A = \frac{mf(CP)1 - mi(CP)1}{mi(CP)1} \quad (6)$$

Onde:

- A: água retida no corpo de prova 1
- mf (CP)1: a massa seca final do corpo de prova 1
- mi (1): a massa seca inicial do corpo de prova 1

Deve-se fazer a correção das massas secas dos corpos de prova, descontando a água que reagiu com o cimento e o solo durante o ensaio e que ficou retida no primeiro corpo de prova a 110°C. Usa a Equação 7:

Equação 7 - Cálculo da massa final corrigida dos corpos de prova (Mfcp)

$$Mfcp(2,3) = \frac{mf(2,3)}{A+1} \quad (7)$$

Onde:

- Mfcp(2,3) : é a massa seca final corrigida dos corpos de prova 2 e 3, em g;
- mf (2,3) : é a massa seca final dos corpos de prova 2 e 3 após atingirem massa constante, em g.
- A: é a água retida no corpo de prova 1.

Finalmente, calcula-se a perda de massa dos corpos de prova 2 e 3 como porcentagem da massa seca inicial, conforme a Equação 8:

Equação 8 - Perda de massa dos corpos de prova 2 e 3 em relação à massa seca inicial (%)

$$Pm(2,3) = \frac{micp(2,3) - mfcp(2,3)}{micp(2,3)} \quad (8)$$

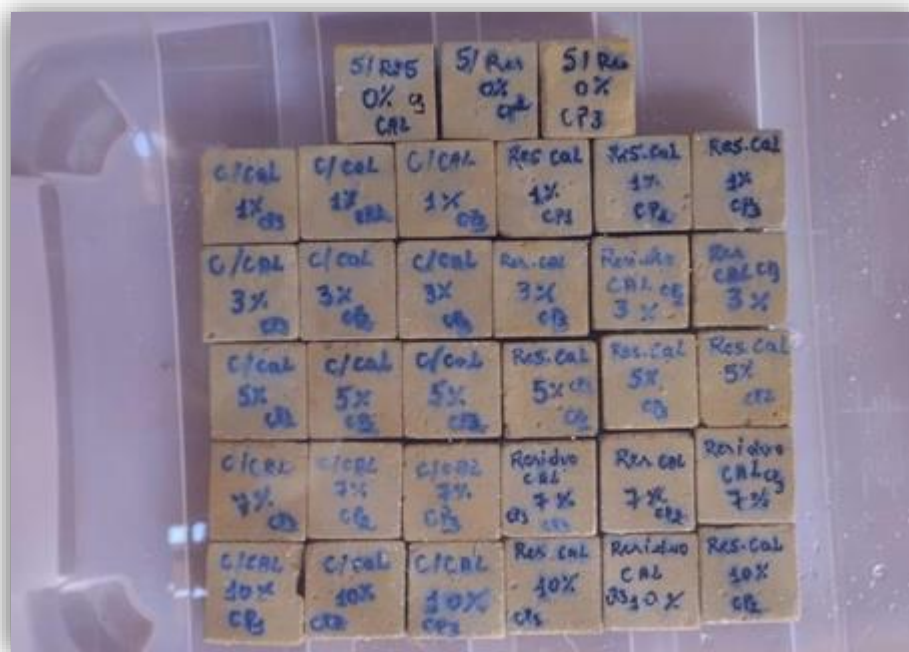
Onde:

- micp (2,3): a massa seca inicial calculada por ocasião da massa seca inicial calculada por ocasião da moldagem dos corpos de prova 2 e 3, em g;

- m_{fcp} (2,3): a massa seca final corrigida dos corpos de prova 2 e 3, em g;
- P_m (2,3): a perda de massa dos corpos de prova 2 e 3, em %.

De acordo com a ABCP, a perda de massa dos tijolos de solo-cimento ou tijolo ecológico não deve ser superior a 10% após todos os ciclos de molhagem e secagem. Foram preparados três corpos de prova de cada formulação para este ensaio em cada uma das idades: aos 28 e aos 56 dias. A seguir, apresenta-se, na figura 18, os corpos de provas imersos na água.

Figura 18 - Ensaio de durabilidade: corpos de prova imersos em água durante o ciclo de molhagem.



Fonte: Autora (2025).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

5.1.1 Análise Granulométrica do solo, Cal Hidratada e Resíduo de Cal

A Tabela 5 apresenta os resultados da análise granulométrica dos três materiais utilizados neste estudo (solo, cal hidratada e resíduo de cal), evidenciando a distribuição percentual das partículas em função das aberturas das peneiras. As Figuras 19, 20 e 21 mostram as respectivas curvas granulométricas, que permitem visualizar a relação entre o diâmetro das partículas e o percentual de material passante.

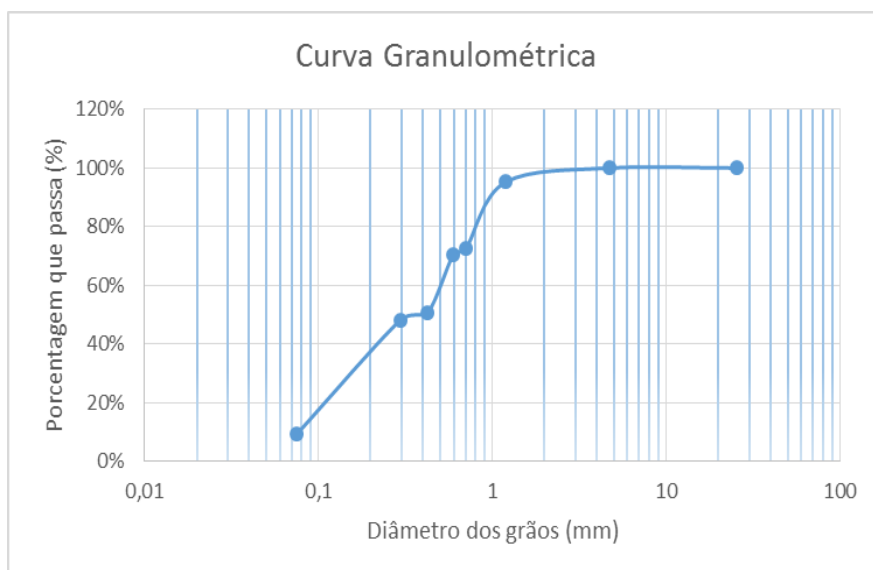
Tabela 5 - Granulometria do solo, Cal Hidratada e Resíduo de cal (Fração Passante nas Diferentes Malhas)

Peneira (mm)	Passando (%) - Solo	Passando (%) - Cal Hidratada	Passando (%) - Resíduo de Cal
25,40	100,00	100,00	100,00%
4,75	100,00	100,00	100,00%
1,19	95,20	97,20	96,10
0,707	72,70	86,60	88,40
0,595	70,30	81,40	85,40
0,425	50,60	65,10	56,40
0,295	48,00	44,20	47,70
0,149	23,7	11,50	9,70
0,075	9,20	0,10	0,20

Fonte: Autora (2025)

No caso do solo, os resultados confirmam as exigências da NBR 8491/12, que determina a passagem total do material pela peneira nº 4 (4,75 mm). Observou-se ainda que apenas 9,2% do material passou na peneira nº 200 (0,075 mm), valor inferior ao intervalo recomendado pela NBR 10833/12 (10 a 50%). Isso indica uma menor proporção de frações finas (argila e silte) e predominância de partículas arenosas, o que pode reduzir a plasticidade e a coesão. Ainda assim, a curva granulométrica apresenta boa distribuição, sendo possível ajustar o material com a adição de argila, conforme sugerido por (EUPHOSINO e FONTANINI, 2021).

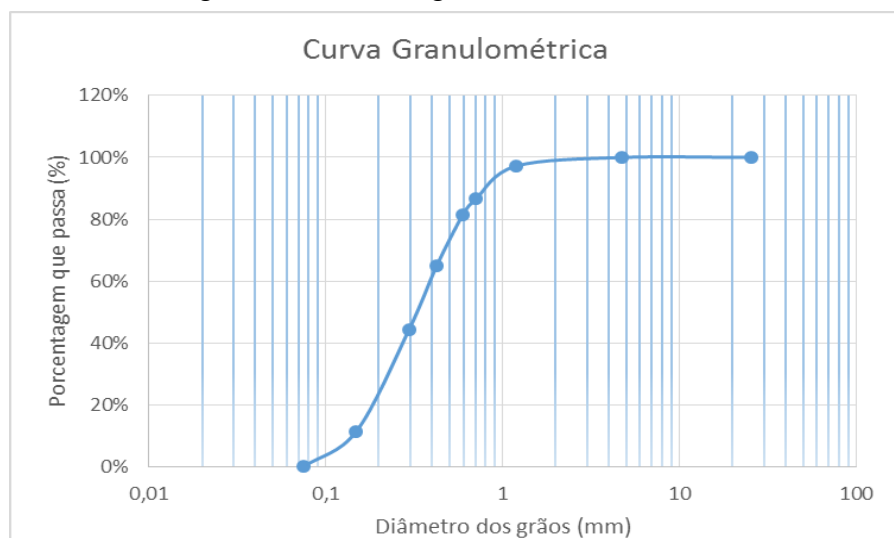
Figura 19 - Curva granulométrica do solo.



Fonte: Autora (2025).

A cal hidratada apresentou comportamento semelhante ao do resíduo, com 100% de passagem nas peneiras de 25,4 mm e 4,75 mm. A partir da peneira de 1,19 mm, iniciou-se a retenção, e a fração passante diminuiu progressivamente até alcançar apenas 0,10% na peneira de 0,075 mm. Esse resultado indica baixa proporção de partículas ultrafinas, o que pode ser benéfico para evitar excesso de finos na mistura. Além disso, a retenção significativa em peneiras intermediárias sugere granulometria mais controlada, característica favorável em aplicações estruturais.

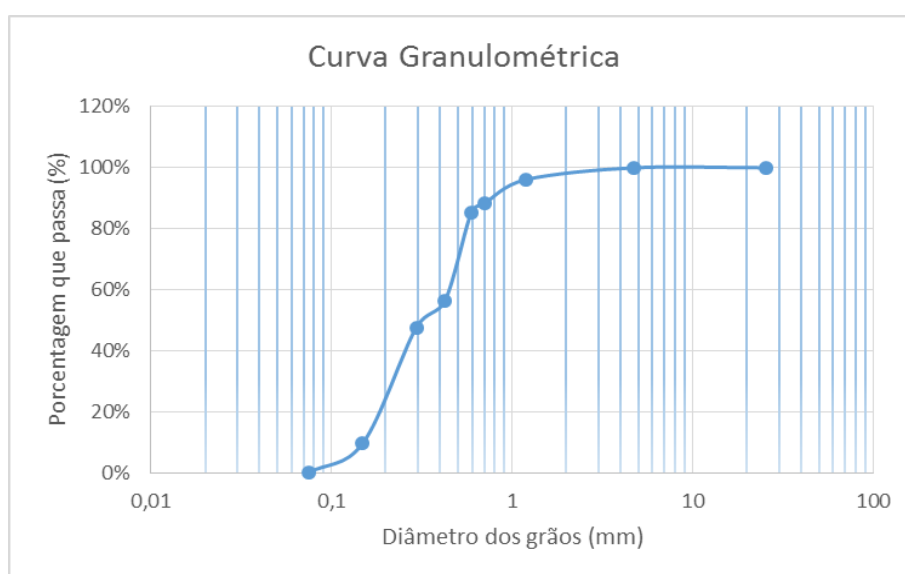
Figura 20 - Curva granulométrica da cal



Fonte: Autora (2025).

Quanto ao resíduo de cal, também não foram observadas partículas grosseiras. A partir da peneira de 1,19 mm (96,10% passante), verificou-se redução gradual da fração passante, com destaque para a queda acentuada em peneiras mais finas: 9,70% na peneira de 0,149 mm e apenas 0,20% na peneira de 0,075 mm. Esses resultados indicam uma granulometria heterogênea, com predominância de partículas médias e finas, mas menor presença de ultrafinos em comparação ao solo, conforme descreve o gráfico 21.

Figura 21 - Curva granulométrica do resíduo de cal



Fonte: Autora (2025).

5.2 ANÁLISE RESIDUAL

Tabela 6 - Determinação do resíduo retido na peneira n° 325 da ABNT

Código da Amostra	Peso inicial	Peso Final	Argila	Resíduo
Solo	100 g	60g	40%	60%

Fonte: Autora (2025).

A análise residual do solo NBR 7181/25 revelou que 60% do material ficou retido na peneira n° 325 (0,045 mm), caindo uma alta fração de finos. Esse resultado está relacionado com a fração de 40% que passou na peneira de 0,075 mm, conforme relatado, ficando dentro do limite normativo de 10% a 50% para materiais finos. Isso sugere que o solo pode ter alta plasticidade, o que pode influenciar na retração e

fissuração dos tijolos. Para garantir a conformidade com a NBR 8492/12, recomenda-se uma análise granulométrica completa e, se necessário, a correção do solo com adição de areia e outros aditivos com a cal e o resíduo de cal para melhorar a resistência.

5.3 LIMITES DE PLASTICIDADE

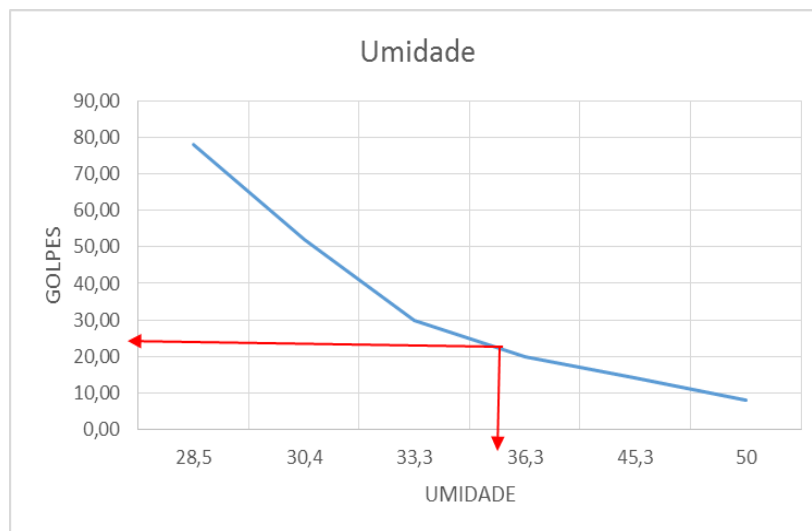
Os resultados referentes ao limite de liquidez da amostra de solo são apresentados nesta seção. Conforme evidenciado na tabela 8, e representado graficamente na Figura 22, a curva de liquidez revelou que a umidade correspondente ao vigésimo quinto golpe foi de 36,3%, valor que caracteriza o limite de liquidez do material. Tal resultado encontra-se em conformidade com os critérios estabelecidos pela NBR 6459:2016, que recomenda valores iguais ou inferiores a 45%. A determinação dessa umidade foi realizada por meio de interpolação gráfica, com base na curva que correlaciona o número de golpes ao teor de umidade, conforme ilustrado na tabela 7 e na figura 22.

Tabela 7 - Relação entre o número de golpes e os teores de umidade para determinação do limite de liquidez

Números de Golpes	Umidade
78	28,5
52	30,4
30	33,3
20	36,3
14	45,3
8,0	50

Fonte: Autora (2025).

Figura 22 - Curva de umidade em função do número de golpes para determinação do limite de liquidez



Fonte: Autora (2025).

A Tabela 8 contém os limites de consistência de Atterberg obtidos para o solo.

Tabela 8 - Limites de consistência de Atterberg do solo.

Matéria prima	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)
Solo	36,3	22,7	13,3

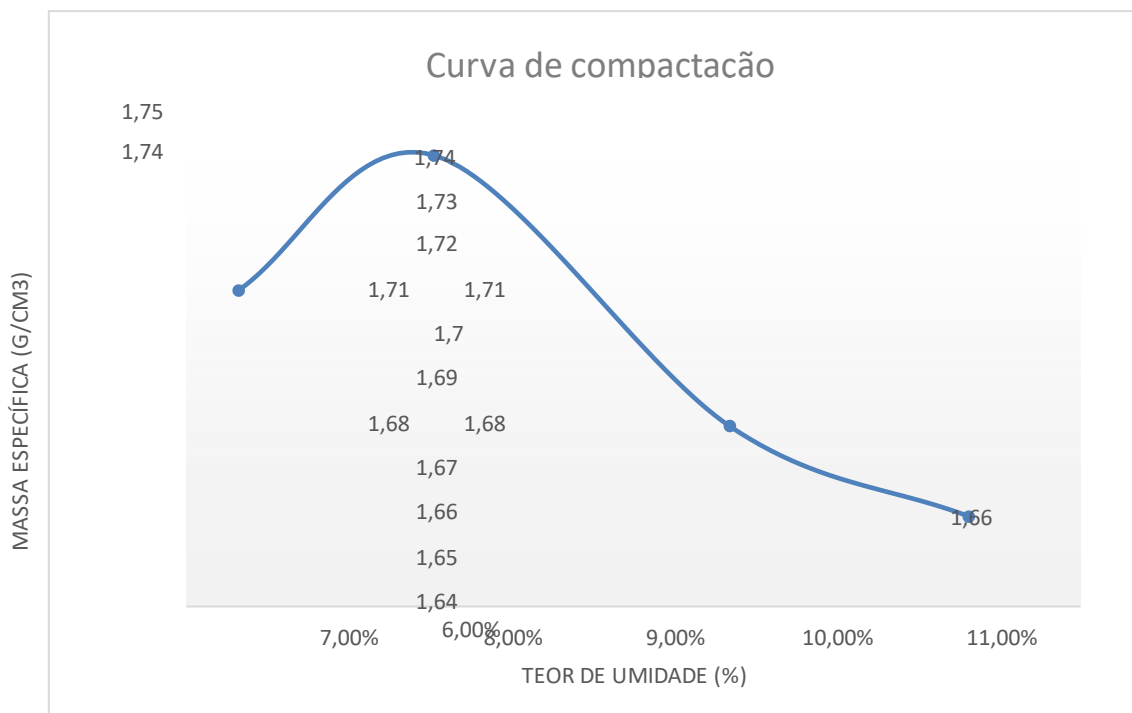
Fonte: Autora (2025).

O limite de plasticidade obtido foi de 36,3%. Isso indica que o solo possui uma boa plasticidade, uma vez que tem uma quantidade adequada de partículas finas que garantem a mistura a capacidade de ser moldada durante a produção do tijolo ecológico. Para a confecção de tijolos ecológicos, a norma NBR 10833/12 recomenda que o limite de liquidez não exceda 45% e que o limite de plasticidade não ultrapasse 18%. A amostra analisada apresentou um limite de liquidez de 36,3% e um limite de plasticidade de 22,7%, resultando em um índice de plasticidade de 13,3%. Assim, conclui-se que o solo em questão é considerado regular para a produção de tijolo solo cimento.

5.4 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Os resultados deste ensaio permitem identificar a relação entre a umidade do solo e sua densidade máxima seca. A Figura 23 apresenta a curva de compactação obtida, evidenciando o ponto de umidade ótima correspondente ao peso específico seco máximo.

Figura 23 - Curva de compactação do solo



Fonte: Autora (2025).

As compactações realizadas para o solo estudado resultaram em uma umidade ótima de 1,66% $\pm$ 2%, e uma massa específica seca máxima de 1,791 g/cm³. Observou-se que, antes desse ponto, o solo apresentava menor densidade devido à falta de umidade suficiente para promover o empacotamento ideal das partículas. Já após ponto de umidade ótima, os valores de massa específica passaram a diminuir, indicando que o excesso de água prejudica a compactação, preenchendo os vazios e reduzindo a densidade do solo. Esse comportamento evidencia a importância da determinação do teor de umidade ideal, que serve como referência para o preparo das formulações, contribuindo para a otimização do processo de fabricação dos tijolos.

O ensaio de compactação do solo foi realizado conforme proposto pela norma da NBR 7182/16, utilizando-se a energia Proctor normal, conforme expressa a equação 9.

