INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO (ILATIT)

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (PPGECI)

ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DE PRODUÇÃO DE TIJOLOS COMPRIMIDOS DE TERRA-CIMENTO (TCTC): ENERGIA INCORPORADA, USO DE CIMENTO E GRAU DE COMPRESSÃO

ERIK JUNIOR PALACIOS FALCON

Foz do Iguaçu

2025

INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO (ILATIT)

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (PPGECI)

ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DE PRODUÇÃO DE TIJOLOS COMPRIMIDOS DE TERRA-CIMENTO (TCTC): ENERGIA INCORPORADA, USO DE CIMENTO E GRAU DE COMPRESSÃO

ERIK JUNIOR PALACIOS FALCON

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECI) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), como requisito parcial a qualificação para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. (Dr.) Gabriel Rodrigues da cunha

Foz do Iguaçu

2025

ERIK JUNIOR PALACIOS FALCON

ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DE PRODUÇÃO DE TIJOLOS COMPRIMIDOS DE TERRA-CIMENTO (TCTC): ENERGIA INCORPORADA, USO DE CIMENTO E GRAU DE COMPRESSÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECI) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), como requisito parcial a qualificação para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

_____
Orientador: Prof. Dr. Gabriel Rodrigues da cunha
UNILA

_____
Prof. Dr. Thiago Lopes Ferreira
UFMG

_____
Prof. Dr. Marcos Martinez Silvoso
UFRJ

Foz do Iguaçu, 30 de setembro de 2025.

Catalogação elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação
Catalogação de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - CENTRAL

P154
Palacios Falcon, Erik Junior
Análise comparativa de modelos de produção de tijolos comprimidos de terra-cimento (TCTC): energia incorporada, uso de cimento e grau de compressão / Erik Junior Palacios Falcon. - Foz do Iguaçu, 2025.
127f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Foz do Iguaçu-PR, 2025.
Orientador: Gabriel Rodrigues da Cunha.

1. Tijolos - Fabricação. 2. TCTC (Tijolos Comprimidos de Terra-Cimento). 3. Tijolos - Composição. 4. Tijolos - Compressão. 5. Tijolos - Desempenho. 6. Energia. I. Cunha, Gabriel Rodrigues da. II. Título.

CDU 691.421

Dedico este trabalho à minha amada G. Katherine M. M., cuja presença leal e ternura constante foram fundamentais para transformar os desafios desta jornada acadêmica e pessoal em conquistas compartilhadas.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha sincera e profunda gratidão ao meu orientador, cuja orientação constante foi essencial para a realização deste trabalho. Sua expertise, paciência e dedicação foram pilares fundamentais ao longo desta jornada acadêmica. A confiança depositada em mim, aliada ao incentivo contínuo e à disponibilidade para esclarecer dúvidas, oferecer feedback construtivo e estimular minhas ideias, foram de valor incalculável. Sou verdadeiramente grato por todo o apoio e encorajamento recebidos. Muito obrigado.

Estendo meus agradecimentos à Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGCI), pela oportunidade de aprofundar minha formação acadêmica. A infraestrutura e o suporte oferecidos pela instituição foram decisivos para a concretização deste trabalho.

Registro também minha gratidão à empresa ALROMA, pela receptividade durante a visita técnica, pela generosidade em compartilhar informações relevantes e pelo acolhimento cordial. A transparência e o comprometimento demonstrados refletem o alinhamento da organização com os valores da pesquisa científica, da sustentabilidade e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Agradeço, igualmente, à equipe técnica da unidade produtiva da RAACH – Fábrica de Tijolos Ecológicos, pela abertura e colaboração durante esta pesquisa. A disposição em compartilhar conhecimentos de forma clara e acessível evidencia o compromisso da empresa com o fortalecimento das relações entre o setor produtivo e o meio acadêmico. Suas práticas sustentáveis, voltadas ao consumo responsável, à gestão eficiente de recursos naturais, à inovação tecnológica local e à construção de parcerias institucionais, são exemplos inspiradores de atuação alinhada aos ODS e à promoção de soluções socioambientais.

Por fim, agradeço aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Thiago Lopes Ferreira e Prof. Dr. Marcos Martinez Silvoso, pela generosidade em dedicar seu tempo à leitura e avaliação deste trabalho. Suas observações e contribuições serão profundamente valorizadas e certamente enriquecerão esta pesquisa.

“O futuro depende do que fazemos no presente”.

Mahatma Gandhi

RESUMO

Esta dissertação realiza uma análise comparativa de diferentes modelos de produção de Tijolos Comprimidos de Terra-Cimento (TCTC), com ênfase na avaliação de parâmetros técnicos e ambientais, nomeadamente o consumo energético, o teor de cimento e o grau de compressão aplicado. No contexto dos desafios ambientais inerentes ao setor da construção civil, os TCTC evidenciando-se como uma alternativa construtiva sustentável, pela ausência do processo de queima e pela utilização de recursos locais. A investigação desenvolveu-se com base numa abordagem metodológica tripartida, compreendendo: (i) uma revisão sistemática da literatura, (ii) a aplicação da Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA), conforme prescrito pela norma ABNT NBR ISO 14031, e (iii) a realização de visitas técnicas a unidades produtivas. Os resultados obtidos revelaram contrastes significativos entre os sistemas de produção manual, semiautomático e automatizado, particularmente no que concerne aos níveis de produtividade e ao impacto energético incorporado no processo produtivo. Verificou-se que variáveis como a força de compressão e a dosagem de cimento são determinantes para o desempenho mecânico dos TCTC, sugerindo o seu potencial para aplicações de natureza estrutural. As práticas operacionais observadas *in loco* evidenciam que, para além da mera eficiência técnica, subsiste uma lógica de sustentabilidade integrada nos processos produtivos. A adoção de ferramentas de gestão ambiental, através do ciclo PDCA, permitiu a interpretação de indicadores de desempenho relevantes, apontando para soluções que transcendem as práticas convencionais. Conclui-se que os resultados desta investigação proporcionam subsídios para reflexões aprofundadas sobre a articulação entre inovação construtiva e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), sobretudo em realidades socioeconómicas diversas.

Palavras-chave: Tijolo, Terra, Cimento, Compressão, Desempenho, Energia, Sustentabilidade.

ABSTRACT

This dissertation conducts a comparative analysis of different production models for Compressed Earth-Cement Bricks (CECB), with emphasis on the evaluation of technical and environmental parameters, namely energy consumption, cement content, and the applied degree of compression. Within the context of the inherent environmental challenges of the construction sector, CECBs distinguish themselves as a sustainable constructive alternative, due to the absence of a firing process and the utilization of local resources. The investigation was developed based on a tripartite methodological approach, comprising: (i) a systematic literature review, (ii) the application of an Environmental Performance Evaluation (EPE), as prescribed by the ABNT NBR ISO 14031 standard, and (iii) the conduction of technical visits to production units. The obtained results revealed significant contrasts among manual, semi-automated, and automated production systems, particularly concerning productivity levels and the embodied energy impact within the production process. It was verified that variables such as compressive force and cement dosage are determining factors for the mechanical performance of CECBs, suggesting their potential for structural applications. The operational practices observed in loco demonstrate that, beyond mere technical efficiency, an integrated logic of sustainability persists within the production processes. The adoption of environmental management tools, through the PDCA cycle, enabled the interpretation of relevant performance indicators, pointing towards solutions that transcend conventional practices. It is concluded that the results of this investigation provide substantial grounds for in-depth reflections on the articulation between constructive innovation and the Sustainable Development Goals (SDGs), especially within diverse socioeconomic realities.

Key words: *Brick, Earth, Cement, Compression, Performance, Energy, Sustainability.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Contexto histórico da evolução da terra-cimento ao longo do tempo 20
Figura 2 - Tipos de TCTC 33
Figura 3 - Blocos interligados 33
Figura 4 - Bloco de terra - Mattone 33
Figura 5 – Tijolo maciço de terra-cimento 34
Figura 6 – Tijolo vazado de terra-cimento 34
Figura 7 - TCTC vazado, tipo canaleta 35
Figura 8 – Medidas padrão dos TCTC vazados, tipo canaleta 36
Figura 9 – Formato e assentamento dos blocos tipo Mattone 37
Figura 10 –Prensas manuais 42
Figura 11 – Variedade dos produtos 42
Figura 12 – Tijolo com altura regulável 42
Figura 13 –Prensas semiautomáticas 43
Figura 14 –Prensas automáticas 44
Figura 15 –Trituradores elétricos 45
Figura 16 – Processadores de terra-cimento 46
Figura 17 – Esteira transportadora 47
Figura 18 – Empilhadeira e acessórios de carga 48
Figura 19 – Robô e vagão Paletizador 48
Figura 20 – Mesa rotatória ergonômica 49
Figura 21 – Configuração para a produção de TCTC a pequena escala 50
Figura 22 – Configuração para a produção de TCTC a média escala 52
Figura 23 – Configuração básica para a produção de TCTC a larga escala 53
Figura 24 - Incidência do grau de compressão e teor de cimento 79
Figura 25 – Terminologia de gestão ambiental - ADA 82
Figura 26 –Modelo Gerencial PDCA 85
Figura 27 –Uso de dados e informações (Executar) 88
Figura 28 –Campo de ação dos indicadores 90
Figura 29 –Diagrama da ADA 93
Figura 30 - Visita técnica - ALROMA 101
Figura 31 – Acompanhamento técnico das operações - ALROMA 102

Figura 32 – Multiprocessador - ALROMA 103
Figura 33 – Layout da planta operacional - ALROMA 103
Figura 34 – Mesa rotatória ergonômica 104
Figura 35 – Paletização automatizado 105
Figura 36 - Reaproveitamento dos resíduos 106
Figura 37 - Visita técnica - RAACH 108
Figura 38 – Terra utilizado na indústria - RAACH 109
Figura 39 – Estocagem do solo 110
Figura 40 - Estabilizador e aditivo 111
Figura 41 – Modelo de produção e Layout - Raach 112
Figura 42 - Processo de cura dos TCTC 115
Figura 43 - Otimização d'água durante a cura dos TCTC 116
Figura 44 - Sistemática de reaproveitamento de resíduos 116
Figura 45 - Comportamento da demanda energética na produção de TCTC 117
Figura 46 - Produtividade dos modelos de produção de TCTC 118
Figura 47 - Custos das maquinárias segundo o modelo produção de TCTC 120
Figura 48 - Energia elétrica incorporada na produção dos TCTC 121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Custo de produção por milheiro de TCTC 53
Tabela 2 - Resistência à compressão de TCTC – incidência do teor de cimento 58
Tabela 3 - Classificação dos equipamentos de compressão para produção de TCTC 60
Tabela 4 - Efeito da taxa de cimento na resistência e durabilidade de TCTC 61
Tabela 5 - Comparativo de terras utilizadas em estudos de TCTC 64
Tabela 6 - Teor de água na moldagem e cura dos TCTC 68
Tabela 7 - Estudos relevantes para análise da RSL 72
Tabela 8 - Estudos relevantes para análise da RSL 73
Tabela 9 - Estudos relevantes para análise da RSL 74
Tabela 10 - Variáveis técnicas mecânicas 76
Tabela 11 - Variáveis técnicas mecânicas 77
Tabela 12 - Variáveis técnicas mecânicas 78
Tabela 13 - Coleção dos dados para os modelos de produção 96
Tabela 14 - Coleção dos dados para os modelos de produção 97
Tabela 15 - Modelos de produção de TCTC 98
Tabela 16 - Produtividade e outras variáveis envolvidos na produção de TCTC 118
Tabela 17 - Custo das maquinárias segundo seu modelo de produção de TCTC 119
Tabela 18 - Energia elétrica incorporada na produção no TCTC 121

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Automático
AA	Aspectos Ambientais
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADA	Avaliação do Desempenho Ambiental
ADA	Avaliação do Desempenho Ambiental
AO	Objetivos Ambientais
BTC	Bloque de Terra Crua
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CDA	Critérios de Desempenho Ambiental
DA	Desempenho Ambiental
IA	Impactos Ambientais
ICA	Indicador de Condição Ambiental
ICD	Indicador-chave de Desempenho
IDA	Indicador de Desempenho Ambiental
IDG	Indicador de Desempenho Gerencial
IDO	Indicador de Desempenho Operacional
ILATIT	Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
ISO	International Organization for Standardization
M	Manual
MA	Meio Ambiente
MEC	Ministério de Educação
PDCA	Plan Do Check Act
PPGECI	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
S-A	Semi Automático
SGA	Sistema de Gestão Ambiental
TCTC	Tijolo Comprimido de Terra-Cimento
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO 12

1.1 JUSTIFICATIVA 13

1.2 OBJETIVOS 14

1.2.1 Objetivo Geral 14

1.2.2 Objetivos Específicos 15

1.3 ESTRUTURA GERAL DA PESQUISA 15

2. TIJOLO COMPRIMIDO DE TERRA-CIMENTO (TCTC) 17

2.1 CONTEXTO HISTÓRICO 18

2.1.1 Antecedentes Históricos e Origens Antigas 18

2.1.2 Evolução Tecnológica e Institucionalização 19

2.1.3 TCTC no Brasil 19

2.2 COMPOSIÇÃO DOS TCTC 21

2.2.1 Terra 21

2.2.1.1 Compactação da Terra 22

2.2.1.2 Parâmetros Técnicos e Critérios de Seleção 23

2.2.1.3 Compatibilidade Terra-Cimento e Estabilização 24

2.2.1.4 Aspectos Ambientais e Sustentabilidade 25

2.2.2 Cimento 26

2.2.2.1 Aspectos Ambientais e Sustentabilidade 26

2.2.2.2 Aplicação na Produção de TCTC 27

2.2.2.3 Perspectivas de Sustentabilidade 28

2.2.3 Água 30

2.2.3.1 Importância do Insumo no Processo Produtivo 30

2.2.3.2 Critérios Qualitativos e Requisitos Normativos 31

2.2.3.3 Sustentabilidade e Gestão de Recursos Hídricos 31

2.3 TIPOS DE COMPONENTES TCTC 32

2.3.1 TCTC Maciço 33

2.3.2 TCTC Vazado 34

2.3.3 TCTC Vazado - canaleta 35

2.3.4 TCTC – Meio Tijolo 36

2.3.5 Bloco de Terra Crua (BTC): Modelo Mattone 36

2.4 RESULTADOS PARCIAIS 37

3. PRODUÇÃO DE TCTC 39

3.1 EQUIPAMENTOS E MAQUINARIOS NA PRODUÇÃO DE TCTC 39
3.1.1 PRENSAS 40
3.1.1.1 Prensas Manuais 41
3.1.1.2 Prensas Semiautomáticas 42
3.1.1.3 Prensas Automáticas 43
3.1.2 TRITURADOR 44
3.1.3 PROCESSADOR 45
3.1.4 ESTEIRAS TRANSPORTADORAS 46
3.1.5 EQUIPAMENTOS AUXILIARES 47
3.2 ESCALAS DE PRODUÇÃO 49
3.2.1 PEQUENA ESCALA 49
3.2.2 MÉDIA ESCALA 51
3.2.3 LARGA ESCALA 52
3.3 PRODUTIVIDADE E RENDIMENTO DOS TCTC 53
3.4 RESULTADOS PARCIAIS 55
4. VARIÁVEIS TÉCNICAS MECANICAS 57
4.1 RESISTENCIA MECÂNICA 57
4.2 FORÇA DE COMPRESSÃO 58
4.3 INCIDÊNCIA DA TAXA DE CIMENTO 60
4.4 MATÉRIA-PRIMA 61
4.5 ÁGUA 65
4.6 RESULTADOS PARCIAIS 68
5. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA (RSL) 70
5.1 OBJETIVO DA RSL 70
5.2 ESTRATÉGIA DE BUSCA 70
5.3 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO 71
5.4 PROTOCOLO DE ANÁLISE 74
5.5 EXTRAÇÃO E COMPARAÇÃO DAS VARIÁVEIS 75
5.6 RESULTADOS PARCIAIS 78
6. GESTÃO AMBIENTAL 81
6.1 ABNT NBR ISO 14031 81
6.1.1 Terminologia e Definições da Norma 82

6.2 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL (ADA) 84
6.2.1 Processo da ADA 85
6.2.1.1 Planejar (Plan) 86
6.2.1.2 Executar (Do) 87
6.2.1.3 Verificar e Agir (Check-Act) 88
6.2.2 Indicadores para ADA 89
6.2.3 Princípios da ADA 91
6.3 APLICAÇÃO DA GESTÃO AMBIENTAL 92
6.3.1 Justificativa da Escolha da Norma ISO 14000 92
6.3.2 Etapas da Avaliação Ambiental 93
6.3.2.1 Planejar (Plan) 94
6.3.2.2 Executar (Do) 95
6.3.2.3 Verificar e Agir (Check–Act) 99
6.4 VISITA DE CAMPO 100
6.4.1 Setor Técnico 101
6.4.2 Setor Operacional: Fábrica RAACH 107
6.4.2.1 Matéria prima - Terra 108
6.4.2.2 Teores de cimento e aditivos estabilizantes 110
6.4.2.3 Modelo de produção e produtividade 111
6.4.2.4 Consumo energético nos processos mecânicos 113
6.4.2.5 Condições ambientais de cura e armazenagem 114
6.5 RESULTADOS PARCIAIS 117
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS 124
7.1 ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS 124
7.1.1 Quantificação Da Energia Elétrica Incorporada 124
7.1.2 Mensuração Do Uso De Cimento 124
7.1.3 Influência Da Força De Compressão 125
7.1.4 Eficiência Energética Dos Processos 125
7.2 CONTRIBUIÇÕES E LIMITAÇÕES: UMA AVALIAÇÃO CRÍTICA 126
7.3 PERSPECTIVAS FUTURAS 126
7.4 CONCLUSÃO REFLEXIVA 127
8. REFERÊNCIAS 128

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com os impactos ambientais gerados pela construção civil impulsiona uma reavaliação crítica dos métodos construtivos e dos insumos empregados no setor. Atualmente, essa atividade responde por aproximadamente 36% do consumo global de energia final e por cerca de 39% das emissões de dióxido de carbono associadas à energia e aos processos industriais, evidenciando sua relevância nas discussões sobre sustentabilidade (GLOBALABC, 2020; IEA, 2019). Frente às demandas ambientais, os tijolos comprimidos de terra-cimento (TCTC) podem ser interpretados como solução construtiva de baixo impacto, sobretudo por utilizarem recursos naturais locais, dispensarem o processo de queima e apresentarem baixo consumo energético, o que contribui para a redução da pegada de carbono na construção civil (ROCHA SILVA *et al.*, 2023; UCHIMURA, 2021).

A produção dos TCTC abrange desde métodos manuais até sistemas totalmente automatizados, sendo que cada modelo produtivo impõe diferentes exigências energéticas e operacionais. Entre os parâmetros técnicos mais relevantes, destaca-se a força de compressão aplicada, diretamente relacionada à resistência mecânica e à durabilidade dos TCTC(ELAHI; SHAHRIAR; ISLAM, 2021a; ISLAM; ELAHI; *et al.*, 2020). A escolha adequada desses parâmetros é essencial para equilibrar o desempenho técnico com a eficiência ambiental do processo. Além disso, o cimento, principal agente estabilizante utilizado na composição dos TCTC, representa o insumo de maior impacto ambiental no ciclo de vida do produto, além de ser um dos componentes mais onerosos economicamente (CALDAS; DIAS; FILHO, 2021; MARTINS *et al.*, 2018). Assim, a otimização do teor de cimento torna-se estratégica para garantir que os benefícios ambientais atribuídos aos TCTC não sejam anulados pelos efeitos negativos da produção cimenteira.

Neste contexto, a presente pesquisa, intitulada “Análise Comparativa de Modelos de Produção de TCTC: Energia Incorporada, Uso de Cimento e Grau de Compressão”, tem como objetivo avaliar o desempenho ambiental dos TCTC em diferentes configurações produtivas. A investigação concentra-se na quantificação da energia elétrica incorporada ao longo das etapas de fabricação, na análise da influência da força de compressão aplicada e na racionalização do uso de materiais, com ênfase no cimento. Ao considerar diferentes escalas de produção (pequena,

média e larga), o estudo busca identificar os modelos mais eficientes sob as perspectivas ambiental, técnica e econômica, contribuindo para o avanço de práticas sustentáveis na construção civil.

1.1 JUSTIFICATIVA

Diante dos compromissos internacionais voltados ao enfrentamento das mudanças climáticas e à promoção da sustentabilidade, conforme estabelecido pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), torna-se essencial compreender e aprimorar as tecnologias aplicadas na construção civil (ONU, 2025). A produção convencional de tijolos, baseada em processos de queima, contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa e para o esgotamento de recursos naturais. Em contraposição, os TCTC podem ser considerados como alternativa relevante, especialmente em contextos que demandam soluções construtivas acessíveis, ambientalmente responsáveis e adaptadas ao uso de recursos locais (DAWSON, 2012; VENKATARAMA REDDY, 2012).

A adoção da nomenclatura “Tijolos Comprimidos de Terra-Cimento (TCTC)” nesta pesquisa visa conferir precisão técnica e alinhamento normativo a um componente frequentemente denominado de forma genérica como “tijolo de solo-cimento” ou “tijolo ecológico”. De acordo com a ABNT (2016), o termo “tijolo” aplica-se a elementos com altura inferior a 115 mm, distinguindo-os dos blocos. O processo de conformação por compressão mecânica, característico dos TCTC, diferencia-se dos métodos tradicionais de queima cerâmica, exigindo uma terminologia que reflita essa especificidade. A matéria-prima “terra” refere-se a um solo selecionado, livre de contaminantes orgânicos e com granulometria controlada, enquanto o cimento atua como agente ligante responsável pela resistência mecânica final. Assim, a denominação TCTC sintetiza com clareza as dimensões, o processo de fabricação, a natureza do material terroso e a composição cimentícia, promovendo padronização conceitual e facilitando a comunicação entre os agentes da cadeia produtiva.

A designação genérica “tijolo ecológico”, embora amplamente difundida, carece de fundamentação técnica que comprove o desempenho ambiental integral dos TCTC, sobretudo diante da crescente automação dos processos produtivos. A avaliação da energia elétrica incorporada ao longo da fabricação torna-se indispensável para validar a sustentabilidade dos modelos de produção, assegurando

que os ganhos de produtividade não comprometam os princípios ecológicos que justificam sua adoção. Paralelamente, a força de compressão aplicada durante a conformação dos TCTC constitui variável crítica, pois influencia diretamente a densidade seca e a resistência mecânica do componente (ELAHI; SHAHRIAR; ISLAM, 2021a; ISLAM; ELAHI; *et al.*, 2020). A otimização desse parâmetro representa um desafio técnico relevante para equilibrar o desempenho estrutural com a eficiência energética do processo.

Outro aspecto fundamental refere-se ao teor de cimento utilizado na mistura. Por ser o insumo de maior impacto ambiental e econômico, sua dosagem inadequada pode comprometer os benefícios atribuídos aos TCTC, contrariando a narrativa de sustentabilidade frequentemente associada ao material terroso (CALDAS; DIAS; FILHO, 2021). A quantificação sistemática das variáveis energia incorporada, força de compressão e teor de cimento emerge, portanto, como requisito essencial para a validação científica da sustentabilidade dos TCTC, especialmente diante das exigências crescentes de transparência quanto à pegada de carbono na construção civil (RÖCK *et al.*, 2020).

Uma limitação relevante deste estudo reside na ausência de parâmetros técnicos padronizados e metodologias consolidadas para a quantificação das emissões de dióxido de carbono. Essa lacuna é agravada no contexto brasileiro pela inexistência de inventários específicos no Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC), que ainda não contempla produtos terrosos estabilizados como os TCTC em seu escopo (SIDAC, 2025).

Dessa forma, a presente pesquisa contribui para o aprofundamento técnico sobre os TCTC, oferecendo fundamentos que orientam escolhas construtivas mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este estudo avalia o desempenho ambiental dos TCTC em diferentes configurações e modelos de produção, com foco em três variáveis principais: a quantificação da energia elétrica incorporada, o impacto da força de compressão aplicada e o teor de cimento utilizado no processo de fabricação.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa consistem em:

- ✓ Quantificar a energia elétrica incorporada nos TCTC em distintas configurações e modelos produtivos.
- ✓ Mensurar a quantidade de materiais empregados na fabricação dos TCTC, com ênfase no cimento.
- ✓ Avaliar a influência da força de compressão aplicada durante o processo de conformação dos TCTC.
- ✓ Examinar a eficiência energética dos diferentes processos de produção dos TCTC.

A pesquisa propõe uma análise técnica, qualitativa e quantitativa que contribui para o aprimoramento de soluções construtivas mais sustentáveis, alinhadas aos compromissos globais de mitigação dos impactos ambientais e à promoção da sustentabilidade no setor da construção civil.

1.3 ESTRUTURA GERAL DA PESQUISA

A estrutura metodológica desta pesquisa segue uma sequência lógica que explora as variáveis físicas, mecânicas e produtivas dos TCTC, também referidos na literatura como componentes comprimidos estabilizados com cimento ou, em linguagem vernacular, como “tijolos de solo-cimento”. Na etapa inicial, desenvolve-se uma fundamentação teórica voltada à compreensão conceitual do material, abordando sua origem histórica, composição físico-química e os diferentes arranjos produtivos existentes.

Em seguida, realiza-se o inventário e a análise crítica dos principais equipamentos que compõem a cadeia produtiva dos TCTC, como prensas hidráulicas, trituradores, processadores e sistemas de esteiras. A partir desse mapeamento tecnológico, caracteriza-se a configuração dos sistemas produtivos em três escalas (pequena, média e larga).

Na etapa subsequente, identifica-se e analisa-se sistematicamente as variáveis técnicas e mecânicas que influenciam o desempenho dos TCTC. Entre os parâmetros críticos examinados, destacam-se a resistência à compressão, a intensidade da força aplicada, o teor de cimento na mistura e as propriedades físico-químicas da matéria-prima. Embora o uso de recursos hídricos seja considerado no

processo, sua mensuração quantitativa específica não integra o escopo desta investigação. Esses fatores são essenciais para compreender a qualidade mecânica dos TCTC e avaliar a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

A pesquisa também incorpora uma dimensão de gestão ambiental, fundamentada conceitual e normativamente na ABNT NBR ISSO-14031 (2015b), que estabelece diretrizes para a avaliação de desempenho ambiental (ADA). Essa abordagem é operacionalizada por meio do modelo gerencial cíclico *Plan-Do-Check-Act* (PDCA), aplicado de forma sistemática para mensurar, interpretar e propor ações corretivas e de melhoria no desempenho ambiental dos processos produtivos dos TCTC. Essa etapa é enriquecida com visitas técnicas a unidades fabris localizadas em Palmas e Contenda, no Estado do Paraná, que permitem avaliar empiricamente por meio de observação direta e confronto crítico as informações obtidas junto a fabricantes e fornecedores especializados.

Complementarmente, adota-se a metodologia da revisão sistemática da literatura (RSL), com o objetivo de mapear, organizar e interpretar o marco bibliográfico relacionado à produção de TCTC. O foco analítico da revisão recai sobre os fatores associados ao grau de compressão, ao teor de cimento e à resistência mecânica final dos componentes. A condução da RSL segue os protocolos metodológicos estabelecidos pelo modelo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), o que possibilita identificar tendências dominantes, lacunas de conhecimento e evidências robustas que sustentam o sistema analítico da pesquisa.

A estrutura híbrida composta pela ADA e pela RSL assegura uma abordagem metodológica consistente, capaz de gerar subsídios técnicos para a consolidação de práticas construtivas sustentáveis e compatíveis com os princípios da responsabilidade ambiental contemporânea.

2. TIJOLO COMPRIMIDO DE TERRA-CIMENTO (TCTC)

O uso do Tijolo Comprimido de Terra-Cimento (TCTC) destaca-se como uma aplicação tecnicamente relevante dentro das tecnologias de construção com terra estabilizada. De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland, o solo[1]-cimento é definido como o produto endurecido obtido pela mistura compactada de terra, cimento Portland e água, em proporções determinadas por dosagem racional e conforme normas técnicas específicas (ABCP, 2004). Complementarmente, a Associação Brasileira de Normas Técnicas estabelece que o TCTC é um componente de alvenaria formado por uma mistura homogênea e compactada de terra, cimento Portland, água e, eventualmente, aditivos ou pigmentos, cuja conformação ocorre por prensagem e posterior cura (ABNT, 2012a).

O processo de fabricação dos TCTC envolve a preparação da mistura com controle rigoroso da umidade, fator determinante para a eficiência da compressão subsequente (UCHIMURA, 2021). A compactação é realizada por meio de prensas manuais, hidráulicas ou automáticas, que aplicam força controlada para moldar os tijolos (ALVES DE AZEREDO *et al.*, 2016). Após essa etapa, os componentes são submetidos à cura, essencial para a hidratação do cimento e o desenvolvimento das propriedades mecânicas e de durabilidade (VENKATARAMA REDDY, 2012).

Uma das principais vantagens dos TCTC é a ausência do processo de queima, o que resulta em significativa redução da energia incorporada ao material. Apesar da presença de cimento em sua composição, os TCTC são considerados alternativas ambientalmente mais favoráveis em relação aos materiais convencionais, como os tijolos cerâmicos e blocos de concreto. Essa característica é especialmente relevante diante das crescentes demandas por soluções construtivas sustentáveis na

[1] Nota Terminológica: Ressalta-se que, nas citações diretas das normas técnicas, mantém-se o termo original "solo". Contudo, para o desenvolvimento desta pesquisa, opta-se pelo uso do termo "terra", o qual será adotado daqui em diante. A justificativa para esta escolha, que fundamenta a preferência pela sigla TCTC (Tijolo Comprimido de Terra-Cimento) em detrimento de "tijolos de solo-cimento", será detalhadamente argumentada na seção 2.2.1, com base em critérios que privilegiam a identidade técnica, a clareza semântica no contexto da construção civil e o alinhamento com parte da literatura nacional especializada.

indústria da construção civil (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Estudos indicam que a técnica de produção dos TCTC contribui para a sustentabilidade ambiental ao utilizar matérias-primas locais com baixo grau de processamento e ao reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO_2) em comparação com os sistemas convencionais de alvenaria (ALVES DE AZEREDO *et al.*, 2016). Além disso, essa tecnologia favorece a racionalização de recursos ao diminuir a dependência de materiais com elevada carga ambiental, como os tijolos queimados e os blocos de concreto (CALDAS; DIAS; FILHO, 2021).

2.1 CONTEXTO HISTÓRICO

O uso da terra como material construtivo remonta aos primórdios da civilização humana, com evidências arqueológicas datadas do período Neolítico, por volta de 10.000 a.C., indicando sua aplicação em habitações e estruturas diversas (GATE, 1991). Ao longo da história, essa técnica foi amplamente empregada em diferentes regiões do mundo, sempre que as condições climáticas e a disponibilidade de terras adequadas permitiram sua viabilidade (SCHROEDER, 2012). A longevidade dessa prática evidencia não apenas sua funcionalidade estrutural, mas também sua capacidade de adaptação a contextos ambientais e socioculturais distintos, o que reforça seu valor como alternativa sustentável na construção contemporânea (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2012).

2.1.1 Antecedentes Históricos e Origens Antigas

As primeiras evidências do uso sistemático de terra estabilizada com aglomerantes remontam a civilizações antigas que empregavam misturas de argila com materiais calcários, como forma de aprimorar a resistência e a durabilidade das construções. Embora narrativas populares frequentemente associem o uso de terra estabilizada com cal às fundações da Grande Muralha da China, estudos técnicos indicam que técnicas de estabilização surgiram de maneira autônoma em diferentes culturas ao redor do mundo (RIBAS SILVA, 2008). Um exemplo expressivo dessa sofisticação tecnológica é observado nos monumentos pré-colombianos da região andina, como Tiwanaku, onde análises petrográficas sugerem o uso de geopolímeros à base de terra e minerais silicoaluminosos, evidenciando um domínio avançado da estabilização química (DAVIDOVITS; HUAMAN; DAVIDOVITS, 2019a, b).

O desenvolvimento das técnicas construtivas com terra percorreu trajetórias distintas entre as civilizações, passando por métodos rudimentares como a taipa de mão e o adobe, até alcançar sistemas mais controlados e padronizados, como os TCTC comprimidos. Essa evolução culminou, no século XX, com a introdução e disseminação de prensas manuais e hidráulicas, que permitiram a produção sistemática dos TCTC, marcando a transição de uma prática artesanal para uma técnica passível de industrialização (SCHROEDER, 2012; VENKATARAMA REDDY, 2012).

2.1.2 Evolução Tecnológica e Institucionalização

A Revolução Industrial, ocorrida no século XIX, impulsionou transformações significativas na ciência dos materiais de construção, entre as quais se destaca a invenção e o patenteamento do cimento Portland pelo britânico Joseph Aspdin, em 1824. Este aglomerante hidráulico introduziu uma nova perspectiva para as técnicas construtivas, permitindo avanços substanciais na estabilização de terras para fins estruturais (HEWLETT; LISKA, 2019).

O uso da terra-cimento como material compósito com propriedades intencionais consolidou-se apenas no início do século XX. Embora existam registros anteriores de sua aplicação empírica, os primeiros estudos sistemáticos que estabeleceram fundamentos técnicos para sua dosagem, comportamento mecânico e durabilidade foram realizados nas décadas de 1930 e 1940, especialmente nos Estados Unidos (CATTON, 1959). Esses estudos pioneiros contribuíram para a institucionalização da terra-cimento por meio da normatização promovida por entidades como a American Society for Testing and Materials (ASTM) e a Portland Cement Association (PCA), que definiram parâmetros técnicos e metodológicos para sua aplicação (RIBAS SILVA, 2008).

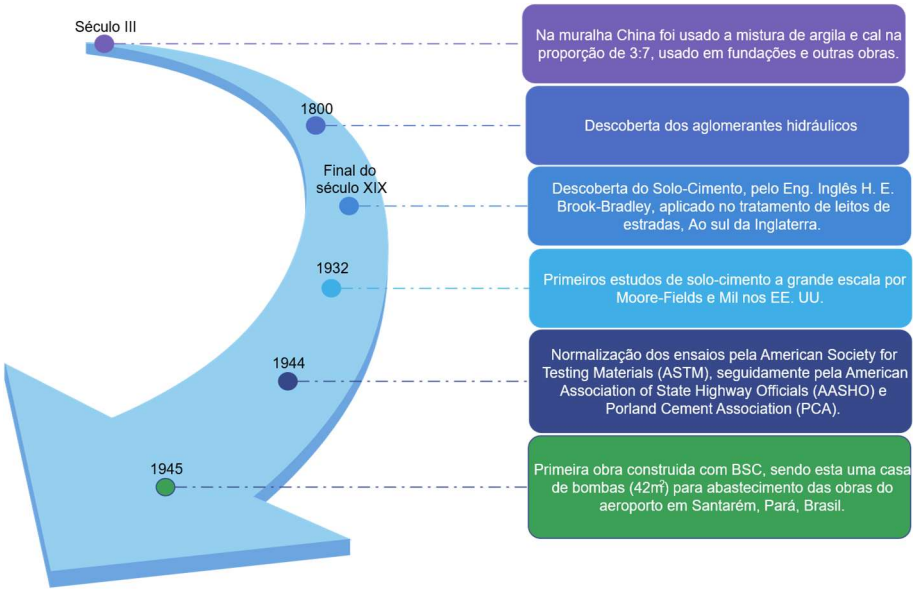
2.1.3 TCTC no Brasil

No contexto brasileiro, a introdução da tecnologia de terra-cimento ocorreu na década de 1940, sendo a construção de uma casa de bombas para abastecimento hídrico no aeroporto de Santarém, no estado do Pará, um dos registros pioneiros de sua aplicação em obras de infraestrutura. Essa iniciativa precedeu a elaboração das normativas técnicas específicas pela Associação Brasileira de Cimento Portland

(ABCP) e pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), configurando um marco inicial na disseminação da tecnologia no país (RIBAS SILVA, 2008).

A trajetória histórica da tecnologia de terra-cimento, representada na Figura 1, evidencia sua evolução desde práticas empíricas ancestrais até sua consolidação como técnica construtiva contemporânea, respaldada por fundamentos científicos e por diretrizes normativas. Essa consolidação foi reforçada pela publicação de manuais técnicos (ABCP, 1984), pela normatização dos métodos de dosagem (ABCP, 2004) e pelos ensaios de desempenho mecânico e físico (ABNT, 2012a, b, c), o que contribuiu para a incorporação da tecnologia na construção civil nacional.

Figura 1 - Contexto histórico da evolução da terra-cimento ao longo do tempo



Fonte: Adaptação (RIBAS SILVA, 2008).

O percurso histórico da construção com terra estabilizada revela uma transição significativa, que vai das técnicas empíricas tradicionais aos sistemas tecnologicamente avançados e normatizados. Essa evolução reflete não apenas o progresso científico no entendimento dos materiais, mas também a crescente valorização dos princípios da sustentabilidade na construção civil (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2012). Nesse cenário, o terra-cimento consolida-se como uma alternativa tecnológica que integra o saber construtivo tradicional à inovação e ao rigor técnico da engenharia contemporânea (SCHROEDER, 2012). A riqueza de sua trajetória histórica é essencial para compreender seu potencial atual como material sustentável, economicamente acessível e tecnicamente adequado a diferentes contextos socioeconômicos e ambientais.

2.2 COMPOSIÇÃO DOS TCTC

Os TCTC são constituídos essencialmente por três materiais: terra, cimento Portland e água, combinados em proporções definidas por dosagem racional, conforme orientações técnicas estabelecidas (ABCP, 1984; UCHIMURA, 2021). A norma ABNT NBR 10833 (2012c) admite ainda a adição de aditivos e pigmentos, desde que atendam aos requisitos de desempenho e composição previstos na ABNT NBR 8491 (2012a).

O processo de produção dos TCTC inicia-se com a mistura homogênea dos insumos, etapa que visa garantir a uniformidade da composição e a distribuição adequada da umidade. Em seguida, a massa é submetida à prensagem por meio de equipamentos manuais ou hidráulicos, que aplicam força controlada para compactar o material. Essa etapa é determinante para a formação de uma microestrutura densa e coesa, condição essencial para o desenvolvimento das propriedades mecânicas e da durabilidade do tijolo (ABCP, 2004; VENKATARAMA REDDY, 2012).

2.2.1 Terra

O “solo” é um material natural de elevada heterogeneidade, composto por partículas minerais, matéria orgânica, água e ar, que recobre a superfície terrestre. No âmbito da construção civil, o termo “terra” refere-se ao material granular oriundo do intemperismo de rochas parentais, frequentemente transportado e depositado por processos geológicos, e que apresenta propriedades físicas e químicas compatíveis com aplicações estruturais (SCHROEDER, 2012). Essa distinção terminológica é essencial, uma vez que nem todos os tipos de terra são adequados para uso direto em edificações. Por esse motivo, a produção de componentes construtivos requer uma avaliação criteriosa da composição do material, especialmente quanto à sua granulometria, plasticidade e capacidade de estabilização.

Neste contexto, justifica-se a adoção da nomenclatura “Tijolo Comprimido de Terra-Cimento (TCTC)” proposta nesta pesquisa, por expressar com maior precisão técnico-qualitativa a natureza do compósito. A denominação evidencia não apenas o uso da terra como elemento principal, mas também o processo de compressão e a função estabilizante do cimento, conferindo ao termo maior rigor conceitual e alinhamento com os fundamentos da engenharia de materiais e da construção civil.

A terra apropriada para fins construtivos pode conter constituintes naturais como matéria orgânica (húmus) e sais solúveis em proporções controladas. A presença excessiva desses elementos pode comprometer a durabilidade e o desempenho mecânico dos componentes edificáveis (DAWSON, 2012). Assim, a compreensão adequada da natureza e do comportamento da terra constitui uma premissa fundamental para a produção de TCTC com qualidade técnica satisfatória.

2.2.1.1 Compactação da Terra

A compactação da terra constitui uma etapa essencial na produção dos TCTC, estando diretamente associada à densidade, resistência mecânica e durabilidade do material. Para compreender o comportamento reológico da terra utilizada, os Limites de Atterberg permanecem como parâmetros fundamentais, pois definem os teores de umidade que marcam as transições entre os estados de consistência: o limite de liquidez (LL) separa os estados líquido e plástico; o limite de plasticidade (PL) distingue os estados plástico e semissólido; e o limite de contração (LC) delimita a passagem do estado semissólido para o sólido. O índice de plasticidade (IP = LL - PL) representa a faixa de umidade em que a terra apresenta comportamento plástico, sendo considerado um parâmetro crítico para avaliar sua aptidão à produção de TCTC (DAWSON, 2012).

O princípio da compactação baseia-se na maximização do peso específico aparente seco da terra por meio da redução dos vazios, obtida pela aplicação de energia mecânica. A relação entre o teor de umidade e o peso específico seco é representada pela curva de compactação, cujo ponto máximo corresponde à umidade ótima condição em que se obtém a densidade máxima com mínima porosidade (ABCP, 2004). Esse comportamento é avaliado por meio do ensaio Proctor, que estabelece a correlação entre a energia de compactação aplicada e o grau de densificação da terra. As variantes do ensaio Proctor normal (592 kJ/m³), intermediário (1.200 kJ/m³) e modificado (2.700 kJ/m³) simulam diferentes níveis de energia de compactação, sendo o Proctor intermediário o mais utilizado para caracterizar terras destinadas à produção de TCTC. A curva obtida permite determinar a umidade ótima e o peso específico seco máximo, parâmetros essenciais para o ajuste da mistura e o controle do processo produtivo (PINHEIRO *et al.*, 2013).

Na prática, a umidade ótima para a produção de TCTC situa-se geralmente entre 10% e 14%, variando conforme a composição granulométrica e o tipo de terra. Nessa faixa, a água atua como agente lubrificante entre as partículas, facilitando seu rearranjo durante a compactação e promovendo maior densidade com menor presença de vazios (VENKATARAMA REDDY; GUPTA, 2008).

A compactação dos TCTC é realizada por meio de prensas manuais, hidráulicas ou automáticas, que aplicam pressão específica sobre a mistura. A energia de compactação deve ser suficiente para garantir o rearranjo eficiente das partículas sólidas, a redução significativa dos vazios interparticulares, a expulsão do ar intersticial e a formação de interface íntima entre as partículas de terra e a pasta de cimento hidratado. Quando adequadamente comprimido, o TCTC apresenta melhorias significativas nas propriedades mecânicas, como resistência à compressão e durabilidade, além de menor permeabilidade à água (ELAHI; SHAHRIAR; ISLAM, 2021a; JAYASINGHE; KAMALADASA, 2007).

2.2.1.2 Parâmetros Técnicos e Critérios de Seleção

A adequação da terra para a produção de TCTC é determinada com base em parâmetros técnicos definidos por normativas especializadas, destacando-se a composição granulométrica, os limites de consistência (Atterberg) e a capacidade de compactação.

De acordo com as diretrizes da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2000), a terra considerada tecnicamente apropriada para a fabricação de TCTC deve atender aos seguintes critérios: apresentar 100% de passagem na peneira ABNT 4,8 mm (nº 4); possuir teor de partículas finas com diâmetro inferior a 0,075 mm (peneira nº 200) entre 10% e 50%; exibir limite de liquidez igual ou inferior a 45%; e índice de plasticidade igual ou inferior a 18%. A distribuição granulométrica equilibrada é essencial para otimizar o empacotamento das partículas, reduzindo a porosidade e promovendo maior densidade e coesão.

Terras com teor excessivo de areia (superior a 85%) tendem a apresentar baixa coesão e dificuldade de moldagem, enquanto aquelas com elevado conteúdo de finos (acima de 50%) podem resultar em retrações acentuadas e fissuração durante o processo de secagem (ABCP, 2000; REDDI; JAIN; YUN, 2012). Dessa forma, a caracterização adequada da terra é uma etapa indispensável para garantir a

qualidade e o desempenho dos TCTC.

2.2.1.3 Compatibilidade Terra-Cimento e Estabilização

A compatibilidade entre a terra e o cimento Portland é um fator decisivo para o desempenho dos TCTC, influenciando diretamente a eficiência do processo de estabilização e a qualidade final do produto. A resposta da terra à adição de cimento depende de suas propriedades físico-químicas, com destaque para a granulometria, plasticidade, capacidade de troca catiônica (CTC) e mineralogia da fração argilosa (REDDI; JAIN; YUN, 2012; VENKATARAMA REDDY, 2012).

Terras predominantemente arenosas, por apresentarem baixa coesão e reduzida área superficial específica, tendem a demandar menores teores de cimento geralmente entre 6% e 8% para atingir níveis satisfatórios de resistência mecânica. Em contrapartida, terras argilosas e siltosas, devido à maior atividade química e capacidade de retenção de água, frequentemente requerem dosagens superiores de cimento, podendo ultrapassar 10%, para garantir a estabilização adequada (ABCP, 2004).

Apesar disso, a presença controlada de argila é desejável, pois contribui para a coesão inicial da mistura, facilitando a desmoldagem e o manuseio dos TCTC após a compressão. As partículas argilosas atuam como ligantes naturais, promovendo a aderência entre os grãos e favorecendo a formação de uma matriz sólida e coesa, especialmente quando combinadas à ação do cimento Portland (DANSO *et al.*, 2015; VENKATARAMA REDDY, 2012).

Nesse contexto, os argilominerais como caulinita, montmorilonita, ilita e clorita desempenham papel fundamental na interação terra-cimento. A montmorilonita, por exemplo, apresenta elevada Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e alta expansibilidade, o que pode comprometer a estabilidade volumétrica do TCTC, exigindo maior controle sobre a umidade e a dosagem de cimento. Já a caulinita, com menor atividade expansiva, favorece a estabilização, proporcionando boa trabalhabilidade e desempenho mecânico com teores reduzidos de cimento (CATTON, 1959).

Além disso, a reação pozolânica entre os produtos da hidratação do cimento como o hidróxido de cálcio e os silicatos e aluminatos presentes nos argilominerais contribui para a formação de compostos cimentantes secundários, como o silicato de

cálcio hidratado (C-S-H) e o aluminato de cálcio hidratado (C-A-H). Esses compostos reforçam a estrutura interna do TCTC, aumentando sua resistência e durabilidade (HEWLETT; LISKA, 2019).

Portanto, a seleção e caracterização adequada da terra com atenção especial à sua fração argilosa e composição mineralógica são etapas fundamentais para garantir a compatibilidade com o cimento e o sucesso do processo de estabilização. A compreensão do comportamento dos argilominerais presentes permite otimizar a formulação da mistura, reduzir o consumo de cimento e aprimorar o desempenho técnico e ambiental dos TCTC.

2.2.1.4 Aspectos Ambientais e Sustentabilidade

O emprego da terra como matéria-prima na construção civil está alinhado aos princípios da sustentabilidade, especialmente no que se refere à redução da energia incorporada e à mitigação dos impactos ambientais. A utilização de terras locais preferencialmente provenientes de escavações do próprio terreno ou de fontes próximas ao local de produção contribui significativamente para a diminuição dos custos energéticos associados ao transporte e à logística de insumos (CALDAS; DIAS; FILHO, 2021; MARTINS *et al.*, 2018).

Além disso, a caracterização e seleção adequadas da terra possibilitam o aproveitamento de materiais que, em outros contextos construtivos, seriam considerados resíduos, promovendo práticas de economia circular no setor da construção civil (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2012). Essa abordagem reforça o potencial dos TCTC como solução tecnicamente viável e ambientalmente responsável.

A terra configura-se como insumo fundamental na produção de TCTC, sendo sua seleção e caracterização etapas críticas para assegurar a qualidade, a durabilidade e o desempenho mecânico dos componentes. O controle rigoroso dos parâmetros de compactação especialmente a umidade ótima e a energia aplicada constituem fator determinante para a obtenção das propriedades mecânicas desejadas. A compreensão dos Limites de Atterberg e sua relação com o comportamento da terra durante a compactação fornece base científica para a otimização do processo produtivo, garantindo a fabricação de componentes terrosos com desempenho estrutural satisfatório e vida útil prolongada.

A evolução histórica do conhecimento sobre os materiais terrosos evidencia a crescente valorização da qualidade da matéria-prima e do controle tecnológico da compactação, configurando-se atualmente como pilares essenciais para o avanço sustentável desta tecnologia construtiva.

2.2.2 Cimento

O cimento Portland configura-se como material aglomerante essencial na construção civil, sendo composto predominantemente por clínquer produto da calcinação controlada de calcário e argila e gesso, podendo incorporar adições minerais em conformidade com normas técnicas específicas (HEWLETT; LISKA, 2019). Sua elevada versatilidade e desempenho mecânico consolidaram sua aplicação quase universal, inclusive como agente estabilizante na produção de TCTC.

No contexto desta pesquisa, torna-se fundamental compreender as especificidades dos diferentes tipos de cimento, sua pegada ambiental, os aspectos normativos e sua aplicabilidade na produção de TCTC, a fim de subsidiar uma análise comparativa entre modelos produtivos.

A normatização brasileira, estabelecida pela ABNT NBR 16697, classifica os cimentos Portland conforme sua composição e requisitos de desempenho. A literatura especializada como Hewlett; Liska (2019) & Taylor (1997) destaca que a formação das fases do clínquer especialmente o silicato tricálcico (C_3S) e o silicato dicálcico (C_2S) é determinante para as propriedades de resistência inicial e durabilidade do cimento endurecido.

No cenário nacional, observa-se predominância dos cimentos das classes CP II (com adições de filler calcário) e CP III (com escória granulada de alto-forno), em função da disponibilidade regional de matérias-primas e de fatores econômicos associados à produção e comercialização (AGOPYAN; JOHN, 2011).

2.2.2.1 Aspectos Ambientais e Sustentabilidade

A indústria cimenteira destaca-se como uma das maiores emissoras de dióxido de carbono (CO_2) no setor industrial, contribuindo de forma significativa para as emissões globais de Gases de Efeito Estufa (GEE). O processo de produção do clínquer principal componente do cimento Portland envolve a descarbonatação térmica do calcário, etapa inerentemente emissiva que libera CO_2 de origem química.

A esse processo somam-se as emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis, necessária para alcançar as temperaturas elevadas do forno rotativo, em torno de 1450 °C (HEWLETT; LISKA, 2019).

Röck et al. (2020) destacam que as emissões incorporadas aos edifícios nas quais os materiais de construção desempenham papel central representam um desafio crítico para a mitigação efetiva das mudanças climáticas. Essa preocupação é reiterada pelo *Global Status Report for Buildings and Construction*, que aponta a urgência de estratégias de descarbonização no setor da construção civil (GLOBALABC, 2020; IEA, 2019).

Nesse contexto, observa-se um contraste expressivo na pegada de carbono entre os diferentes tipos de cimento. Cimentos com elevado teor de clínquer, como o CP V, apresentam maior impacto ambiental, enquanto aqueles que incorporam adições minerais como pozolanas (CP IV) e escória granulada de alto-forno (CP III) demonstram emissões significativamente reduzidas (HEWLETT; LISKA, 2019; PACHECO-TORGAL; JALALI, 2012). Essa vantagem ambiental decorre da substituição parcial do clínquer por subprodutos industriais que, em geral, não requerem processos de calcinação, contribuindo para a redução da energia incorporada e das emissões associadas.

2.2.2.2 Aplicação na Produção de TCTC

A seleção do tipo de cimento Portland para a fabricação de TCTC deve ser orientada por uma análise multifatorial, que considere o desempenho mecânico, os impactos ambientais e a compatibilidade química e granulométrica com a terra local. Os cimentos compostos, especialmente os das classes CP II, são amplamente recomendados pela literatura técnica em detrimento do CP I, devido à maior versatilidade e adequação a diferentes tipos de terra (ABCP, 1984; UCHIMURA, 2021).

O cimento Portland, particularmente o tipo CP[2] II[3]-E[4]-32[5], é amplamente

[2] CP: Cimento Portland
[3] Tipo: I - Simples/comum; II - Composto; III - de Alto-Forno; IV - Pozolânico e V - de Alta Resistência Inicial.
[4] Adição: S – Com adição; E - Escória granulada de alto forno; F - Fíler e Z - Puzolana.
[5] Resistência Mecânica: 25; 32 e 40 (Mpa).

empregado como estabilizante químico na produção de TCTC, sendo incorporado à mistura em proporções que variam entre 6% e 10% em massa da terra seca (MELO *et al.*, 2011; MOURA *et al.*, 2021; SOUZA; SEGANTINI; PEREIRA, 2008). Sua principal função consiste em conferir resistência mecânica e durabilidade ao compósito por meio das reações de hidratação que formam silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), responsáveis pela coesão da matriz cimentante (VENKATARAMA REDDY, 2012).

De acordo com a norma brasileira ABNT NBR 8491, os tijolos devem apresentar resistência mínima à compressão aos sete dias de cura para serem considerados aptos ao uso em alvenaria. A média dos valores de resistência não deve ser inferior a 2,0 MPa, e nenhum valor individual pode estar abaixo de 1,7 MPa (ABNT, 2012a).

O mecanismo de estabilização envolve a formação de uma matriz coesa e resistente, com ligações entre grãos similares às observadas em concretos convencionais (ABCP, 1984). Em terras argilosas, além da hidratação do cimento, ocorrem reações entre os minerais argilosos e a cal liberada, formando compostos como silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (CATTON, 1959). A eficiência da estabilização depende fundamentalmente de três fatores: teor de cimento, natureza da terra e grau de compressão. Terras com teores de areia entre 45% e 85% são consideradas mais adequadas, pois favorecem uma distribuição granulométrica ideal (ABCP, 2000, 2004).

O processo de hidratação em matrizes de terra-cimento segue princípios químicos similares aos do concreto, embora ocorra em meio heterogêneo e com maior relação água/cimento. Conforme detalhado por Taylor (1997), os silicatos tricálcico (C_3S) e dicálcico (C_2S) reagem formando gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) principal responsável pela resistência e hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Em terras argilosas, o hidróxido de cálcio reage com sílica e alumina presentes, gerando fases secundárias que contribuem para a coesão e a impermeabilidade do compósito (MELIÀ *et al.*, 2014).