Equação 9 - Modelo matemático da curva de compactação (ensaio Proctor)

$$y = -0.0125x^2 + 0.0415x + 1.6875 \quad 2.x.(0.0125)=0.0415$$

$$R^2 = 0.7701 \quad 0.025.x=0.0415 \quad (9)$$

$$y=0,0125.(2,7556)+0,0415.(1,66)+1,6875 \quad x=1.66\% \quad y=1.791 \quad (9)$$

onde:

- Y= é o peso específico seco (g/cm³)
- X= Teor de umidade

5.5 ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA

De acordo com a norma NBR 7182/16, os resultados CP com solo-cimento ficaram conforme descrito abaixo:

- CP1 - diâmetro 01 = 23,0 cm
- CP2 - diâmetro 02 = 21,0 cm
- CP3 - diâmetro 03 = 23,5 cm
- Média = 22,5 cm

Os resultados CP com solo-cimento + resíduo da cal ficaram de conforme descrito abaixo:

- CP1 - diâmetro 01 = 22,1 cm
- CP2 - diâmetro 02 = 22,0 cm
- CP3 - diâmetro 03 = 22,3 cm
- Média = 22,13 cm

Água da mistura deve corresponder a um índice de consistência de (225 ± 5) mm no ensaio, conforme prescreve a NBR 7182/16. Ressalta-se que as médias dos diâmetros obtidos para o solo e para o resíduo de cal estão em conformidade com a norma.

No caso da cal hidratada, optou-se por não realizar ensaios específicos neste estudo, uma vez que há ampla disponibilidade de dados na literatura reportando seu comportamento no índice de consistência. Os resultados já estabelecidos confirmam

que a cal hidratada apresenta desempenho dentro da faixa normativa, não comprometendo a conformidade da mistura.

Os resultados obtidos indicam que a adição de resíduo de cal influencia na consistência da mistura, porém sem comprometer sua adequação às exigências da norma. Estudos prévios corroboram essa tendência: (ALBUQUERQUE *et al.*, 2019) observaram que a argamassa de referência apresentou índice de consistência de 220,5 mm, enquanto as misturas contendo resíduo de cal reduziram para 220 mm, representando uma diminuição de aproximadamente 5%.

Assim, a incorporação de cal hidratada e resíduo de cal, nas proporções de 1%, 3%, 5%, 7% e 10%, conforme planejado, deverá impactar a consistência e, conseqüentemente, o comportamento mecânico dos corpos de prova. Dessa forma, a caracterização da consistência das misturas antes da moldagem constitui um parâmetro essencial para assegurar a homogeneidade e a qualidade dos tijolos solo-cimento. Os ensaios realizados demonstram que, mesmo com a incorporação de resíduos, a mistura permanece dentro dos padrões normativos, reforçando a viabilidade da utilização de aditivos como a cal e seu resíduo na produção de tijolos ecológicos.

5.6 ATIVIDADE POZOLÂNICA

Após as caracterizações físicas e químicas do resíduo de cal se fez necessário um teste para determinar sua atividade pozolânica, avaliando assim sua potencial aplicação, conforme os resultados apresentados na tabela 9. Para isso os índices de atividade foram determinados com hidróxido de cálcio por meio da norma NBR 7215/19 e no período de 28 dias foram produzidos 3 corpos de prova para análise. A atividade pozolânica refere-se a materiais que adicionados ao concreto têm a função de substituir o cimento ou somar-se a ele devido a melhoria de suas propriedades como resistência mecânica, menor calor de hidratação, maior durabilidade (FLEESON *et al.*, 2017).

Tabela 9 - Resistências à compressão para atividade pozolânica

Traço	CP 1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	RCS Média (Mpa)
RC	6,02	5,00	6,06	5,69
SC	9,88	6,98	5,70	7,52
Desvio relativo Máximo da série (%)	- 5,79	-12,12	- 6,50	-

Fonte: Autora (2025).

A atividade pozolânica de um material é determinada conforme a NBR 7215/2019, exigindo que sua resistência seja, no mínimo, 75% da amostra padrão. Conforme a tabela 9, o desvio relativo máximo de cada série é inferior a 6%, e o índice de atividade pozolânica atinge o valor exigido, comprovando a pozolanicidade do RC. (DUARTE *et al.*, 2022) relatam que a reação pozolânica é favorecida em decorrência de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), como observado nos difratogramas (DRX) da cal e resíduo de cal apresentados.

5.7 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS (SOLO, CAL HIDRATADA, RESÍDUO DE CAL)

A análise por Fluorescência de Raios X (FRX) é uma técnica eficiente para identificar os elementos químicos presentes nos materiais, bem como quantificar suas respectivas proporções (SOARES, 2016). Os resultados obtidos, apresentados na tabela 12, revelaram diferenças significativas na composição química entre o solo natural, o resíduo de cal e a cal hidratada. O solo apresentou predominância dos óxidos de silício (SiO_2), alumínio (Al_2O_3) e ferro (Fe_2O_3), que juntos correspondem a 95,4% da composição total, indicando forte presença dos minerais quartzo e caulinita, típicos de solos argilosos. A presença de SiO_2 é um indicativo de plasticidade do solo, o que pode ser confirmado pelos dados dos Limites de Atterberg obtidos, apresentados na tabela 10.

O resíduo de cal, por sua vez, apresentou teor elevado de óxido de cálcio (CaO), embora inferior ao da cal hidratada, evidenciando-se ainda a presença de óxidos residuais de silício, alumínio e ferro, possivelmente decorrentes de impurezas ou de reações incompletas no processo industrial de obtenção da cal.

Já a cal hidratada apresentou composição predominantemente constituída por CaO, com teor de 82,5%, conforme indicado na tabela 12. Esse valor, superior ao limite mínimo de 70% estabelecido pela NBR 7175/2003, classifica o material como de alta pureza e elevada reatividade. Tal característica é essencial para a ocorrência das reações pozolânicas entre solo e cal, promovendo a estabilização do solo e contribuindo para a produção de tijolos solo–cimento com melhor desempenho estrutural e durabilidade.

Além da elevada concentração de óxido de cálcio (CaO), a cal hidratada apresentou um teor significativo de óxido de magnésio (MgO), em torno de 15,4%. Esse valor, embora elevado, pode influenciar positivamente na plasticidade da mistura solo–cimento, favorecendo o manuseio e a moldagem.

De acordo com a literatura e também tomando como referência os limites estabelecidos para o cimento Portland (NBR 16697:2018), teores de MgO até cerca de 5% são geralmente aceitos como seguros em formulações de solo-cimento. Entre 5 e 6,5%, ainda é considerado tolerável, mas requer controle. Já valores acima de 7% de MgO, especialmente quando associados à dolomita, podem comprometer a estabilidade a longo prazo devido à hidratação lenta e expansiva do MgO, causando fissuras e redução da durabilidade dos tijolos. O dióxido de silício (SiO_2) foi identificado em baixa concentração (0,41%), como esperado para cal hidratada de alta pureza, reforçando a qualidade do material. Os demais constituintes somaram apenas 1,69%, representando um baixo nível de impurezas. Esses resultados confirmam a boa qualidade da cal analisada, com composição adequada para aplicações em estabilização de solos e na fabricação de tijolos solo–cimento.

Esse valor, embora elevado, pode influenciar positivamente na plasticidade da mistura solo–cimento, favorecendo o manuseio e a moldagem.

No entanto, requer atenção quanto à possível presença de dolomita, mineral que, em algumas condições, pode comprometer a estabilidade a longo prazo devido à reatividade do MgO. O dióxido de silício (SiO_2) foi identificado em baixa concentração (0,41%), como esperado para cal hidratada de alta pureza, reforçando a qualidade do material. Os demais constituintes somaram apenas 1,69%, representando um baixo nível de impurezas. Esses resultados confirmam a boa qualidade da cal analisada, com composição adequada para aplicações em estabilização de solos e na fabricação de tijolos solo–cimento.

O resíduo de cal proveniente da mineração apresentou composição

promissora, destacando-se pelo teor elevado de CaO (72,1%), valor expressivo que o qualifica como potencial aditivo para reações de hidratação e pozolânicas em misturas cimentícias. O óxido de cálcio é essencial para a formação de hidróxidos e compostos que conferem propriedades aglomerantes ao sistema solo-cimento, contribuindo para o ganho de resistência mecânica.

Contudo, o MgO foi identificado em concentração ainda mais elevada (26,5%), o que demanda cautela. Altos teores de MgO podem comprometer a durabilidade do material, devido à sua tendência de hidratação tardia, gerando expansão volumétrica e possíveis fissuras com o tempo. A literatura e a norma NBR 16697:2018 (Cimento Portland) estabelecem que o teor de MgO deve ser $\leq 6,5\%$ para evitar problemas de estabilidade.

Assim, observa-se que o resíduo apresenta valores muito superiores a este limite, motivo pelo qual sua dosagem no tijolo solo-cimento deve ser rigorosamente controlada, a fim de minimizar riscos de instabilidade dimensional. O SiO₂ foi detectado em baixa proporção (0,48%), o que limita o potencial pozolânico do resíduo de forma isolada.

No entanto, sua presença pode favorecer reações secundárias quando em sinergia com outras fontes de sílica, como o próprio solo. Por fim, os demais constituintes somaram 0,92%, representando impurezas ou traços residuais que, embora não impactem diretamente as propriedades cimentícias, devem ser monitorados para garantir a qualidade e a regularidade do resíduo ao longo do tempo.

Tabela 10 - Distribuição dos Principais Óxidos nas Matérias-Primas Analisadas (% em massa)

Matéria prima	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Outros
Solo	61,2%	18,6%	-	-	15,6%	4,6%
Cal Hidratada	0,41%	-	82,5%	15,4%	-	1,69%
Resíduo da Cal	0,48%	-	72,1%	26,5%	-	0,92%

Fonte: Autora(2025)

Para corroborar com o que foi expresso acima, o estudo realizado por (SANTOS *et al.*, 2021), a fluorescência de raios X, foi utilizada para analisar a composição química da cal hidratada. Os resultados indicaram um alto teor de cálcio (Ca), representando acima de 68% da composição. Também foram identificadas pequenas quantidades de silício (Si) sendo abaixo de 1%. Sendo valores aproximados

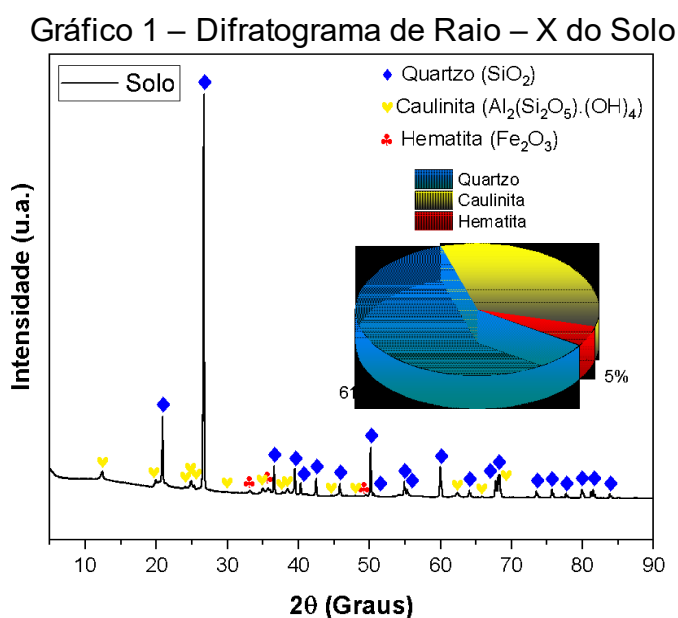
aos dados acima, esses achados forneceram informações importantes para entender as propriedades físicas e químicas desse material.

5.8 DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X (DRX), DAS MATÉRIAS-PRIMAS

5.8.1 DRX do solo

Durante a análise mineralógica da argila, foram identificados minerais como quartzo (SiO_2), caulinita ($\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$), e hematita (Fe_2O_3), confirmando os achados da fluorescência de raios X (FRX), conforme os dados apresentados na Tabela 12.

O gráfico 1 apresenta o difratograma de Raios X (DRX) referente ao solo empregado neste estudo



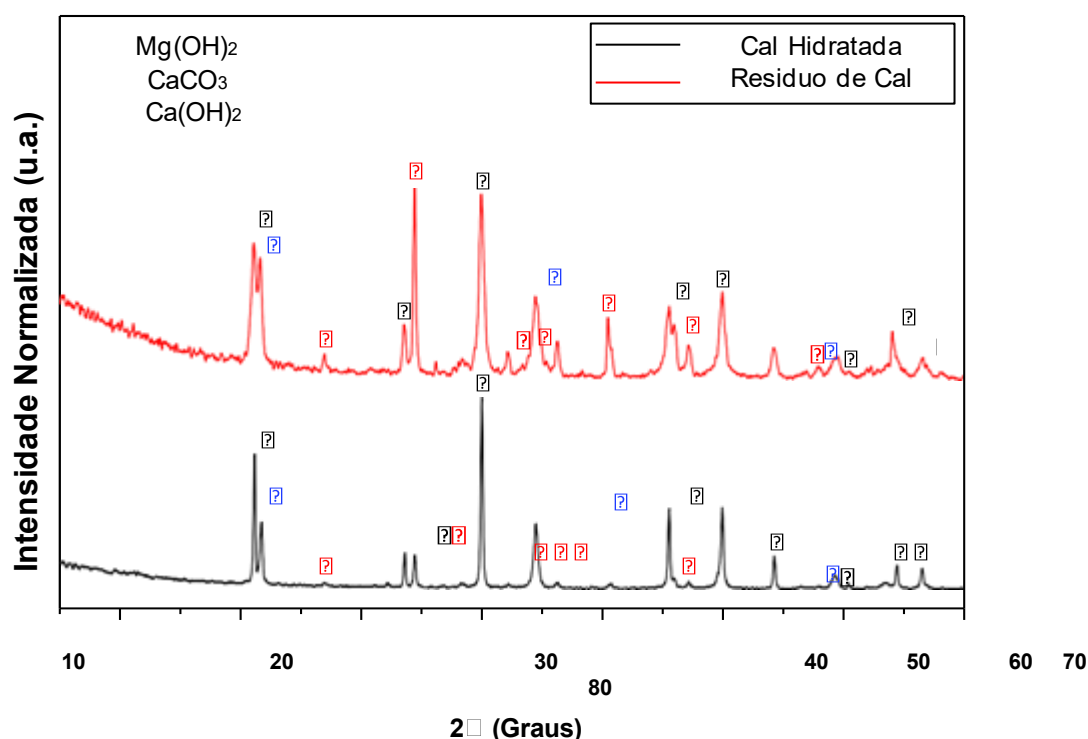
Fonte: Autora (2025).

Esses argilominerais são responsáveis por importantes características plásticas e coloidais, o que justifica as variações nas propriedades físicas do material, a caulinita, com estrutura cristalina neutra, favorece a interação solo-cimento e contribui para a plasticidade do solo, resultando em maior resistência inicial dos tijolos e facilitando o desmolde na compressão. O quartzo, garante a estabilidade dimensional do tijolo, ajudando a controlar a plasticidade do solo na presença de água. Já a hematita garante a coloração do tijolo.

5.8.2 DRX da cal hidratada e do resíduo de cal

A análise mineralógica da cal hidratada e do resíduo de cal, feita usando a técnica de Difração de Raios X (DRX), revelou a existência de cristais de hidróxido de magnésio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), carbonato de cálcio (CaCO_3) e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Essas descobertas confirmam a composição que já tinha sido sugerida pelos resultados da análise por Fluorescência de Raios X (FRX). Isso mostra que as duas técnicas concordam quanto aos principais elementos presentes nas amostras. Ilustrados no gráfico 2.

Gráfico 2 - DRX da Cal Hidratada e do Resíduo de Cal



Fonte: Autora (2025).

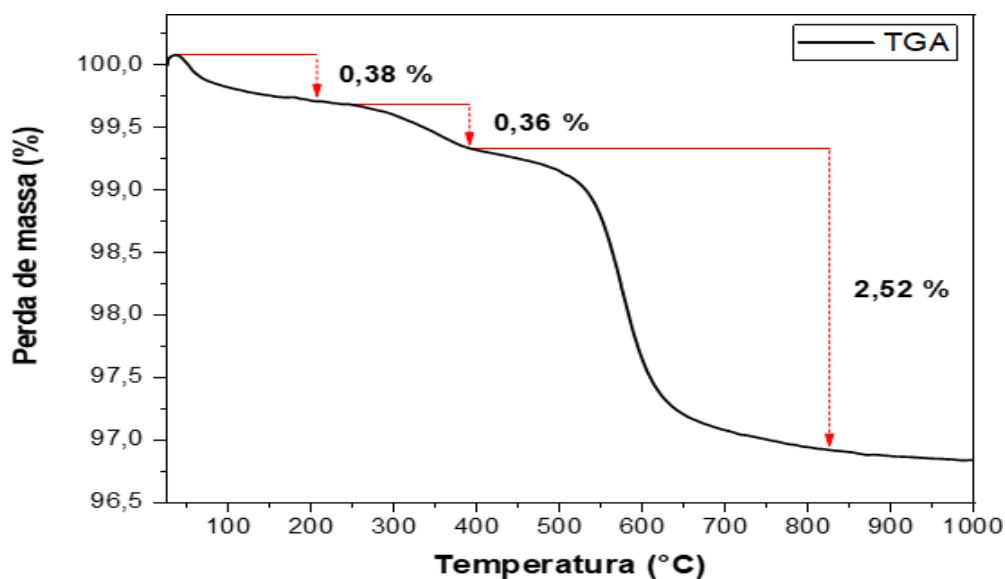
Em relação à cal e ao resíduo de cal utilizados nesta pesquisa, observa-se na Tabela 10, que a cal apresenta teor de óxido de cálcio (CaO) de 82,5% e óxido de magnésio (MgO) de 15,4%.

Já o resíduo apresenta 72,1% de CaO e 25,4% de MgO . De acordo com os critérios estabelecidos pela NBR 7175:2003, a cal analisada enquadra-se como cal cálcica do tipo CH-II. Essa classificação é corroborada pelos resultados obtidos na análise de difração de raios X (DRX), pois verifica-se a presença das fases mineralógicas de Brucita, Calcita e Portlandita, resultado também encontrado nas análises realizadas por (FONSECA, 2018).

5.9 ANÁLISES TERMOGRAVIMÉTRICA TG E DTG DO SOLO

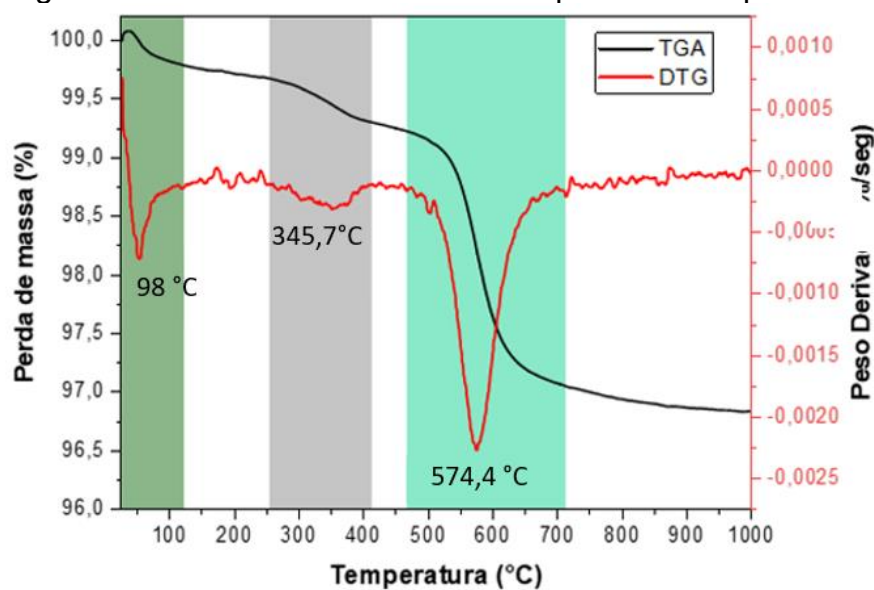
A análise termogravimétrica (TG) permitiu identificar três eventos distintos de perda de massa no material. As Figuras 24 e 25 apresentam as curvas obtidas, enquanto a Tabela 11 reúne as respectivas temperaturas e variações de massa associadas a cada evento.

Figura 24 - Análise de TG e suas respectivas perdas de massas



Fonte: Autora (2025).

Figura 25 - Análise da DTG e suas respectivas Temperaturas



Fonte: Autora (2025).

Conforme MENEZES *et al.*, (2018), o primeiro evento corresponde à perda de água adsorvida, ocorrendo na faixa de 98°C. Essa fase é caracterizada pela liberação de água fisicamente adsorvida na superfície ou retida nos poros do material, removida em temperaturas relativamente baixas.

O segundo fenômeno, ocorrido a 345,7° C, corresponde, nesse intervalo, à perda de massa devido à concentração de compostos orgânicos, como húmus ou matéria orgânica presente no solo. Essa faixa de temperatura é típica para a perda de água estrutural, que ocorre de forma mais pronunciada entre 200°C e 400°C.

Por fim, o evento em 574,4 °C corresponde à desidroxilação estrutural de argilominerais (como caulinita e ilita), com liberação de água ligada à rede cristalina e formação de fases metaestáveis, a exemplo da metacaulinita.

Tabela 11 - Eventos de Perda de Massa do solo identificados por Análise Termogravimétrica (TG)

Eventos	(I)	(II)	(III)
Faixa de Temp. (°C)	98	345,7	574,4
Perda de Massa (%)	0,38	0,36	2,52

Fonte: Autora, (2025).

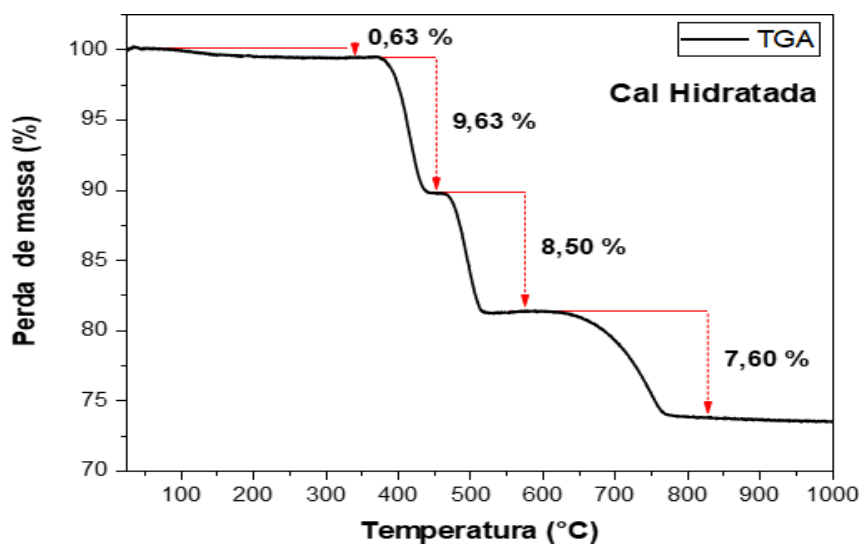
A perda de massa total é de 3,26%, relativamente pequena, o que pode indicar que o solo tem uma composição que não é altamente volátil ou que as reações térmicas não são tão intensas. Isso sugere que o material possui um grau de estabilidade térmica. Dentro das condições comprovadas, mas não significa que ele seja completamente estável.

5.10 ANÁLISES TERMOGRAVIMÉTRICA TG E DTG DA CAL HIDRATADA

A análise termogravimétrica (TG) forneceu dados relevantes sobre os eventos de perda de massa dos materiais. As curvas obtidas permitiram identificar quatro etapas distintas de decomposição. As figuras 26 e 27 e a tabela 12, a seguir,

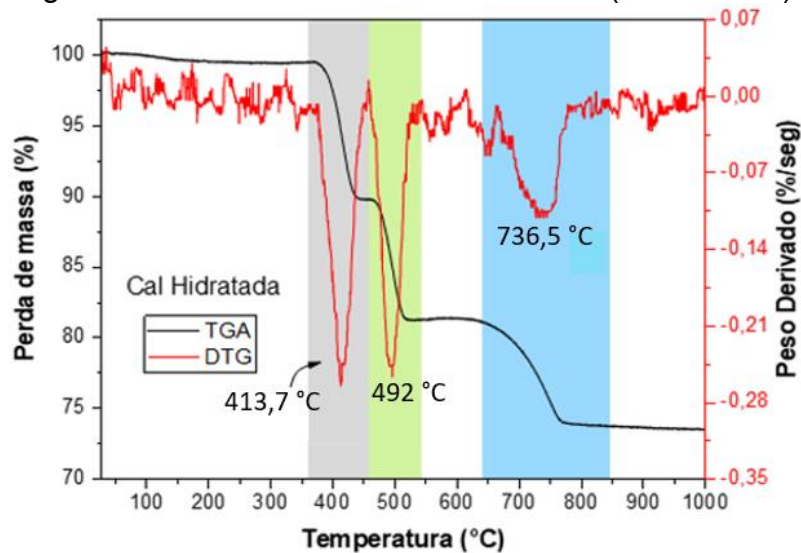
apresentam os resultados da TG, evidenciando a relação entre perda de massa e temperatura, o que possibilita a avaliação do comportamento térmico das amostras.

Figura 26 - Curva de Análise Térmica (TGA) da Cal Hidratada



Fonte: Autora (2025)

Figura 27 - Curvas das análises térmicas (TGA e DTG)



Fonte : Autora (2025).

Tabela 12 - Eventos de perda de massa da cal hidratada identificados por Análise Termogravimétrica (TG)

Eventos	(I)	(II)	(III)	(IV)
Faixa de Temp. (°C)	0 – 200°C	200- 413,7°C	492 °C	736,5°C
Perda de Massa (%)	0,63	9,63	8,50	7,60

Fonte: Autora (2025).

O primeiro evento está relacionado à perda de água adsorvida, ocorrendo na faixa de temperatura entre 100°C e 400°C. Esta perda está relacionada à água adsorvida e/ou água superficial presente na cal hidratada. É comum que a água fisicamente adsorvida na cal hidratada evapore nessa faixa de temperatura.

De acordo com MENEZES *et al.*, (2018), o segundo pico de perda de massa, registrado na faixa de aproximadamente 413,7 °C, corresponde à desidroxilação do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), processo em que ocorre a liberação de água estrutural (H_2O) e a formação de óxido de cálcio (CaO). Esse comportamento térmico é clássico e comumente observado próximo aos 400 °C.

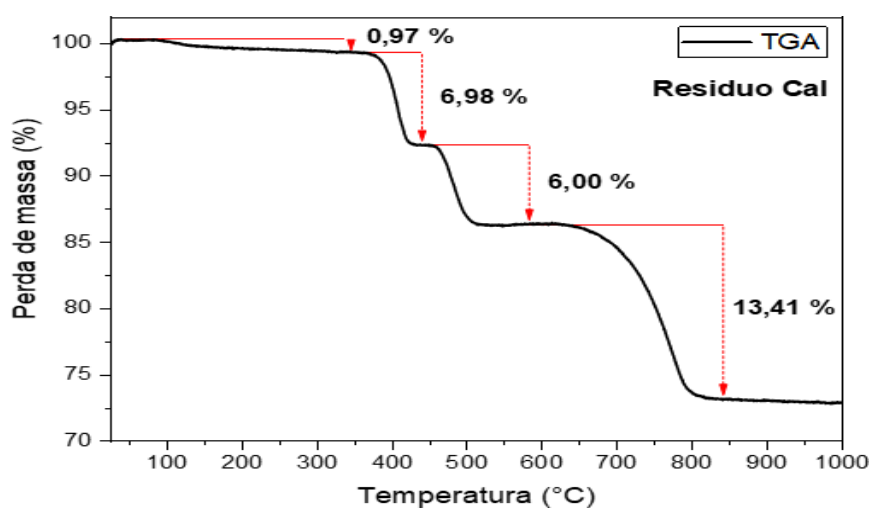
O terceiro evento ocorre na faixa de temperatura de 492° C. Esta perda pode estar associada à presença de menores de hidróxidos e outros compostos ou uma transição cruzada relacionada à investigação relacionado à composição de fases secundárias, como pequenos carbonatos formados pela ocorrência do CaO com o CO_2 do ar. Os dados obtidos neste estudo corroboram em partes com os resultados apresentados por (CAROLINE, 2017).

Por fim, o último evento ocorre na temperatura 736,5°C, é uma faixa de temperatura típica para a permanência de carbonato de cálcio (CaCO_3) em óxido de cálcio (CaO) e liberação de dióxido de carbono (CO_2). O carbonato de cálcio ou calcita, pode ser uma impureza presente na cal hidratada ou formada devido à carbonatação superficial. Tendo uma perda de massa total de 26,36 uma perda significativa.

5.11 ANÁLISES TERMOGRAVIMÉTRICA TG E DTG DO RESÍDUO DE CAL

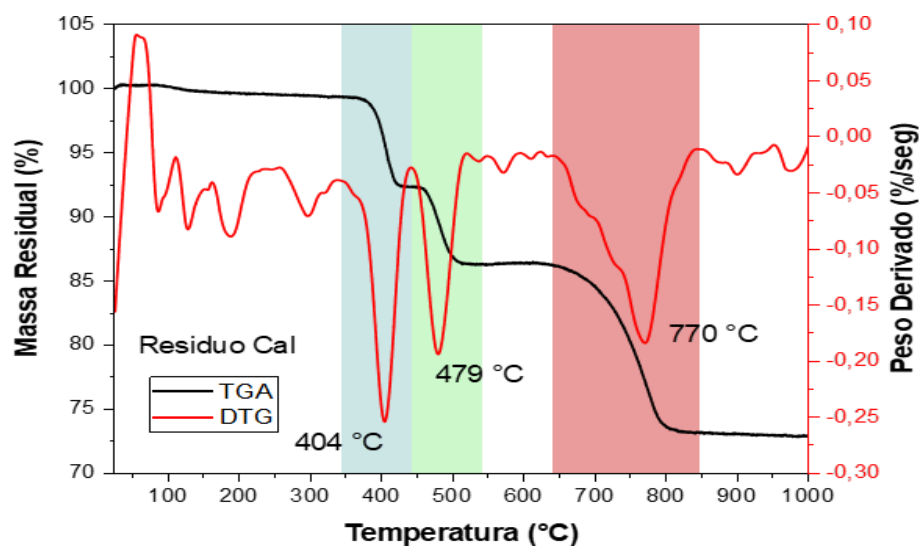
No presente estudo, a análise termogravimétrica (TG), da perda de resíduo de cal proveniente da mineração revelou quatro eventos distintos de perda de massa, cada um relacionado a diferentes processos térmicos, conforme descrito a seguir nas figuras 28 e 29, e na tabela 13.

Figura 28 - Perfil Térmico do Resíduo de Cal



Fonte: Autora (2025).

Figura 29 - Análises térmicas e suas curvas de (TGA E DTG) do resíduo



Fonte: Autora (2025)

Tabela 13 - Eventos de Perda de Massa do resíduo de cal, Identificados por Análise Termogravimétrica (TG)

Eventos	(I)	(II)	(III)	(IV)
Faixa de Temp. (°C)	100 – 400°C	404 °C	479 °C	770 °C
Perda de Massa (%)	0,97	6,98	6,00	13,41

Fonte: Autora (2025).

A primeira perda ocorre entre as temperaturas de 100 a 400° C, provavelmente corresponde à perda de água adsorvida e água de hidratação. Nesta faixa de temperatura, ocorre a liberação de água fisicamente adsorvida nos poros e na superfície do material, além da possível desidratação de hidróxidos.

Na segunda faixa de temperatura, em torno de 404 °C, ocorre a desidroxilação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), resultando na formação de óxido de cálcio (CaO) e liberação de água, conforme descrito por MENEZES *et al.*, (2018).

Na terceira faixa e 479°C, a essa temperatura, é possível que ocorra a permanência de carbonatos metálicos, como o carbonato de cálcio (CaCO_3). Esse evento é, liberando dióxido de carbono (CO_2), é característico de materiais minerais contendo carbonatos.

Por fim, segundo FERNANDES M. *et al.*, (2017), no quarto evento de temperatura a 770°C, elevadas como essa indicam a liberdade de carbonatos mais benéfica ou a oxidação de materiais orgânicos residuais. Também pode ser relatado à continuação da experiência de carbonato de cálcio, é o que geralmente ocorre em torno de 600 a 900°C, resultando em CO_2 e óxido de cálcio (CaO). Durante a análise, a amostra sofreu uma decomposição que resultou em uma redução total da massa de 27,36 %.

5.12 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Para os ensaios de absorção de água, foram moldados 3 corpos de prova por formulação. As análises foram realizadas aos 60 dias, utilizando amostras representativas. A Tabela 14, apresenta as médias e os desvios padrão da absorção de água para os diferentes teores de cal hidratada (CPC) e resíduo de cal (CPR).

Tabela 14 - Absorção de água aos 60 dias com corpos de prova com cal (CPC) e corpos de prova com resíduo de cal (CPR).

Corpo de Prova (CP)	Média	Desvio Padrão
CPC 0%	12,80	3,14
CPC 3%	12,17	0,42
CPC 5%	12,86	1,74
CPC 7%	18,71	1,92
CPC 10 %	17,17	0,39
CPR 0 %	12,80	3.14
CPR 3 %	10,39	1.47
CPR 5 %	17.24	0.37
CPR 7 %	15.52	0.07
CPR 10 %	15.05	2.52

Fonte: Autora (2025).

Os resultados indicam que todas as formulações analisadas apresentaram índices de absorção de água inferiores ao limite de 20%, conforme estipulado pela norma NBR 8491/12 para materiais à base de solo-cimento. Em pesquisa semelhante, Ferreira e Cunha (2017) também utilizaram resíduos industriais em formulações de solo-cimento e obtiveram resultados compatíveis aos do presente estudo, com absorção de água inferior ao limite normativo de 20%.

Em contrapartida, o trabalho desenvolvido por Siqueira e Holanda (2013) demonstrou que algumas formulações com resíduos industriais não atingiram esse critério normativo. As formulações contendo 3% de adição, tanto para os corpos de prova com cal hidratada (12,17%) quanto para aqueles com resíduo (10,39%), apresentaram os menores índices de absorção de água entre todas as amostras avaliadas.

Esse comportamento está relacionado ao maior teor de ligante, o qual favorece o avanço das reações cimentícias, promovendo uma matriz mais densa e com menor porosidade. Como resultado, há uma redução significativa na absorção hídrica, aspecto fundamental para a qualidade e durabilidade de tijolos de solo-cimento. Os dados obtidos também se correlacionam com os resultados de resistência à compressão, uma vez que, de modo geral, as composições com maior resistência apresentaram os menores índices de absorção. Ao comparar os grupos com adição de cal e de resíduo de cal, observa-se que, embora os valores médios de absorção tenham sido levemente inferiores para os que utilizaram o resíduo, os desvios padrão

sugerem comportamento semelhante entre os grupos.

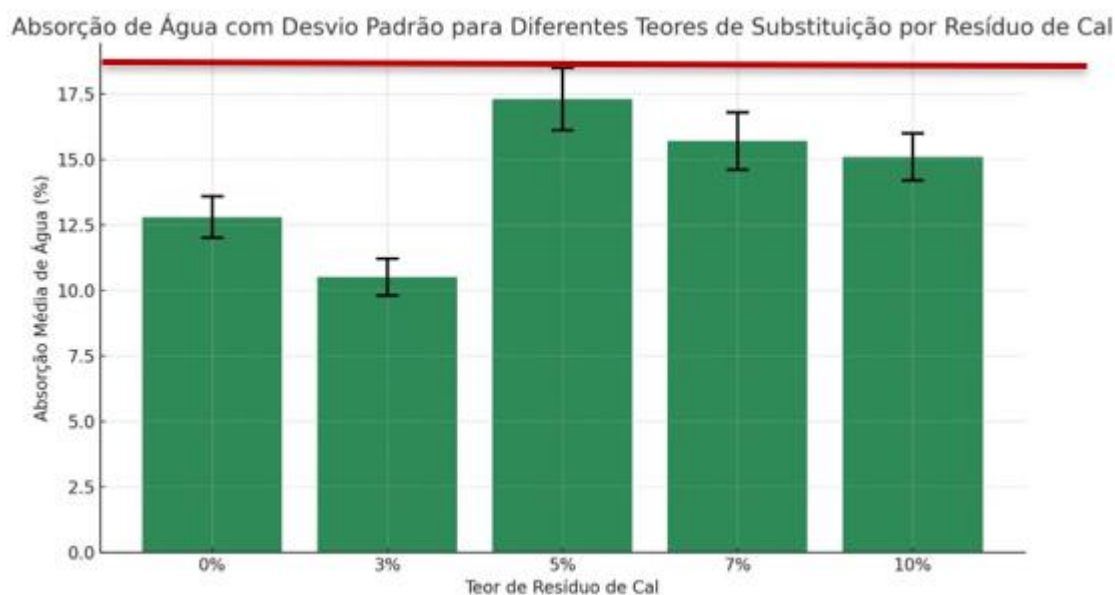
Isso evidencia que a substituição parcial por resíduo de cal não comprometeu essa propriedade. Para melhor visualização, as Figuras 30 e 31, apresentam um gráfico com os valores obtidos no ensaio.

Figura 30 - Absorção de Água com Desvio Padrão para Diferentes Teores de Substituição por Cal



Fonte: Autora (2025).

Figura 31 - Absorção de Água para Diferentes Teores de Substituição por Resíduo de Cal



Fonte: Autora(2025).

De acordo com a tabela e de uma análise direta dos valores individuais é possível verificar que quanto maior o percentual de substituição de cal e resíduo de cal na amostra, maior é o percentual de absorção de água dos corpos de provas.

Observa-se que a amostra CPC 3% apresentou o menor valor de absorção (12,17%), com o menor desvio padrão (0,42), indicando maior uniformidade e desempenho mais estável. Por outro lado, a formulação CPC 7% apresentou a maior absorção (18,71%), sugerindo que o aumento do teor de cal acima de 5% não contribuiu positivamente para a redução da porosidade, podendo até ter provocado microfissuras devido ao excesso de material aglomerante.

Em relação ao resíduo de cal (CPR), o menor valor de absorção foi observado em CPR 3% (10,39%), o que indica um desempenho satisfatório dessa formulação, comparável ou até superior ao da cal comercial em baixos teores. No caso do CPR, observou-se que a resistência máxima ocorreu em 5% de adição (17,24 MPa). Para teores superiores, de 7% e 10%, os valores reduziram para 15,52 MPa e 15,05 MPa, respectivamente. Esse comportamento pode estar associado à heterogeneidade do resíduo e à sua menor reatividade em comparação à cal hidratada, fatores que limitam a formação de compostos cimentícios em teores mais elevados. Além disso, o excesso de resíduo pode comprometer a compactação e aumentar a porosidade da matriz, o que justifica o fato de o CPR a 10% apresentar desempenho inferior ao CPC em 5% e 7%.

5.12.1 Análises estatísticas para ensaio de absorção de água – Cal.

Diante das análises dos dados referentes à absorção de água, com o objetivo de aprofundar os resultados, realizou-se um estudo estatístico por meio da ANOVA. Inicialmente, verificou-se se os dados atendiam aos pressupostos do teste, sendo a normalidade avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk, conforme apresentado na tabela 15, a seguir.

Tabela 15 - Teste de normalidade dos dados de absorção de água aos 60 dias para as formulações com cal, utilizando o teste de Shapiro-Wilk.

Grupo	Estatística W	p- valor	Nível de Significância (α)	Distribuição Normal
SCC 0%	0,99953	0,9585	0,05	Sim
SCC 3%	0,88608	0,3425	0,05	Sim
SCC 5%	0,84571	0,2291	0,05	Sim
SCC 7%	0,9193	0,4501	0,05	Sim
SCC 10%	0,81061	0,1401	0,05	Sim

Fonte: Autora (2025).

Com base na análise estatística, observou-se que os dados seguem uma distribuição normal, uma vez que os valores de p obtidos no teste de Shapiro-Wilk foram superiores a 0,05. Esse resultado indica que a hipótese nula (H_0) não foi rejeitada. Para avaliar a homogeneidade das variâncias entre os grupos, aplicou-se o teste de Levene. Assim como na normalidade, a aceitação da hipótese nula ($p > 0,05$) nesse teste aponta para a homogeneidade dos dados analisados. Os resultados obtidos encontram-se detalhados na Tabela 18.