2.2.2.3 Perspectivas de Sustentabilidade

Diante dos impactos ambientais associados à produção de cimento Portland responsável por aproximadamente 8% das emissões globais de dióxido de carbono

(CO_2) alternativas com menor pegada carbônica vêm sendo investigadas e aplicadas na produção de TCTC (RÖCK *et al.*, 2020). Cimentos compostos com adições pozolânicas, como cinza volante, sílica ativa, escória de alto-forno e metacaulim, têm demonstrado eficácia na redução da porosidade e na melhoria da durabilidade dos componentes terrosos (CALDAS; DIAS; FILHO, 2021; MARTINS *et al.*, 2018).

Estudos recentes de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) consolidam os blocos de terra compactada estabilizada com cimento como alternativa construtiva de baixo impacto ambiental, atribuindo esse desempenho principalmente à ausência de processo de queima e ao uso de materiais de origem local (CALDAS; DIAS; FILHO, 2021). A viabilidade ambiental dos materiais terrosos, quando comparados a soluções convencionais, é reiterada na literatura internacional (MELIÀ *et al.*, 2014), posicionando-os como estratégia relevante para a redução das emissões incorporadas na construção civil (RÖCK *et al.*, 2020).

A maximização do desempenho ambiental está diretamente vinculada à seleção criteriosa dos materiais constituintes. A escolha do aglutinante revela-se decisiva, uma vez que cimentos com composições contendo adições pozolânicas ou escória siderúrgica como os tipos CP II-E e CP III promovem reduções na pegada de carbono da ordem de 30% em relação ao cimento Portland comum (CP V-ARI), em função da menor energia incorporada e do reduzido consumo de clínquer em sua fabricação (HEWLETT; LISKA, 2019; MEHTA; MONTEIRO, 2006). Complementarmente, a otimização da logística de transporte dos insumos, especialmente da terra, constitui variável crítica para potencialização integral dos benefícios ambientais inerentes à técnica (MARTINS *et al.*, 2018).

Contudo, no cenário normativo brasileiro, essa comprovação científica ainda não encontra respaldo formal adequado. A exclusão dos componentes terrosos do escopo de atuação do Sistema de Avaliação da Conformidade de Componentes da Construção (SIDAC) suscita questionamentos fundamentais quanto às justificativas para sua não inclusão e parametrização. Essa lacuna normativa criticada pela desconexão entre evidência técnica e regulamentação conforme discutido por Schroeder (2012) em análise sobre os códigos aplicáveis às edificações em terra, gera implicações diretas para a disseminação da tecnologia, uma vez que dificulta sua certificação e ampla aceitação no mercado.

2.2.3 Água

A água constitui um insumo fundamental no processo de fabricação dos Tijolos de Terra-Cimento Compactado (TCTC), atuando como elemento catalisador das reações químicas e agente de trabalhabilidade da mistura. Do ponto de vista físico-químico, a água desempenha dupla função essencial: promove a hidratação do cimento Portland, desencadeando a formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) – matriz responsável pela coesão e resistência mecânica do compósito e confere plasticidade à mistura, permitindo adequada compactação e moldagem dos tijolos (ABCP, 1984, 2000; TAYLOR, 1997).

A relação água-cimento-terra configura-se como variável crítica no processo produtivo. Conforme estabelecido nas normativas técnicas (ABCP, 2000, 2004), a umidade ótima de compactação deve ser rigorosamente controlada, situando-se geralmente entre 10% e 14% em peso, dependendo das características granulométricas do solo e do tipo de cimento empregado. A correta dosagem hídrica assegura máxima densificação do material sob compactação, minimizando a porosidade e maximizando a resistência mecânica final dos tijolos (VENKATARAMA REDDY, 2012; WALKER, 1995).

2.2.3.1 Importância do Insumo no Processo Produtivo

Na produção dos TCTC, a água desempenha papel integrador no sistema terra-cimento, sendo determinante para o desenvolvimento das propriedades mecânicas e da durabilidade do compósito. Estudos demonstram que a hidratação adequada do cimento, especialmente dos silicatos tricálcico (C_3S) e dicálcico (C_2S), resulta na formação de estruturas cristalinas que conferem resistência progressiva ao material (HEWLETT; LISKA, 2019; TAYLOR, 1997).

A homogeneidade da mistura está diretamente condicionada ao teor de água empregado. Quantidades insuficientes comprometem a hidratação completa do cimento e dificultam o processo de compactação, resultando em tijolos friáveis e de baixa resistência. Por outro lado, o excesso de água provoca segregação dos componentes, aumento da retração durante a secagem e formação de vazios internos, o que reduz significativamente a resistência à compressão e eleva a absorção de água dos tijolos (ABCP, 2000; GUETTALA; ABIBSI; HOUARI, 2006).

O processo de cura subsequente à moldagem exige atenção rigorosa às

condições de umidade. A manutenção da superfície dos tijolos úmida por um período mínimo de sete dias, conforme preconizado pela ABCP (1984), é essencial para assegurar a continuidade das reações de hidratação e o desenvolvimento das propriedades mecânicas, prevenindo a ocorrência de fissuras por secagem precoce (CALDAS; DIAS; FILHO, 2021; WALKER, 1995).

2.2.3.2 Critérios Qualitativos e Requisitos Normativos

A qualidade da água utilizada na produção dos TCTC constitui parâmetro crítico para assegurar o desempenho mecânico e a durabilidade do compósito. A presença de impurezas como matéria orgânica, sulfatos, cloretos e outros sais solúveis pode interferir negativamente nas reações de hidratação do cimento, comprometer a formação da matriz cimentante e reduzir a vida útil dos tijolos (ABCP, 2000, 2004).

Recomenda-se, preferencialmente, a utilização de água potável, em conformidade com os padrões estabelecidos pela legislação vigente. Alternativamente, águas provenientes de outras fontes como poços, captação pluvial ou sistemas de reaproveitamento podem ser empregadas, desde que submetidas a análises físico-químicas que comprovem sua compatibilidade com o processo de estabilização e não apresentem riscos à integridade do material (EUPHROSINO *et al.*, 2022; MELO *et al.*, 2011).

2.2.3.3 Sustentabilidade e Gestão de Recursos Hídricos

No contexto da construção sustentável, a otimização do consumo hídrico na produção dos TCTC representa um aspecto ambiental relevante. Em comparação com materiais convencionais, como blocos cerâmicos e de concreto que demandam volumes expressivos de água ao longo de seu ciclo de vida os TCTC apresentam vantagens significativas, especialmente pela ausência do processo de queima (CALDAS; DIAS; FILHO, 2021).

Estratégias voltadas à minimização do consumo de água incluem: Recirculação de águas: reaproveitamento de águas provenientes da lavagem de equipamentos e de excedentes do processo produtivo; Captação de águas pluviais: implementação de sistemas de coleta e armazenamento para uso direto na produção; Controle tecnológico: utilização de sensores de umidade e sistemas de dosagem

automatizada para garantir precisão no consumo (CALDAS; DIAS; FILHO, 2021; MARTINS *et al.*, 2018).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) dos TCTC corrobora seu desempenho ambientalmente favorável, evidenciando redução significativa na pegada hídrica em relação aos sistemas convencionais de alvenaria (CALDAS; DIAS; FILHO, 2021; MARTINS *et al.*, 2018). Essa característica está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas, particularmente ao ODS 6, que trata da gestão sustentável da água e do saneamento universal.

2.3 TIPOS DE COMPONENTES TCTC

A nomenclatura técnica dos componentes utilizados em alvenaria é definida pela norma ABNT NBR 16868-1 (2020), que os classifica com base em suas dimensões. De acordo com essa norma, o componente é denominado bloco quando sua altura é igual ou superior a 115 mm; caso contrário, é classificado como tijolo. Complementarmente, a ABNT NBR 8491 (2012a) estabelece que o tijolo de terra-cimento apresenta altura inferior à largura, podendo ser produzido nas versões maciça ou vazada, conforme os requisitos de aplicação.

Há uma ampla variedade de configurações para os componentes de terra comprimida e estabilizada com cimento, conforme ilustrado na Figura 2, Figura 3 e Figura 4. As tipologias incluem modelos maciços, vazados, modulares e com texturas em múltiplas faces (como versões de quatro ou seis faces). Destacam-se os blocos de encaixe (*interlocking blocks*), representados na Figura 3, que permitem a montagem sem o uso de argamassa de assentamento, favorecendo a racionalização do processo construtivo. Também merece destaque o modelo específico Mattone, ilustrado na Figura 4, que apresenta geometria diferenciada voltada à eficiência estrutural e estética.

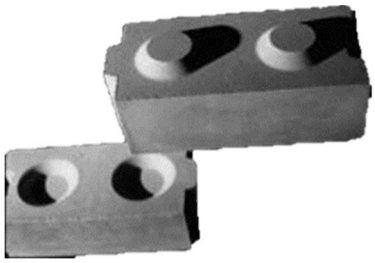
Figura 2 - Tipos de TCTC

Fonte: (ECO MÁQUINAS, 2024a).

Figura 3 - Blocos interligados

Fonte: (GATE, 1991)

Figura 4 - Bloco de terra - Mattone



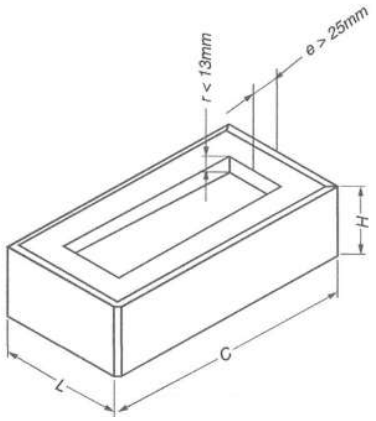
Fonte: (MELO *et al.*, 2011)

2.3.1 TCTC Maciço

O componente TCTC maciço é definido como um tijolo de terra comprimida e estabilizada com cimento, com geometria paralelepipédica e dimensões nominais de 240 mm (comprimento) × 120 mm (largura) × 70 mm (altura). De acordo com a ABNT NBR 8491 (2012a), o tijolo é classificado como maciço quando a porcentagem de sólidos corresponde a, no mínimo, 85% de seu volume aparente. A norma permite a presença de reentrâncias em uma das faces maiores, desde que respeitem o afastamento mínimo de 25 mm das arestas e profundidade máxima de 13 mm, conforme ilustrado na Figura 5.

Do ponto de vista produtivo, a ausência de vazios internos e a simplicidade geométrica conferem maior facilidade ao processo de fabricação, reduzindo a complexidade dos moldes utilizados nas prensas. Tecnicamente, essa configuração resulta em uma seção transversal integralmente resistente, o que proporciona ao componente maior resistência à compressão e, por consequência, potencialmente maior durabilidade em comparação aos modelos vazados (VENKATARAMA REDDY, 2012).

Figura 5 – Tijolo maciço de terra-cimento



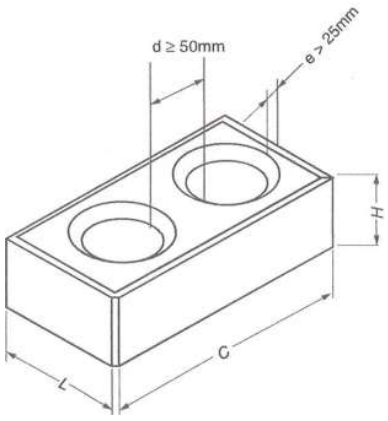
Fonte: (ABNT, 2012a).

2.3.2 TCTC Vazado

O componente TCTC vazado é produzido a partir da mistura de terra e cimento, conformado por compressão em moldes com dimensões nominais de 240 mm (comprimento) × 120 mm (largura) × 70 mm (altura). Caracteriza-se pela presença de cavidades verticais que resultam em um volume de sólidos inferior a 85% do volume aparente total, enquadrando-se, portanto, na definição de tijolo vazado conforme estabelecido pela ABNT NBR 8491 (2012a).

A mesma norma especifica que a espessura mínima das paredes deve ser de 25 mm, e o afastamento entre as faces internas dos furos deve ser, no mínimo, de 50 mm, garantindo integridade estrutural e resistência adequada à compressão. Essa configuração está representada na Figura 6.

Figura 6 – Tijolo vazado de terra-cimento



Fonte: (ABNT, 2012).

A presença de cavidades verticais nos componentes TCTC vazados confere vantagens funcionais relevantes, como a redução do peso próprio, a melhoria do desempenho termoacústico da alvenaria e a facilitação da passagem de instalações elétricas e hidráulicas, contribuindo para a racionalização do processo construtivo (VENKATARAMA REDDY, 2012). No entanto, essa configuração estrutural implica em uma área líquida resistente inferior, o que pode resultar em menor resistência à compressão quando comparada aos tijolos maciços, exigindo atenção especial aos critérios de aplicação e ao dimensionamento estrutural.

2.3.3 TCTC Vazado - canaleta

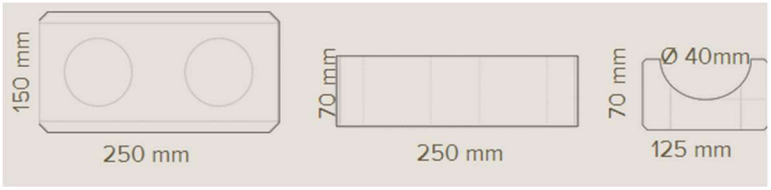
O TCTC vazado tipo canaleta constitui uma variante especializada dentro da família dos componentes de terra comprimida e estabilizada com cimento. Conforme ilustrado na Figura 7 e Figura 8, sua geometria padrão apresenta dimensões nominais de 250 mm (comprimento) × 125 mm (largura) × 70 mm (altura). Esse componente é produzido por meio da compressão de uma mistura de terra e cimento em moldes específicos que conferem uma geometria distintiva, caracterizada pela presença de canaletas ou vazios longitudinais.

A função primordial dessas canaletas é permitir o alojamento de armaduras de aço e o recebimento de concreto de preenchimento (graute), sendo destinadas à execução de elementos estruturais de amarração e contraventamento na alvenaria, como vergas, contravergas, cintas e vigas baldrame. Adicionalmente, a configuração vazada contribui para a redução do peso próprio do componente e facilita a passagem de instalações elétricas e hidráulicas no plano horizontal da alvenaria, promovendo maior racionalização do sistema construtivo (SOTERO *et al.*, 2016).

Figura 7 - TCTC vazado, tipo canaleta

Fonte: (LEKOBRASIL, 2024)

Figura 8 – Medidas padrão dos TCTC vazados, tipo canaleta



Fonte: LEKOBRASIL (2024

2.3.4 TCTC – Meio Tijolo

O componente TCTC tipo “Meio Tijolo” configura-se como uma solução dimensionalmente otimizada, obtida por meio da compressão de mistura terra-cimento em moldes com metade das dimensões do tijolo convencional. Essa variação modular apresenta vantagens operacionais significativas, especialmente pela eliminação de cortes e pela redução de perdas de material durante a execução da alvenaria, conforme estabelecido pela ABNT NBR 8491 (2012a). Além disso, proporciona maior flexibilidade construtiva em detalhamentos arquitetônicos e nas interfaces entre elementos, mantendo as propriedades mecânicas e de durabilidade características dos TCTC.

Sob o ponto de vista técnico-normativo, o componente preserva integralmente as especificações da ABNT NBR 8491 (2012a), assegurando compatibilidade dimensional e estrutural com os tijolos padrão utilizados no sistema construtivo. Sua aplicação está alinhada aos princípios da construção sustentável, promovendo eficiência material por meio da minimização de resíduos e da otimização do uso de recursos, conforme evidenciado em estudos de Caldas; Dias; Filho (2021). A racionalização construtiva proporcionada por esse elemento reforça o potencial dos TCTC como tecnologia sustentável para a construção civil contemporânea.

2.3.5 Bloco de Terra Crua (BTC): Modelo Mattone

O modelo “Mattone” constitui um sistema construtivo inovador, desenvolvido pelo Professor Roberto Mattone, do *Politecnico di Torino* (Itália), caracterizado por sua geometria de encaixe preciso. Conforme ilustrado na Figura 9, os blocos apresentam dimensões nominais de 280 mm (comprimento) × 140 mm (largura) × 100 mm (altura), com massa média de 5,35 kg. Esses componentes são produzidos por meio da compressão de terra crua estabilizada com 5% de cimento, conferindo ao material

resistência mecânica adequada sem necessidade de processo de queima.

A principal característica tecnológica do sistema reside nos dispositivos de intertravamento incorporados à geometria dos blocos, que permitem encaixe preciso entre as unidades. Esse mecanismo contribui para a melhoria da estabilidade dimensional da alvenaria, aumentando a resistência e a rigidez do conjunto estrutural (MELO *et al.*, 2011). Adicionalmente, o sistema de encaixe possibilita a redução do consumo de argamassa de assentamento e maior velocidade executiva, representando uma evolução significativa na tecnologia de blocos de terra comprimida e alinhando-se aos princípios da construção racionalizada e sustentável.

Figura 9 – Formato e assentamento dos blocos tipo Mattone

Fonte: (MELO *et al.*, 2011)

2.4 RESULTADOS PARCIAIS

Até o momento, foram realizadas as etapas de levantamento bibliográfico, sistematização histórica e caracterização técnica dos componentes envolvidos na produção dos TCTC. A análise concentrou-se na compreensão dos materiais constituintes terra, cimento e água e nos parâmetros que influenciam diretamente o desempenho técnico e ambiental dos TCTC.

Observou-se que a terra utilizada na produção dos TCTC deve atender a critérios técnicos rigorosos, especialmente no que se refere à granulometria e aos Limites de Atterberg. A faixa ideal de umidade para compactação situa-se entre 10% e 14%, sendo essa condição essencial para a obtenção de densidade máxima e mínima porosidade, conforme indicado pelos ensaios Proctor (ABCP, 2004; PINHEIRO et al., 2013). A presença de argilominerais como caulinita e montmorilonita influencia diretamente a compatibilidade com o cimento e a estabilidade volumétrica do compósito (CATTON, 1959; REDDI; JAIN; YUN, 2012).

Em relação ao cimento, os tipos CP II e CP III destacam-se como alternativas mais sustentáveis, devido à incorporação de adições minerais que reduzem a pegada de carbono em até 30% quando comparados ao CP V-ARI (HEWLETT; LISKA, 2019; MEHTA; MONTEIRO, 2006). A dosagem de cimento recomendada para estabilização varia entre 6% e 10%, dependendo da composição da terra, sendo que terras arenosas demandam menos cimento que terras argilosas (ABCP, 2004; DANSO et al., 2015).

A ausência do processo de queima na produção dos TCTC representa uma vantagem ambiental significativa, reduzindo a energia incorporada e as emissões de CO_2 em relação aos tijolos cerâmicos e blocos de concreto (AGOPYAN; JOHN, 2011; CALDAS; DIAS; FILHO, 2021). A utilização de matérias-primas locais e o aproveitamento de terras provenientes de escavações reforçam o caráter sustentável da tecnologia, promovendo práticas de economia circular (MARTINS et al., 2018; PACHECO-TORGAL; JALALI, 2012).

Esses resultados sugerem que a produção de TCTC apresenta condições de otimização ambiental, especialmente quando há controle rigoroso dos parâmetros de compactação e seleção criteriosa dos materiais. Verifica-se uma tendência de valorização dos cimentos compostos e da caracterização mineralógica da terra como estratégias para reduzir impactos ambientais e melhorar o desempenho técnico dos TCTC.

Além disso, a análise histórica evidencia que a evolução da tecnologia dos TCTC está vinculada à institucionalização de normas e ao avanço da ciência dos materiais, o que poderia reforçar a viabilidade técnica da sua aplicação em larga escala (SCHROEDER, 2012; VENKATARAMA REDDY, 2012).

3. PRODUÇÃO DE TCTC

A tecnologia de produção de TCTC tem sido progressivamente valorizada no contexto da construção civil, evidenciando-se pela adaptabilidade a diferentes escalas produtivas e pelos benefícios econômicos e ambientais associados à sua aplicação. Esta seção tem como objetivo apresentar e analisar as distintas configurações operacionais para a produção de TCTC em pequena, média e larga escala, examinando suas características técnicas, estrutura organizacional e impactos na eficiência produtiva.

Os modelos operacionais se estendem desde estruturas técnicas simplificadas, com mínima mecanização e uso intensivo de força de trabalho (JARFEL; SAHARA, 2024b; VERDE EQUIPAMENTOS, 2022), até configurações altamente automatizadas, que requerem apenas supervisão pontual, devido à automação dos processos produtivos (ALROMA, 2025e; ECO MÁQUINAS, 2024c). Cada escala produtiva apresenta vantagens e desafios específicos, influenciando diretamente a seleção de equipamentos, a organização do processo produtivo e a viabilidade econômica do empreendimento.

A compreensão dessas abordagens produtivas visa fornecer subsídios técnicos e analíticos para decisões estratégicas relacionadas à implantação e à otimização de unidades produtoras de TCTC. A investigação fundamenta-se em dados atualizados do primeiro trimestre de 2024 e em estudos precedentes (CALDAS; DIAS; FILHO, 2021; MELO *et al.*, 2011), com ênfase na eficiência energética, nos custos de produção e no rendimento técnico dos TCTC. Dessa forma, busca-se contribuir para uma visão crítica e abrangente sobre os caminhos da produção de TCTC em contextos diversos, desde empreendimentos artesanais até operações industriais em larga escala.

3.1 EQUIPAMENTOS E MAQUINARIOS NA PRODUÇÃO DE TCTC

A produção de TCTC demanda o uso de equipamentos especializados que assegurem a eficiência operacional e a qualidade técnica do produto. O parque tecnológico básico é composto por quatro categorias principais de equipamentos: prensas, trituradores, misturadores e sistemas de transporte, cada qual desempenhando funções específicas e complementares na cadeia produtiva.

As prensas representam o núcleo do processo produtivo, sendo responsáveis pela conformação dos tijolos por meio da compressão da mistura de terra e cimento em moldes dimensionados. Esses equipamentos variam desde modelos manuais (JARFEL; SAHARA, 2024b; VERDE EQUIPAMENTOS, 2022), até sistemas hidráulicos automatizados de alta capacidade (ALROMA, 2025e; ECO MÁQUINAS, 2024c), com diferentes níveis de pressão aplicável e produtividade horária.

Os trituradores desempenham papel essencial na preparação da matéria-prima, promovendo a fragmentação da terra em partículas de granulometria controlada e a eliminação de impurezas, o que é fundamental para garantir a homogeneidade da mistura (JARFEL; SAHARA, 2024d; VERDE EQUIPAMENTOS, 2024e). Os misturadores, por sua vez, são responsáveis pela homogeneização precisa dos componentes terra, cimento e água assegurando a distribuição uniforme do aglutinante e a consistência ideal para a etapa de compressão (ALROMA, 2025d; ECO MÁQUINAS, 2024b; VERDE EQUIPAMENTOS, 2024d).

Por fim, os sistemas de transporte, como esteiras transportadoras e empilhadeira, otimizam o fluxo de materiais entre as diferentes fases do processo, contribuindo para a racionalização operacional e a redução do esforço manual (VERDE EQUIPAMENTOS, 2024a).

A seleção e integração adequada desses equipamentos são determinantes para o desempenho global do sistema produtivo, influenciando diretamente a qualidade dimensional e mecânica dos TCTC, a produtividade da unidade fabril e a eficiência no uso de recursos. A correta especificação técnica, considerando as características da matéria-prima e o volume de produção almejado, constitui um fator crítico para o êxito de empreendimentos baseados nessa tecnologia.

3.1.1 PRENSAS

As prensas constituem o equipamento central no processo de produção dos TCTC, sendo responsáveis pela conformação dos componentes por meio da compressão eficiente da mistura de terra e cimento em moldes específicos. A correta operação desses equipamentos é essencial para garantir a uniformidade dimensional e a qualidade superficial dos tijolos, especialmente considerando que os TCTC são elementos de alvenaria aparente, dispensando revestimentos adicionais (ABNT, 2012a). Essa característica reforça a necessidade de precisão no processo de

prensagem, a fim de assegurar desempenho técnico e acabamento adequado.

O mercado disponibiliza três categorias principais de prensas para a produção de TCTC, cada uma com características operacionais distintas: Prensas Manuais; Prensas Semiautomáticas; Prensas Automáticas. A escolha da tipologia de prensa deve considerar variáveis como o volume de produção desejado, a disponibilidade de mão de obra, o capital de investimento e os requisitos de eficiência energética. Essa decisão impacta diretamente na qualidade dos TCTC produzidos, na rentabilidade do empreendimento e na sustentabilidade do processo produtivo como um todo.

3.1.1.1 Prensas Manuais

As prensas manuais são equipamentos de acionamento exclusivamente humano, voltados principalmente à produção de TCTC em pequena escala. Nesse sistema, os operadores exercem controle direto sobre o processo de compressão, aplicando força manual sobre a mistura de terra e cimento posicionada nos moldes específicos. O uso de alavancas mecânicas auxilia na amplificação da força aplicada, garantindo compressão do material.

A operação típica envolve dois agentes: um operador responsável pelo acionamento do mecanismo de compressão e um auxiliar encarregado da remoção dos tijolos dos moldes e do transporte para a área de cura. Essa divisão de tarefas contribui para a otimização do fluxo produtivo, apesar das restrições inerentes ao processo manual.

Do ponto de vista técnico, as prensas manuais apresentam capacidade produtiva estimada entre 1.000 e 1.500 unidades por jornada de 8 horas, atendendo demandas de pequena e média escala. Os equipamentos incluem moldes especiais e silo de armazenamento integrado (Figura 10), além de sistemas de ajuste de altura (Figura 12), que conferem versatilidade para a produção de diferentes componentes incluindo mais de trinta variantes de TCTC, pisos e pastilhas (Figura 11).

A principal vantagem desses sistemas reside em sua portabilidade e independência energética, o que os torna apropriados para contextos com infraestrutura reduzida ou acesso limitado a energia (JARFEL; SAHARA, 2024d; VERDE EQUIPAMENTOS, 2024e). Comparativamente, sua produtividade é mais limitada que a dos modelos semiautomáticos e automáticos, em virtude da dependência de esforço físico contínuo.

Figura 10 –Prensas manuais

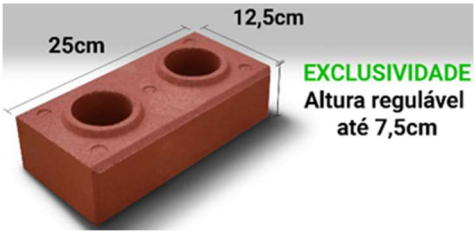
Fonte: Verde Equipamentos (2022).

Figura 11 – Variedade dos produtos

Fonte: Verde Equipamentos (2022).

Fonte: Jarfel; Sahara (2024a).

Figura 12 – Tijolo com altura regulável



Fonte: Verde Equipamentos (2022).

3.1.1.2 Prensas Semiautomáticas

As prensas semiautomáticas, ilustradas na Figura 13, configuram sistemas hidráulicos de acionamento elétrico que representam um avanço tecnológico relevante em relação aos modelos manuais. Esses equipamentos integram motores elétricos, sistemas hidráulicos especializados e componentes auxiliares como silo integrado, gaveta dosadora e pistão hidráulico formando um conjunto técnico voltado à compressão eficiente dos TCTC.

Do ponto de vista operacional, essas prensas operam por meio de uma integração entre controle manual e funções automatizadas auxiliares. Funções secundárias, como liberação de pressão e ejeção dos tijolos moldados, são automatizadas, enquanto o operador permanece responsável pelo controle principal do processo. Essa configuração proporciona um desempenho significativamente superior em relação aos sistemas de operação manual (JARFEL; SAHARA, 2024a; VERDE EQUIPAMENTOS, 2024b).

A capacidade produtiva desses equipamentos situa-se entre 1.500 e 3.000 unidades por jornada de 8 horas, variando conforme as configurações adotadas e as características do processo. O sistema de ajuste de altura integrado confere

versatilidade dimensional, viabilizando a fabricação de mais de 30 modelos distintos de componentes de terra-cimento comprimido, incluindo diversas tipologias de TCTC, pisos e pastilhas.

A adoção da semiautomação representa uma solução estratégica que equilibra investimento inicial e ganhos operacionais, posicionando essas prensas como alternativa ideal para empreendimentos de médio porte que visam otimizar o fluxo produtivo sem incorrer nos custos associados à automação integral.

Figura 13 –Prensas semiautomáticas

Fonte: Verde Equipamentos (2024b).

Fonte: Jarfel; Sahara (2024).

3.1.1.3 Prensas Automáticas

As prensas automáticas representam o estágio avançado de automação na fabricação de TCTC, caracterizando-se pela operação autônoma e controle integral por sistemas computadorizados. Conforme ilustrado na Figura 14, esses equipamentos realizam de forma totalmente automatizada todas as etapas do processo da compressão, ejeção e encaminhamento dos componentes para cura (ALROMA, 2025e).

A arquitetura tecnológica dessas prensas integra sistemas hidráulicos e pneumáticos de alta precisão, monitorados por sensores especializados que asseguram o controle dimensional e qualitativo dos produtos. Recursos avançados, como temporizadores programáveis e sistemas de ajuste automático de altura, conferem elevada versatilidade, permitindo a fabricação de uma ampla gama de componentes incluindo tijolos, blocos e pisos de terra comprimida em diferentes formatos e dimensões.

O desempenho produtivo desses sistemas alcança aproximadamente 600 unidades por hora (4800 TCTC por dia), estabelecendo um padrão de eficiência ideal para operações em larga escala. Essa produtividade é sustentada pela automação e

padronização dos processos, que promovem maior estabilidade operacional e elevada consistência na qualidade dos produtos, reduzindo significativamente a variabilidade associada a procedimentos manuais (ALROMA, 2025e; ECO MÁQUINAS, 2024c; VERDE EQUIPAMENTOS, 2024c).

A incorporação de prensas automáticas atende às exigências de empreendimentos com elevada demanda e rigor técnico, consolidando-se como a solução mais avançada disponível na produção industrial de TCTC.

Figura 14 –Prensas automáticas

Fonte: Verde Equipamentos (2024c).

Fonte: Eco Máquinas (2024).

3.1.2 TRITURADOR

Os trituradores são equipamentos fundamentais na etapa de preparação da matéria-prima destinada à produção de TCTC. Sua função principal consiste na fragmentação e homogeneização da terra, transformando torrões e agregados em partículas com granulometria controlada. Simultaneamente, promovem a remoção de impurezas e a incorporação uniforme de estabilizantes, como o cimento, assegurando a qualidade da mistura (JARFEL; SAHARA, 2024d; VERDE EQUIPAMENTOS, 2024e).

Conforme ilustrado na Figura 15, esses equipamentos, de acionamento elétrico, integram-se de forma sinérgica ao processo produtivo, sendo projetados para operar em conjunto com as prensas de TCTC. O processo de trituração e homogeneização é considerado crítico, pois influencia diretamente a consistência da matéria-prima e, consequentemente, as propriedades mecânicas e a durabilidade dos componentes produzidos (ECO MÁQUINAS, 2024d).

A operação baseia-se em um sistema de turbilhonamento, com capacidade

de processamento de até 3 m³ por hora (JARFEL; SAHARA, 2024d). Essa configuração técnica permite sua aplicação em diferentes fases do processo produtivo desde a preparação inicial da terra até a mistura final com o cimento garantindo homogeneidade adequada para a etapa de compressão.

A integração eficiente do triturador à cadeia produtiva contribui para a maximização do desempenho do sistema, reduzindo a variabilidade da matéria-prima e minimizando a necessidade de correções manuais. Como resultado, há um impacto positivo direto na qualidade e uniformidade dos TCTC fabricados.

Figura 15 –Trituradores elétricos

Fonte: Verde Equipamentos (2024e).

Fonte: Jarfel; Sahara (2024d).

3.1.3 PROCESSADOR

Os processadores, ilustrados na Figura 16, são equipamentos multifuncionais que integram, em uma única unidade, as etapas críticas de peneiramento, trituração e mistura na produção de TCTC. Projetados para operações de alta capacidade, esses sistemas garantem eficiência e qualidade na preparação da matéria-prima por meio da automação dos processos envolvidos (ALROMA, 2025d; ECO MÁQUINAS, 2024b; VERDE EQUIPAMENTOS, 2024d).

A operação é caracterizada pela dosagem precisa de terra, cimento, água e aditivos, assegurando consistência e homogeneidade na mistura final. Notavelmente, todo o ciclo pode ser conduzido por um único operador, o que representa uma otimização significativa da mão de obra em comparação aos sistemas fragmentados de preparação (ALROMA, 2025d).

A capacidade de processamento desses equipamentos pode acompanhar uma produção diária entre 3.000 e 6.000 unidades de TCTC, variando conforme as

propriedades do material processado e as configurações operacionais adotadas (ALROMA, 2025d; ECO MÁQUINAS, 2024b; VERDE EQUIPAMENTOS, 2024d). Essa faixa posiciona os processadores como solução técnica ideal para empreendimentos de médio e grande porte, nos quais a eliminação de gargalos produtivos e a garantia de homogeneidade da mistura são fatores determinantes para o desempenho industrial.

A integração das três funções em um único equipamento simplifica substancialmente o *layout* fabril, reduz a necessidade de múltiplos sistemas especializados e minimiza os pontos de transferência de material, contribuindo diretamente para a eficiência global do processo de produção de TCTC.

Figura 16 – Processadores de terra-cimento

Fonte: (VERDE EQUIPAMENTOS, 2024d).

Fonte: (ALROMA, 2025d).

3.1.4 ESTEIRAS TRANSPORTADORAS

As esteiras transportadoras, conforme ilustrado na Figura 17, constituem sistemas essenciais para a movimentação eficiente de materiais ao longo da cadeia produtiva dos TCTC. Esses equipamentos atuam como elementos de interligação entre as diferentes etapas do processo, viabilizando o transporte contínuo desde a matéria-prima bruta (solo *in natura*) até os TCTC recém-ejetados das prensas, passando pela terra triturada e pela mistura homogeneizada de terra-cimento.

Em configurações de médio e grande porte, as esteiras assumem papel estratégico ao assegurar fluxo constante de materiais, eliminando interrupções operacionais e otimizando a lógica interna da unidade fabril. A articulação eficiente entre as etapas produtivas favorece a continuidade operacional, reduzindo o tempo de ciclo e a necessidade de manipulações manuais.

A seleção técnica e o dimensionamento adequado desses sistemas de

transporte são fatores críticos para o desempenho operacional, influenciando tanto a capacidade produtiva quanto a integridade dos materiais movimentados (VERDE EQUIPAMENTOS, 2024a). A especificação correta deve considerar variáveis como capacidade de carga, velocidade de operação, inclinação e distância a ser percorrida, de modo a atender às particularidades de cada *layout* produtivo.

A implementação eficiente de sistemas de transporte contínuo representa, portanto, um diferencial estratégico para a escalabilidade da produção de TCTC, viabilizando a transição de operações artesanais para sistemas industriais com ganhos expressivos em produtividade e padronização qualitativa.

Figura 17 – Esteira transportadora

Fonte: Verde Equipamentos (2024a).

3.1.5 EQUIPAMENTOS AUXILIARES

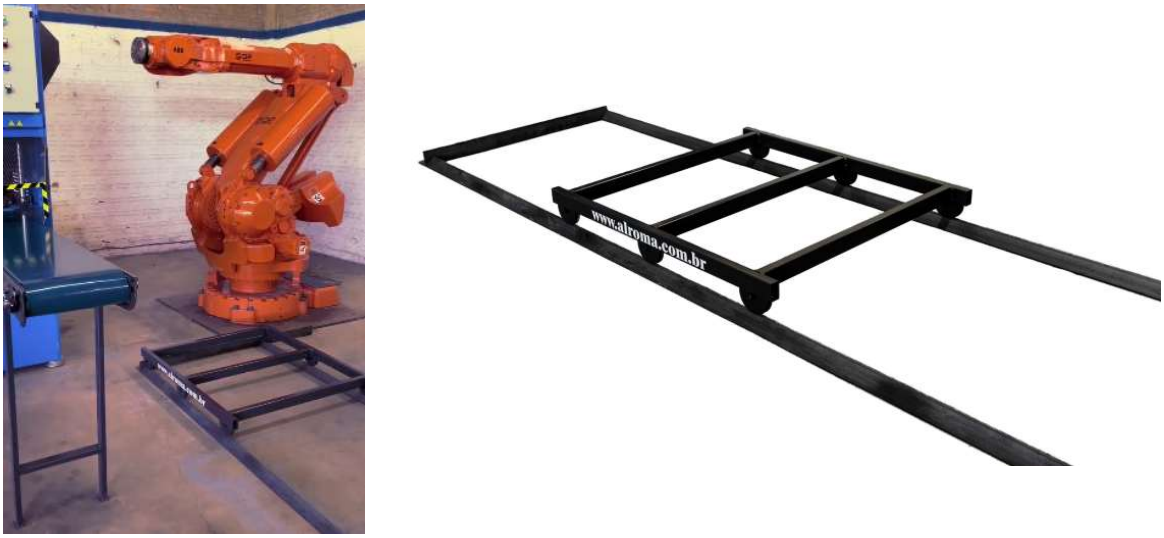
Na cadeia produtiva dos TCTC, o uso de equipamentos auxiliares é considerado um recurso complementar para o aumento da eficiência operacional, embora não seja imprescindível em todos os contextos produtivos (ABCP, 2000). Entre esses dispositivos, destaca-se a empilhadeira Figura 18, um ativo logístico multifuncional que contribui para a racionalização dos esforços físicos. Sua aplicação abrange desde o abastecimento de insumos como a terra até a movimentação e empilhamento de paletes carregados com TCTC, direcionando-os às áreas de cura e estocagem final, o que favorece a consolidação do fluxo interno de materiais (ALROMA, 2025a).

Figura 18 – Empilhadeira e acessórios de carga

Fonte: (ALROMA, 2025a)

Em um nível mais avançado de automação, o robô paletizador (Figura 19) configura-se como um sistema programável dedicado à organização automatizada dos tijolos sobre os paletes. Este equipamento opera de forma integrada ao vagão paletizador, que permanece posicionado junto ao setor de prensagem durante toda a jornada de trabalho. O vagão realiza o deslocamento automatizado dos paletes por trilhos até o setor de cura, viabilizando a movimentação automatizada dos paletes e contribuindo para a integração eficiente das etapas produtivas (ALROMA, 2025f).

Figura 19 – Robô e vagão Paletizador



Fonte: (ALROMA, 2025f)

Complementarmente, a mesa rotatória ergonômica (Figura 20) representa uma solução intermediária voltada à melhoria das condições de trabalho na linha de

produção. Seu design incorpora um mecanismo de rotação que permite ao operador girar o palete durante o arranjo dos componentes, otimizando a organização espacial dos TCTC e aprimorando a ergonomia da tarefa, em conformidade com os princípios de eficiência produtiva (ALROMA, 2025b). Essa funcionalidade elimina a necessidade de deslocamento ao redor do palete, permitindo que o operador permaneça em posição fixa enquanto gira a mesa para manter o ponto de acomodação sempre acessível. Além disso, a elevação da superfície contribui para a preservação da saúde física do colaborador, ao evitar movimentos repetitivos.

Figura 20 – Mesa rotatória ergonômica

Fonte: (ALROMA, 2025b)

3.2 ESCALAS DE PRODUÇÃO

O conceito de escala de produção refere-se à capacidade produtiva de uma unidade fabril, mensurada pelo volume de unidades fabricadas em determinado intervalo de tempo. No contexto da produção de TCTC, essa escala pode ser classificada em três níveis principais pequena (até 1.000 unidades/dia), média (cerca de 1.500 unidades/dia) e larga escala (acima de 4.800 unidades/dia) cada qual com especificidades operacionais e tecnológicas distintas.

Cada escala apresenta vantagens e desafios específicos, influenciando decisões estratégicas relacionadas à seleção tecnológica, ao dimensionamento dos equipamentos, à estrutura organizacional e à capacidade de adaptação frente às oscilações de mercado. A escolha adequada da escala produtiva constitui um fator decisivo para a viabilidade econômica e operacional de empreendimentos baseados na tecnologia de produção de TCTC.

3.2.1 PEQUENA ESCALA

A produção em pequena escala representa o nível mais elementar na fabricação de TCTC, caracterizando-se pelo uso predominante de força física humana

na condução dos processos produtivos. Esse modelo operacional exige intervenção direta e contínua da mão de obra para a execução das etapas fundamentais, desde o preparo da matéria-prima até a compressão final dos componentes.

Conforme ilustrado na Figura 21, a configuração mais básica e energeticamente independente utiliza prensas manuais para moldagem da mistura terra-cimento. Nessa modalidade, o processamento é inteiramente manual, envolvendo destorroamento e peneiramento da terra, seguido da mistura com cimento e água etapa que, em alguns casos, é assistida por betoneiras convencionais.

Figura 21 – Configuração para a produção de TCTC a pequena escala

Fonte: Adaptação Verde Equipamentos (2024c).

Uma variante aprimorada dentro dessa mesma escala incorpora equipamentos elétricos especializados, como trituradores e peneiradoras, que otimizam o processamento e a homogeneização dos materiais. Ainda assim, mesmo com esse suporte tecnológico, mantém-se a dependência essencial de mão de obra qualificada para todas as atividades produtivas.

Apesar do suporte pontual de equipamentos, o desempenho operacional desse modelo continua restrito frente às configurações de média e larga escala, especialmente nos aspectos de produtividade horária e padronização dos produtos, o que limita sua inserção competitiva no mercado.

Este arranjo produtivo requer uma equipe de três operários, cada um responsável por uma etapa específica: abastecimento e preparo do material, operação de moldagem/compressão, e armazenamento com gestão inicial da cura dos TCTC. Devido à sua natureza essencialmente manual, essa configuração é projetada para operações de pequena escala, com capacidade produtiva de até 1.000 unidades por dia em uma jornada padrão de 8 horas (JARFEL; SAHARA, 2024b; VERDE

EQUIPAMENTOS, 2022).

Uma característica distintiva desse modelo reside no baixo consumo de energia elétrica em comparação às alternativas semiautomáticas e automáticas disponíveis no mercado. Trata-se da opção mais acessível em termos de investimento inicial e complexidade tecnológica, sendo ideal para empreendimentos iniciantes, projetos comunitários ou contextos com infraestrutura energética limitada (VERDE EQUIPAMENTOS, 2022).

3.2.2 MÉDIA ESCALA

A produção em média escala configura-se como um nível intermediário na fabricação de TCTC, caracterizando-se pela utilização exclusiva de equipamentos de acionamento elétrico, que dispensam o uso direto de força humana nas etapas de processamento da matéria-prima e compressão dos componentes.

Conforme ilustrado na Figura 22, a configuração básica desse modelo produtivo inclui uma prensa hidráulica elétrica, um triturador e uma peneira rotativa conjunto tecnológico que viabiliza uma capacidade de produção de até 1.500 unidades por jornada de 8 horas (JARFEL; SAHARA, 2024a; VERDE EQUIPAMENTOS, 2024b). A operação do sistema requer a alocação de três operários especializados, com funções distribuídas entre abastecimento e alimentação dos equipamentos, operação de moldagem/compressão e gestão do armazenamento e cura dos TCTC produzidos.

Do ponto de vista energético, esse modelo apresenta consumo superior ao sistema manual, em razão da dependência de equipamentos elétricos com maior sofisticação tecnológica. Paralelamente, o investimento inicial necessário para aquisição desses dispositivos é significativamente mais elevado, refletindo a complexidade operacional e a capacidade produtiva ampliada do sistema.

Essa configuração representa, portanto, um equilíbrio estratégico entre aumento de produtividade e investimento moderado, posicionando-se como solução ideal para empreendimentos em fase de expansão que buscam transição da produção artesanal para modelos de produção industrial automatizados, sem incorrer nos custos associados à automação integral.

Figura 22 – Configuração para a produção de TCTC a média escala

Fonte: Adaptação Verde Equipamentos (2024c).

3.2.3 LARGA ESCALA

Os modelos de produção em larga escala representam o estágio mais avançado da tecnologia aplicada à fabricação de TCTC, sendo projetados especificamente para operações industriais de alta densidade. Caracterizam-se pela adoção de sistemas integralmente elétricos, equipados com sensores especializados e controles automatizados, capazes de executar todas as etapas produtivas com elevada precisão e rendimento.

Conforme ilustrado na Figura 23, essa configuração tecnológica inclui prensas automáticas de compressão de alta performance, processadores ou multiprocessadores integrados para dosagem e homogeneização dos insumos, além de esteiras transportadoras que asseguram o fluxo contínuo entre as etapas. Esses componentes formam um sistema coeso voltado à maximização da produtividade e à automação completa dos processos, com capacidade produtiva de até 5.760 unidades por dia o equivalente a 720 tijolos por hora em uma jornada padrão de 8 horas exigindo apenas um operador para supervisão geral do sistema (ALROMA, 2025c, e; ECO MÁQUINAS, 2024b, c; VERDE EQUIPAMENTOS, 2024d, c).

Como consequência da complexidade e intensidade tecnológica envolvida, esse modelo apresenta consumo energético elevado. O investimento inicial necessário para sua implantação é substancialmente superior aos modelos de pequena e média escala, sendo economicamente viável apenas para operações com alta demanda e inseridas em mercados consolidados.

Figura 23 – Configuração básica para a produção de TCTC a larga escala

Fonte: Adaptação Verde Equipamentos (2024c).

3.3 PRODUTIVIDADE E RENDIMENTO DOS TCTC

A produtividade dos TCTC apresenta variações significativas em função da escala de produção e do grau de automação dos equipamentos utilizados. Segundo dados de Jarfel & Sahara (2024c), referentes ao primeiro trimestre de 2024, o modelo de pequena escala operando com prensa manual e capacidade de até 1.500 unidades por dia (187,5 tijolos/hora) apresenta custo de produção de R$ 789,30 por milheiro, conforme detalhado na Tabela 1. Esse valor contempla o consumo de 2,25 m³ de terra e 7 sacas de cimento Portland (equivalente a 10% em massa), com rendimento de 56 unidades/m², o que corresponde a aproximadamente 18 m² de alvenaria por milheiro.

Tabela 1 – Custo de produção por milheiro de TCTC

Item	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo parcial
Mão de obra	h	16,00	R$ 15,63	R$ 250,00
Mat. Prima (Terra)	m^3	2,25	R$ 100,00	R$ 225,00
Cimento	sacas	7,00	R$ 44,90	R$ 314,30
Custo total na produção de 1 milheiro de tijolo				R$ 789,30

Fonte: Adaptação de JARFEL; SAHARA (2024)

Em comparação, Melo et al. (2011) registraram desempenho superior para os blocos “Mattone”, que, com densidade de 36 unidades/m² e teor de cimento reduzido para 5%, atingem 28 m² por milheiro. Apesar do rendimento técnico elevado, sua adoção no mercado brasileiro permanece limitada por fatores ainda não plenamente esclarecidos. Isso implica que, para cada metro quadrado de TCTC produzido artesanalmente, são utilizados cerca de 20 kg de cimento, embora essa quantidade

possa variar conforme o modelo produtivo adotado (ver seção 6.4.2.2), especialmente em função da força de compressão aplicada durante a moldagem dos componentes.

A análise econômica evidencia o cimento Portland como principal componente dos custos variáveis, representando 39,82% do total. Esse fator transcende a esfera financeira, impactando diretamente a sustentabilidade do processo. Conforme demonstrado por Röck et al. (2020) e Caldas, Dias e Filho (2021), o cimento é o principal responsável pela pegada de carbono dos TCTC, configurando um paradoxo entre a ecoeficiência do sistema construtivo e os impactos ambientais de seu principal estabilizante. Estudos indicam que a indústria cimenteira responde por aproximadamente 8% das emissões globais de CO_2 (GLOBALABC, 2020), o que justifica a busca por alternativas tecnológicas, como a substituição parcial por adições pozolânicas estratégia que permite reduzir simultaneamente os custos e as emissões (BAHAR; BENAZZOUG; KENAI, 2004; ELAHI; SHAHRIAR; ISLAM, 2021a; ISLAM; TAUSIF-E-ELAHI; *et al.*, 2020).

A viabilidade econômica dos TCTC se fortalece quando considerados os benefícios ambientais e sociais associados à técnica. Conforme Agopyan e John (2011), o uso de solos locais e mão de obra comunitária potencializa a acessibilidade habitacional, especialmente em regiões com déficit habitacional. Adicionalmente, a avaliação do ciclo de vida confirma a superioridade ambiental dos TCTC frente aos sistemas convencionais, com reduções de até 77% nas emissões de CO_2 equivalente em comparação às alvenarias cerâmicas (CALDAS; DIAS; FILHO, 2021).

Essa performance ambiental, aliada à durabilidade comprovada que supera quatro décadas com manutenção reduzida (SCHROEDER, 2012; WALKER, 1995), posiciona os TCTC como tecnologia estratégica para a construção sustentável, devido à sua baixa pegada ambiental, potencial de uso de materiais locais e eficiência energética. No entanto, sua adoção em larga escala no Brasil ainda enfrenta entraves normativos. Conforme apontado por Schroeder (2012), há uma lacuna institucional significativa, evidenciada pela exclusão dos componentes terrosos do escopo do Sistema de Avaliação da Conformidade (SIDAC), o que limita sua regulamentação técnica e dificulta sua inserção em programas oficiais de habitação e infraestrutura

Essa contradição entre o potencial sustentável dos TCTC e a ausência de normatização adequada revela um desafio estrutural que precisa ser superado para que essa tecnologia possa cumprir plenamente seu papel na transição para modelos

construtivos mais ecológicos e inclusivos.

3.4 RESULTADOS PARCIAIS

Considerando o panorama produtivo já descrito, foram sistematizadas as configurações operacionais da produção de TCTC, com foco na caracterização técnica dos equipamentos utilizados, nas escalas produtivas e na análise preliminar de produtividade e eficiência energética. A investigação contemplou dados atualizados do primeiro trimestre de 2024, além de referências técnicas consolidadas.

Os resultados parciais indicam que a produção de TCTC pode ser estruturada em três escalas principais (pequena, média e larga) cada uma com especificidades operacionais e impactos distintos sobre a produtividade e o consumo energético. A produção em pequena escala, baseada em prensas manuais, apresenta capacidade de até 1.000 unidades por dia, com baixo consumo de energia elétrica e dependência operacional de força de trabalho físico (JARFEL; SAHARA, 2024b; VERDE EQUIPAMENTOS, 2022). Já os modelos de média escala, com prensas hidráulicas e trituradores elétricos, alcançam até 1.500 unidades por jornada, equilibrando investimento e rendimento técnico (VERDE EQUIPAMENTOS, 2024b). Por fim, os sistemas automatizados de larga escala atingem até 5.760 unidades por dia, com operação supervisionada por apenas um operador, embora apresentem consumo energético elevado e exigência de capital intensivo (ALROMA, 2025c; ECO MÁQUINAS, 2024c).

A análise dos equipamentos revelou que as prensas automáticas são capazes de produzir até 600 unidades por hora, com controle dimensional por sensores e sistemas hidráulicos de alta precisão. A integração de trituradores, misturadores e esteiras transportadoras contribui para a padronização dos tijolos e a redução de variabilidade na mistura, fatores críticos para a qualidade técnica dos TCTC (ECO MÁQUINAS, 2024d; VERDE EQUIPAMENTOS, 2024a).

Do ponto de vista econômico, o custo de produção por milheiro em pequena escala foi estimado em R$ 789,30, com o cimento representando 39,82% do custo total (JARFEL; SAHARA, 2024c). A dosagem utilizada foi de 10% em massa, equivalente a 7 sacas por milheiro, o que reforça o papel do cimento como principal componente de impacto financeiro e ambiental. Comparativamente, blocos como o “Mattone”, com apenas 5% de cimento, apresentaram rendimento técnico superior,

atingindo 28 m² por milheiro (MELO et al., 2011).

Esses resultados sugerem que a eficiência produtiva dos TCTC está diretamente relacionada ao grau de automação e à integração dos equipamentos. Verifica-se uma tendência de aumento da produtividade e da padronização dos componentes à medida que se avança para escalas maiores, embora isso implique maior consumo energético e investimento inicial. A análise econômica confirma o cimento Portland como o principal insumo de impacto, tanto em termos de custo quanto de emissões de CO_2, o que reforça a necessidade de estratégias de substituição parcial por adições pozolânicas ou escorias de alto forno (RÖCK et al., 2020; CALDAS; DIAS; FILHO, 2021).

A viabilidade ambiental dos TCTC é fortalecida pela ausência de processo de queima e pelo uso de matérias-primas locais, com reduções de até 77% nas emissões de CO_2 equivalente em comparação aos sistemas convencionais de alvenaria (CALDAS; DIAS; FILHO, 2021). Essa performance, aliada à durabilidade superior a quatro décadas (SCHROEDER, 2012; WALKER, 1995), posiciona os TCTC como tecnologia estratégica para a construção sustentável.

4. VARIÁVEIS TÉCNICAS MECANICAS

A produção de TCTC envolve uma interação complexa de variáveis que influenciam diretamente sua qualidade estrutural, durabilidade e viabilidade técnica. Este capítulo aborda os principais fatores mecânicos que condicionam o desempenho dos TCTC, com destaque para a resistência à compressão, a força aplicada durante a moldagem, o teor de cimento, as propriedades da matéria-prima e o controle da umidade.

Estudos como os de Morel et al. (2007), Heathcote (1991) e Bahar et al. (2004) demonstram que a resistência mecânica dos TCTC está fortemente associada à densificação adequada da mistura, à proporção de aglomerantes utilizados e às condições de produção. A escolha do método de compressão seja manual, hidráulico ou dinâmico impacta não apenas a resistência final, mas também a uniformidade dimensional e a durabilidade dos componentes.

A dosagem de cimento constitui outro parâmetro crítico. Embora essencial para a estabilização da terra, seu uso deve ser cuidadosamente balanceado para evitar custos excessivos e mitigar impactos ambientais. Paralelamente, a qualidade da terra utilizada e o teor de água durante a moldagem são determinantes para a formação de uma microestrutura compacta e resistente, capaz de garantir o desempenho mecânico esperado.

Ao longo deste capítulo, serão discutidas as variáveis incidentes e apresentadas recomendações técnicas que orientam a produção de TCTC, evidenciando a importância do controle rigoroso e da avaliação contínua dos parâmetros envolvidos. A análise integrada desses fatores contribui para o desenvolvimento de soluções construtivas sustentáveis, alinhando resistência mecânica e viabilidade econômica.