Tabela 16 - Resultado do teste de Levene para verificar a homogeneidade das variâncias nas formulações com cal

Tipo	P- value
Média	0.8235

Fonte: Autora (2025).

O valor de p obtido foi de 0.8235, superior ao limite de 0,05, o que confirma a homogeneidade dos dados de absorção de água. Dessa forma, a hipótese nula foi mantida, indicando que não há diferenças significativas entre as variâncias dos grupos analisados. A exigência de independência entre os dados é atendida, considerando que cada amostra foi composta por diferentes proporções dos materiais utilizados, o que garante variações distintas entre elas.

Após os dados confirmarem a homogeneidade das variâncias por meio do teste de Levene, procedeu-se à análise de variância (ANOVA), cujos resultados estão apresentados na Tabela 17. Em seguida, foi aplicado teste de Tukey conforme demonstrado na Tabela 18.

Tabela 17 - Resultados da ANOVA para Comparação dos Teores de Substituição de Cimento por Cal na Absorção de Água dos Corpos de Prova

Fonte de Variação	GL (Df)	F (Experimental)	F (Crítico)	p-valor
Entre grupos	4	5.245	3.47805	0.0154
Dentro dos grupos	10	-	-	-

Fonte: Autora (2025).

A partir da análise dos resultados da ANOVA aplicada aos dados de absorção de água dos corpos de prova aos 60 dias, observa-se que o valor de p (0,0154) é inferior ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), o que implica a rejeição da hipótese nula de igualdade entre as médias. O valor de F experimental (5,245) também foi superior ao F crítico (3.47805), reforçando a existência de diferença estatisticamente significativa entre os grupos analisados.

Esse resultado indica que a substituição parcial do cimento por cal hidratada influenciou significativamente a absorção de água dos tijolos solo-cimento. Diante dessa constatação, justifica-se a aplicação de um teste de Tukey, com o objetivo de identificar quais pares de formulações diferem entre si de forma significativa.

Tabela 18 - Resultados do teste de Tukey para comparação dos teores de cal hidratada (CPC) nas médias de absorção de água aos 60 dias

Comparação (%)	Diferença- diff	Limite inferior(lw	Limite superior (Upr)	Valor de p (adj)
CPC 3 - CPC 0	-0.63000000	-6.5104926	5.250493	0.9961220
CPC 5 - CPC 0	0.05666667	-5.8238259	5.937159	0.9999997
CPC 7 - CPC 0	5.64333333	-0.2371592	11.523826	0.0614237
CPC 10 - CPC 0	4.36333333	-1.5171592	10.243826	0.1810435
CPC 5 - CPC 3	0.68666667	-5.1938259	6.567159	0.9946076
CPC 7 - CPC 3	6.27333333	0.3928408	12.153826	0.0355378
CPC 10 - CPC 3	4.99333333	-0.8871592	10.873826	0.1073278
CPC 7 - CPC 5	5.58666667	-0.2938259	11.467159	0.0645125
CPC 10 - CPC 5	4.30666667	-1.5738259	10.187159	0.1894987
CPC 10 - CPC 7	-1.28000000	-7.1604926	4.600493	0.9479190

Fonte: Autora (2025).

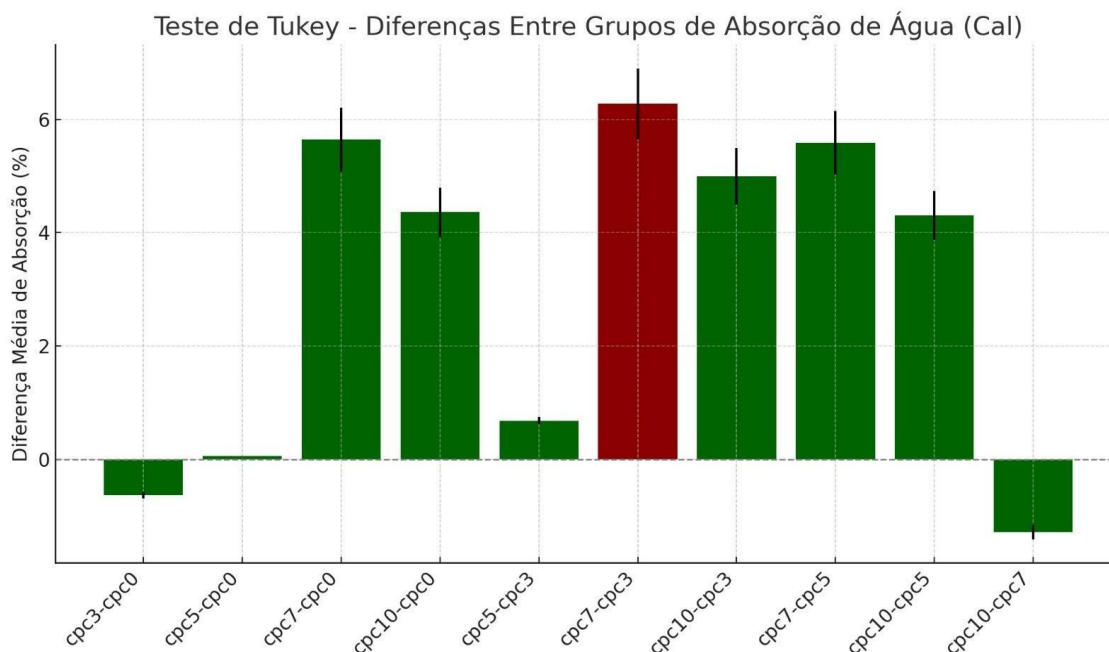
Pelo teste post-hoc de Tukey, observa-se que apenas a comparação entre CPC 7 e CPC 3 apresentou valor de $p < 0,05$ ($p = 0,0355$), indicando a existência de diferença estatisticamente significativa entre essas amostras. Isso sugere que a formulação com 7% de substituição apresentou desempenho significativamente diferente daquela com 3%, sendo a única comparação com significância estatística clara neste conjunto de dados.

Nas demais comparações, inclusive entre CPC 0 (controle) e os demais percentuais (3%, 5%, 7% e 10%), os valores de p ajustado foram todos superiores a 0,05, o que indica ausência de diferença estatística significativa. Mesmo a comparação CPC 7 vs CPC 0 ($p = 0,0614$) e CPC 7 vs CPC 5 ($p = 0,0645$) chegaram próximas do limite de significância, mas ainda assim não atingiram o critério estatístico para rejeição da hipótese nula.

Quando associado aos valores médios de resistência, que demonstraram desempenho superior para o teor de 3% aos 28 dias e maior uniformidade dos

resultados, esses achados reforçam que a formulação com 3% se configura como o ponto ótimo, conciliando desempenho mecânico e estabilidade estatística.

Figura 32 - Teste de Tukey- Diferenças entre Grupos de Absorção de Água (Cal)



Fonte: Autora (2025).

Com base no teste post-hoc de Tukey, observou-se que apenas a comparação entre os grupos com 7% e 3% de cal (**cpc7 vs cpc3**) apresentou diferença estatisticamente significativa na absorção de água ($p < 0,05$). Na figura 32, as demais combinações entre os diferentes teores de cal não mostraram diferenças significativas, mesmo quando visualmente algumas delas apresentaram variações na média. Esses resultados indicam que apenas o aumento de 3% para 7% de cal promoveu uma alteração significativa no comportamento de absorção hídrica do material.

5.12.2 Análises estatísticas para ensaio de absorção de água – Resíduo de Cal

Para interpretar os dados de absorção de água dos corpos de prova com resíduo de cal, realizou-se uma análise estatística. A normalidade foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene. Atendidos os pressupostos, aplicou-se a ANOVA, seguida do teste de Tukey, para

identificar diferenças significativas entre os teores avaliados. Os resultados estão apresentados na tabela 21, e gráficos a seguir.

Tabela 19 - Teste de normalidade dos dados de absorção de água aos 60 dias para as formulações com Resíduo, utilizando o teste de Shapiro-Wilk.

Grupo	Estatística W	p- valor	Nível de Significância (α)	Distribuição Normal
SCR 0%	0,99953	0,9585	0,05	Sim
SCR3%	0,90593	0,4046	0,05	Sim
SCR5%	0,92148	0,4575	0,05	Sim
SCR 7%	0,97744	0,712	0,05	Sim
SCR 10%	0,82288	0,1704	0,05	Sim

Fonte: Autora (2025).

Para os dados obtidos aos 60 dias, os testes de normalidade baseados no método de Shapiro-Wilk para as formulações com resíduo, apresentaram valores de p superiores a ($p > 0,05$), em todos os grupos avaliados. Portanto, não se rejeita a hipótese nula, indicando que os dados seguem uma distribuição normal em todos os tratamentos.

Para avaliar a homogeneidade das variâncias entre os grupos, aplicou-se o teste de Levene. Como os valores de p obtidos foram superiores a 0,05, não se rejeita a hipótese nula, o que indica que os dados apresentam homogeneidade de variâncias. Os resultados obtidos encontram-se organizados na Tabela 22.

Tabela 20 - Resultado do teste de Levene para verificar a homogeneidade das variâncias nas formulações Resíduo.

Tipo	P- value
Média	0.9791

Fonte: Autora (2025).

Os resultados obtidos aos 60 dias indicam homogeneidade de variâncias entre os grupos, conforme verificado pelo teste de Levene. Com essa condição estatística atendida, procedeu-se à realização da análise de variância (ANOVA), cujos dados estão apresentados na Tabela 21. Em seguida, aplicou-se o teste de comparações

múltiplas de Tukey, conforme demonstrado na Tabela 22.

Tabela 21 - Resultados da ANOVA para Comparação dos Teores de Substituição de Cimento por Resíduo de Cal na Absorção de Água dos Corpos de Prova

Fonte de Variação	GL (Df)	F (Experimental)	F (Crítico)	p-valor
Entre grupos	4	3.789	2.689628	0.0398
Dentro dos grupos	10	-	-	-

Fonte: Autora (2025).

A partir da análise dos resultados da ANOVA para os corpos de prova aos 60 dias, observa-se que o valor de p (0,0398) é inferior ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), o que leva à rejeição da hipótese nula de igualdade entre as médias. Isso indica que há, pelo menos, um grupo com diferença estatisticamente significativa em relação aos demais. Portanto, conclui-se que a substituição parcial do cimento por resíduo de cal influencia significativamente os resultados de resistência à compressão simples dos tijolos solo-cimento ($F = 3,789$; $p = 0,0398$). Tal constatação justifica a aplicação de um teste *post hoc* (como o teste de Tukey) para identificação dos pares de grupos que apresentam diferenças significativas.

Tabela 22 - Resultados do Teste de Tukey para Comparação das Médias de Resistência à Compressão entre Diferentes Teores de Substituição de Cimento por Resíduo de Cal (60 dias)

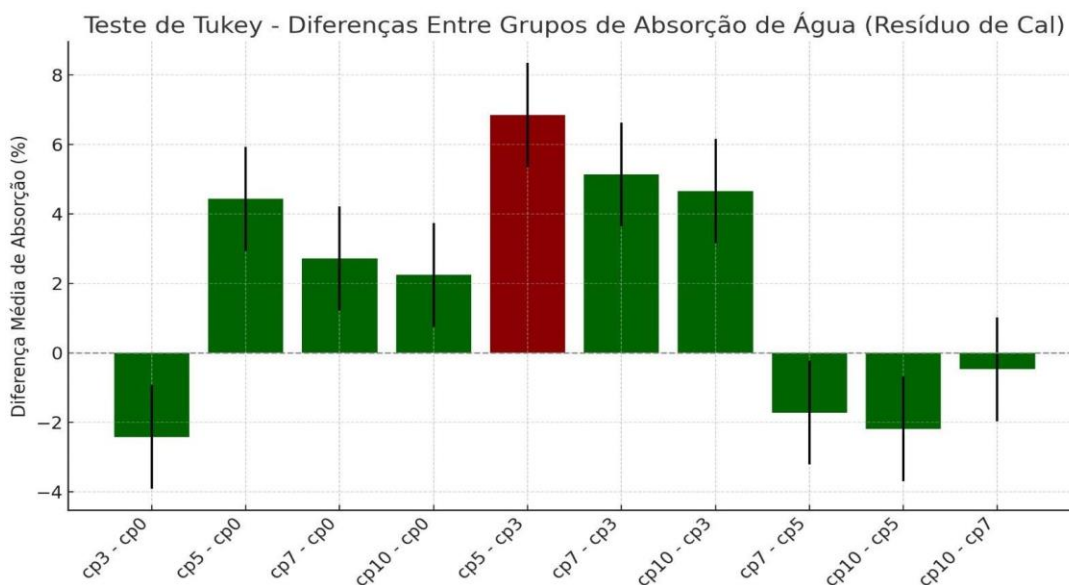
Comparação(%)	Diferença-diff	Limite Inferior (lwr)	Limite Superior (Upr)	Valor de P (adj)
CPR 3 - CPR 0	-2.4166667	-8.7625999	3.929267	0.7230097
CPR 5 - CPR 0	4.4333333	-1.9125999	10.779267	0.2218366
CPR 7 - CPR 0	2.7166667	-3.6292666	9.062600	0.6360914
CPR 10 - CPR 0	2.2433333	-4.1025999	8.589267	0.7709099
CPR 5 – CPR 3	6.8500000	0.5040668	13.195933	0.0333182
CPR 7 - CPR 3	5.1333333	-1.2125999	11.479267	0.1309765
CPR 10 – CPR 3	4.6600000	-1.6859332	11.005933	0.1877486
CPR 7 - CPR 5	-1.7166667	-8.0625999	4.629267	0.8941637
CPR 10 - CPR 5	-2.1900000	-8.5359332	4.155933	0.7850940
CPR 10 – CPR 7	-0.4733333	-6.8192666	5.872600	0.9990507

Fonte: Autora (2025).

Com base nos resultados do teste de Tukey, observou-se que a comparação entre os teores de substituição de CPR 5% Vs CPR 3% de cimento por resíduo de cal (RC) apresentou diferença estatisticamente significativa ($p = 0,0333$). Isso indica que há rejeição da hipótese nula, confirmando a existência de uma diferença relevante entre os grupos. Dessa forma, pode-se afirmar que a substituição de 5% de cimento por RC influenciou significativamente os valores de resistência à compressão aos 60 dias, quando comparada à substituição de 3%. As demais comparações não apresentaram significância estatística, uma vez que os valores de p foram superiores a 0,05 ou os intervalos de confiança incluíram o valor zero, confirmando a existência de uma diferença relevante entre os grupos. Apesar disso, ao analisar os valores médios de resistência, verifica-se que, embora 5% tenha apresentado variação significativa em relação a 3%, essa última formulação manteve um desempenho mais equilibrado e consistente ao longo dos ensaios. Assim, o teor de 3% se consolida

como a opção mais adequada.

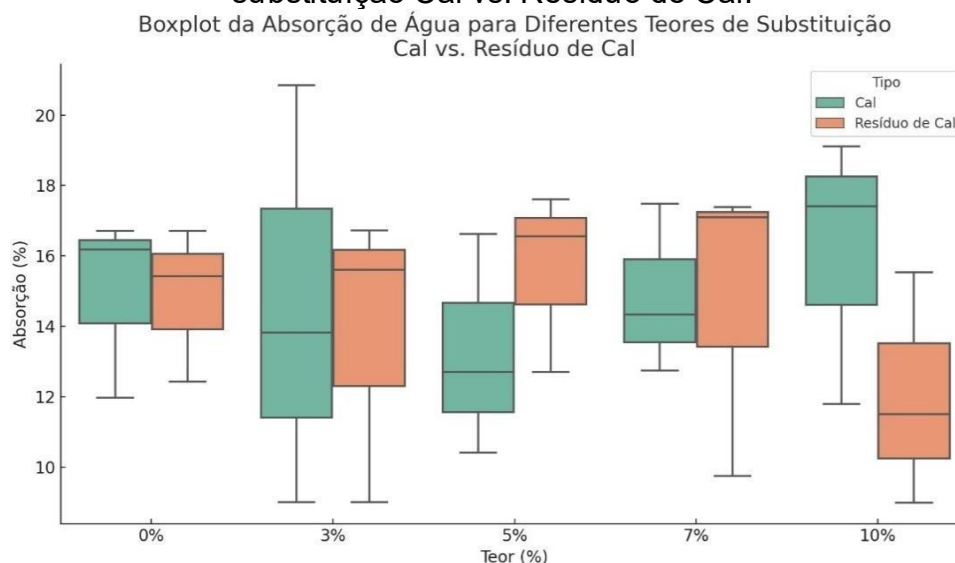
Figura 33 - Gráfico do teste de Tukey- Diferenças entre Grupos de Absorção de Água(Resíduo de Cal).



Fonte: Autora (2025).

Dentre as comparações realizadas pelo teste de Tukey, visto acima na figura 33, apenas o par CPR 5% vs CPR 3% apresentou diferença estatisticamente significativa na absorção de água, evidenciando que o aumento da substituição de cimento por resíduo de cal de 3% para 5% elevou significativamente a absorção do material. Nas demais combinações, embora tenham sido observadas variações nas médias, estas não foram estatisticamente significativas ao nível de 5% de probabilidade.

Figura 34 - Boxplot da Absorção de Água para Diferentes Teores de substituição Cal vs. Resíduo de Cal.



Fonte: Autora (2025).

O boxplot na figura 34, permitiu comparar a absorção de água em tijolos solo-cimento com diferentes teores de substituição de cimento (0%, 3%, 5%, 7% e 10%) por dois tipos de adição: cal e resíduo de cal. Observou-se que, de modo geral, os valores de absorção variaram conforme o tipo e o percentual de substituição adotado:

- Nos teores de 0% e 3%, a absorção média foi semelhante entre cal e resíduo de cal, embora com maior variabilidade no grupo com 3%.
- Em 5% de substituição, o grupo com resíduo de cal apresentou maior absorção média, o que indica possível aumento na porosidade. Essa diferença foi estatisticamente significativa no teste de Tukey.
- Para o teor de 7%, as médias voltam a se aproximar, com leve aumento da dispersão nos dados do grupo com resíduo.
- No teor de 10%, a substituição por resíduo de cal resultou na menor mediana de absorção, além de menor variabilidade, sugerindo um desempenho mais estável e potencialmente favorável à durabilidade.

Esses resultados evidenciam que o teor e o tipo de substituição influenciam diretamente o comportamento higroscópico dos tijolos, sendo o teor de 10% com resíduo de cal o que apresentou menor tendência à absorção de água.

5.13 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS) – CAL

Após as análises, foram realizados os ensaios de resistência à compressão

simples (RCS), a fim de avaliar o desempenho mecânico dos corpos de prova aos 7 e 28 dias de cura, tanto para cal quanto para resíduo de cal. Os resultados estão dispostos na Tabela 23 e 24, ilustrados na figura 35.

SOUSA *et al.*(2018) e DIAS *et al.* (2016), em suas pesquisas desenvolvidas com corpos de prova, avaliaram os resultados na trabalhabilidade dos traços por não haver nenhuma norma que regulamente os limites de resistência à compressão dos corpos de prova produzidos. Adotou-se como critério de avaliação para escolha os traços que apresentaram maior resistência à compressão no comparativo entre os valores obtidos tanto para cal quanto para o resíduo da cal.

Tabela 23 - Resistência à Compressão Simples (RCS) da cal aos 7 dias

%CAL	Idade (dias)	RCS Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
0	7	1,76	0,16	8,85
3	7	1,59	0,03	1,95
5	7	1,28	0,06	4,33
7	7	1,19	0,05	3,95
10	7	0,84	0,06	7,14

Fonte: Autora (2025).

Para a caracterização mecânica dos corpos de prova, foi realizado o ensaio de resistência à compressão simples (RCS) em corpos de prova com 7 dias de cura. Os resultados indicam uma tendência de redução da resistência com o aumento do teor de cal. O traço sem substituição apresentou o melhor desempenho devido boa trabalhabilidade, fato este que converge com o que se observa nos limites de Atterberg no que se refere a suscetibilidade à moldagem, enquanto o traço com 3% de cal, embora com leve redução na média, demonstrou maior uniformidade nos resultados, evidenciada pelo menor coeficiente de variação. A partir de 5%, observou-se uma queda mais acentuada na resistência apresentando grande dificuldade na trabalhabilidade do traço, indicando que teores mais elevados de cal afetam negativamente o ganho mecânico nas fases iniciais de cura.