4.1 RESISTENCIA MECÂNICA

A resistência à compressão dos TCTC constitui um dos parâmetros técnicos fundamentais para sua aplicação, tanto como elementos de vedação quanto em alvenaria estrutural. Conforme destacado pela NBR-8492 (2012b) e Morel et al. (2007), essa propriedade é fortemente influenciada por três variáveis principais: a força de compressão aplicada durante a moldagem, o teor de cimento na mistura e o

teor de umidade presente no momento da produção. A interação entre esses fatores determina a densidade seca alcançada, indicador diretamente correlacionado à resistência mecânica final do TCTC.

A partir da Tabela 2, é possível inferir que a obtenção de TCTC com resistência mecânica satisfatória depende de uma abordagem integrada. O teor de cimento, o tipo de compressão e o controle da umidade devem ser tratados como variáveis interdependentes. A escolha da técnica de moldagem e dos insumos não deve se limitar aos critérios normativos mínimos, mas considerar uma visão sistêmica que contemple durabilidade, eficiência térmica e viabilidade econômica, ajustada ao contexto local.

Tabela 2 - Resistência à compressão de TCTC – incidência do teor de cimento

Autor	Método de Compressão	Teor de Cimento (%)	Resistência Média (MPa)	Condição Testada
Morel et al. (2007)	Manual	4,00	2,00	Seco
Morel et al. (2007)	Hidráulica	10,00	5,00	Seco
Bahar et al. (2004)	Compressão Dinâmica	5,00	10,00	Seco
Bahar et al. (2004)	Compressão Dinâmica	5,00	2,00	Após imersão
Heathcote (1991)	Estática	5,00	2,20	Seco
Cid-F. et al. (2012)	Estática32	8,00	2,01	Seco & úmido

Fonte: O autor com base nos estudos citados.

4.2 FORÇA DE COMPRESSÃO

A força de compressão aplicada na produção de TCTC é um fator determinante para a obtenção de alta densidade seca, reduzida porosidade e, consequentemente, melhor desempenho mecânico e durabilidade dos TCTC. A compressão não apenas garante o rearranjo eficiente das partículas da terra como influencia diretamente na ligação entre partículas e na redução de vazios internos.

Segundo Morel et al. (2007), existe uma correlação clara entre o nível de energia aplicado durante a compressão e a resistência à compressão dos TCTC. Equipamentos que operam com pressões elevadas como as prensas hidráulicas produzem componentes com resistência superior a 3 MPa, enquanto dispositivos manuais, que operam com forças reduzidas (abaixo de 2 MPa), resultam em tijolos com desempenho limitado. Esse comportamento é reforçado por Heathcote (1991), que propôs uma relação matemática entre densidade seca e resistência, sugerindo que a aplicação de forças superiores àquelas encontradas em métodos manuais é

essencial para o uso estrutural dos TCTC.

O estudo de Bahar et al. (2004) oferece uma análise aprofundada sobre a compressão dinâmica, destacando seu potencial para aplicações mais exigentes. Utilizando um peso de 12,5 kg lançado de uma altura de 820 mm, foram aplicadas energias específicas entre 3,0 a 10,3 J/cm³, resultando em resistências à compressão superiores a 10 MPa em condição seca. Esse método se mostra eficaz para terras com 30% de areia e 62% de argila/silte, promovendo redução da absorção por capilaridade e melhorias na resistência após imersão cerca de 2 MPa. Contudo, os autores destacam que a eficiência do processo requer controle preciso da energia aplicada, sendo sua adoção em escala industrial limitada pelo custo e complexidade de equipamentos.

Guettala et al. (2006) reforçam a importância da aplicação de força de 10 MPa como ideal para solos argilo-arenosos com 5% de cimento, equilibrando resistência mecânica com baixa absorção de água. Esses autores apontam também que o tipo de molde e a geometria do sistema de prensagem influenciam diretamente na distribuição da força, podendo gerar gradientes de densidade não desejados em prensas de ação unilateral.

Por sua vez, Mansour et al. (2016) argumentam que a variação da pressão de compressão altera não apenas a resistência mecânica, mas também a condutividade térmica dos TCTC. Pressões mais elevadas aumentam a densidade e resistência, porém diminuem a eficiência térmica do material devido à compressão dos vazios de ar que promovem isolamento. Para aplicações que exigem equilíbrio térmico, os autores recomendam compactações que resultem em densidades moderadas (~1750 kg/m³), que oferecem resistência adequada (cerca de 1 MPa) e isolamento térmico aceitável (~0,75 W/m·K).

Apesar dos benefícios da alta compressão, o estudo de Ipinge (2012) destaca que TCTC com alta densidade podem ser sensíveis à saturação hídrica, especialmente em solos ricos em argila. Isso demanda estratégias complementares, como adição de estabilizantes ou impermeabilizantes (e.g., Masterseal 501), para garantir o desempenho estrutural e durabilidade dos TCTC em ambientes úmidos.

A classificação dos sistemas de compressão pode ser dividida em quatro grandes categorias, conforme descrito na literatura técnica e organizado na Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação dos equipamentos de compressão para produção de TCTC

Tipo de Equipamento	Modo de Operação	Força de Compressão [MPa]	Exemplos de Aplicação
Manual	Humana direta	1–2	Artesanal; uso local limitado
Mecânico	Alavancada	2–4	Cooperativas; prod. média
Semi-automático	Hidráulica simples	4–8	Produção semi-industrial
Automático	Prensas hidráulicas	8–12	Larga escala; padronização

Fonte: O autor com base em Morel et al. (2007), Bahar et al. (2004) e Ipinge (2012).

Em síntese, a força de compressão aplicada aos TCTC deve ser cuidadosamente controlada e adequada às características do solo, ao teor de cimento e às exigências do projeto construtivo. O uso de equipamentos hidráulicos automáticos é recomendado para produções em larga escala que exigem alto desempenho técnico e padronização, enquanto os sistemas manuais ou mecânicos são mais apropriados para contextos locais e projetos de baixo custo. A escolha do equipamento de compressão deve considerar o tipo de terra, a proporção de estabilizante, os limites de compressão da mistura e as condições ambientais da construção compondo uma matriz de decisão técnica e econômica essencial para a viabilidade do uso dos TCTC em escala sustentável.

4.3 INCIDÊNCIA DA TAXA DE CIMENTO

A resistência à compressão é uma das propriedades mais importantes dos TCTC, sendo diretamente influenciada pela quantidade de cimento utilizada na mistura. Segundo a NBR 8492 (2012), que estabelece os métodos de ensaio para resistência à compressão (≥ 2,0 MPa) e absorção de água (≤ 20%), TCTC com teores de cimento entre 6% e 10% em massa geralmente atendem aos requisitos mínimos para alvenaria de vedação.

Estudos como os de Walker (1995) e Heathcote (1991) comprovam que o aumento do teor de cimento resulta em ganhos significativos de resistência. Isso ocorre porque o cimento, ao hidratar-se, forma uma matriz rígida que envolve as partículas da terra, aumentando a coesão e reduzindo a porosidade. Trabalhos como os de Bahar et al. (2004) e Jayasinghe & Kamaladasa (2007) reforçam que a compactação associada ao cimento promove uma estrutura mais densa e menos suscetível à deformação.

A compactação é uma etapa crucial na produção dos TCTC. Conforme

descrito na ABCP (2000) e na NBR 10833 (2012), a pressão aplicada durante a moldagem elimina vazios e melhora a adesão entre a terra e o cimento. Quanto maior a taxa de cimento, maior a trabalhabilidade da mistura e mais eficiente é a compactação, resultando em TCTC com maior densidade e homogeneidade.

Embora o aumento do cimento eleve a resistência, é necessário equilibrar a dosagem para evitar custos excessivos e impactos ambientais. Trabalhos como os de Caldas et al. (2021) e Elahi et al. (2021) mostram que é possível alcançar desempenho satisfatório com teores moderados de cimento, especialmente quando são utilizados aditivos ou resíduos como cinzas volantes ou bagaço de cana.

A taxa de cimento é, portanto, um parâmetro fundamental na produção de TCTC, influenciando diretamente a resistência à compressão, a compactação e a durabilidade do material. Estudos e normas técnicas demonstram que a otimização dessa dosagem é essencial para garantir o equilíbrio entre desempenho mecânico, viabilidade econômica e sustentabilidade. Pesquisas futuras devem explorar a incorporação de materiais alternativos para reduzir o consumo de cimento sem comprometer a qualidade dos TCTC.

Em síntese, a definição da taxa de cimento na produção dos TCTC deve considerar simultaneamente critérios técnicos, econômicos e ambientais. Conforme evidenciado na Tabela 4, teores entre 5% e 8% configuram uma faixa ideal, proporcionando equilíbrio entre resistência mecânica, durabilidade e impacto ambiental, desde que associados a processos de compressão eficazes e controle rigoroso do teor de umidade.

Tabela 4 - Efeito da taxa de cimento na resistência e durabilidade de TCTC

Teor de Cimento (%)	Tipo de Estabilização	Resistência à Compressão (MPa)	Comportamento em Saturação	Considerações Ambientais
0%	-	< 1	Perda total de resist.	Baixo impacto, mas frágil
4%	Cimento	~2	Redução >50%	Viável com uso controlado
6%	Cimento	≥2	Redução moderada	Atende requisitos normat.
8%	Cimento + cal	≥2	Desempenho variável	Cal limitada frente à erosão
10%	Cimento + resina	~5	Redução mínima	Custo elevado

Fonte: O autor com base em Morel et al. (2007), Guettala et al. (2006), Cid-Falceto et al. (2012), Ipinge (2012), Mansour et al. (2016)

4.4 MATÉRIA-PRIMA

A matéria-prima utilizada na produção dos TCTC constitui um dos pilares

fundamentais para garantir a qualidade, o desempenho técnico e a sustentabilidade do sistema construtivo. A escolha e a composição adequada da terra impactam diretamente na resistência mecânica, durabilidade, trabalhabilidade e na pegada ambiental do processo.

No contexto específico dos TCTC, estabelece-se uma distinção técnica essencial entre os conceitos de "terra" e "solo". O termo "terra" refere-se especificamente ao material granular proveniente do intemperismo de rochas, metodicamente preparado para produção de componentes construtivos, caracterizando-se pela isenção de matéria orgânica, granulometria controlada e plasticidade adequada para moldagem e estabilização (SCHROEDER, 2012). Em contrapartida, "solo" representa um conceito geotécnico mais amplo e genérico, que pode incluir materiais inadequados à produção de complonentes estabilizados. Esta distinção semântica não é meramente terminológica, mas reflete diferenças fundamentais nas propriedades e aplicações dos materiais. A terra para TCTC é selecionada e eventualmente corrigida para atender parâmetros técnicos específicos que garantam o desempenho esperado do componente construtivo, enquanto o solo abrange toda a variedade de materiais geológicos presentes na natureza, independentemente de sua aptidão construtiva.

De acordo com as diretrizes técnicas estabelecidas pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2000), a composição granulométrica ideal para terras destinadas à produção de TCTC deve apresentar entre 50% e 70% de areia (fração grossa) responsável por conferir estrutura esquelética e reduzir retrações e entre 30% e 50% de silte e argila (fração fina), que promove coesão e retenção de umidade adequada para a hidratação do cimento. Terras com teor argiloso superior a 70% tendem a desenvolver problemas de retração linear e fissuração durante o processo de cura, enquanto terras excessivamente arenosas (>70% de areia) manifestam baixa coesão natural, demandando majoração do teor de cimento para estabilização eficiente. Esta recomendação é corroborada por Venkatarama Reddy (2012), que enfatiza a influência da mineralogia da fração argilosa e da energia de compactação no desempenho final dos componentes. A ABCP recomenda ainda a mistura de diferentes tipologias de terra como estratégia para adequação granulométrica quando o material disponível localmente não atende isoladamente aos parâmetros técnicos estabelecidos. Esta prática permite otimizar o desempenho mecânico dos TCTC

mediante o balanceamento adequado das frações granulométricas, considerando também a plasticidade e a energia de compactação aplicável.

Autores como Venkatarama Reddy (2012) e Elahi et al. (2021) reforçam que a caracterização mineralógica da fração argilosa, o índice de plasticidade e a energia de compressão aplicada constituem fatores críticos para o desempenho mecânico e a durabilidade dos TCTC. A otimização integrada desses parâmetros permite alcançar resistências satisfatórias com teores de cimento entre 6% e 10%, conforme demonstrado em estudos recentes (CALDAS; DIAS; FILHO, 2021; ISLAM; ELAHI; *et al.*, 2020). Esta faixa de dosagem de cimento representa o equilíbrio entre desempenho técnico e viabilidade econômico-ambiental, uma vez que minimiza tanto as emissões de CO_2 associadas à produção cimenteira quanto os custos de manufatura, sem comprometer as propriedades mecânicas dos componentes. A adequada compactação, por sua vez, potencializa a eficiência do cimento empregado, garantindo maior densidade e redução de vazios na matriz do TCTC.

Por outro lado, terras predominantemente arenosas, embora facilitem o processo de prensagem e reduzam significativamente os riscos de retração durante a cura, apresentam limitações estruturais notórias. Estas terras caracterizam-se pela baixa coesão interparticulada e elevada capacidade de absorção hídrica, condições que demandam majoração do teor de cimento - frequentemente superior a 10% - para assegurar estabilidade mecânica adequada e resistência satisfatória à erosão (CALDAS; DIAS; FILHO, 2021). Essa condição acarreta elevação significativa dos custos ambientais diretos, particularmente nas emissões de CO_2 equivalentes associadas à produção cimenteira, além dos impactos econômicos decorrentes do maior consumo do insumo mais oneroso da mistura. Tal cenário contradiz os princípios fundamentais de sustentabilidade que originalmente justificam a adoção dos TCTC, exigindo criteriosa avaliação técnico-econômica que considere o custo ciclo de vida completo do material. A otimização do uso destas terras pode ser alcançada mediante estratégias complementares, como a incorporação de estabilizantes alternativos ou a correção granulométrica através de misturas com terras mais argilosas, visando equilibrar as propriedades mecânicas com a sustentabilidade ambiental do processo produtivo.

Elahi et al. (2021) salienta que as terras utilizadas na produção de TCTC devem apresentar índice de plasticidade (IP) inferior a 15 e teor de matéria orgânica

abaixo de 1%, parâmetros que garantem hidratação eficiente do cimento e evitam o desenvolvimento de porosidade excessiva decorrente da decomposição de compostos orgânicos. Estes critérios técnicos, quando adequadamente aplicados, permitem otimizar o desempenho mecânico dos TCTC enquanto mantêm a sustentabilidade ambiental do processo produtivo, equilibrando resistência mecânica, durabilidade e impacto ambiental.

A terra utilizada na produção de TCTC está intrinsicamente sujeita à sazonalidade climática, variações de umidade natural e heterogeneidade geológica, fatores que impõem a necessidade de implementação de sistemas de controle de qualidade contínuo. A padronização da matéria-prima, mediante estratégias de homogeneização de lotes e controle rigoroso de estoque, deve constituir prática rotineira em unidades produtivas que visam consistência técnico-construtiva. Diversos estudos sobre TCTC documentam variações significativas na composição granulométrica da terra e na dosagem de cimento, reflexo das características locais e dos objetivos específicos de cada projeto (conforme síntese comparativa apresentada na Tabela 5). Esta compilação evidencia que a maioria das pesquisas converge para uma faixa granulométrica ideal compreendendo 50% a 70% de areia e 30% a 50% de silte/argila, associada a dosagens de cimento entre 6% e 10%. A adaptação desses parâmetros em função da plasticidade e coesão da mistura representa prática consolidada, permitindo otimizar o desempenho mecânico dos TCTC enquanto mantém a viabilidade econômica e ambiental do processo produtivo.

Tabela 5 - Comparativo de terras utilizadas em estudos de TCTC

Estudo/Autor	Fração Grossa (Areia)	Fração Fina (Silte/Argila)	Teor de Cimento (%)
ABCP (2004)	50–70%	30–50%	6–10%
MELO et al. (2011)	~60%	~40%	8–10%
MOURA et al. (2021)	55–65%	35–45%	6–8%
SOUZA; SEGANTINI; PEREIRA (2008)	60–70%	30–40%	10%
LISIAS IPINGE (2012)	<30%	>70%	10–12%
BAHAR et al. (2004)	45–60%	40–55%	5–8%

Fonte: O autor

Do ponto de vista ambiental, a gestão sustentável da matéria-prima constitui aspecto fundamental para a viabilidade ecológica dos TCTC. A extração não controlada de terra pode acarretar significativa degradação ambiental, incluindo perda de biodiversidade, alterações na dinâmica hidrológica e desequilíbrios ecológicos

persistentes. Como estratégia mitigatória, Caldas et al. (2021) recomendam a implantação de reservas de terra controladas, associadas a planos de manejo integrado que incluam práticas de recomposição vegetativa progressiva, monitoramento de impactos e reaproveitamento sistemático de áreas previamente degradadas. Esta abordagem permite conciliar o suprimento regular de matéria-prima com a preservação ambiental. A dimensão logística assume igual relevância, uma vez que a proximidade entre a fonte de terra e a unidade produtiva impacta diretamente na pegada de carbono do processo.

Martins et al. (2018) demonstram que o transporte de materiais representa não apenas um dos principais componentes de custo, mas também significativa fonte de emissões de gases de efeito estufa na cadeia produtiva de materiais construtivos. Ainda que fora do escopo desta pesquisa, a integração entre gestão ambiental responsável e eficiência logística constitui um requisito fundamental para que os TCTC alcancem plenamente seu potencial como tecnologia construtiva sustentável.

Portanto, a seleção criteriosa, o preparo adequado e a gestão sustentável da matéria-prima são determinantes não apenas para o desempenho técnico dos TCTC, mas também para sua consolidação como tecnologia construtiva ambientalmente responsável e socialmente viável.

4.5 ÁGUA

A água exerce funções multifuncionais críticas na produção de TCTC, atuando simultaneamente como meio dispersante, agente de hidratação do cimento e facilitador da compactação da mistura. Sua presença em teores adequados é determinante para a densificação eficiente do material e para o desenvolvimento das reações químicas que conferem resistência mecânica ao compósito.

De acordo com Caldas et al. (2021), o teor ótimo de umidade durante a moldagem situa-se preferencialmente entre 10% e 14%, faixa que garante plasticidade suficiente para a prensagem sem gerar excesso de água livre, o qual comprometeria a integridade dimensional dos TCTC durante a cura. Essa umidade corresponde aproximadamente ao teor ótimo de compactação, determinado pelo ensaio Proctor intermediário, estabelecendo condições ideais para o rearranjo das partículas e máxima densificação. A água atua como lubrificante interpartículas, reduzindo o atrito interno e facilitando o rearranjo granular para formação de uma

estrutura densa. Paralelamente, assegura a hidratação completa do cimento Portland, essencial para o desenvolvimento das fases cimentícias, como os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que conferem coesão e resistência à matriz terra-cimento.

O controle rigoroso do teor de umidade constitui, portanto, um parâmetro crítico de qualidade, sendo que desvios significativos em relação à umidade ótima podem comprometer tanto as propriedades mecânicas quanto a durabilidade dos TCTC produzidos. Elahi et al. (2021) corroboram essa análise ao demonstrar que a resistência à compressão é maximizada quando a mistura apresenta teor de umidade meticulosamente ajustado, favorecendo a redistribuição otimizada das partículas e a redução de vazios durante a compactação.

Por outro lado, teores hídricos excessivos atuam como agentes separadores na matriz terra-cimento, impedindo a consolidação adequada da massa e promovendo o desenvolvimento de capilaridade elevada após a cura. Essa condição resulta em aumento da porosidade capilar ativa, reduzindo significativamente a durabilidade dos TCTC frente a ciclos de molhagem e secagem, conforme verificado em estudos de envelhecimento acelerado (ISLAM; ELAHI; *et al.*, 2020).

A hidratação do cimento Portland depende criticamente não apenas da quantidade de água incorporada, mas também da uniformidade de sua distribuição na mistura e das condições ambientais durante o período de cura. Islam et al. (2020) demonstram que, em ambientes quentes e secos, a evaporação acelerada pode interromper precocemente as reações de hidratação, comprometendo o desenvolvimento das fases cimentícias. Estratégias eficazes incluem cobertura com geotêxteis saturados, aplicação periódica de nebulização controlada e armazenamento em câmaras de cura, garantindo a continuidade do processo de hidratação e o desenvolvimento integral da resistência mecânica (JAYASINGHE; KAMALADASA, 2007).

Caldas et al. (2021) reforçam que TCTC submetidos a regimes de cura com controle hídrico adequado apresentam redução significativa na erosão superficial (até 40% em ensaios padrão) e desempenho superior frente à absorção de água atributos especialmente relevantes em climas semiáridos. A microestrutura desenvolvida sob condições ideais de cura exibe menor volume de poros capilares interconectados, resultando em maior resistência à penetração de água e agentes agressivos.

De acordo com os dados compilados na Tabela 6, observa-se que a faixa

média de umidade utilizada na moldagem dos TCTC situa-se entre 10% e 15%, confirmando os valores apontados por Caldas et al. (2021) como ideais para garantir plasticidade, densificação e hidratação eficiente do cimento. Além disso, a tabela evidencia as práticas de cura adotadas nos estudos analisados, como cobertura úmida, nebulização periódica e cura em ambiente controlado, todas voltadas à manutenção da umidade durante o processo de hidratação. Embora os autores não apresentem dados quantitativos sobre o consumo hídrico específico na etapa de cura, as estratégias descritas indicam preocupação com a eficiência hídrica e a durabilidade dos TCTC em diferentes contextos climáticos.

Do ponto de vista ambiental, a gestão racional dos recursos hídricos é fundamental. Embora o consumo direto de água na produção de TCTC seja inferior ao verificado em sistemas convencionais como o concreto armado, pode representar impacto relevante em regiões com escassez hídrica crônica. Caldas et al. (2021) recomendam estratégias de eficiência hídrica, como o reuso de água de lavagem de equipamentos, captação de águas pluviais para fins não estruturais e controle de desperdícios ao longo do processo produtivo práticas que podem reduzir em até 40% a demanda hídrica total. A composição granulométrica da terra influencia diretamente essa demanda. Martins et al. (2018) demonstram que terras com predominância de frações finas podem exigir até 30% mais água para atingir consistência adequada à compactação, devido à maior área superficial específica e à tendência à formação de aglomerados.

A qualidade da água utilizada é outro parâmetro crítico frequentemente negligenciado. A presença de sais solúveis, matéria orgânica ou contaminantes químicos pode comprometer a hidratação do cimento e a estabilidade química dos TCTC. Sólidos dissolvidos totais superiores a 2.000 mg/L, especialmente sulfatos e cloretos, podem inibir a formação das fases cimentícias e promover eflorescências superficiais (HEWLETT; LISKA, 2019).

A norma ABNT NBR 10833 (2012) recomenda o uso de água potável ou, alternativamente, água com características físico-químicas compatíveis. Em contextos rurais, sistemas de filtração e decantação simplificados são soluções viáveis para remoção de sedimentos e redução de turbidez. Estudos mostram que águas com pH fora da faixa 6,0–8,5 podem alterar a cinética de hidratação do cimento, enquanto concentrações de matéria orgânica superiores a 50 mg/L tendem a formar complexos

com íons cálcio, reduzindo a eficiência da estabilização (DALLACORT *et al.*, 2002). A implementação de protocolos simples de controle como medição de pH, turbidez e condutividade elétrica representa prática economicamente viável que contribui para a consistência produtiva e durabilidade dos TCTC, especialmente em regiões com fontes hídricas heterogêneas.

Tabela 6 - Teor de água na moldagem e cura dos TCTC

Estudo/Autor	Teor de água na mistura (%)	Prática de cura adotada)
Morel et al. (2007)	10–15%	Cobertura úmida por 7 dias
Bahar et al. (2004)	12–14%	Cura natural em ambiente controlado
Melo et al. (2011)	10–12%	Nebulização periódica por 14 dias
Moura et al. (2021)	11–13%	Cobertura com lona e umidificação diária
Souza; Segantini; Pereira (2008)	10–15%	Cura úmida por 28 dias
Guettala; Abibsi; Houari (2006)	12%	Cura em ambiente semiárido controlado

Fonte: O autor

4.6 RESULTADOS PARCIAIS

Com base na análise integrada das variáveis técnicas mecânicas, foram sistematizados os principais fatores que influenciam o desempenho dos TCTC, com destaque para a resistência à compressão, a força aplicada durante a moldagem, o teor de cimento, o controle da umidade e a composição da matéria-prima. A investigação reuniu dados da literatura e normativos que fundamentam a correlação entre essas variáveis e a qualidade técnica dos TCTC.

Os resultados parciais indicam que a resistência à compressão dos TCTC está diretamente associada à densidade seca obtida durante a moldagem, sendo influenciada por três fatores principais: força de compressão, teor de cimento e umidade da mistura. Prensas hidráulicas que aplicam forças superiores a 8 MPa produzem tijolos com resistência acima de 3 MPa, enquanto sistemas manuais resultam em valores entre 1 e 2 MPa (MOREL et al., 2007; HEATHCOTE, 1991). A compressão dinâmica, com energia de até 10,3 J/cm³, alcançou resistências superiores a 10 MPa em condição seca (BAHAR et al., 2004).

Quanto ao teor de cimento, estudos apontam que dosagens entre 6% e 10% são suficientes para atender aos requisitos normativos da NBR 8492 (≥2 MPa), com ganhos progressivos de resistência conforme o aumento da dosagem (CID-FALCETO et al., 2012; GIORGI et al., 2018). No entanto, o desempenho está condicionado à

aplicação eficaz de compressão e ao controle da umidade, cuja faixa ideal situa-se entre 10% e 15% (MOREL et al., 2007; BAHAR et al., 2004). Excesso de água compromete a densificação e aumenta a porosidade, reduzindo a resistência final.

A composição da terra também se mostrou determinante. Terras com 50% a 70% de areia e 30% a 50% de silte/argila apresentam desempenho técnico equilibrado, enquanto solos excessivamente argilosos ou arenosos exigem correções granulométricas e ajustes na dosagem de cimento (ABCP, 2000; VENKATARAMA REDDY, 2012).

Esses resultados sugerem que a produção de TCTC com desempenho técnico satisfatório depende de uma abordagem integrada, que considere simultaneamente os parâmetros de compressão, dosagem de cimento, umidade e composição da terra. Verifica-se uma tendência de aumento da resistência mecânica com o uso de prensas hidráulicas e técnicas de compressão dinâmica, embora estas últimas demandem avaliação de viabilidade econômica para aplicação em larga escala.

A análise também evidencia que a otimização da matéria-prima especialmente da fração argilosa e do índice de plasticidade permite reduzir o consumo de cimento sem comprometer a resistência, contribuindo para a sustentabilidade do processo. Estratégias como o uso de aditivos impermeabilizantes e a correção granulométrica com areia são eficazes para mitigar perdas de resistência em condições de saturação hídrica (IPINGE, 2012; ELAHI et al., 2021).

5. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA (RSL)

A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) foi conduzida como etapa fundamental da metodologia deste estudo, com o propósito de aprofundar a compreensão sobre os fatores técnicos e ambientais que influenciaram a produção dos TCTC. Essa abordagem metodológica foi escolhida por permitir a identificação de padrões recorrentes, lacunas investigativas e tendências consolidadas na literatura, especialmente no que se refere à relação entre o grau de compressão aplicado, o teor de cimento incorporado à mistura e a resistência mecânica dos TCTC, com ênfase na resistência à compressão. A RSL possibilitou o mapeamento sistemático do conhecimento acumulado até o momento, oferecendo suporte teórico estruturado para a análise dos dados empíricos apresentados na seção 6.3.

5.1 OBJETIVO DA RSL

O objetivo principal da Revisão Sistemática da Literatura (RSL) foi localizar, selecionar e sintetizar estudos científicos que abordaram a fabricação e a avaliação dos TCTC, com ênfase na análise quantitativa e qualitativa das variáveis que influenciaram seu desempenho. Foram priorizadas publicações que investigaram os efeitos de diferentes práticas de produção, como variações na força de compressão, proporções de cimento utilizadas e métodos de estabilização da terra, sobre as propriedades físicas, estruturais e ambientais dos componentes. A RSL permitiu compreender a mecânica envolvida na produção dos TCTC e contextualizar as boas práticas adotadas em distintas regiões, além de identificar os avanços tecnológicos incorporados ao processo de fabricação, conforme discutido por autores como Bahar et al. (2004) e Caldas et al. (2021), que destacaram a relevância da correlação entre parâmetros técnicos e desempenho ambiental em sistemas construtivos alternativos.

5.2 ESTRATÉGIA DE BUSCA

A busca pelos estudos foi realizada por meio de um processo sistemático e rigoroso, utilizando bases de dados reconhecidas pela relevância científica: Scopus, ScienceDirect, Google Scholar e o portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Cada plataforma foi selecionada conforme sua abrangência e especificidade: Scopus e ScienceDirect

forneceram acesso à literatura internacional revisada por pares; o Google Scholar contribuiu com teses, dissertações e relatórios técnicos; e o portal CAPES contemplou a produção científica nacional, com destaque para pesquisas contextualizadas ao cenário brasileiro.

As *strings* de busca foram formuladas a partir da combinação de palavras-chave representativas do tema, como “blocos de terra-cimento”, “compressão” e “resistência à compressão”, além de suas versões em inglês: “*soil-cement blocks*”, “*compaction*” e “*mechanical strength*”. Foram também incorporadas expressões relacionadas à sustentabilidade, como “*cement reduction*” e “*soil stabilization*”, com o intuito de localizar estudos que discutiram alternativas à elevada dosagem de cimento e seus impactos ambientais.

5.3 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Para assegurar a qualidade e a relevância dos estudos analisados, foram definidos critérios objetivos de inclusão e exclusão. Optou-se por incluir publicações veiculadas entre os anos de 2000 e 2024, com ênfase nos trabalhos mais recentes especialmente aqueles produzidos na última década por refletirem metodologias atualizadas e avanços tecnológicos significativos no campo da construção com terra estabilizada. Também foram considerados estudos com elevado fator de impacto, desde que apresentassem dados empíricos robustos.

Os artigos selecionados apresentaram obrigatoriamente dados quantitativos e mensuráveis relacionados às variáveis centrais desta pesquisa: o grau de compressão (expressa em porcentagem do Proctor), o teor de cimento utilizado na mistura e a resistência mecânica dos TCTC, com destaque para a resistência à compressão. Essa triagem criteriosa permitiu reunir um conjunto de informações consistentes, organizadas na Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9 as quais sintetizaram os estudos mais alinhados aos objetivos propostos.

A seleção foi conduzida por meio de um processo rigoroso de triagem, que excluiu sistematicamente trabalhos que não disponibilizavam o texto completo, inviabilizando a análise metodológica e a verificação dos dados apresentados. Também foram descartadas publicações que abordaram materiais ou técnicas distintas daquelas investigadas, como blocos cerâmicos ou compósitos não estabilizados com cimento, por não contribuírem diretamente para as questões

centrais da pesquisa.

Tabela 7 - Estudos relevantes para análise da RSL

(continua)

Título do Estudo	Proctor (%)	Cimento (%)	Resit. Comp. (MPa)	Autor (Ano)
Durability study of stabilized earth concrete under laboratory and climatic conditions	95	6	6,2	Guettala et al. (2002)
Influence of sand grading on cement-stabilized soil blocks	90	8	4,5	Reddy & Gupta (2006)
Effect of fiber addition on properties of soil-cement blocks	92	7	5,5	Danso et al. (2015)
Influence of compacting rate on earth blocks reinforced with fibers	98	5	7	Millogo et al. (2016)
Compressed earth blocks reinforced with plant fibers: A review	94	6	5,8	Nshimiyimana et al. (2020)
Performance of compacted cement-stabilised soil	85	10	4	Bahar et al. (2004)
Engineering properties of unfired clay masonry bricks	88	9	4,2	Oti et al. (2009)
Compressive strength testing of compressed earth blocks	98	4	6	Morel et al. (2007)
Strength and durability of compressed earth blocks	90	7	5	Walker (2004)
Compressive strength of cement-stabilized earth blocks	95	6	5,5	Heathcote (2002)
Sustainable materials for low-cost housing	93	6	5,3	Venkatarama Reddy (2004)
Mechanical properties of compressed earth blocks with straw	91	5	4,8	Taallah et al. (2014)
Thermal conductivity of cob blends	89	8	4,5	Alavéz-Ramírez et al. (2012)
Optimization of compressed earth blocks with waste additives	96	5	6,5	Maskell et al. (2018)
Durability of rammed earth walls with stabilizers	97	4	6,8	Bui et al. (2009)
Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls	94	7	5,6	Jayasinghe & Kamaladasa (2007)
Compressed earth blocks: Standards and production guidelines	92	8	5,2	Adam & Agib (2001)
Engineering characteristics of compressed earth blocks with rice husk ash	90	6	4,7	Muntohar (2011)
Compressed earth blocks: Vol. 1 - Manual of production	95	5	6	Rigassi (1985)
Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilized soil blocks	93	7	5,4	Walker (1995)
Influence of compaction energy on the performance of soil-cement bricks	96	5	6,3	Almeida et al. (2015)
Natural fiber reinforced earth blocks	91	6	5,1	Galán-Marín et al. (2010)
Sustainable earth blocks with recycled aggregates	93	7	5,4	Islam et al. (2018)

Tabela 8 - Estudos relevantes para análise da RSL

(continuação)

Título do Estudo	Proctor (%)	Cimento (%)	Resit. Comp. (MPa)	Autor (Ano)
Effect of curing methods on compressed earth blocks	89	8	4,9	Lima et al. (2017)
Alumina filler waste in stabilized earth blocks	94	5	5,7	Miqueleiz et al. (2012)
Life cycle assessment of compressed earth blocks	95	6	6	Olacia et al. (2020)
Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction	90	7	5,2	Pacheco-Torgal & Jalali (2012)
Mechanical properties of adobe blocks reinforced with natural fibers	92	6	5,3	Quagliarini & Lenci (2010)
Preliminary study of compressed stabilized earth block with sugarcane bagasse	88	9	4,8	Riza et al. (2011)
Thermal performance of compressed earth blocks with recycled glass	97	4	6,5	Silva et al. (2019)
Mechanical properties and hygroscopicity of earth blocks stabilized with cement and lime	93	6	5,5	Taallah & Guettala (2016)
Effect of the addition of coal-ash and cassava peels on soil-cement blocks	90	8	4,7	Villamizar et al. (2012)
Use of recycled glass in compressed earth blocks	95	5	6,1	Wongsa et al. (2018)
Machine learning for predicting compressive strength of stabilized earth blocks	94	6	5,9	Xu et al. (2020)
Sustainable earth blocks with nano-additives	98	4	7,2	Yaseen et al. (2021)
Microstructural analysis of compressed earth blocks with cement	91	7	5	Zak et al. (2016)
Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água	90	6	2	ABNT NBR 8492 (2012)
Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders	95	7,5	2,8	ASTM D1633 (2017)
Optimal compaction pressure for stabilized earth blocks	97	5	6,7	Heath et al. (2009)
Cement stabilized rammed earth with waste additives	92	6	5,4	Kariyawasam & Jayasinghe (2016)
Laterite-based stabilized products for sustainable construction	94	6	5,6	Lemougna et al. (2014)
Mechanical properties of earth blocks with wool fibers	93	5	5,8	Maskell et al. (2015)
Improving traditional earth construction for sustainable housing	90	8	4,6	Ngowi (1997)
Geotechnical properties of lateritic soil stabilized with cement	89	9	4,5	Ogunribido (2012)
Thermal behaviour of adobe and compressed earth blocks	91	7	5,1	Parra-Saldivar & Batty (2006)
Tensile strength of fiber-reinforced earth blocks	95	5	6,2	Quagliarini et al. (2017)

Tabela 9 - Estudos relevantes para análise da RSL

(conclusão)

Título do Estudo	Proctor (%)	Cimento (%)	Resit. Comp. (MPa)	Autor (Ano)
Laterite-based geopolymer stabilized earth blocks	96	4	6,8	Sore et al. (2018)
Machine-pressed earth blocks with palm oil fuel ash	94	5	6	Ta'a et al. (2022)
Durability of compressed earth blocks with cement and lime	92	6	5,3	Uzoegbo (2016)
AI-optimized mix design for low-carbon earth blocks	97	4	7,1	Zhang et al. (2023)

Fonte: O autor

No caso de revisões bibliográficas e meta-análises, apenas foram consideradas aquelas que evidenciaram claramente os critérios metodológicos adotados, que destacaram a importância da transparência metodológica na construção de sínteses confiáveis. Embora essas decisões tenham reduzido o número inicial de estudos elegíveis, elas foram essenciais para garantir a consistência e a robustez da base de dados utilizada. Cada publicação selecionada passou por esse filtro minucioso, assegurando que a revisão se fundamentasse exclusivamente em evidências relevantes e metodologicamente sólidas.

5.4 PROTOCOLO DE ANÁLISE

A sistematização da Revisão Sistemática da Literatura foi conduzida com base nos princípios do protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), adaptados ao escopo específico desta pesquisa. O processo metodológico foi estruturado em quatro etapas sequenciais:

- Identificação: foram realizadas buscas nas bases de dados previamente selecionadas, utilizando as strings de pesquisa definidas com base nas palavras-chave representativas do tema.
- Triagem: procedeu-se à eliminação de registros duplicados e à seleção preliminar dos estudos com base nos títulos e resumos, conforme os critérios de relevância temática.
- Elegibilidade: os textos completos dos estudos foram lidos integralmente, aplicando-se os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos para garantir a pertinência metodológica.

- Inclusão: os artigos selecionados foram organizados e categorizados de acordo com as variáveis investigadas, assegurando alinhamento com os objetivos da pesquisa e consistência na análise comparativa dos modelos de produção dos TCTC.

Essa abordagem permitiu a construção de uma base de dados confiável e metodologicamente robusta, que destacaram a importância da transparência e da rastreabilidade na condução de revisões sistemáticas voltadas à avaliação de desempenho ambiental.

5.5 EXTRAÇÃO E COMPARAÇÃO DAS VARIÁVEIS

Após a seleção dos estudos, as variáveis foram extraídas por meio de leitura sistemática dos textos completos previamente selecionados e organizadas em quadros comparativos, com o objetivo de facilitar a análise cruzada dos resultados. O grau de compressão foi examinado com base nas técnicas de prensagem adotadas e na densidade dos TCTC na condição seca. Dada a escassez de dados diretos sobre o grau de compressão em diversos estudos, foi implementada uma relação matemática estimativa, conforme a Equação (1):

$$\sigma = \left(\frac{\rho - 1475}{217}\right)^2 \qquad \text{Equação (1)}$$

Onde:

σ: Grau de compressão [MPa];

ρ: Densidade do TCTC na condição seca [kg/m^3];

A Equação (1) foi elaborada com base na adaptação de estudos que correlacionaram a densidade seca dos TCTC com a força de compressão aplicada durante o processo de fabricação, conforme metodologia similar à proposta por Bahar et al. (2004) e corroborada por Morel et al. (2007). A partir dos dados apresentados na Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12, consolidou-se uma expressão capaz de estimar a intensidade da compactação aplicada à mistura terra-cimento com base na densidade final dos TCTC em estado seco.

Em relação ao teor de cimento, foram identificadas as proporções utilizadas em cada estudo, bem como as justificativas técnicas para essas escolhas e seus impactos sobre o desempenho final dos TCTC. Observou-se que a variação no teor

de cimento influenciou diretamente a resistência mecânica dos TCTC, especialmente nos ensaios de compressão realizados na condição seca, conforme evidenciado nos dados da Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12. Estudos como os de Castro et al. (2016) e Caldas et al. (2021) destacaram que teores mais elevados de cimento tendem a melhorar a resistência à compressão, embora impliquem maior energia incorporada e impacto ambiental.

A análise comparativa permitiu observar que a resistência à compressão dos TCTC variou significativamente em função da combinação entre grau de compressão e teor de cimento, com valores que oscilaram entre 0,50 MPa e 14,00 MPa. Essa variação reforçou a importância de se considerar simultaneamente os parâmetros técnicos e ambientais na avaliação do desempenho dos TCTC, conforme recomendação das normas ABNT NBR 8492 (2012b) e das diretrizes de avaliação ambiental da ABNT NBR ISO 14031 (2015b).

Tabela 10 - Variáveis técnicas mecânicas

(continua)

Compressão. (MPa)	Cimento (%)	Resistência à compressão (MPa)	Observações
0,39	0	0,50	porosidade: 41,6%
0,76	0	1,00	
2,10	0	1,00	Compressão estática
2,00	0	1,90	Resistência mínima exigida (Norma).
1,32	0	2,50	
1,65	0	3,00	
1,93	0	3,80	
2,90	0	3,99	
3,16	0	4,01	Densidade máxima: 2194 kg/m^3
1,00	2	0,54	densidade 1692 kg/m³
2,63	2	0,81	densidade 1827 kg/m³
3,43	2	1,08	densidade 1877 kg/m³
0,95	4	1,08	densidade 1686 kg/m³
2,17	4	1,46	densidade 1795 kg/m³
3,45	4	1,79	densidade 1878 kg/m³
1,08	4	2,00	Densidade 1700kg/m³

Tabela 11 - Variáveis técnicas mecânicas

(continuação)

Compressão. (MPa)	Cimento (%)	Resistência à compressão (MPa)	Observações
5,85	4	4,00	Densidade 2000kg/m³
0,78	5	0,92	densidade 1667 kg/m³
2,30	5	1,52	densidade 1804 kg/m³
2,50	5	1,89	Resistência afetada por alta plasticidade
10,00	5	3,00	Valor sugerido por Pave (2007)
4,00	5	3,20	Estudo de Walker (1997)
15,00	5	15,40	
0,57	6	0,97	densidade 1639 kg/m³
3,05	6	1,81	densidade 1854 kg/m³
3,23	6	1,92	densidade 1865 kg/m³
2,00	6	2,00	Resistência adequada para uso estrutural.
2,50	7	2,72	
10,00	7	5,00	
0,90	8	1,62	densidade 1681 kg/m³
1,94	8	1,73	densidade 1777 kg/m³
3,57	8	1,92	densidade 1885 kg/m³
2,00	8	2,01	Combinação cimento-cal (>durabilidade)
10,00	8	3,91	
15,00	8	12,70	Dados de Guettala et al. (2005)
15,00	8	18,40	
1,39	10	1,62	densidade 1731 kg/m³
2,15	10	1,89	densidade 1793 kg/m³
2,38	10	2,16	densidade 1810 kg/m³
3,84	10	3,00	Densidade 1900kg/m³
2,50	10	3,02	
3,26	10	3,03	densidade 1867 kg/m³
2,77	10	3,14	densidade 1836 kg/m³
3,60	10	3,68	densidade 1887 kg/m³
2,10	10	4,25	12% de água
5,85	10	5,00	Densidade 2000kg/m³
4,20	10	5,50	Redução de ~90% após imersão
6,30	10	6,50	
7,30	10	6,80	
10,00	10	8,00	

Tabela 12 - Variáveis técnicas mecânicas

(conclusão)

Compressão. (MPa)	Cimento (%)	Resistência à compressão (MPa)	Observações
10,00	15	10,00	
10,00	20	11,36	
10,00	20	12,00	
10,00	25	14,00	

Fonte: O autor

5.6 RESULTADOS PARCIAIS

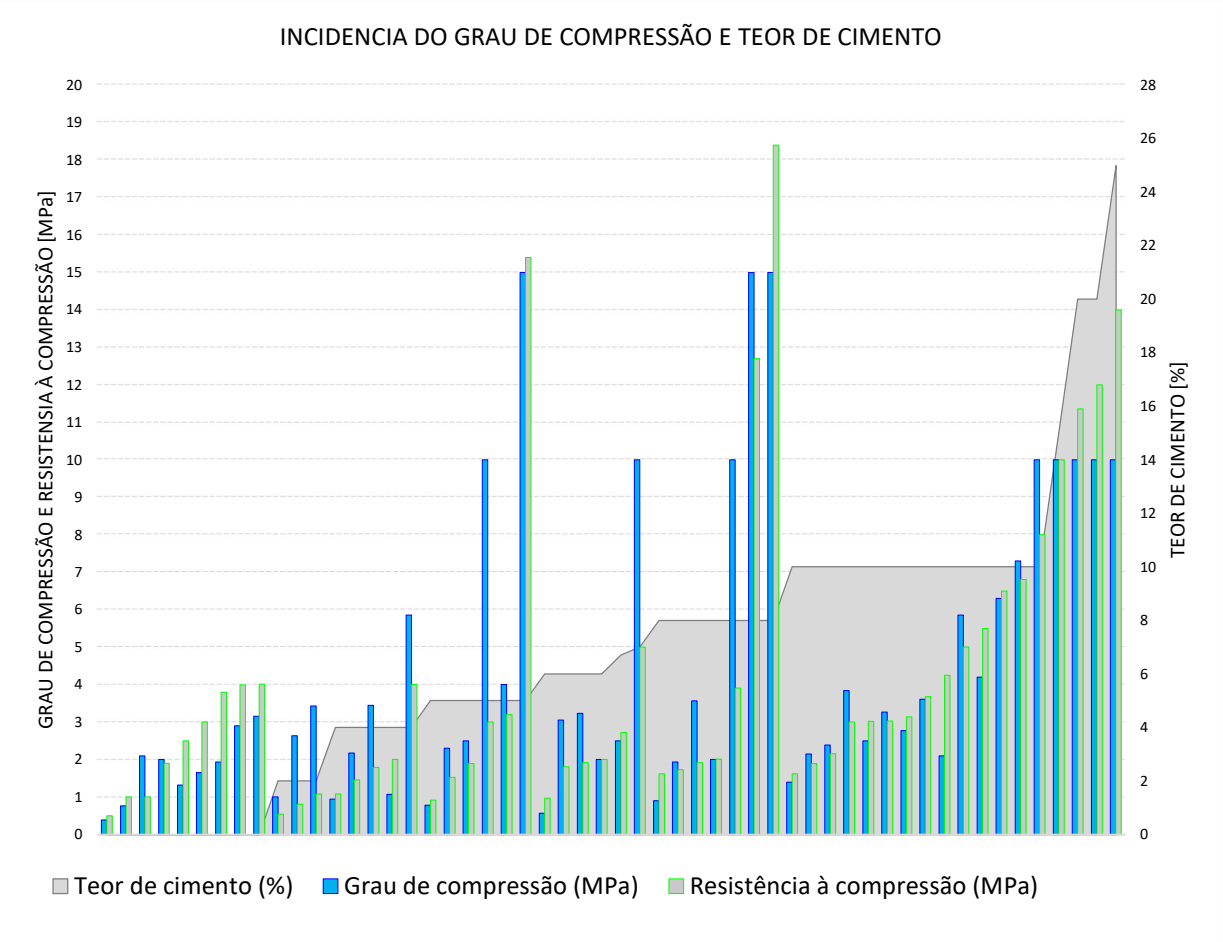
A sistematização dos estudos contemplados na revisão sistemática da literatura permitiu delinear um panorama técnico sobre os TCTC, evidenciando correlações significativas entre o grau de compressão (compactação), o teor de cimento empregado e a resistência à compressão mecânica. Os dados organizados na Tabela 10, tabela se revelaram padrões recorrentes, embora tenham sido observadas inconsistências atribuídas à heterogeneidade das amostras de terra utilizadas na literatura. Essa variabilidade condicionou de forma expressiva os resultados, tornando os comportamentos mecânicos dos TCTC não lineares, mesmo quando os demais parâmetros técnicos, como teor de cimento e força de compressão, foram mantidos constantes.

A Figura 24 ilustra o comportamento da terra comprimida sem adição de cimento, evidenciando uma relação direta entre a intensidade da força aplicada e a resistência à compressão mecânica. Os valores de compactação variaram entre 0,39 MPa e 3,16 MPa, resultando em resistências entre 0,50 MPa e 4,01 MPa. Esses resultados indicaram que, mesmo na ausência de estabilização química, o aumento da força de prensagem promoveu ganhos significativos no desempenho mecânico, reforçando a correlação entre densidade seca e resistência à compressão (HEATHCOTE, 1991; VENKATARAMA REDDY, 2012). Em contextos de escassez de dados experimentais, a Equação (1) de correlação empregada neste estudo serve para estimar a intensidade da compactação com base na densidade seca, consolidando esta como variável técnica de referência.

A resistência à compressão apresentou ampla variabilidade, oscilando entre 0,50 MPa, em componentes não estabilizados, e 15,40 MPa em misturas otimizadas com 5% de cimento e força de compactação de 15 MPa. Observou-se que os

melhores desempenhos foram obtidos com forças de prensagem iguais ou superiores a 15 MPa, mesmo com teores de cimento entre 5% e 8%, o que reforçou a viabilidade técnica e ambiental dessa faixa de dosagem. Por outro lado, verificou-se que forças de compactação em torno de 10 MPa exigiram teores de cimento superiores a 10% para alcançar resistências equivalentes, o que compromete os princípios de sustentabilidade, considerando que o cimento é o insumo com maior emissão de CO_2 na cadeia produtiva e representa o maior custo unitário na fabricação dos TCTC (AGOPYAN; JOHN, 2011; RÖCK et al., 2020; CUNHA, 2016a).

Figura 24 - Incidência do grau de compressão e teor de cimento



Fonte: O Autor

Dessa forma, os resultados parciais obtidos neste capítulo consolidaram os principais fatores que influenciam o desempenho dos TCTC e apontaram direções promissoras para o aprimoramento das boas práticas produtivas. A convergência entre compressão eficiente, estabilização racional e criteriosa seleção de insumos revelou-se como vetor estratégico para o desenvolvimento de soluções construtivas

sustentáveis, adaptáveis a diferentes contextos geográficos e socioeconômicos (GIORGI et al., 2018; ABCP, 1984; NETO; LEOCADIO; PINHEIRO, 2023).

6. GESTÃO AMBIENTAL

A gestão ambiental compreende um conjunto articulado de estratégias, políticas e práticas adotadas por organizações com o objetivo de minimizar os impactos negativos de suas atividades sobre o meio ambiente. Seu propósito central é promover a sustentabilidade, assegurando que os processos produtivos e operacionais sejam conduzidos de forma a preservar os recursos naturais, prevenir a poluição e atender às exigências legais e normativas vigentes.

Esse processo envolve a identificação sistemática dos aspectos e impactos ambientais associados às atividades da organização, o estabelecimento de metas e indicadores de desempenho ambiental, a implementação de planos de ação corretivos e preventivos, bem como a avaliação contínua dos resultados obtidos. Para isso, são utilizados instrumentos como os Sistemas de Gestão Ambiental (SGA), com destaque para a família de normas ISO 14000, que fornece diretrizes para estruturação, implementação e melhoria contínua dos SGA, e, no contexto brasileiro, a NBR ISO 14031, que trata especificamente da avaliação de desempenho ambiental.

A gestão ambiental eficaz pressupõe uma abordagem integrada, que considere não apenas a conformidade legal, mas também a responsabilidade socioambiental e a eficiência no uso de recursos. Em síntese, trata-se de assegurar que as operações organizacionais sejam conduzidas de maneira ética, responsável e sustentável, contribuindo para a proteção do meio ambiente e para a promoção de um desenvolvimento equilibrado e duradouro (ABNT, 2015a; ISO, 2013).

6.1 ABNT NBR ISO 14031

A norma ABNT NBR ISO 14031 fornece diretrizes para a avaliação do desempenho ambiental, incluindo a definição de termos, a avaliação de cargas ambientais, biodiversidade, sustentabilidade, poluição transfronteiriça, impacto do negócio no meio ambiente, entre outros aspectos. Ela também aborda a comunicação do desempenho ambiental para partes interessadas internas e externas, visando a melhoria contínua e a transparência nas práticas ambientais das organizações (ABNT, 2015b).

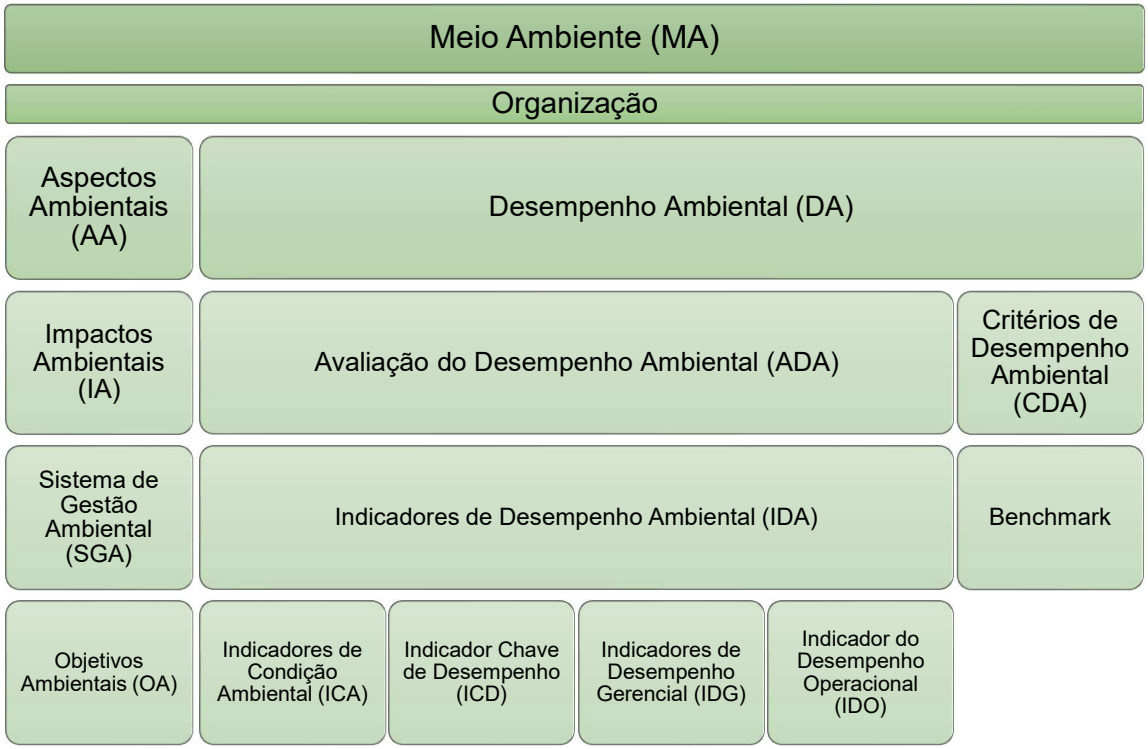
A norma tem como objetivo orientar a avaliação do desempenho ambiental em organizações, independentemente de seu porte ou natureza. Ela busca auxiliar as

organizações na compreensão, demonstração e melhoria de seu desempenho ambiental, gerenciando efetivamente os elementos de suas atividades, produtos e serviços que têm impacto no meio ambiente. A avaliação do desempenho ambiental é um processo planejado que fornece informações contínuas e verificáveis à gestão, permitindo determinar se o desempenho ambiental da organização está alinhado aos critérios estabelecidos pela administração.