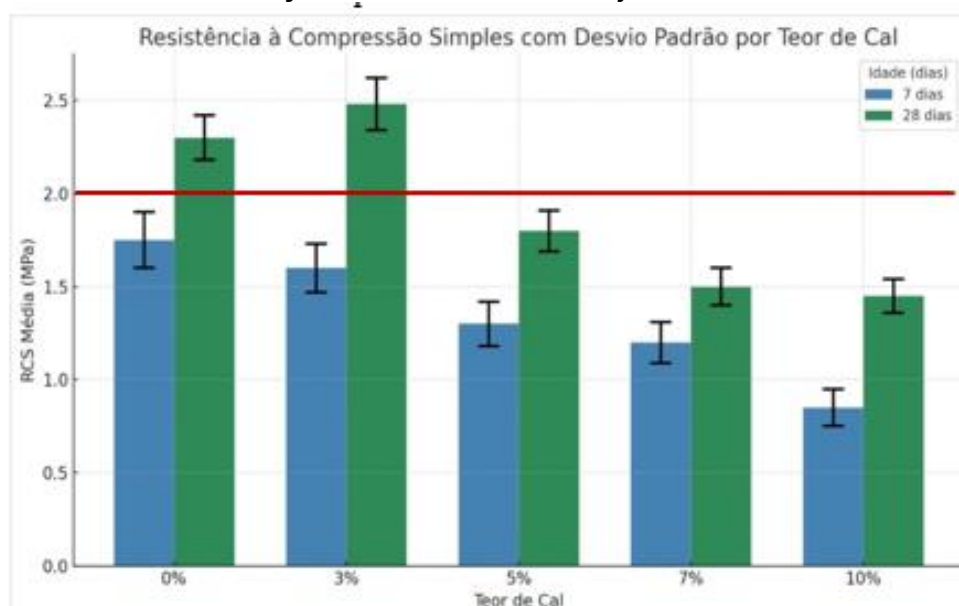
Tabela 24 - Resistência à Compressão Simples (RCS) Cal aos 28 dias

%CAL	Idade (dias)	RCS Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
0	28	2,30	0,17	7,40
3	28	2,48	0,19	7,80
5	28	1,81	0,16	8,77
7	28	1,50	0,05	3,01
10	28	1,45	0,15	10,14

Fonte: Autora (2025).

Vale ressaltar que diante dos dados destas tabelas, aos 28 dias, a formulação com 3% de substituição de cimento por cal apresentou o melhor desempenho mecânico, superando inclusive o traço de referência. A partir do teor de 5%, observou-se uma redução progressiva na resistência à compressão, acompanhada por maior variabilidade nos resultados. Assim, o teor de 3% destacou-se como a formulação mais eficiente entre os traços avaliados.

Figura 35 - Resistência à compressão simples média com desvio padrão aos 7 e 28 dias, em função do teor de cal nos tijolos solo-cimento.



Fonte: Autora (2025).

A figura 35, evidencia que a incorporação de 3% de cal se mostrou a proporção

mais eficiente, resultando em aumento expressivo da resistência mecânica aos 28 dias sem comprometer significativamente o desempenho inicial. Em contrapartida, teores superiores a 5% acarretaram perdas notáveis tanto na resistência precoce quanto após a cura, indicando um limite técnico para a substituição do cimento por cal na formulação dos tijolos.

5.13.1 Análise estatística para resistência à compressão simples – Cal

A fim de verificar a influência dos diferentes teores de cal na resistência à compressão simples dos corpos de prova, procedeu-se à análise estatística dos dados obtidos. Inicialmente, foram avaliados os pressupostos de normalidade e homogeneidade, requisitos fundamentais para a aplicação da análise de variância. Os resultados dessas etapas preliminares encontram-se sintetizados a seguir.

Tabela 25 - Teste de Shapiro-Wilk para os corpos de prova com diferentes porcentagens de cal (CPR), 7 dias.

Formulação	W-Stat	p-valor	$\alpha = 0,05$	Distribuição Normal
CPC 0%	0,86675	0.1738	0,05	Sim
CPC 3%	0.98674	0.9856	0,05	Sim
CPC 5%	0.869	0.1819	0,05	Sim
CPC 7%	0.98826	0.9896	0,05	Sim
CPC 10%	0.94926	0.7229	0,05	Sim

Fonte: Autora (2025).

Tabela 26 - Teste de Shapiro-Wilk para os corpos de prova com diferentes porcentagens de cal (CPR), para 28 dias.

Formulação	W-Stat	p-valor	$\alpha = 0,05$	Distribuição Normal
CPC 0%	0.93747	0.6161	0,05	Sim
CPC 3%	0.87255	0.1954	0,05	Sim
CPC 5%	0.93777	0.6187	0,05	Sim
CPC 7%	0.94692	0.7016	0,05	Sim
CPC 10%	0.8658	0.1705	0,05	Sim

Fonte: Autora (2025).

Os resultados dos testes estatísticos aplicados para os dados obtidos aos 7 e 28 dias indicaram que, em ambas as idades, os dados apresentaram distribuição normal, uma vez que os valores de p foram superiores a 0,05, não havendo, portanto, evidência para rejeição da hipótese nula. A homogeneidade das variâncias entre os grupos também foi confirmada por meio do teste de Levene, cujos p -valores se mantiveram acima do nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$) em ambas as idades de análise. Esses resultados asseguram a validade dos pressupostos necessários para a aplicação da análise de variância (ANOVA), conforme detalhado na Tabela 28.

Tabela 27 - Teste de Levene aplicado aos dados de resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias para Cal.

Tempo de Cura	Tipo	Valor de p	Homogeneidade das Variâncias
7 dias	Média	0.9617	Homogêneas
28 dias	Média	0.9579	Homogêneas

Fonte: Autora (2025).

Os resultados dos testes de homogeneidade indicaram que os dados de resistência à compressão simples com adição de cal, tanto aos 7 quanto aos 28 dias, atendem ao pressuposto de variâncias homogêneas. Os valores de p obtidos foram de 0,9617 para 7 dias e 0,9579 para 28 dias, ambos superiores ao nível de significância de 0,05, o que confirma a aceitação da hipótese nula a independência dos dados é garantida pela natureza distinta das amostras, resultante das diferentes proporções de cal utilizadas nas formulações.

Tabela 28 - ANOVA da resistência à compressão dos corpos de prova com adição de cal (7 e 28 dias).

Idade (dias)	Fonte de Variação	GL (Df)	F (Experimental)	F (Crítico)	p -valor
7 dias	Entre grupos	4	132,4	2,6896	0,00002
	Dentro dos grupos	30	-	-	-
28 dias	Fonte de Variação	4	65,85	2,6896	0,00002
	Dentro dos grupos	30	-	-	-

Fonte: Autora (2025).

Conforme os resultados apresentados na Tabela 28, a análise de variância (ANOVA) indicou valores de p significativamente inferiores ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$) para ambas as idades analisadas. Aos 7 dias, obteve-se $F = 132,4$; $p = 0,00002$, enquanto aos 28 dias o valor foi de $F = 65,85$; $p = 0,00002$. Esses resultados levaram à rejeição da hipótese nula de igualdade entre as médias, evidenciando que, em ambas as idades de cura, a substituição parcial do cimento por cal influenciou significativamente os valores de resistência à compressão simples dos corpos de prova. A diferença estatística entre os grupos justifica a aplicação de testes complementares de comparações múltiplas de acordo com a tabela 29 a seguir.

Tabela 29 - Resultados do teste de Tukey aplicados às médias de resistência à compressão simples dos corpos de prova após 7 dias de cura para cal.

Comparação	Diferença- diff	lwr	Upr	P adj
cpc3-cpc1	-0.16857143	-0.2967995	-0.04034337	0.0053343
cpc5-cpr1	-0.47857143	-0.6067995	-0.35034337	0.0000000
cpc7-cpc1	-0.57714286	-0.7053709	-0.44891480	0.0000000
cpc10-cpc1	-0.92000000	-1.0482281	-0.79177195	0.0000000
cpc5-cpc3	-0.31000000	-0.4382281	-0.18177195	0.0000008
cpc7-cpc3	-0.40857143	-0.5367995	-0.28034337	0.0000000
cpc10-cpc3	-0.75142857	-0.8796566	-0.62320052	0.0000000
cpc7-cpc5	-0.09857143	-0.2267995	0.02965663	0.1965402
cpc10-cpc5	-0.44142857	-0.5696566	-0.31320052	0.0000000
cpc10-cpr7	-0.34285714	-0.5696566	-0.21462909	0.0000001

Fonte: Autora (2025).

Pelo teste de Tukey, é possível verificar que na comparação de Cpc 5% vs Cpc 7%, o valor de p é menor que 0,05 indicando a adoção da hipótese alternativa. Isso estabelece que há uma diferença significativa entre as amostras, indicando que a substituição de 5% e de 7%, respectivamente, de cimento por Cal, influenciou significativamente nos resultados da resistência. Dessa forma, ao analisar os valores

médios de resistência e a consistência dos resultados, consolida-se que a formulação com 3% representa o limite técnico e estatístico ideal, garantindo o melhor equilíbrio entre ganho de resistência e estabilidade dos corpos de prova.

Tabela 30 - Resultados do teste de Tukey aplicados às médias de resistência à compressão simples dos corpos de prova após 28 dias de cura.

Comparação	Diferença- diff	lwr	Upr	P adj
cpc3-cpc1	0.1885714	-0.04690985	0.42405271	0.1656918
cpc5-cpc1	-0.4842857	-0.71976699	-0.24880443	0.0000145
cpc7-cpc1	-0.7957143	-1.03119557	-0.56023301	0.0000000
cpc10-cpc1	-0.8457143	-1.08119557	-0.61023301	0.0000000
cpc5-cpc3	-0.6728571	-0.90833842	-0.43737586	0.0000000
cpc7-cpc3	-0.9842857	-1.21976699	-0.74880443	0.0000000
cpc10-cpc3	-1.0342857	-1.26976699	-0.79880443	0.0000000
cpc7-cpc5	-0.3114286	-0.54690985	-0.07594729	0.0050243
cpc10-cpc5	-0.3614286	-0.59690985	-0.12594729	0.0009640
cpc10-cpc7	-0.0500000	-0.28548128	0.18548128	0.9714222

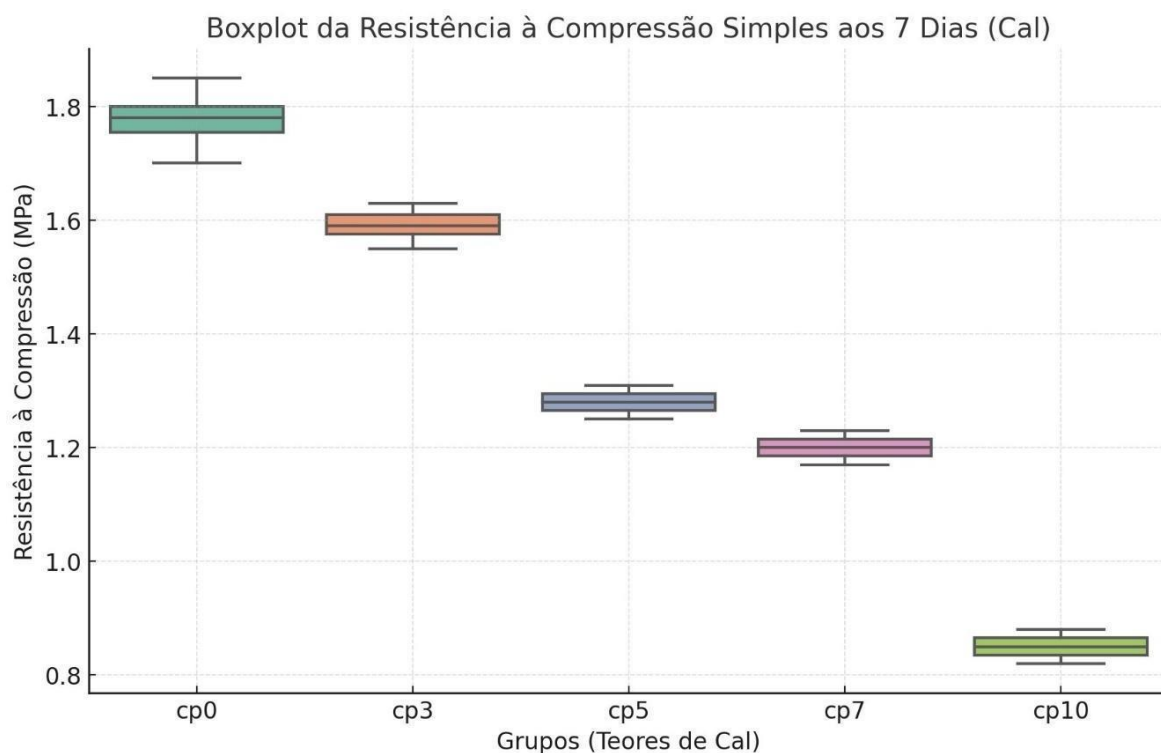
Fonte: Autora (2025).

O teste de Tukey revelou que a formulação com 3% de substituição de cimento por cal (cp3) apresentou desempenho significativamente superior em relação aos demais teores avaliados (5%, 7% e 10%). As diferenças foram estatisticamente significativas, com *p*-valores ajustados inferiores a 0,05 e intervalos de confiança que não incluíram o zero. Embora a comparação com o grupo controle (0%) não tenha apontado diferença significativa, o traço com 3% destacou-se por alcançar a maior média de resistência à compressão simples aos 28 dias, configurando-se que a formulação 3% é a mais eficiente para aplicação na produção de tijolos solo-cimento, segundo os critérios adotados neste estudo.

A Figura 36, apresenta a distribuição da resistência à compressão simples dos corpos de prova aos 7 dias, considerando diferentes teores de substituição de cimento

por cal.

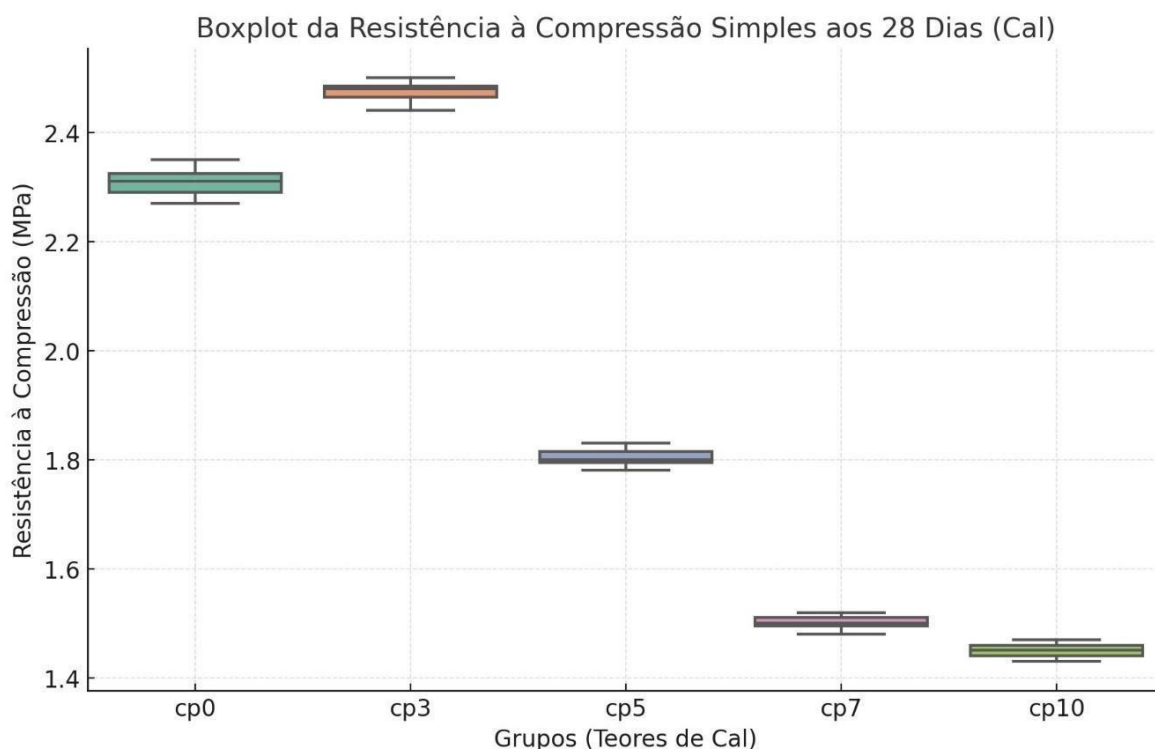
Figura 36 - Distribuição da resistência à compressão simples aos 7 dias – Cal



Fonte: Autora (2025).

Nota-se uma tendência clara de redução da resistência à medida que o percentual de cal aumenta. O grupo controle (cp1) obteve os maiores valores médios, seguido pela formulação com 3% de cal (cp3). A partir de 5% de substituição, observa-se uma queda mais acentuada nos resultados, sendo o desempenho mais baixo registrado no grupo com 10% de cal (cp10). Esses dados reforçam a influência negativa de teores mais elevados de cal no desenvolvimento da resistência mecânica em idades precoces.

Figura 37 - Distribuição da resistência à compressão simples aos 28 dias – Cal



A Figura 37 apresenta a distribuição dos resultados de resistência à compressão simples aos 28 dias para os diferentes teores de substituição de cimento por cal. A formulação com 3% de cal (cp3) destacou-se ao alcançar os maiores valores médios, superando inclusive o grupo controle (cp1), que também apresentou desempenho consistente. A partir do teor de 5%, observa-se uma queda acentuada na resistência, com os grupos cp7 e cp10, exibindo medianas inferiores ao limite de 2,0 MPa estabelecido pela NBR 8491:1984 para tijolos de vedação. Esses resultados reforçam que a substituição moderada de 3% foi a mais eficaz para o desenvolvimento da resistência mecânica, enquanto teores mais elevados prejudicaram significativamente o desempenho dos corpos de prova.

5.14 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS) – RESÍDUO DE CAL

Tabela 31 - Resistência à Compressão Simples (RCS) da cal aos 7 dias

%RC	Idade (dias)	RCS Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
CPR0	7	1,76	0,16	8,85
CPR3	7	1,73	0,07	4,08
CPR5	7	1,70	0,14	8,02
CPR7	7	1,46	0,08	5,48
CPR10	7	0,98	0,06	5,82

Fonte: Autora(Autora).

Legenda: %RC = Porcentagem de resíduo de cal.

Os resultados obtidos indicam que a substituição parcial do cimento por resíduo de cal influencia diretamente a resistência à compressão simples (RCS) aos 7 dias. A formulação sem adição de resíduo (0%) apresentou o maior valor médio de resistência (1,76 MPa), comportamento que se manteve relativamente estável nas amostras com 3% (1,73 MPa) e 5% (1,70 MPa), sugerindo que essas proporções não comprometem o desempenho mecânico na fase inicial de cura.

A partir de 7% de substituição por resíduo de cal, observou-se queda acentuada na resistência à compressão, com o menor valor registrado em 10% (0,98 MPa). Os resultados indicam que teores até 5% mantêm desempenho satisfatório e boa estabilidade, especialmente na formulação com 3%, que apresentou menor dispersão nos dados.