6.1.1 Terminologia e Definições da Norma

A terminologia adotada na norma ISO 14031 (2013) estabelece uma base conceitual estruturada para a gestão ambiental no contexto organizacional, conforme ilustrado na Figura 25. Inicialmente, define-se o meio ambiente (MA) como a circunvizinhança na qual a organização opera, abrangendo elementos como ar, água, solo, recursos naturais, flora, fauna, seres humanos e suas inter-relações (ABNT, 2015b).

Figura 25 – Terminologia de gestão ambiental - ADA



Fonte: Adaptação (ABNT, 2015a, b; ISO, 2013).

Nesse contexto, identificam-se os aspectos ambientais (AA), que correspondem aos elementos das atividades, produtos ou serviços da organização que interagem com o meio ambiente. Destacam-se, entre esses, os aspectos

considerados significativos, em razão de seu potencial de gerar impactos ambientais relevantes (ABNT, 2015a).

Para avaliar o estado do meio ambiente e o desempenho ambiental da organização, são utilizados os indicadores de condição ambiental (ICA), que fornecem informações sobre as condições ambientais em escalas local, regional, nacional ou global. Já os impactos ambientais (IA) referem-se às modificações adversas ou benéficas no meio ambiente resultantes das atividades da organização (ISO, 2013)

Com o objetivo de gerenciar os aspectos e impactos ambientais, a organização pode implementar um Sistema de Gestão Ambiental (SGA), que compreende uma estrutura organizacional integrada a atividades de planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos, processos e recursos. Nesse sistema, são definidos os objetivos ambientais (OA), que representam os propósitos globais da organização em matéria ambiental, derivados de sua política ambiental, e que devem ser quantificados sempre que possível (ABNT, 2015b, a).

O desempenho ambiental (DA) refere-se aos resultados obtidos pela organização na gestão de seus aspectos ambientais. Para avaliá-lo, são definidos os critérios de desempenho ambiental (CDA), que consistem em metas, objetivos ou outros parâmetros estabelecidos pela administração. A avaliação do desempenho ambiental (ADA) é o processo sistemático utilizado para apoiar decisões gerenciais, envolvendo a seleção de indicadores, coleta e análise de dados, comparação com os critérios estabelecidos, elaboração de relatórios, análises críticas e ações de melhoria contínua (ABNT, 2015b).

Nesse processo, são empregados diferentes tipos de indicadores de desempenho ambiental (IDA), que fornecem informações específicas sobre o desempenho da organização. Entre eles, destacam-se:

- Indicadores-chave de desempenho (ICD): Representam os indicadores mais relevantes e significativos para a organização.
- Indicadores de desempenho gerencial (IDG): Refletem os esforços da gestão para influenciar positivamente o desempenho ambiental.
- Indicadores de desempenho operacional (IDO): Fornecem dados sobre os resultados ambientais diretamente relacionados às operações da organização.

Esses indicadores são essenciais para o monitoramento e a melhoria contínua

do desempenho ambiental, contribuindo para a sustentabilidade e o cumprimento dos compromissos ambientais assumidos (ABNT, 2015a, b; ISO, 2013).

Adicionalmente, destaca-se o papel do benchmarking como prática estratégica no contexto da gestão ambiental. Essa abordagem permite que as organizações comparem seu desempenho com o de outras instituições do mesmo setor que adotam práticas de excelência. O *benchmarking* possibilita a identificação de oportunidades de melhoria, o estabelecimento de metas mais ambiciosas e a implementação de ações voltadas à elevação do desempenho ambiental. Essa busca contínua por referências externas e inovação é fundamental para impulsionar a melhoria dos processos e consolidar a responsabilidade ambiental no ambiente empresarial.

6.2 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL (ADA)

A Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA) é um processo gerencial sistemático utilizado para comparar o desempenho ambiental passado e presente de uma organização com seus objetivos e metas ambientais, por meio da aplicação de indicadores-chave de desempenho. Essa prática é considerada essencial para mensurar, analisar e comunicar os resultados ambientais obtidos, permitindo a identificação de aspectos ambientais significativos, o estabelecimento de metas de melhoria e a detecção de oportunidades para uma gestão ambiental mais eficaz.

A ADA possibilita às organizações identificar áreas que demandam aprimoramento, implementar ações corretivas e preventivas, monitorar o progresso em direção aos objetivos ambientais e demonstrar seu compromisso com a sustentabilidade e a responsabilidade socioambiental. Além disso, permite a avaliação de tendências de desempenho ao longo do tempo, fornecendo subsídios para decisões estratégicas baseadas em evidências ambientais.

A realização da ADA pode ocorrer de forma independente ou integrada a um Sistema de Gestão Ambiental (SGA), contribuindo diretamente para a melhoria contínua do desempenho ambiental e para o atendimento de requisitos legais, normativos e compromissos voluntários assumidos pela organização (ABNT, 2015b).

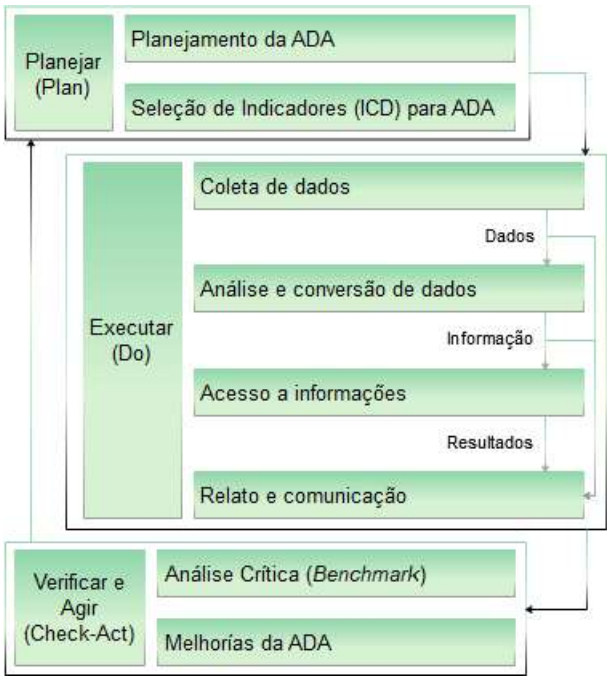
Em síntese, a ADA constitui uma ferramenta indispensável para a gestão ambiental organizacional, oferecendo suporte à tomada de decisões sustentáveis e promovendo a melhoria contínua por meio de práticas como o benchmarking

ambiental que consiste na comparação do desempenho da organização com referências externas de excelência. Essa abordagem fortalece a cultura de inovação e responsabilidade ambiental, consolidando a ADA como instrumento estratégico para a sustentabilidade empresarial.

6.2.1 Processo da ADA

A Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA) é conduzida por meio de um processo contínuo e sistemático, estruturado com base no modelo de gestão *Plan-Do-Check-Act* (PDCA) ou Planejar–Executar–Verificar–Agir conforme ilustrado na Figura 26. Esse modelo orienta a implementação de práticas de melhoria contínua na gestão ambiental organizacional.

Figura 26 –Modelo Gerencial PDCA



Fonte: (ABNT, 2015b).

Na fase planejar, realiza-se o planejamento estratégico da avaliação, com destaque para a seleção dos indicadores-chave de desempenho ambiental, que são definidos com o objetivo de mensurar os impactos das atividades da organização sobre o meio ambiente. Esses indicadores devem refletir os aspectos ambientais significativos e estar alinhados aos objetivos e metas ambientais previamente estabelecidos.

Na etapa executar, ocorre a coleta e análise de dados, envolvendo o

levantamento e a interpretação de informações relacionadas aos aspectos ambientais da organização, como consumo de recursos naturais, geração de resíduos, emissões atmosféricas e uso da água. Essa etapa exige precisão metodológica e confiabilidade nos dados obtidos.

Em seguida, na fase de verificar, os dados coletados são submetidos a uma análise crítica, que pode incluir comparações com o histórico da própria organização ou com benchmarks de empresas do mesmo setor. Essa análise permite avaliar o desempenho ambiental, identificar tendências, oportunidades de melhoria e áreas que requerem atenção especial.

A comunicação dos resultados por meio de relatórios constitui uma etapa essencial, na qual as informações sobre o desempenho ambiental são compartilhadas com as partes interessadas internas e externas. Essa comunicação deve ser transparente, acessível e oportuna, visando promover a conscientização, o engajamento e a responsabilidade ambiental.

Por fim, na fase agir, realiza-se a análise crítica e a implementação de melhorias, com base nos resultados obtidos ao longo do tempo. Essa revisão periódica do sistema de avaliação permite verificar a eficácia das ações adotadas, ajustar estratégias e consolidar a melhoria contínua do desempenho ambiental da organização.

Essas etapas, articuladas em ciclo, constituem a espinha dorsal da ADA, promovendo o monitoramento sistemático e o aprimoramento constante da gestão ambiental organizacional (ABNT, 2015b).

6.2.1.1 Planejar (Plan)

O planejamento da Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA) constitui uma etapa estratégica essencial para organizações, independentemente de possuírem ou não um Sistema de Gestão Ambiental (SGA). Seu foco principal é a seleção de indicadores-chave de desempenho ambiental, capazes de mensurar de forma eficaz os impactos das atividades organizacionais sobre o meio ambiente.

Essa seleção deve considerar a natureza das operações, os aspectos ambientais significativos e o alinhamento com os objetivos ambientais e estratégicos da organização. Conforme estabelecido pela ABNT NBR ISO 14031 (ABNT, 2015b), os indicadores devem atender a critérios como:

- Relevância: capacidade de refletir os principais impactos ambientais;
- Mensurabilidade: possibilidade de quantificação objetiva;
- Confiabilidade: precisão e consistência dos dados;
- Simplicidade: facilidade de compreensão e aplicação;
- Comparabilidade: viabilidade de comparação interna e externa;
- Atualidade: adequação ao contexto e às exigências atuais.

A consideração desses critérios permite que os indicadores selecionados forneçam informações úteis e contextualizadas, revelando áreas críticas, oportunidades de melhoria e tendências de desempenho.

Além disso, os indicadores devem ser estruturados de forma integrada, com base em uma plataforma de dados comum, o que possibilita uma avaliação sistêmica do desempenho ambiental. Essa abordagem favorece a compreensão de como os objetivos ambientais influenciam outras áreas operacionais, promovendo uma visão holística das práticas organizacionais e fortalecendo a transversalidade da gestão ambiental.

Ao utilizar eficientemente essas medidas, as organizações ampliam sua capacidade de gerar insights estratégicos, orientar decisões sustentáveis e consolidar uma cultura organizacional voltada à melhoria contínua e à responsabilidade ambiental.

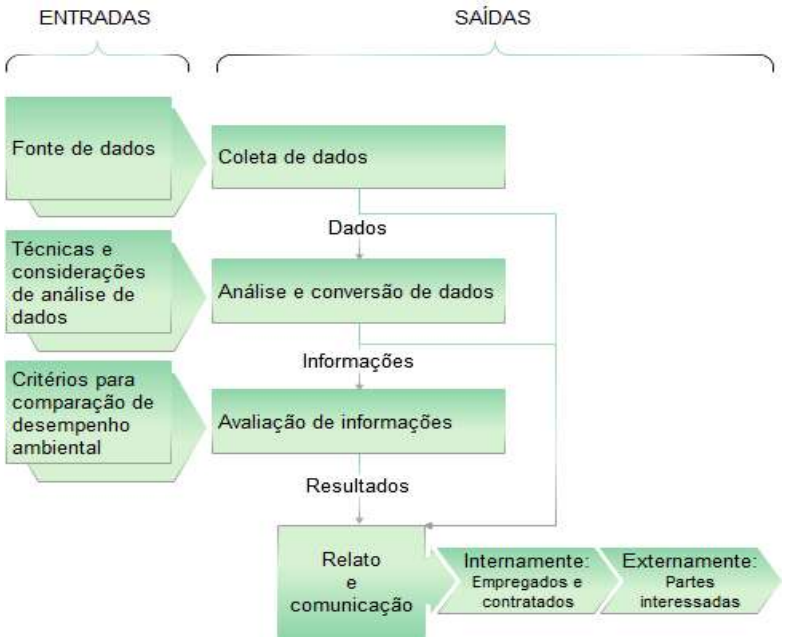
6.2.1.2 Executar (Do)

Durante a fase de execução da Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA), a norma ABNT NBR ISO 14031 recomenda a adoção de etapas sistemáticas, conforme ilustrado na Figura 27, com foco na transformação de dados ambientais em informações úteis para a tomada de decisão.

A primeira etapa consiste na coleta de dados relevantes, em que informações associadas aos indicadores previamente selecionados são reunidas de forma meticulosa, assegurando sua precisão, representatividade e confiabilidade em relação às atividades e impactos ambientais da organização. Em seguida, os dados coletados são submetidos à análise técnica, sendo convertidos em informações significativas que descrevem o desempenho ambiental da organização. Nessa etapa, aplicam-se métodos analíticos para identificar tendências, padrões e oportunidades de melhoria, proporcionando uma compreensão aprofundada do cenário ambiental.

Posteriormente, ocorre a avaliação crítica das informações, por meio da comparação dos resultados obtidos com os objetivos e metas ambientais estabelecidos. Essa análise permite verificar o progresso em direção às metas traçadas, identificar desvios e determinar a necessidade de ações corretivas ou ajustes nas práticas ambientais. A última etapa envolve a elaboração de relatórios de desempenho ambiental, que consolidam as informações coletadas, analisadas e avaliadas. Esses relatórios devem ser comunicados de forma clara, transparente e acessível às partes interessadas internas e externas, promovendo o engajamento, a conscientização e a responsabilidade ambiental. Esse conjunto de ações representa o núcleo da fase "Executar" do ciclo PDCA, sendo essencial para garantir que a ADA produza informações confiáveis e úteis para o aprimoramento contínuo da gestão ambiental organizacional.

Figura 27 –Uso de dados e informações (Executar)



Fonte: (ABNT, 2015b).

6.2.1.3 Verificar e Agir (Check-Act)

A fase de Verificação e Ação no processo de Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA) é essencial para assegurar a eficácia contínua do sistema e promover a melhoria do desempenho ambiental da organização. Essa etapa corresponde às fases finais do ciclo PDCA, nas quais os resultados obtidos são analisados criticamente e transformados em ações concretas de aprimoramento.

A norma ISO 14031 recomenda as seguintes diretrizes para conduzir essa etapa de forma eficaz:

- Revisão periódica: A ADA deve ser revisada regularmente com enfoque crítico, visando identificar falhas, lacunas e oportunidades de melhoria. Essa prática contribui para o aperfeiçoamento da gestão ambiental e das operações organizacionais, refletindo diretamente na melhoria das condições ambientais.
- Identificação de oportunidades de aprimoramento: Durante a revisão, é fundamental reconhecer pontos em que o processo de ADA pode ser otimizado seja na coleta e análise de dados, na definição de indicadores, na avaliação de desempenho ou na comunicação dos resultados.
- Implementação de ações de melhoria: Com base na análise crítica, devem ser planejadas e executadas ações corretivas e preventivas que visem à melhoria contínua do desempenho ambiental. Essas ações devem estar alinhadas aos objetivos estratégicos da organização e ser monitoradas quanto à sua eficácia.
- Exemplos de ações de aprimoramento: Entre as medidas recomendadas estão:
- Elevação da qualidade, confiabilidade e disponibilidade dos dados ambientais;
- Aperfeiçoamento da capacidade analítica e dos métodos de avaliação;
- Desenvolvimento de novos indicadores mais representativos e úteis;
- Atualização e capacitação contínua do pessoal envolvido no processo de ADA.

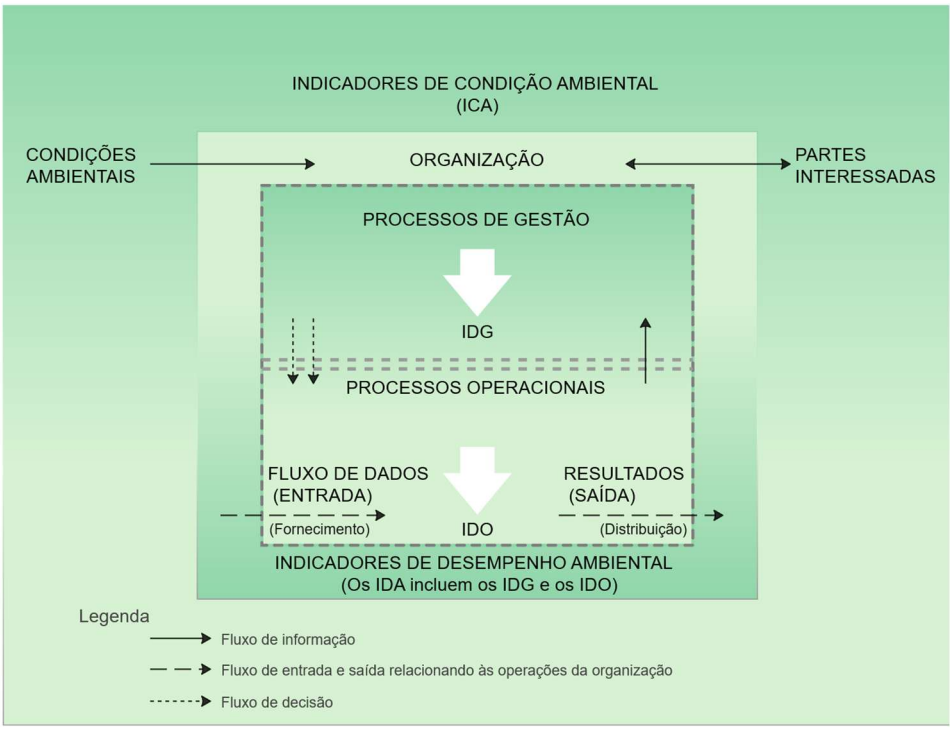
Essas ações, quando implementadas de forma estruturada e acompanhadas por mecanismos de controle e revisão, fortalecem a cultura de melhoria contínua e consolidam a ADA como instrumento estratégico de gestão ambiental.

6.2.2 Indicadores para ADA

Os indicadores desempenham um papel central na Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA), ao fornecerem dados mensuráveis, objetivos e comparáveis que subsidiam a análise crítica do desempenho ambiental organizacional. Dois tipos

principais de indicadores são utilizados nesse processo: os Indicadores de Condição Ambiental (ICA) e os Indicadores de Desempenho Ambiental (IDA), cujos campos de atuação se concentram, respectivamente, no meio ambiente e na organização, conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28 –Campo de ação dos indicadores



Fonte: Adaptação (ABNT, 2015b).

Os ICA têm como finalidade avaliar o estado atual do meio ambiente e identificar os possíveis impactos decorrentes das atividades organizacionais. Esses indicadores abrangem informações sobre a qualidade do ar, da água, do solo e da biodiversidade, permitindo uma leitura contextualizada das condições ambientais. Exemplos incluem:

- Concentração de poluentes atmosféricos;
- Níveis de contaminação hídrica;
- Volume de resíduos sólidos gerados;
- Indicadores de diversidade biológica local.

Por meio dos ICA, as organizações conseguem monitorar o estado ambiental de suas áreas de influência e identificar zonas críticas que demandam ações de mitigação ou compensação ambiental.

Já os IDA são utilizados para mensurar o desempenho ambiental da

organização em relação aos seus objetivos, metas e requisitos legais. Esses indicadores fornecem insights sobre o progresso institucional rumo à sustentabilidade e à redução de impactos ambientais. Exemplos incluem:

- Redução do consumo de energia e água;
- Diminuição das emissões de gases de efeito estufa;
- Aumento da taxa de reciclagem e reaproveitamento de resíduos;
- Eficiência no uso de matérias-primas.

Os IDA permitem avaliar o impacto direto das atividades organizacionais sobre o meio ambiente, além de orientar o estabelecimento de metas ambientais, o monitoramento de resultados e a comunicação de desempenho às partes interessadas.

Em síntese, os indicadores utilizados na ADA representam ferramentas indispensáveis para organizações que buscam aprimorar sua performance ambiental e contribuir efetivamente para a sustentabilidade. A utilização integrada de ICA e IDA possibilita uma visão abrangente e estratégica do impacto ambiental, promovendo a adoção de medidas eficazes de gestão, o fortalecimento da responsabilidade socioambiental e o alcance de resultados positivos tanto para a organização quanto para o meio ambiente.

6.2.3 Princípios da ADA

A eficácia da Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA) depende da observância de princípios fundamentais que orientam a qualidade, a utilidade e a confiabilidade das informações utilizadas no processo. Esses princípios garantem que os dados coletados e analisados sejam relevantes para a tomada de decisão e contribuam efetivamente para a melhoria contínua da gestão ambiental.

Relevância: As informações devem ser diretamente relacionadas aos aspectos ambientais significativos da organização, permitindo decisões estratégicas e operacionais alinhadas aos objetivos ambientais e à sustentabilidade.

Integralidade: Os dados devem ser abrangentes, contemplando todos os fatores relevantes para uma avaliação completa dos impactos ambientais das atividades organizacionais. A ausência de informações críticas pode comprometer a precisão da análise e a efetividade das ações corretivas.

Consistência e precisão: As informações devem ser consistentes ao longo do

tempo e suficientemente precisas para permitir comparações válidas entre o desempenho passado, presente e futuro. Isso assegura a confiabilidade dos resultados e a rastreabilidade das tendências ambientais.

Transparência: Os dados devem ser apresentados de forma clara, acessível e compreensível para os usuários pretendidos internos e externos garantindo que as decisões sejam embasadas em informações confiáveis e verificáveis.

Ao seguir esses princípios, as organizações fortalecem a ADA como ferramenta estratégica, promovendo uma gestão ambiental eficaz, responsável e orientada à melhoria contínua. A aplicação rigorosa desses fundamentos contribui para o aprimoramento da performance ambiental e para o cumprimento dos compromissos legais, normativos e voluntários assumidos pela organização (ABNT, 2015b).

6.3 APLICAÇÃO DA GESTÃO AMBIENTAL

A etapa metodológica referente à aplicação da gestão ambiental foi fundamentada na norma ABNT NBR ISO 14000, com destaque para os procedimentos descritos na ABNT NBR ISO 14031, voltados à Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA). Essa abordagem foi adotada em razão de sua robustez conceitual e operacional, oferecendo diretrizes claras para a mensuração, interpretação e comunicação do desempenho ambiental em sistemas produtivos.

A norma ISO 14000 foi selecionada por sua ampla aceitação internacional e pela significativa adesão no setor industrial brasileiro, além de seu alinhamento com os princípios da sustentabilidade e da responsabilidade ambiental. A aplicação dessa norma permitiu estruturar a avaliação ambiental de forma sistemática, contribuindo para a identificação de impactos relevantes, o estabelecimento de metas de melhoria e a promoção da transparência nos processos de gestão ambiental.

6.3.1 Justificativa da Escolha da Norma ISO 14000

A norma ABNT NBR ISO 14000 foi selecionada por sua capacidade de orientar a estruturação de Sistemas de Gestão Ambiental (SGA) eficazes, com foco na melhoria contínua, na conformidade com a legislação vigente e na prevenção de impactos ambientais negativos. Essa norma forneceu instrumentos metodológicos para a identificação de aspectos e impactos ambientais, definição de metas e

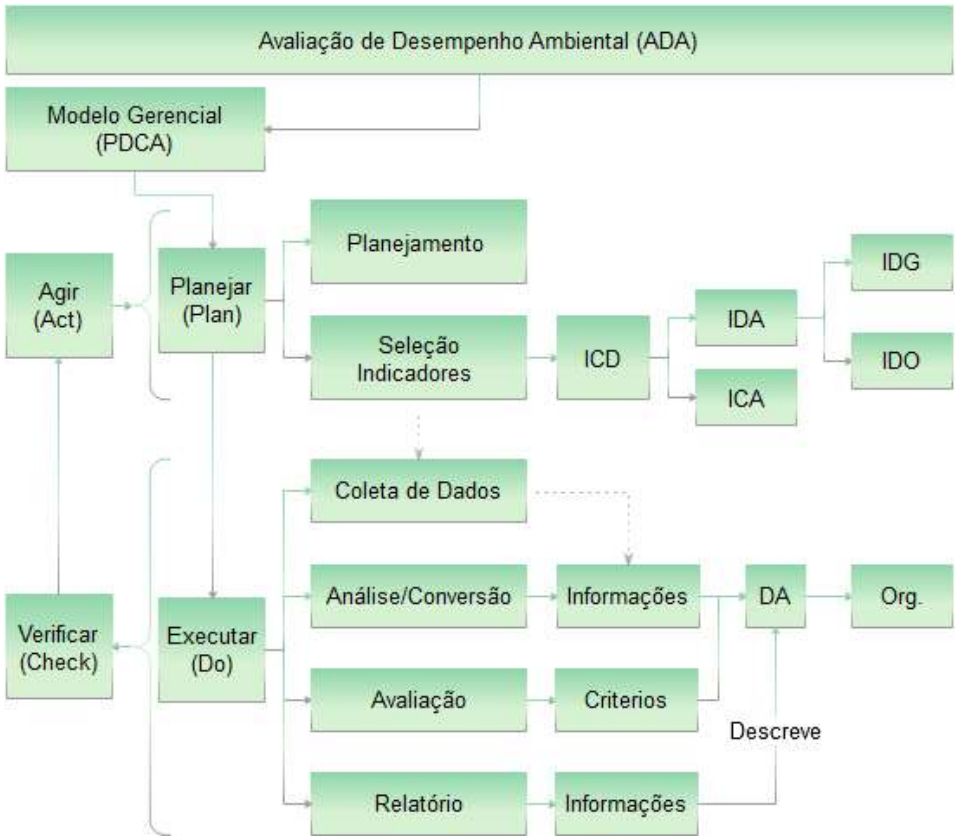
indicadores de desempenho, além de permitir a organização de um ciclo de gestão baseado no modelo *Plan-Do-Check-Act* (PDCA).

Seu reconhecimento internacional e ampla aceitação no setor industrial brasileiro justificaram sua adoção como referência normativa para a avaliação dos sistemas produtivos de TCTC, independentemente da escala de operação. A aplicação da ISO 14000 possibilitou alinhar os procedimentos metodológicos deste estudo aos princípios da sustentabilidade e da responsabilidade ambiental, conforme estabelecido pela ABNT (2015a) e reforçado pelas diretrizes da ISO (2013).

6.3.2 Etapas da Avaliação Ambiental

Com o objetivo de quantificar a energia elétrica incorporada nos processos de produção dos TCTC, a Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA) foi executada em três fases principais, conforme ilustrado no Diagrama da Figura 29.