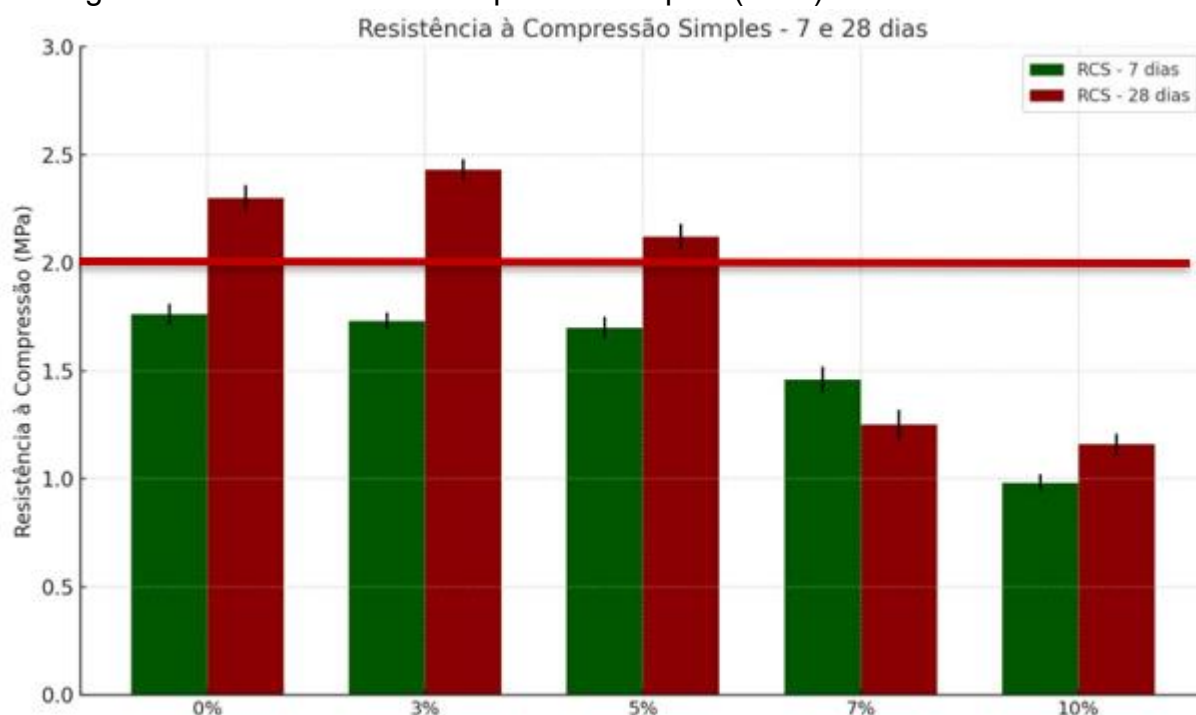
Tabela 32 - Resistência à Compressão Simples (RCS) aos 28 dias

%RC	Idade (dias)	RCS Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
CPR0	28	2,30	0,17	7,40
CPR3	28	2,43	0,36	14,68
CPR5	28	2,12	0,29	13,89
CPR7	28	1,25	0,04	2,82
CPR10	28	1,16	0,03	2,61

Fonte: Autora(Autora).

Legenda: %RC = Porcentagem de resíduo de cal.

Figura 38 – Resistência à compressão simples (RCS) aos 7 e 28 dias.



Fonte: Autora (2025).

Observa-se na figura 38, um gráfico no qual representa que os teores de 0% e 3% apresentaram os melhores desempenhos aos 28 dias, com redução progressiva da resistência à medida que o percentual de resíduo aumentou. O comportamento ao longo do tempo evidencia o impacto negativo de teores elevados de resíduo da mineração na evolução da resistência mecânica dos tijolos solo-cimento.

5.14.1 Análise Estatística para Resistência à Compressão Simples – Resíduo de Cal

Tabela 33 - Teste de Shapiro-Wilk para os corpos de prova com diferentes porcentagens de Resíduo de cal (CPR), 7 dias.

Formulação	W-Stat	p-valor	$\alpha = 0,05$	Distribuição Normal
CPR 0%	0.86675	0.1738	0,05	Sim
CPR 3%	0.94889	0.7196	0,05	Sim
CPR 5%	0.83351	0.08638	0,05	Sim
CPR 7%	0.84974	0.1222	0,05	Sim
CPR 10%	0.91002	0.396	0,05	Sim

Fonte: Autora (2025).

A Tabela 33 apresenta os resultados do teste de Shapiro-Wilk aplicado às diferentes formulações com porcentagens de resíduo de cal aos 7 dias. Os valores de p-valor, todos superiores ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), indicam que os dados seguem uma distribuição normal. Assim, é possível aplicar testes estatísticos paramétricos para análise da variância e comparação entre os grupos.

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk foi aplicado aos resultados de resistência à compressão simples (RCS) dos corpos de prova com diferentes teores de resíduo de cal (CPR) aos 28 dias (Tabela 34).

Tabela 34 - Teste de Shapiro-Wilk para os corpos de prova com diferentes porcentagens de Resíduo de cal (CPR), para 28 dias.

Formulação	W-Stat	p-valor	$\alpha = 0,05$	Distribuição Normal
CPR 0%	0.93747	0.6161	0,05	Sim
CPR 3%	0.83257	0.08462	0,05	Sim
CPR 5%	0.8845	0.2472	0,05	Sim
CPR 7%	0.91887	0.4607	0,05	Sim
CPR 10%	0.95201	0.7479	0,05	Sim

Fonte: Autora (2025).

Todos os valores de p obtidos foram superiores ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), o que indica que não há evidências para rejeição da hipótese de normalidade. Dessa forma, conclui-se que os dados seguem distribuição normal, permitindo a aplicação de testes estatísticos paramétricos nas análises subsequentes.

Tabela 35 - Teste de Levene aplicado aos dados de resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias para Resíduo de cal.

Tempo de Cura	Tipo	Valor de p	Homogeneidade das Variâncias
7 dias	Média	0.9868	Homogêneas
28 dias	Média	0.8048	Homogêneas

Fonte: Autora (2025).

O teste de Levene foi aplicado aos dados de resistência à compressão simples aos 7 dias, com base na mediana (Tabela 35). O valor de p -valor (0,9868) foi superior ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), indicando que as variâncias entre os grupos são homogêneas. Assim, os pressupostos de normalidade e homogeneidade de variância foram atendidos, validando o uso de testes estatísticos paramétricos, como a ANOVA.

Para os dados de 28 dias, o teste de Levene também foi realizado com base na mediana (Tabela 37). O resultado obtido ($p = 0,8048$) foi superior ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), indicando que as variâncias entre os grupos são homogêneas. Com isso, os pressupostos de normalidade e homogeneidade de variância foram confirmados, permitindo a utilização de ANOVA paramétrica para a análise comparativa entre os grupos.

Tabela 36 - ANOVA dos valores de resistência à compressão simples (RCS) dos corpos de prova com resíduo de cal aos 7 dias.

Fonte de Variação	GL (Df)	F (Experimental)	F (Crítico)	p-valor
Entre grupos	4	65,43	2,689628	0,00022
Dentro dos grupos	30	-	-	-

Fonte: Autora (2025).

A Tabela 36 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) aplicada aos valores de resistência à compressão simples (RCS) dos corpos de prova com diferentes teores de resíduo de cal aos 7 dias. Observa-se que o valor de F experimental (65,43) foi consideravelmente superior ao F crítico (2,6896), e o p-valor associado (0,00022) foi significativamente inferior ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$). Com isso, conclui-se que há diferença estatística significativa entre as médias dos grupos analisados, indicando que a porcentagem de resíduo de cal influencia a resistência mecânica aos 7 dias.

Tabela 37 - Análise de variância (ANOVA) para os valores de resistência à compressão simples dos corpos de prova com adição de Resíduo de cal, avaliados aos 28 dias de cura.

Fonte de Variação	GL (Df)	F (Experimental)	F (Crítico)	p-valor
Entre grupos	4	51.36	2.689628	0,00536
Dentro dos grupos	30	-	-	-

Fonte: Autora (2025).

O F experimental (51,36) é muito superior ao F crítico (2,6896), o p-valor (0,00536) é muito menor que 0,05. Isso indica que há diferenças estatisticamente significativas entre os grupos, ou seja, a variação na porcentagem de resíduo de cal afeta a resistência aos 28 dias.

A Tabela 37 mostra os resultados da análise de variância (ANOVA), aplicada aos valores de resistência à compressão simples (RCS) dos corpos de prova com diferentes teores de resíduo de cal aos 28 dias. O valor de F experimental (51,36) foi consideravelmente superior ao F crítico (2,6896), enquanto o p-valor (0,00536) foi significativamente inferior ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$). Esses resultados indicam que existem diferenças estatísticas significativas entre as médias das formulações avaliadas, confirmando que a adição de diferentes porcentagens de resíduo de cal influencia o desempenho mecânico do material ao longo do tempo de cura.

Tabela 38 - Resultados do teste de Tukey aplicados às médias de resistência à compressão simples dos corpos de prova após 7 dias de cura para resíduo de cal.

Comparação	Diferença- diff	Limite inferior (lwr)	Limite superior (Upr)	P-ajustado
cpr3-cpr0	- 0.03714286	0.2033195	0.12903380	0.9656275
cpr5-cpr0	0.06571429	0.2318909	0.10046237	0.7804484
cpr7-cpr0	0.30428571	0.4704624	0.13810906	0.0000893
cpr10-cpr0	0.78428571	0.9504624	0.61810906	0.0000000
cpr5-cpr3	0.02857143	0.1947481	0.13760523	0.9868682
cpr7-cpr3	0.26714286	0.4333195	0.10096620	0.0005402
cpr10-cpr3	0.74714286	0.9133195	0.58096620	0.0000000
cpr7-cpr5	0.23857143	0.4047481	0.07239477	0.0021032
cpr10-cpr5	0.71857143	0.8847481	0.55239477	0.0000000
cpr10-cpr7	0.48000000	0.6461767	0.31382334	0.0000000

Fonte: Autora (2025).

Pelo teste Tukey, é possível verificar que nas comparações entre, cpr7 vs cpr0, cpr10 vs cpr0, os valores de p são menores que 0,05, indicando a adoção da hipótese alternativa. Isso demonstra que há diferenças estatisticamente significativas entre essas combinações de amostras. Dessa forma, observa-se que as combinações de até cpr5-cpr0, ou seja, não há diferença significativa entre os grupos até 5% de RC, confirmando a tolerância estatística até esse teor, corroborando com o resultado apresentado na tabela 25 de Resistência à Compressão Simples (RCS) da cal aos 7 dias e que a partir de 7%, há queda significativa. A formulação com 10% de resíduo destacou-se por apresentar as maiores diferenças, evidenciando um impacto negativo na resistência à compressão simples com o aumento do teor de resíduo. Consolidando o limite técnico e estatístico em torno de 3%.

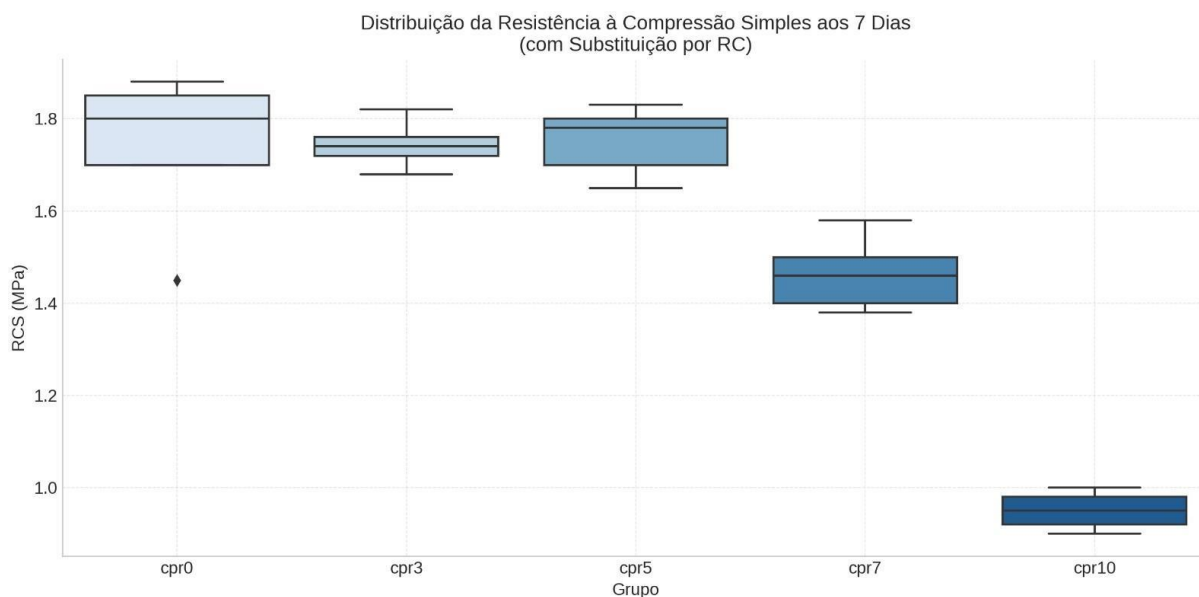
Tabela 39 - Resultados do teste de Tukey aplicados às médias de resistência à compressão simples dos corpos de prova após 28 dias de cura para resíduo de cal.

Comparação	Diferença- diff	lwr	Upr	P adj
cpr3-cpr1	0.13428571	-0.2087721	0.47734348	0.7866633
cpr5-cpr1	- 0.17857143	-0.5216292	0.16448634	0.5643322
cpr7-cpr1	- 1.04428571	-1.3873435	-0.70122795	0.0000000
cpr10-cpr1	- 1.13285714	-1.4759149	-0.78979937	0.0000000
cpr5-cpr3	- 0.31285714	-0.6559149	0.03020063	0.0872100
cpr7-cpr3	- 1.17857143	-1.5216292	-0.83551366	0.0000000
cpr10-cpr3	- 1.26714286	-1.6102006	-0.92408509	0.0000000
cpr7-cpr5	-0.86571429	-1.2087721	-0.52265652	0.0000004
cpr10-cpr5	-0.95428571	-1.2973435	-0.61122795	0.0000001
cpr10-cpr7	-0.08857143	-0.4316292	0.25448634	0.9429519

Fonte: Autora (2025).

O teste de Tukey realizado para os dados de resistência à compressão simples (RCS) aos 28 dias (Tabela 39) revelou que não houve diferenças estatisticamente significativas entre as formulações com 0%, 3% e 5% de resíduo de cal. Em contrapartida, as formulações com 7% e 10% apresentaram diferenças significativas em relação às formulações com teores menores, evidenciando a redução na resistência com o aumento do resíduo. A comparação entre CPR 10% e CPR 7%, porém, não mostrou diferença significativa, indicando que a redução da resistência tende a estabilizar-se após 7% de resíduo.

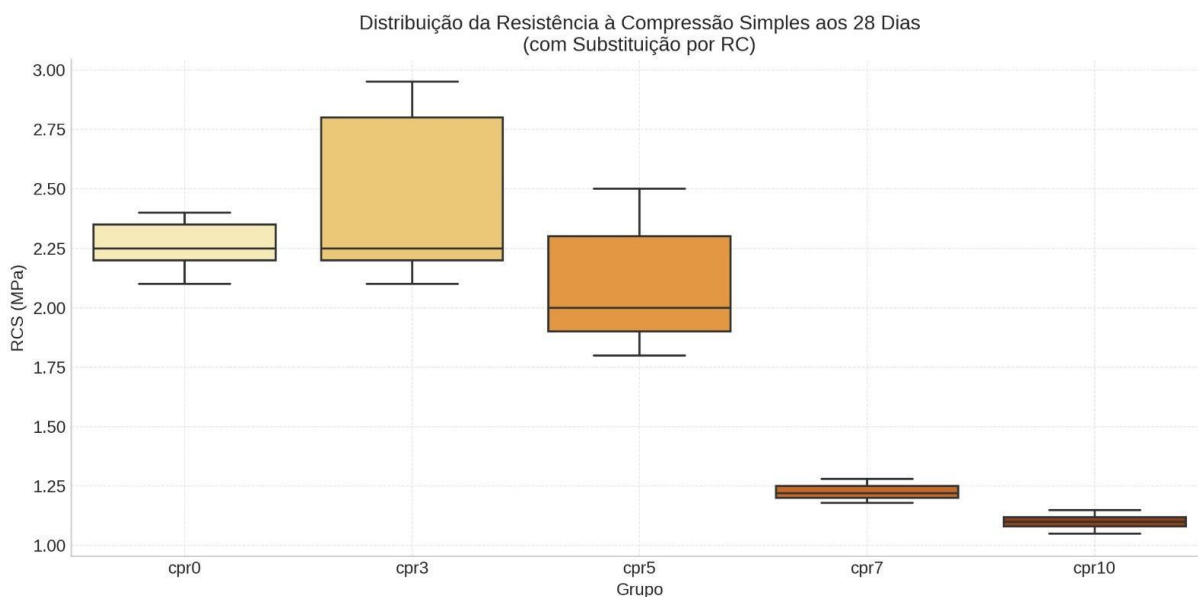
Figura 39 - Distribuição da resistência à compressão simples (RCS) aos 7 dias para diferentes teores de RC



Fonte: Autora (2025).

A Figura 39 mostra a distribuição dos valores de resistência à compressão simples (RCS) para verificação da substituição parcial de cimento por resíduo (RC) e aos 7 dias nos traços analisados, foi realizado o teste estatístico para as amostras. Observa-se que os grupos cpr1 (controle, sem substituição), cpr3 e cpr5 mantêm valores médios de RCS relativamente elevados e próximos entre si, com medianas superiores a 1,6 MPa. No entanto, a partir do teor de 7%, ocorre uma queda acentuada nos valores de resistência, sendo mais expressiva no grupo cpr10, cuja mediana se aproxima de 1,0 MPa, evidenciando forte comprometimento da capacidade mecânica do material nessa condição. Os grupos cpr7 e cpr10 também apresentam maior dispersão dos dados, com presença de outliers negativos, sugerindo instabilidade no comportamento mecânico dos corpos de prova. Essa tendência indica que teores superiores a 5% de substituição por RC influenciam negativamente o ganho de resistência em idade precoce, tornando-se menos adequados para aplicações em que a resistência inicial é um fator crítico.

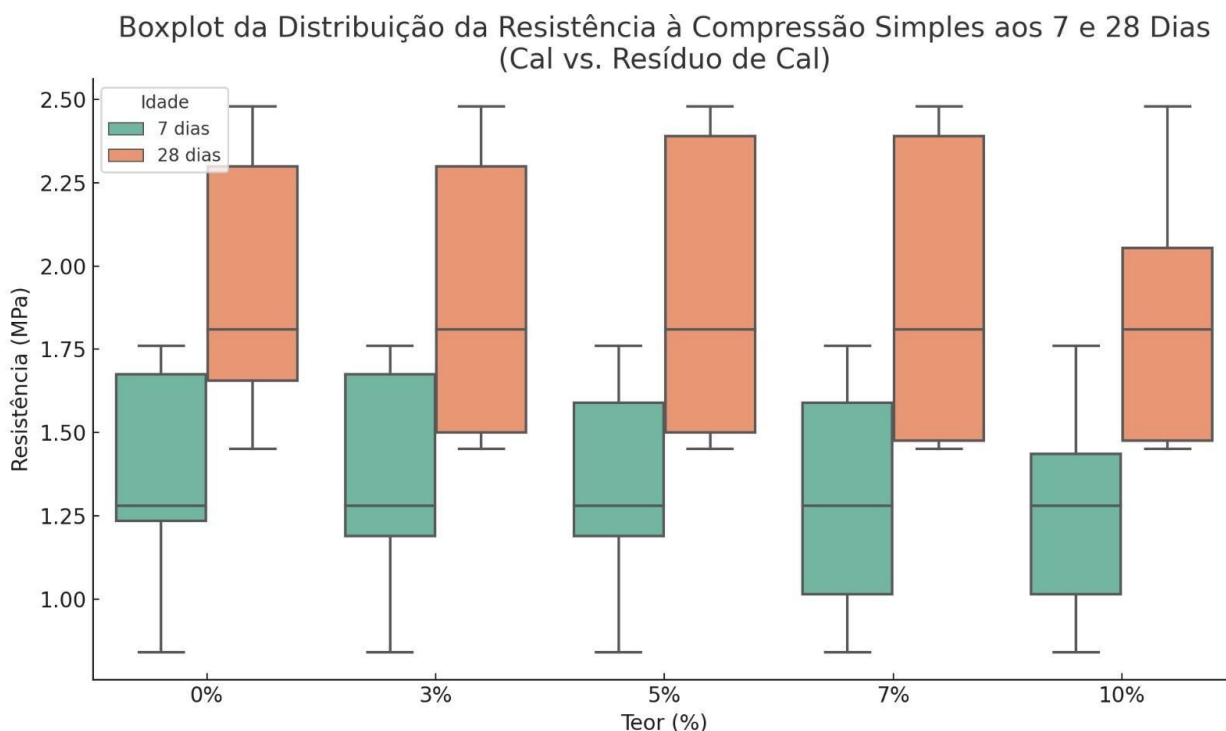
Figura 40 – Distribuição da Resistência à Compressão Simples aos 28 Dias para Diferentes Teores de Substituição por RC



Fonte: Autora (2025).

A Figura 40 apresenta a distribuição dos valores de resistência à compressão simples (RCS) aos 28 dias, considerando diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de Cal (RC). Observa-se que a formulação com 3% de RC (cpr3) obteve o melhor desempenho, com mediana superior à do grupo controle (cpr1) e ampla faixa interquartil, indicando boa resposta mecânica, ainda que com certa variabilidade. O grupo cpr5 apresentou desempenho intermediário, enquanto cpr7 e cpr10 registraram reduções expressivas na resistência, com medianas em torno de 1,3 Mpa, valor inferior ao limite mínimo de 2,0 MPa estabelecido pela NBR 8491:1984. A presença de outliers no grupo cpr3 sugere variações pontuais, sem comprometer sua superioridade estatística. De modo geral, os resultados indicam que teores acima de 5% de substituição comprometem significativamente o ganho de resistência ao longo do tempo, ao passo que a adição de 3% de RC se mostrou a mais adequada para a formulação dos tijolos solo-cimento neste estudo.

Figura 41 - Boxplot da RCS (7 e 28 dias) – (cal vs resíduo de cal)



Fonte: Autora (2025).

A partir dos dados apresentados na figura 41, observa-se um comportamento crescente na resistência à compressão simples (RCS) entre os períodos de 7 e 28 dias, independentemente do teor de substituição adotado. Esse avanço é esperado e reflete a continuidade das reações de hidratação ao longo do tempo de cura, o que favorece o ganho de resistência mecânica nas formulações de solo-cimento.

Nesse contexto, as formulações com 0% e 3% de substituição por cal ou resíduo de cal apresentaram comportamentos similares, com distribuições de resistência que revelaram valores médios mais elevados e menor dispersão — indicando maior estabilidade e confiabilidade dos dados. A formulação com 3% destacou-se como ponto de equilíbrio, favorecendo o ganho de resistência aos 28 dias sem comprometer de forma significativa o desempenho nas fases iniciais de cura.

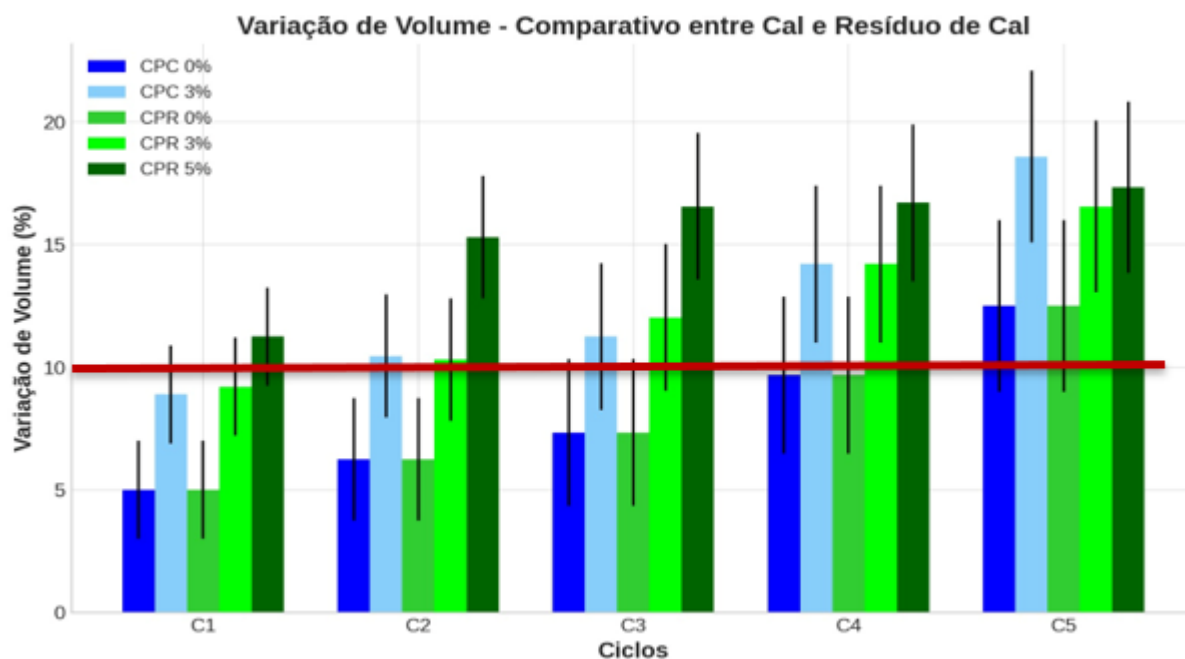
Por outro lado, a partir de 5% de substituição, verifica-se uma tendência de redução gradual da resistência, com valores medianos decrescentes e aumento da dispersão dos dados, sobretudo nas idades iniciais. As formulações com 7% e 10% apresentaram os menores resultados, com destaque para o comprometimento acentuado da resistência aos 7 dias, indicando limitação na capacidade de ganho de resistência em condições de substituição mais agressiva.

Esses resultados sugerem que a adição moderada de cal ou de seu resíduo pode ser adotada de forma técnica e sustentável até o limite de 3%, enquanto proporções superiores comprometem significativamente o desempenho mecânico dos tijolos ao longo do tempo de cura.

5.15 ENSAIO DE DURABILIDADE POR IMERSÃO E SECAGEM

A durabilidade de materiais cimentícios estabilizados com aditivos alternativos como cal e resíduo de cal é um fator crítico para o seu desempenho em longo prazo, especialmente quando expostos a ciclos de molhagem e secagem. Neste estudo, foram avaliados corpos de prova (CPs) de solo-cimento com diferentes teores de substituição do cimento por cal (CPC) e por resíduo de cal (CPR), utilizando o traço 1:4 (solo:aglomerante), submetidos a 5 ciclos de envelhecimento acelerado, com observação da variação de volume e perda de massa. A Figura 42 apresenta um gráfico comparativo que ilustra a variação de volume entre os traços com cal e com resíduo de cal.

Figura 42 - Gráfico da Variação de Volume- Comparativo entre Cal e Resíduo de Cal



Fonte: Autora (2025).

Tabela 40 - Variação da Perda de Massa (%) por Ciclos de Secagem e Molhagem nos Corpos de Prova com Diferentes Teores de Cal

TRAÇOS	PERDA DE MASSA (%)				
CPC0%	70.85	75.56	73.85	80.37	80.26
CPC3%	40,80	50,25	71,03	80,80	85,52

Fonte: Autora (2025).

De acordo com os dados da tabela 40, os resultados de perda de massa indicam que a adição de resíduo influenciou o comportamento das amostras durante o aquecimento em estufa. O traço CPR0%, sem resíduo, apresentou as maiores perdas, o que indica maior quantidade de umidade e materiais que evaporam com facilidade. A comparação entre os traços CPC0% e CPC3% revela que a adição de 3% de cal reduziu significativamente a perda de massa nas etapas iniciais do aquecimento em estufa. Enquanto o traço sem cal apresentou valores elevados e estáveis, o traço com cal mostrou perdas menores no início e aumento gradual nas medições seguintes. Esse comportamento sugere que a cal contribui para uma secagem mais controlada, possivelmente ao reagir com a umidade ou estabilizar parte dos compostos presentes na mistura.

Tabela 41 - Variação da Perda de Massa (%) por Ciclos de Secagem e Molhagem nos Corpos de Prova com Diferentes Teores de Resíduo de Cal

TRAÇOS	PERDA DE MASSA (%)				
CPR0%	70.85	75.56	73.85	80.37	80.26
CPR3%	36.67	77.23	79.94	83.86	87.20
CPR5%	30.38	36.15	71.30	84.41	86.73

Fonte: Autora (2025).

Vale destacar que o traço CPR0%, utilizado como corpo de prova controle, apresentou perdas de massa elevadas e relativamente estáveis ao longo dos ciclos, variando entre 70,85% e 80,37%. Esses valores indicam que,

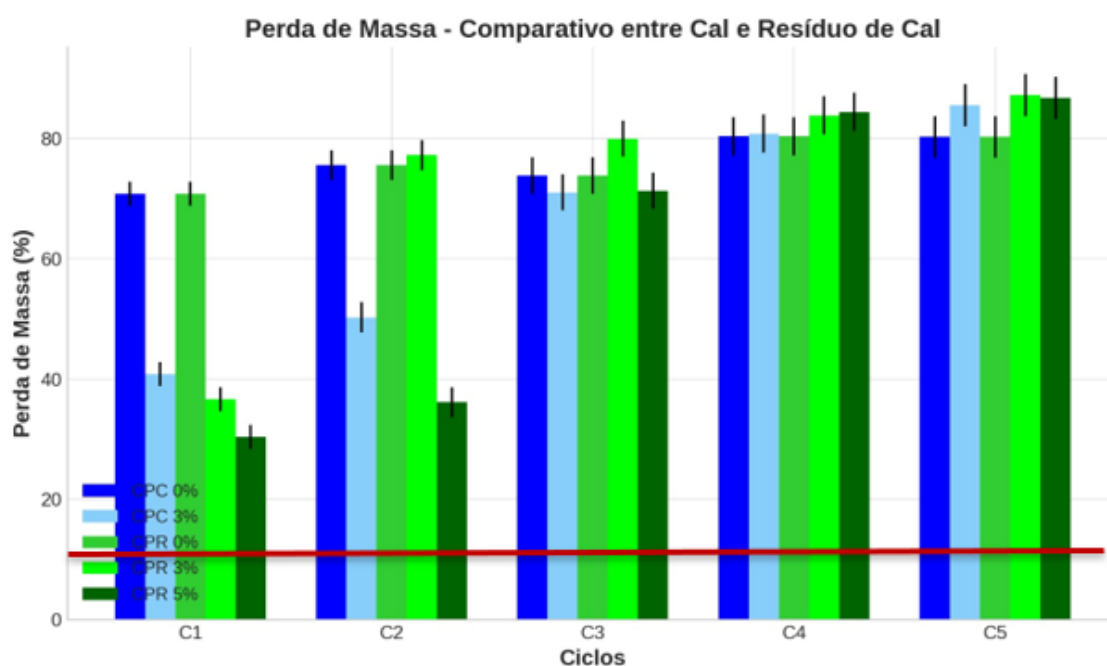
na ausência de resíduo de cal, o material apresenta baixa resistência à degradação provocada pelos ciclos sucessivos de molhagem e secagem, sendo mais suscetível à lixiviação e desagregação superficial.

Ao analisar o traço CPR3%, observa-se uma perda inicial significativamente

menor (36,67%). No entanto, nos ciclos subsequentes, os valores de perda se aproximam dos verificados no traço controle, o que sugere que o efeito estabilizante do resíduo de cal foi limitado ou teve sua atuação retardada. Esse comportamento pode indicar uma formulação instável, em que o resíduo de cal não reagiu de maneira homogênea com os constituintes do solo-cimento.

Por sua vez, o traço CPR5 apresentou as menores perdas de massa nos dois primeiros ciclos (30,38% e 36,15%), demonstrando um desempenho inicial mais eficaz frente à ação da água. Entretanto, nos ciclos seguintes, houve um crescimento expressivo nas perdas, que atingiram até 86,73%, revelando que a proteção conferida pelo resíduo de cal tem caráter temporário. Esse padrão pode estar associado à saturação do efeito pozolânico ou à ativação de reações secundárias, comprometendo a integridade do material com o avanço da degradação. A figura 43, a seguir, mostra a comparação de perda de massas entre as amostras de cal e resíduo de cal

Gráfico comparativo da perda de massa entre amostras com cal e resíduo de cal.



Fonte: Autora (2025).

Considerando que o limite de perda de massa para produção de solo-cimento é de 10% (CEPED), o traço de 3% com substituição do cimento por de cal e resíduo de cal apresentaram perdas de massa aproximadas. Al-Subari e Ekinci (2022) observaram no ensaio de durabilidade que, independentemente da mistura e de outras

variáveis, as amostras de maior resistência foram encontradas ao diminuir o teor de substituição, em função do fechamento dos poros no processo de compactação. De acordo com Nascimento (2021), é possível afirmar que um aumento na substituição do cimento acima dos 3% estudados nesta pesquisa resultará em perda de massa.

6 CONCLUSÃO

- Os resultados dos ensaios físicos e químicos demonstraram que o solo utilizado, oriundo da Serra do Gavião (PI), apresenta características compatíveis com a produção de tijolos solo-cimento, exigindo, no entanto, ajustes granulométricos, como adição de areia, para aprimorar sua plasticidade e desempenho.
- A cal hidratada (CH II) e o resíduo de cal de mineração analisados apresentaram composição química rica em óxidos como CaO e MgO, evidenciando elevado potencial pozolânico e capacidade aglomerante, o que contribuiu positivamente para o desenvolvimento das propriedades mecânicas e físico-químicas dos corpos de prova.
- Todos os corpos de prova avaliados atenderam ao limite de absorção de água estabelecido pela ABNT NBR 8491:2012 ($\leq 20\%$). As formulações CPC 3% e CPR 3% destacaram-se por apresentarem os menores valores médios de absorção (12,17 % e 10,39 %, respectivamente), evidenciando melhor desempenho frente à ação da água. As demais formulações, embora com absorções mais elevadas, permaneceram dentro dos parâmetros normativos, demonstrando conformidade com os requisitos exigidos.
- Os ensaios de compactação evidenciaram um ponto ótimo de umidade em torno de $1.66\% \pm 2$ e massa específica seca máxima de $1,791 \text{ g/cm}^3$, condições ideais que proporcionaram boa trabalhabilidade e densidade ao material, fundamentais para a produção de tijolos de qualidade.
- Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples indicaram que os corpos de prova com substituição parcial de 3% de cal e 3% de resíduo de cal apresentaram os melhores desempenhos mecânicos após 7 e 28 dias de cura.
- As formulações que utilizaram 3% de substituição de cimento por resíduo de cal mostraram bom desempenho nos ensaios de absorção de água e durabilidade por ciclos de imersão e secagem, apresentando perda de massa inferior a 10%, em conformidade com os critérios da ABCP.
- A partir das análises estatísticas realizadas (Shapiro-Wilk, Levene, ANOVA e Tukey), concluiu-se que a substituição parcial do cimento por cal e por resíduo de cal influenciou significativamente a resistência à compressão simples (RCS)

dos corpos de prova. Aos 28 dias, a formulação com 3% de substituição apresentou os melhores resultados de resistência, superando inclusive o traço de referência,

enquanto teores a partir de 5% provocaram queda progressiva da RCS e aumento da variabilidade dos resultados. Dessa forma, o teor de 3% destacou-se como o mais eficiente e estatisticamente superior para o ganho de resistência dos tijolos solo-cimento.

- O ensaio de durabilidade demonstrou que a substituição de 3% de cimento por cal ou resíduo de cal reduziu as perdas de massa nos ciclos iniciais, indicando maior estabilidade frente à degradação. Contudo, teores acima de 3% resultaram em aumento progressivo da perda de massa, ultrapassando o limite recomendado pelo CEPED e comprometendo a durabilidade dos tijolos solo-cimento.
- A aplicação do modelo estatístico demonstrou coerência com os resultados experimentais, validando a formulação CPC 3% e CPR 3%, como a composição otimizada para produção de tijolos solo-cimento mais sustentáveis, viáveis tecnicamente e com potencial de aplicação comercial.

Conclui-se, portanto, que a substituição parcial de cimento por cal hidratada ou resíduo de cal em proporções de 3% é tecnicamente viável e ambientalmente vantajosa, alinhando-se aos princípios da economia circular e promovendo o reaproveitamento de resíduos industriais no setor da construção civil.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Diante das condições em que esta pesquisa foi desenvolvida, há outros parâmetros que podem ainda ser analisados e estudados de maneira mais aprofundada para futuros trabalhos relacionados à fabricação de tijolo solo-cimento, como as sugeridas a seguir:

- ✓ Realizar um estudo da viabilidade econômica do uso de tijolo solo-cimento com a substituição parcial da formulação encontrada neste estudo;
- ✓ Executar um estudo do conforto acústico do tijolo solo-cimento comparando ao tijolo de cerâmica convencional.
- ✓ Testar os resultados da formulação com 3 % da cal e de resíduo da cal no tijolo solo-cimento.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833**: Norma Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491**: Norma Tijolo de Solo Cimento - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . **NBR 8492**: Norma Tijolo de Solo Cimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7175: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833**: Norma Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Norma Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO TIJOLO ECOLÓGICO, **ANITECO**, 2020. Disponível em: <https://www.aniteco.org.br>. Acesso em: 30 jan. 2025.
- AI-SUBARI, L.; EKINCI, A. **Avaliação de resistência e durabilidade de borracha de pneu triturada estabilizada com argila aluvial cimentada artificialmente. Construção e Materiais de Construção**, v. 345, pág.128312, 2022.
- ALBUQUERQUE, D. D. M.; ANDRADE NETO, J. S.; AMORIM JUNIOR, N. S.; . RIBEIRO, D. V. **Propriedades das argamassas de revestimento contendo resíduo proveniente da produção do TiO₂ (MNR)**. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132019653752562> Cerâmica 65, p.340-350,2019. Acesso em: 30 jan. 2025.
- BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de construção: novos materiais para construção civil**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2025.
- BLOIS, L.; LAY-EKUAKILLE, A. Environmental impactos from atmospheric emission of heavy metals: A case study of a cement plant. **Measurement: Sensors**, v. 18, p. 100313, dez. 2021.

CARVALHO, R. S. de S. **Estudo da viabilidade da utilização da fibra de coco babaçu em formulações de tijolo solo-cimento**. 2019. 78 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Piauí, 2019. Disponível em: http://bia.ifpi.edu.br:8080/jspui/bitstream/123456789/780/2/2019_dis_rsscavvalho.pdf. Acesso em: 30 jan. 2025.

DANTAS, N. K. P. D. **Estudo do comportamento de tijolos de solo-cimento com substituição de solo por resíduos da construção civil**. 2020. 76 f. Dissertação. Instituto Federal Goiano, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/1286>. Acesso em: 26 jan. 2025.

DALVI, M. B. **A sustentabilidade como premissa para a seleção de materiais**. 2020. 194 f. Tese de doutorado. Universidad del Bío-Bío, Concepción/ Chile, 2014.

DIAS, C. A. C. M.; SANCHEZ, R. ; MONTEIRO, S. N. ; VIEIRA, C. M. F. **Avaliação das propriedades físicas mecânicas de cerâmica vermelha incorporada com lama de alto forno**. In: 19º Congresso brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Campos do Jordão. Anais do 19ºCBCIMat. 2016.

DUARTE, J. B.; RAMOS FILHO, R. E. B; FONSÊCA, N. J. M.; DIAS, L. N.; SILVA, V. M.; ACCHAR, W. **Adição conjunta do resíduo de cerâmica vermelha e da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na produção de tijolos ecológicos**. Revista Princípios. Paraíba, v. 59, n. 4, 2022.

ECO MÁQUINAS. **Como construir uma casa com tijolo ecológico em 2023?**. 2023. Disponível em: <https://ecomaquinas.com.br/como-construir-uma-casa-com-tijoloecologico-em-2023/>. Acesso em: 28 fev. 2025.

EUPHROSINO, C. A. e FONTANINI, P. S.P. **Análise do solo utilizado na fabricação de tijolos solo-cimento para habitação de interesse social em Limeira-SP**. 3º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos – WTPSC, 2021.

EUPHROSINO, Camila A.; FONTANINI, Patricia S.P. Análise do solo utilizado na fabricação de tijolos solo-cimento para habitação de interesse social em Limeira-SP. In: 3º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos – WTPSC, 3., 2021. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2021. p. 1–6. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/tecsic/article/view/1315>. Acesso em: 27 out. 2024.

ENERGY TECHNOLOGY PERSPECTIVES. **Energy Technology Perspectives 2020. Paris, 2020**. Disponível em: Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>. Acesso em: 27 janeiro de 2025

FERNANDES, M. et al. **Comportamento térmico de pastas de cimento: análise TG/DTG e implicações estruturais.** *Ibracon Structures and Materials Journal*, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/7C4qg4tWbgVYmCbQdwMKJgf/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 9 jul. 2025.

FERRARI, V. J. et al. (2014). **Tijolos vazados de solo-cimento produzidos com solo da Região do Arenito Caiuá do Paraná.** *Ambiente Construído*, 14(3), 131-148, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000300011>. Acesso em: 9 jul. 2025.

FONTOLAN, Beatrice Lorenz; PRETTO BIASI, Bárbara; RECALCATTI, Sandileia; IAROSINSKI NETO, Alfredo. Análise discriminante entre práticas sustentáveis e certificações em empresas da construção civil. **Revista de Gestão e Projetos**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 143–170, 2022. DOI: 10.5585/gep.v13i2.22143. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/gep/article/view/22143>. Acesso em: 27 out. 2024.

FERREIRA, Regis de C.; CUNHA, Ananda H. N. **Quality evaluation of soilcement-plant residue bricks by the combination of destructive and nondestructive tests.** Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n8p543-549>. Acesso em: 27 out. 2024.

FONSÊCA, Nayara Jhêssica Marques da. Potencial de substituição do cimento pela cal em tijolos de solo-cimento com incorporação de resíduo cerâmico. 2018. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

FLEESON, W, et al. Estudo da calcinação de rejeito de mineração de carvão para aplicação como pozolana. **Journal of Personality and Social Psychology**, v. 1, n. 1, p. 1188–1197, 2017.

GIORDANI, C. **Influência da cal hidratada no comportamento de argamassas mistas.** 2017. 174 f. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: UFRGS, 2017.

GIULIO, Gabriela Marques Di; GÜNTHER, Wanda R. **Inovações nas práticas e ações rumo à sustentabilidade.** São Paulo: Editora da Faculdade de Saúde Pública Universidade de São Paulo, 2019.

GÓIS, L. C. **Estudo da incorporação da cal em composições binárias de solo-cimento para produção de tijolos maciços.** 2012. 119 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

JOHANN, A. D. R. **Metodologia para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação da Porosidade de um Solo Siltoso Tratado com Cal em Diferentes Tempos de Cura.** Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2013.

LIMA, C.S.B.; CORDEIRO, L.C.A.; RIBEIRO, R.C., JOBEL JÚNIOR,V.; GUIMARÃES, W.S.; BENARROSH, P.F.P.M. **Produção, utilização e vantagens do cimento Portland e cp iv. Revista Farociencia**, Porto Velho, c, 4, n. 1, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.36703/farociencia.v4i1.161>. Acesso em: 08 mar. 2025.

LIMA, M. C. A; SILVA, A. K. B; SILVA JUNIOR, M. A. B . Certificação ambiental de habitações: um instrumento para ações sustentáveis na construção civil. **Electronic Journal "Fórum Ambiental da Alta Paulista"**, [S. l.], v. 16, n. 2, 2020. DOI: 10.17271/1980082716220202326. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/2326. Acesso em: 27 out. 2024.

MADIRISHA, M. M.; DADA, O. R.; IKOTUN, B. D. Chemical fundamentals geopolymers in sustainable construction. **Materials Today Sustainability**, v. 27, p. 100842, set. 2024.

MARTINS, K. H; PUNHAGUI, K. R. G; JOHN, V. M. **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção**: cal. São Paulo: Sidac, 2022.

MASUERO, Angela Borges. Desafio da Construção Civil: crescimento com sustentabilidade ambiental. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 26, n. 04, p. e13123, 2021.

MENEZES, R. M. R. O. et al. Efeito do teor de água e tamanho de partícula na decomposição térmica de pastas de cimento moídas. **Revista Matéria**, v. 23, n. 1, e-12206, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/85Y7qdyPFp6rRFsrKGMNFpm/>. Acesso em: 9 jul. 2025.

MOHAMAD, N. *et al* Environmental impact of cement production and Solutions: a review. **Materials Today: Proceedings**, mar. 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/349877298_Environmental_impact_of_cement_production_and_Solutions_A_review. Acesso em: 9 jul. 2025.

MOURA, E. M.et al. Caracterização e uso da cinza do bagaço de cana-de- açúcar em tijolos de solo-cimento. **Ambiente Construído**, 21. 1 ed. 69-80, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100494>. Acesso em: 10 nov. 2024.

NASCIMENTO, Á.M.; FEITOSA A. O.; ALMEIDA, T. S.; LACERDA, D. M. **Tijolo modular de solo-cimento como material na construção civil**. Inter Scientia, Volume 6,2018, p. 187-202. Disponível em: <https://periodicos.unipe.br/index.php/interscientia/article/download/645/527>. Acesso em: 8 de jan.2025.

NASCIMENTO, E. et al. Soil-cement brick with granite cutting residue reuse, **Journal of Cleaner Production**, Volume 321, 2021.

OJURI, O. O.; ADAVI, A. A.; OLUWATUYI, O. E. Geotechnical and environmental evaluation of lime–cement stabilized soil–mine tailing mixtures for highway construction. **Transportation Geotechnics**, [s.l.], v. 10, p. 1-12, mar. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.10.001>. Acesso em: 18 de jan de 2025.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHEIRO, M.V.; VELÁSQUEZ, S.; BONILLA, M. **Determination of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking residue. Thermogravimetric analysis studies on FC3R lime pastes. Cement and Concrete Research**, V.33, p 1085 – 1091, July 2003.

PINTO, L. M. **Estudo de tijolos de solo cimento com adição de resíduo de construção civil**. TCC Graduação - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015. Disponível em: 57 <http://coral.ufsm.br/gepetecs/images/pdf/TCC--Lucas-Mazzoleni-Pinto---correes.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2025.

QUEIROZ, M. E. R. de; OLIVEIRA, Jaqueline M. de; LORDSLEEM JÚNIOR, A. C. **Boas práticas na redução, reutilização e reciclagem de resíduos na construção de edifícios**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO. Volume 12, 2021. Pages 1–8. DOI: <https://doi.org/10.46421/sibragec.v12i00.436>. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sibragec/article/view/436>. Acesso em: 18 jan. 2025.

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, [s.l.], v. 21, n. 8, p.543-549, ago. 2017. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n8p543-549>. Acesso em: 18 jan. 2025.

SANTOS, D. R., MENDONÇA, R. S., ANJOS, M. J., & LOPES, R. T. **Analysis of hydrated lime using X-ray fluorescence spectrometry**. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 328(2), 637-644, 2021.

SANCHES, B.; GOMES, N. T.; BAHIANSE, A. V.; OLIVEIRA, R. P.; ALEXANDRE, J. Tijolo de Solo-Cimento: incorporados de resíduos e viabilidade na construção civil no Brasil. Research, Society and Development, Vol. 11, nº 2, 2022.

SILVA, T. R., CECCHIN, D., & AZEVEDO, A. R. (2021). **Technological Characterization of PET –Polyethylene Terephthalate**. Materials, v. 14, n. 17.

SIQUEIRA, F.B.; HOLANDA, J.N.F. Reuse of grits waste for the production of soil–cement bricks. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 131, p.1- 6, dez. 2013. Elsevier BV. Acesso em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.040>. Acesso em: 18 jan. 2025.

SOARES, R. A. L.; SOARES R. A. L. & LIMA, Y. C. C. **Avaliação do tijolo ecológico produzido em Teresina** –PI. 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica 15 a 18 de maio, Águas de Lindoia – SP, 2016.

SOUZA, L. K. **Limites de Atterberg e sua correlação com a granulometria e matéria orgânica dos solos**. Brazilian Journal of Biosystems Engineering. Volume 12, 2018, p. 185-196, ISSN 2359-6724, <https://doi.org/10.18011/bioeng2018v12n2p185-196>. Disponível em: <http://https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/Qx3zyWVxQJPst4DWZyY3WqD/abstract/?lang=em#>. Acesso em: 28 fev. 2025.

SOUZA, R. B. Apostila de ensaios preliminares – **Cerâmica Vermelha**. Teresina-PI, 2015.

SKIBSTED, J.; SNELLINGS, R. **Reatividade de materiais cimentícios suplementares (SCMs) em misturas de cimento**, Cem. Concr. Res. 124, 105799, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105799>, 2019.

THOMAS, J. I. et al Mud bricks using oyster shells. In: DASGUPTA, K. et al. **Proceedings of SECON'19**. Cham: Springer, 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, v. 46.

Zhang, M.; Li, W.; Wang, Z. & Liu, H. (2023a) Urbanization and production: Heterogeneous effects on construction and demolition waste. **Habitat International**, 134, 102778, <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2023.102778>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2023.102778>. Acesso em: 28 fev. 2025.

APÊNDICES

APÊNDICE A - ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

		ENSAIO DE COMPACTAÇÃO			
Cilindro (g)	2380	2380	2380	2380	2380
Amostra úmida + cilindro (g)	4235	4360	4535	4605	4550
Amostra úmida (g)	1855	1980	2155	2225	2170
Volume do cilindro (cm³)	1004,8	1004,8	1004,8	1004,8	1004,8
Massa específica natural (g/cm³)	1,84	1,97	2,14	2,21	2,15
		DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE			
Cápsula N°	1	2	3	4	5
Amostra úmida + cápsula (g)	22,33	25,86	24,49	22,23	27,1
Amostra seca + cápsula (g)	21,51	24,57	23,01	20,64	25,05
Água (g)	0,82	1,29	1,48	1,59	2,05
Cápsula (g)	8,55	7,42	7,17	5,94	8,74
Amostra seca (g)	12,96	17,15	15,84	14,7	16,31
Teor de umidade (g)	6,32%	7,52%	9,34%	10,81%	12,56%
Massa específica aparente seca (g/cm³)	1,71	1,74	1,66	1,66	1,64
Teor de umidade (g)	6,32%	7,52%	9,34%	10,81%	
Massa específica aparente seca (g/cm³)	1,71	1,74	1,68	1,66	

Fonte: Autora (2025).

APÊNDICE B - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES (RCS) - RESULTADO
DA RESISTENCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS) AOS 7 DIAS PARA CAL

	% CAL	CURA DIAS	CP	RCS (MPa)	RCS MÉDIA (MPa)	*DP	**CV (%)
TRAÇO: 1:4	0	7	1	1.82	1.76	0.16	8.85
			2	1.45			
			3	1.87			
			4	1.75			
			5	1.70			
			6	1.92			
			7	1.83			
	3	7	1	1.55	1.59	0.03	1.95
			2	1.62			
			3	1.57			
			4	1.59			
			5	1.61			
			6	1.58			
			7	1.64			
	5	7	1	1.23	1.28	0.06	4.33
			2	1.33			
			3	1.35			
			4	1.22			
			5	1.34			
			6	1.28			
			7	1.24			
	7	7	1	1.25	1.19	0.05	3.95
			2	1.11			
			3	1.21			
			4	1.15			
			5	1.19			
			6	1.22			
			7	1.17			
	10	7	1	0.84	0.84	0.06	7.14
			2	0.87			
			3	0.92			
			4	0.86			
			5	0.74			
			6	0.88			
			7	0.79			

Fonte: Autora (2025).

*DP – Desvio Padrão;

**CV – Coeficiente de Variação

**APÊNDICE C - RESULTADO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)
AOS 28 DIAS PARA CAL**

	% CAL	CURA DIAS	CP	RCS (MPa)	RCS MÉDIA (MPa)	*DP	**CV (%)
TRAÇO: 1:4	0	7	1	2.30	2.30	0.17	7.40
			2	2.05			
			3	2.49			
			4	2.14			
			5	2.52			
			6	2.30			
			7	2.27			
	3	7	1	2.62	2.48	0.19	7.80
			2	2.40			
			3	2.12			
			4	2.40			
			5	2.63			
			6	2.67			
			7	2.55			
	5	7	1	1.90	1.81	0.16	8.77
			2	2.05			
			3	1.70			
			4	1.67			
			5	1.60			
			6	1.87			
			7	1.89			
	7	7	1	1.50	1.50	0.05	3.01
			2	1.54			
			3	1.47			
			4	1.46			
			5	1.44			
			6	1.56			
			7	1.53			
	10	7	1	1.39	1.45	0.15	10.14
			2	1.44			
			3	1.16			
			4	1.56			
			5	1.59			
			6	1.55			
			7	1.46			

Fonte: Autora (2025).

*DP – Desvio Padrão;

**CV – Coeficiente de Variação

**APÊNDICE D - RESULTADOS DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES-
RCS PARA RESIDUO DE CAL EM 7 DIAS**

	% RC	CURA DIAS	CP	RCS (MPa)	RCS MÉDIA (MPa)	*DP	**CV (%)
TRAÇO: 1:4	0	7	1	1.82	1.76	0.16	8.85
			2	1.45			
			3	1.87			
			4	1.75			
			5	1.70			
			6	1.92			
			7	1.83			
	3	7	1	1.74	1.73	0.07	4.08
			2	1.63			
			3	1.71			
			4	1.82			
			5	1.65			
			6	1.73			
			7	1.80			
	5	7	1	1.67	1.70	0.14	8.02
			2	1.67			
			3	1.81			
			4	1.82			
			5	1.42			
			6	1.76			
			7	1.73			
	7	7	1	1.38	1.46	0.08	5.48
			2	1.43			
			3	1.56			
			4	1.42			
			5	1.58			
			6	1.39			
			7	1.45			
	10	7	1	0.94	0.98	0.06	5.82
			2	0.98			
			3	0.91			
			4	0.96			
			5	1.09			
			6	1.00			
			7	0.97			

Fonte: Autora (2025).

*DP – Desvio Padrão;

**CV – Coeficiente de Variação

**APÊNDICE E - RESULTADO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)
PARA O RESÍDUO DE CAL AOS 28 DIAS**

	% RC	CURA DIAS	CP	RCS (MPa)	RCS MÉDIA (MPa)	*DP	**CV (%)
TRAÇO: 1:4	0	7	1	2.30	2.30	0.17	7.40
			2	2.05			
			3	2.49			
			4	2.14			
			5	2.52			
			6	2.30			
			7	2.27			
	3	7	1	2.14	2.43	0.36	14.68
			2	2.77			
			3	2.09			
			4	2.20			
			5	2.18			
			6	2.95			
			7	2.68			
	5	7	1	2.56	2.12	0.29	13.89
			2	1.81			
			3	2.47			
			4	1.99			
			5	1.87			
			6	2.16			
			7	1.96			
	7	7	1	1.24	1.25	0.04	2.82
			2	1.21			
			3	1.29			
			4	1.27			
			5	1.23			
			6	1.30			
			7	1.22			
	10	7	1	1.14	1.16	0.03	2.61
			2	1.11			
			3	1.16			
			4	1.17			
			5	1.20			
			6	1.17			
			7	1.19			

Fonte: Autora (2025).

*DP – Desvio Padrão;

**CV – Coeficiente de Variação

APÊNDICE F - ABSORÇÃO DE ÁGUA – PARA A CAL

Absorção de água – 0% CAL

CP	Massa (g)		Absorção (%)
	Seca	Saturada	
1	118.19	137.94	16.71
2	122.33	133.35	9.00
3	115.97	130.71	12.71
Absorção média (%)			12.80
Desvio padrão			3.14

Absorção de água – 3% CAL

CP	Massa (g)		Absorção (%)
	Seca	Saturada	
1	116.62	131.49	12.75
2	116.07	129.77	11.80
3	117.00	131.02	11.98
Absorção média (%)			12.17
Desvio padrão			0.42

Absorção de água – 5% CAL

CP	Massa (g)		Absorção (%)
	Seca	Saturada	
1	109.99	125.21	13.83
2	111.45	123.07	10.42
3	113.38	129.65	14.34
Absorção média (%)			12.86
Desvio padrão			1.74

Absorção de água – 7% CAL

CP	Massa (g)		Absorção (%)
	Seca	Saturada	
1	108.79	129.58	19.11
2	110.84	128.79	16.19
3	106.20	128.35	20.85
Absorção média (%)			18.71
Desvio padrão			1.92

APÊNDICE G - ABSORÇÃO DE ÁGUA – CAL

Absorção de água – 10% CAL

CP	Massa (g)		Absorção (%)
	Seca	Saturada	
1	104,76	128.60	16.71
2	108,91	127,95	9.00
3	111,24	130.61	12.71
Absorção média (%)			12,80
Desvio padrão			3.14

ABSORÇÃO DE ÁGUA - RESÍDUO CAL

Absorção de água – 0% RESÍDUO CAL

CP	Massa (g)		Absorção (%)
	Seca	Saturada	
1	118.19	137.94	16.71
2	122.33	133.35	9.00
3	115.97	130.71	12.71
Absorção média (%)			12,80
Desvio padrão			3.14

Absorção de água – 3% RESÍDUO CAL

CP	Massa (g)		Absorção (%)
	Seca	Saturada	
1	114.62	125.79	9.75
2	113.67	123.90	8.99
3	113.50	127.61	12.43
Absorção média (%)			10,39
Desvio padrão			1.47

Absorção de água – 5% RESÍDUO CAL

CP	Massa (g)		Absorção (%)
	Seca	Saturada	
1	106.99	124.88	16.72
2	106.36	125.10	17.61
3	106.54	125.07	17.39
Absorção média (%)			17.24
Desvio padrão			0.37

Absorção de água – 10% RESÍDUO CAL

CP	Massa (g)		Absorção (%)
	Seca	Saturada	
1	101.96	118.84	16.55
2	107.95	126.42	17.10
3	107.84	120.25	11.50
Absorção média (%)			15.05
Desvio padrão			2.52

APÊNDICE H - RESULTADOS DA DURABILIDADE POR SECAGEM E

MOLHAGEM CPC - 0% E 3% CPR – 0%, 3% E 5% - com 60 dias

- Perda de massa CPC de solo-cimento em substituição ao cimento por cal ao final dos 5 ciclos de molhagem e secagem - 1:4. - 0% e 3%

Tabela – Cálculo da perda de massa para 0% de Cal

Ciclo	Mf (média) (g)	Mi (média) (g)	An (média) (%)	Mfc (g)	Pm (%)
1°	124.98	128.00	2.35	37.30	70.85
2°	125.15	128.00	3.00	31.28	75.56
3°	124.51	128.00	2.72	33.47	73.85
4°	123.09	128.00	3.90	25.12	80.37
5°	121.90	128.00	3.83	25.23	80.28

Tabela – Cálculo da perda de massa para 3% de Cal

Ciclo	Mf (média) (g)	Mi (média) (g)	An (média) (%)	Mfc (g)	Pm (%)
1°	124.77	125.66	0.70	74.39	40.80
2°	124.41	125.66	0.99	62.51	50.25
3°	122.68	125.66	2.37	36.40	71.03
4°	120.63	125.66	4.00	24.12	80.80
5°	117.53	125.66	6.46	18.19	85.52

Fonte: Autora, (2025)

Perda de massa CPC de solo-cimento em substituição ao cimento por resíduo de cal ao final dos 5 ciclos de molhagem e secagem - 1:4. - 0% e 3% E 0%,3% e 5%

➤ RESÍDUO DE CAL

Tabela – Cálculo da perda de massa para 0% de Resíduo de Cal

Ciclo	Mf (média) (g)	Mi (média) (g)	An (média) (%)	Mfc (g)	Pm (%)
1°	124.98	128.00	2.35	37.30	70.85
2°	125.15	128.00	3.00	31.28	75.56
3°	124.51	128.00	2.72	33.47	73.85
4°	123.09	128.00	3.90	25.12	80.37
5°	121.90	128.00	3.83	25.23	80.28

Tabela – Cálculo da perda de massa para 3% de Resíduo de Cal

Ciclo	Mf (média) (g)	Mi (média) (g)	An (média) (%)	Mfc (g)	Pm (%)
1°	121.24	121.94	0.57	77.22	36.67
2°	117.89	121.94	3.23	27.76	77.23
3°	117.43	121.94	3.69	25.03	79.94
4°	115.97	121.94	4.89	19.68	83.86
5°	114.23	121.94	6.32	15.60	87.20

Tabela – Cálculo da perda de massa para 5% de Resíduo de Cal

Ciclo	Mf (média) (g)	Mi (média) (g)	An (média) (%)	Mfc (g)	Pm (%)
1°	114.50	115.00	0.43	80.06	30.38
2°	114.36	115.00	0.55	73.42	36.15
3°	112.23	115.00	2.40	33.00	71.30
4°	109.26	115.00	4.99	18.24	84.41
5°	108.51	115.00	6.08	15.25	86.73

Fonte: Autora (2025).