Figura 29 –Diagrama da ADA



Fonte: Adaptação (ABNT, 2015b).

Essa abordagem metodológica foi fundamentada nas diretrizes da ABNT NBR ISO 14031, que orientam a mensuração e interpretação de indicadores ambientais com base em evidências empíricas e critérios comparativos. A aplicação dessas

etapas permitiu integrar os princípios da gestão ambiental ao contexto produtivo dos TCTC, contribuindo para a construção de um modelo avaliativo alinhado aos objetivos de sustentabilidade e eficiência energética.

6.3.2.1 Planejar (Plan)

A fase de planejamento constituiu a base estruturante da Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA), tendo sido desenvolvida em duas dimensões complementares. Na primeira, foram definidos os objetivos ambientais, com foco na análise da viabilidade técnica e econômica da produção dos TCTC, considerando sua eficiência energética e desempenho ambiental, conforme os parâmetros estabelecidos pela norma ABNT NBR ISO 14031 (ABNT, 2015b).

Na segunda dimensão, procedeu-se à seleção dos indicadores-chave de desempenho (ICD), priorizando variáveis quantificáveis relacionadas a:

- Consumo energético (kWh por unidade produzida, com distinção entre fontes renováveis e não renováveis);
- Uso de materiais (proporção terra-cimento e reaproveitamento de resíduos);
- Uso de água (litros por ciclo produtivo e presença de sistemas de reutilização);
- Desempenho técnico (resistência à compressão em MPa e durabilidade conforme normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT).

Os dados utilizados foram obtidos a partir de informações técnicas fornecidas por fabricantes de maquinários, complementados por visitas técnicas a centros de produção e por revisão normativa. Essa abordagem permitiu alinhar a metodologia aos princípios do ciclo PDCA, assegurando rastreabilidade e consistência para as etapas subsequentes (Executar, Verificar e Agir).

Esse formato metodológico viabilizou não apenas a avaliação pontual dos indicadores, mas também a modelagem de cenários comparativos entre técnicas artesanais e semi-industrializadas, garantindo que a análise contemplasse simultaneamente a viabilidade econômica e a mitigação dos impactos ambientais. A metodologia adotada, conforme detalhado na seção 6.3.1, conferiu robustez aos resultados obtidos, fundamentais para a continuidade do processo avaliativo.

6.3.2.2 Executar (Do)

A fase de execução deste estudo foi estruturada como um processo metodológico abrangente, voltado à obtenção, organização e interpretação de dados técnicos relacionados às tecnologias empregadas na produção dos TCTC. A coleta sistemática de informações foi realizada junto às principais empresas do mercado nacional especializadas e, em alguns casos, exclusivas na fabricação de equipamentos e sistemas voltados à estabilização de componentes terrosos com cimento. A escolha dessas fontes fundamentou-se na confiabilidade técnica e no acesso direto a dados essenciais sobre desempenho produtivo, consumo energético e viabilidade operacional.

Para garantir uma caracterização abrangente dos perfis tecnológicos disponíveis, foi adotada uma estratégia multimodal de levantamento e validação de dados. Essa abordagem integrou a análise de fichas técnicas, manuais de operação e especificações fornecidas por fabricantes nacionais como ECO MÁQUINAS, JARFEL; SAHARA, VERDE EQUIPAMENTOS e ALROMA. Complementarmente, foi realizada visita técnica especializada à sede da ALROMA, localizada no estado do Paraná, permitindo a observação direta dos processos fabris, a verificação *in loco* das capacidades técnicas dos equipamentos e o registro de parâmetros operacionais fundamentais para a análise comparativa.

A triangulação metodológica entre dados documentais, informações primárias obtidas junto aos fabricantes e evidências observacionais coletadas durante a visita técnica constituiu um procedimento de validação cruzada que conferiu robustez analítica ao estudo. Essa abordagem multidimensional possibilitou o confronto sistemático entre referenciais teóricos e práticas operacionais, fortalecendo a consistência das análises comparativas realizadas.

Os dados obtidos foram sistematizados na Tabela 13 e Tabela 14, que detalharam os principais parâmetros operacionais dos equipamentos analisados, incluindo modelo produtivo, tipo de maquinário, número de operadores, demanda de energia elétrica (kW/h), capacidade produtiva média diária (TCTC/dia) e investimento inicial em maquinário (R$). Com base nessa categorização, os modelos foram classificados segundo sua natureza tecnológica: manual (M), semiautomático (SA) e automático (A).

Tabela 13 - Coleção dos dados para os modelos de produção

(continua)

Modelos de Produção	Maquinária	Nº Op.	Energia Elétrica [kW/h]	Produção Média [TCTC/d]	Custo Unitário da Maquinária [R$]
M-1	Prensa profissional manual	2	0	1000	R$ 10.125,00
M-1	Triturador JAG 2500 Trifásico (220V) - 1 cv	1	0,75		R$ 6.075,00
SA-1	Prensa HM Monofásico (220V) – 3 cv	2	14,5	1500	R$ 20.250,00
SA-1	Triturador JAG 2500 Monofásico (220V) - 1 cv	1	1,1		R$ 6.075,00
SA-2	Prensa HM Trifásico (380V) - 3 cv	2	3,4	1500	R$ 20.250,00
SA-2	Triturador JAG 2500 Trifásico (220V) - 1 cv	1	0,75		R$ 6.075,00
M-2	Prensa Manual	1	0	1500	R$ 15.000,00
M-2	Triturador, Monofásico (220V) – 2 cv	1	1,5		R$ 9.100,00
M-2	Peneira, Monofásico (220V) – 0,5 cv	1	0,19		R$ 7.900,00
SA-3	Prensa Hidráulica, Monofásico (220V) – 5 cv	1	3,7	3000	R$ 36.500,00
SA-3	Triturador, Monofásico (220V) – 2 cv	1	1,5		R$ 9.100,00
SA-3	Peneira, Monofásico (220V) – 0,5 cv	1	0,19		R$ 7.900,00
A-1	Prensa automática 3T, Trifásico (220V) - 10 cv	1	8,9	3000	R$ 149.000,00
A-1	Processador Titã, Trifásico (220V) - 15 cv (3 motores)		7,7		R$ 74.900,00
A-1	Esteira transportadora (4,5 m), Trifásico (220V) - 1,5 cv, 2un		2,4		R$ 39.000,00
A-2	Prensa automática 5T, Trifásico (220V) - 10 cv	1	11	5000	R$ 219.000,00
A-2	Processador S Titã, Trifásico (220V) - 15 cv (3 motores)		9,6		R$ 113.900,00
A-2	Esteira transportadora (4,5 m), Trifásico (220V) - 1,5 cv, 2un		2,4		R$ 39.000,00
SA-4	Prensa Semiautomática 4T, Trifásico (220V/380), 2cv	2	1,62	1200	R$ 25.000,00
SA-4	Triturador trifásico (220V/380), 1,0 cv	1	0,81		R$ 13.500,00

Tabela 14 - Coleção dos dados para os modelos de produção

(conclusão)

Modelos de Produção	Maquinária	Nº Op.	Energia Elétrica [kW/h]	Produção Média [TCTC/d]	Custo Unitário da Maquinária [R$]
SA-4	Esteira 3m, Trifásico (220/380V), 0.75cv		0,62		R$ 7.563,00
A-3	Prensa automática 10T, trifásico (220/380V), 12,5cv	1	10	3840	R$ 199.000,00
A-3	Multiprocessador, trifásico (220/380V), 23,25cv		31,2		R$ 130.000,00
A-3	Esteira 3m, Trifásico (220/380V), 1,5cv		1,1		R$ 18.900,00
A-4	Prensa automática 7T, trifásico (220/380V), 12,5cv	1	6	3840	R$ 149.000,00
A-4	Multiprocessador, trifásico (220/380V), 23,25cv		31,2		R$ 130.000,00
A-4	Esteira 3m, Trifásico (220/380V), 1,5cv		1,1		R$ 18.900,00
A-5	Prensa automática 7T*, trifásico (220/380V), 12,5cv	1	6	3840	R$ 110.000,00
A-5	Multiprocessador, trifásico (220/380V), 23,25cv		31,2		R$ 130.000,00
A-5	Esteira 3m, Trifásico (220/380V), 1,5cv		1,1		R$ 18.900,00
A-6	Prensa automática 12T - 7,5s, trifásico (220/380V), 15cv	1	8,5	3840	R$ 189.000,00
A-6	Multiprocessador, 800L-750, trifásico (220/380V), 14cv		7,75		R$ 138.000,00
A-6	Esteira 3m, Trifásico (220/380V), 1,0cv		0,73		R$ 28.500,00
A-7	Prensa automática 12T - 10s, trifásico (220/380V), 15cv	1	7,25	2880	R$ 157.000,00
A-7	Multiprocessador, 400L-375, trifásico (220/380V), 14cv	1	6,5		R$ 109.000,00
A-7	Esteira 3m, Trifásico (220/380V), 1,0cv		0,73		R$ 28.500,00

Legenda: (**M**) Modelo manual; (**AS**) Modelo semiautomático; (**A**) Automático
Fonte: O autor

O levantamento foi realizado no primeiro trimestre de 2024, período em que vigoraram os seguintes parâmetros econômicos de referência: salário-mínimo nacional de R$ 1.412,00 e cotação média do dólar comercial de R$ 5,33. Esses indicadores macroeconômicos foram utilizados para contextualizar os valores de investimento e custos operacionais, permitindo análises comparativas temporais e ajustes por paridade de poder de compra.

A metodologia de coleta fundamentou-se em consultas diretas aos fabricantes, análise de documentação técnica e realização de cotações comerciais. As visitas técnicas complementaram esse processo, permitindo a verificação *in loco* dos parâmetros operacionais. Essa abordagem sistematizada viabilizou uma comparação objetiva entre diferentes configurações tecnológicas, favorecendo a análise de *trade-offs* entre investimento inicial, custos operacionais e capacidade produtiva no planejamento de unidades de produção de TCTC.

A padronização e o tratamento dos dados permitiram aprofundar a compreensão sobre o impacto energético dos diferentes modelos de produção, conforme resumido na Tabela 15. Essa tabela apresenta indicadores como número de operadores, demanda energética (kW/h), produtividade por unidade (TCTC/h) e estimativa de custo de implantação dos maquinários. A normalização desses dados viabilizou uma avaliação precisa da energia elétrica incorporada ao processo produtivo dos TCTC, gerando insumos cruciais para análises de eficiência, sustentabilidade e tomada de decisão organizacional.

Tabela 15 - Modelos de produção de TCTC

Modelo	Nº Op.	Demanda Energética [kW/h]	Produtividade [Ud./h]	Custo [Mil R$]
M-1	3	0,75	125,00	16,20
M-2	3	1,69	187,50	32,00
SA-4	3	3,05	150,00	46,06
SA-2	3	4,15	187,50	26,33
SA-3	3	5,39	375,00	53,50
SA-1	3	15,60	187,50	26,33
A-7	2	14,48	360,00	294,50
A-1	1	19,00	375,00	262,90
A-6	1	16,98	480,00	355,50
A-2	1	23,00	625,00	371,90
A-4	1	38,30	480,00	297,90
A-5	1	38,30	480,00	258,90
A-3	1	42,30	480,00	347,90

Legenda: (**M**) Modelo manual; (**AS**) Modelo semiautomático; (**A**) Automático
Fonte: O autor

A etapa subsequente consistiu em uma análise comparativa crítica dos sistemas produtivos, tanto entre si quanto em relação ao histórico operacional da organização (foco deste estudo). Essa triangulação permitiu identificar padrões e tendências, revelando gargalos, potencialidades e oportunidades de inovação. A

integração entre visitas técnicas a empresas fornecedoras e unidades produtivas em operação agregou perspectiva prática à investigação, destacando boas práticas e soluções tecnológicas aplicáveis.

6.3.2.3 Verificar e Agir (Check–Act)

A etapa final do processo metodológico, denominada “Verificar e Agir”, teve como objetivo consolidar criticamente os dados obtidos ao longo da análise dos diferentes modelos de produção dos TCTC. Mais do que um simples cruzamento de informações, essa fase configurou-se como um momento de reflexão aprofundada, no qual cada resultado foi interpretado considerando os contextos técnicos, produtivos e operacionais associados a cada sistema avaliado.

Diferentemente de abordagens que contrastam os resultados com parâmetros normativos internacionais ou *benchmarks* consolidados, esta pesquisa adotou uma perspectiva empírica e localizada. A verificação dos dados foi realizada por meio da análise criteriosa das informações coletadas junto aos modelos produtivos e seus respectivos equipamentos, tanto em contextos simulados quanto em ambientes reais de operação. Essa escolha metodológica justificou-se pela heterogeneidade das práticas industriais no setor de TCTC e pela ausência de normas específicas voltadas à quantificação da energia incorporada na fase produtiva dos TCTC.

Nesse contexto, a fase de verificação buscou compreender, de forma comparativa, as diferenças observadas entre os modelos manuais, semiautomáticos e automáticos, com base nos indicadores previamente levantados demanda energética, produtividade, número de operários e custo de implementação. A riqueza dos dados obtidos permitiu identificar padrões recorrentes e inconsistências relevantes, como a constatação de que, em diversos casos, modelos de menor complexidade apresentaram desempenho técnico e ambiental superior aos sistemas mais sofisticados.

A etapa de “Agir” foi orientada pela consolidação das interpretações derivadas da observação direta de unidades produtivas. As visitas técnicas realizadas às fábricas ALROMA (centro de desenvolvimento tecnológico) e RAACH (setor operacional) forneceram suporte empírico essencial para contrastar os dados coletados, além de aprofundar o entendimento sobre a aplicação dos equipamentos em condições reais de produção. Essas experiências *in loco* possibilitaram o contraste

entre os dados documentais e as práticas cotidianas, revelando nuances operacionais que não seriam captadas por meio de análise exclusivamente técnica ou acadêmica.

Assim, a fase de verificação e ação não se pautou pela mera aderência a normas ou padrões preestabelecidos, mas pela construção de um arcabouço técnico e estratégico voltado à otimização da produção dos TCTC, fundamentado em evidências empíricas diretamente nos ambientes produtivos. Os achados decorrentes desta etapa estabelecem a transição para a seção subsequente, dedicada à descrição pormenorizada e à análise crítica das visitas técnicas, na qual as tecnologias empregadas e os arranjos operacionais observados serão examinados sob os princípios da sustentabilidade, da eficiência energética e da racionalização do uso de recursos e materiais.

6.4 VISITA DE CAMPO

A realização da visita técnica aos setores da indústria voltada à produção dos TCTC constituiu uma etapa essencial da fase “Verificar e Agir” da Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA) conduzida nesta pesquisa. Essa atividade foi estrategicamente planejada com o objetivo de aprofundar a análise dos modelos produtivos adotados, por meio da observação direta das práticas industriais, da interação com profissionais atuantes no setor e da coleta de dados primários em campo.

A visita contemplou dois ambientes complementares: a fábrica de equipamentos ALROMA, localizada em Palmas – PR, especializada na concepção e fabricação de maquinários voltados à produção de componentes em terra-cimento; e a unidade produtiva da RAACH – Fábrica de TCTC, situada em Contenda – PR, dedicada à fabricação dos componentes construtivos com base nos equipamentos previamente avaliados. A proposta consistiu em investigar empiricamente os aspectos tecnológicos, operacionais e ambientais que compõem as cadeias produtivas sustentáveis, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

A coleta de dados em campo foi conduzida por meio de uma abordagem metodológica multimodal, que integrou a observação sistemática das instalações e dos processos produtivos com a realização de entrevistas semiestruturadas junto a técnicos e operadores. Esse protocolo foi complementado pela análise documental

dos fluxos materiais e energéticos, bem como pelo registro fotográfico das condições operacionais observadas *in situ*. A conjugação dessas técnicas permitiu uma compreensão empírica aprofundada dos desafios concretos enfrentados pelo setor e uma avaliação crítica das soluções tecnológicas adotadas, especialmente aquelas voltadas ao incremento da eficiência produtiva e à mitigação dos impactos ambientais.

6.4.1 Setor Técnico

A visita técnica à fábrica de equipamentos ALROMA foi realizada em 28 de outubro de 2024 (Figura 30), na unidade industrial localizada na rodovia PRC 280 – Km 134, no município de Palmas, Estado do Paraná. A atividade integrou as ações institucionais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECI) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), sendo promovida e financiada por este. O objetivo central consistiu em aprofundar o estudo de tecnologias sustentáveis aplicadas à produção de materiais para a construção civil, com ênfase na análise da ecoeficiência dos processos produtivos, especialmente no que se refere às demandas energéticas e ao uso de insumos na fabricação de componentes comprimidos de terra estabilizada com cimento.

Figura 30 - Visita técnica - ALROMA

Fonte: O autor

A unidade visitada, fundada em 2005, é especializada na fabricação de equipamentos voltados à produção de componentes em terra-cimento. As tecnologias desenvolvidas prescindem do processo de queima de argila e do uso excessivo de água, alinhando-se aos princípios da sustentabilidade e aos Objetivos de

Desenvolvimento Sustentável (ODS).

A recepção inicial foi conduzida por Rogerio Restelli, na área administrativa, seguida por entrevistas com engenheiros e operadores (Figura 31), que apresentaram o histórico da empresa e os detalhes técnicos dos processos e equipamentos em operação. Destacaram-se os sistemas de prensagem automática e os multiprocessadores dos modelos 800L, 400L e 200L, que integram em um único equipamento as funções de abastecimento, trituração, peneiramento e mistura (Figura 32). Esses sistemas demonstraram ganhos expressivos em produtividade, otimização do desempenho produtivo e racionalização do uso de mão de obra, com aproveitamento eficiente de áreas físicas compactas (60 m² – Figura 33) e exigindo apenas dois operários para produzir até 480 unidades por hora.

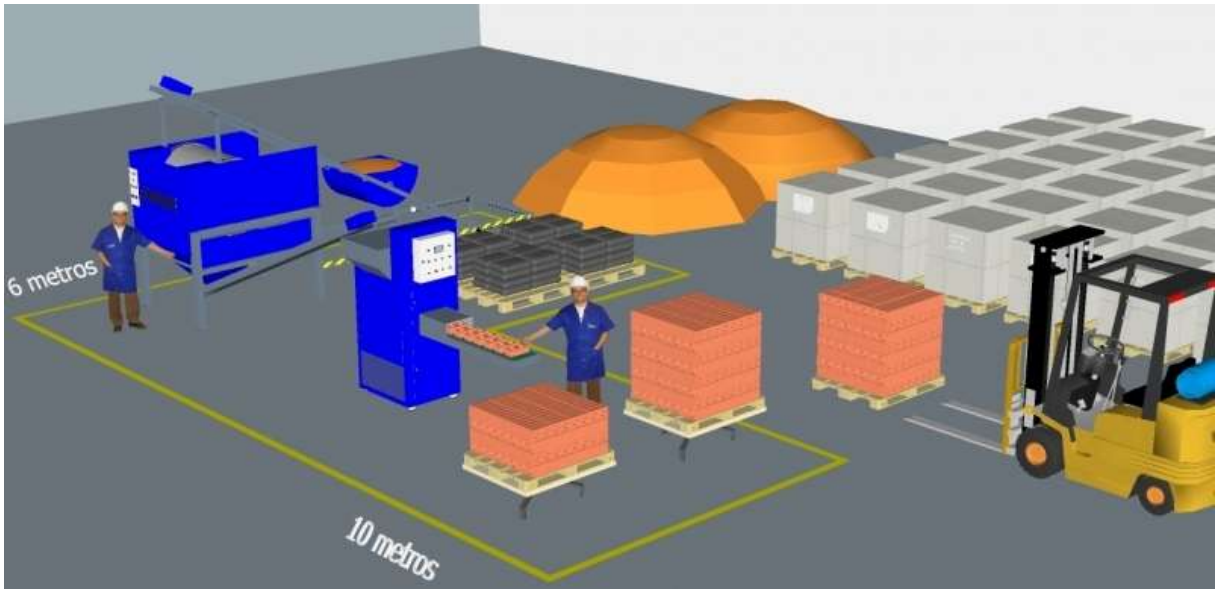
Figura 31 – Acompanhamento técnico das operações - ALROMA

Fonte: O autor

Figura 32 – Multiprocessador - ALROMA

Fonte: O autor

Figura 33 – Layout da planta operacional - ALROMA



Fonte: (ALROMA, 2025e).

Segundo os dados fornecidos pelos técnicos, até o momento da visita já haviam sido produzidas aproximadamente 310 milhões de unidades de TCTC por meio dos equipamentos da ALROMA, o que corresponde à preservação estimada de cerca de 930 mil árvores e à redução de mais de 25.900 toneladas de CO_2, conforme parâmetros do GHG Protocol (2024).

Durante a visita técnica, foi possível acompanhar o funcionamento de um sistema inovador de paletização, desenvolvido para organizar os componentes TCTC

sobre paletes com capacidade para 448 unidades, distribuídas em oito fiadas de 56 TCTC. A cada fiada, os TCTC eram posicionados em sentido alternado, promovendo o travamento da pilha e garantindo maior estabilidade durante o transporte.

Foram observados dois modelos distintos de organização. O primeiro, de natureza fixa, foi utilizado em operações manuais com suporte de uma mesa rotatória ergonômica (Figura 34), que facilitava o empilhamento dos TCTC. Essa mesa girava progressivamente à medida que o palete era preenchido, permitindo que o operador permanecesse posicionado em um único ponto de trabalho, sem necessidade de contornar a estrutura para completar cada fiada.

Figura 34 – Mesa rotatória ergonômica

(a) Mesa rotatoria (b) Arranjo mecanico dos TCTC sob a mesa (c) Empilhamento dos TCTC

Fonte: O autor

O segundo modelo, automatizado, operava em linha com auxílio de robô paletizador. Nesse sistema, os TCTC eram organizados sobre os vagões paletizadores, que, uma vez preenchidos, eram deslocados por trilhos até o setor de cura, previamente isolados com filme plástico para viabilizar o processo de cura por confinamento (Figura 35).

A sequência operacional do robô foi observada em oito etapas: (a) identificação, por sensores, da posição dos TCTC recém-fabricados e do vagão paletizador; (b) posicionamento inicial do robô; (c) apreensão do TCTC por meio de garras específicas, sem causar danos ao componente; (d) elevação do TCTC; (e) movimentação do braço em direção ao vagão; (f) posicionamento preciso do TCTC sobre o vagão; (g) retorno à posição inicial; e (h) reinício do ciclo até o preenchimento completo do vagão com 448 unidades, concluindo assim sua tarefa.

Figura 35 – Paletização automatizado

(a) Posição inicial trilho-vagão-robô

(b) Posição de arranque

(c) Aprende o TCTC com as garras

(d) Levanta o TCTC aprendido

(e) Movimento em direção ao vagão

(f) Posicionamento do primeiro TCTC

(g) Retorno a posição inicial

(h) Traslado do segundo TCTC

(i) Traslado do quinto TCTC

(j) Traslado do nono TCTC

(k) Posicionamento do nono TCTC

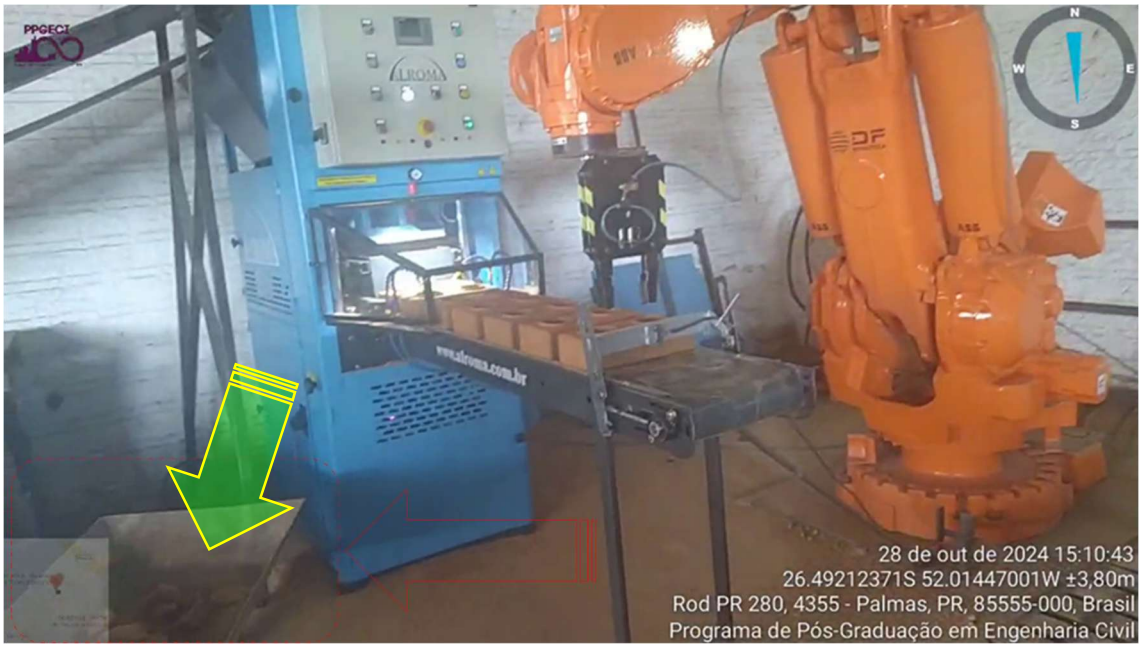
(l) Continua com o ciclo

Fonte: O autor

Outro aspecto relevante observado foi o uso exclusivo de energia solar como fonte elétrica em toda a operação fabril, desde a produção das máquinas até os sistemas de prensagem e mistura. Embora não tenha sido realizada uma análise aprofundada sobre o impacto ambiental da matriz energética, o uso de fonte renovável foi destacado como medida positiva frente ao atual cenário climático.

A fábrica também adota práticas de reaproveitamento de matéria-prima, especialmente de componentes que não atendem aos critérios de qualidade, reintegrando-os à linha de produção na forma de terra (Figura 36). A etapa de cura é conduzida com significativa economia hídrica, utilizando a água do traço original do terra-cimento, preservada por meio do confinamento dos paletes com plástico filme, o que evita a evaporação e praticamente elimina a necessidade de adição de água para completar o processo.

Figura 36 - Reaproveitamento dos resíduos



Fonte: O autor

Durante a visita[6], não foi possível quantificar o consumo específico de energia

[6] Esclarecimentos Metodológicos:
A visita permitiu verificação *in loco* de aspectos qualitativos dos processos;
Dados quantitativos de consumo serão obtidos em unidade produtiva operacional;
A matriz energética renovável foi verificada, mas não quantificada em operação real.

elétrica em regime produtivo contínuo. Ressalta-se, contudo, que a unidade opera com sistema de autogeração por meio de painéis fotovoltaicos, utilizando exclusivamente fontes renováveis. Os parâmetros relacionados ao consumo de insumos (terra, cimento) e recursos hídricos serão investigados em etapa posterior, durante visita técnica a uma unidade produtiva em operação comercial. Essa distinção é relevante, uma vez que a ALROMA atua como fornecedora de tecnologia para o segmento de TCTC, e não como unidade produtiva final.

As atividades observadas consistiram em demonstrações operacionais dos equipamentos, com caráter essencialmente qualitativo, voltadas à apresentação das funcionalidades, capacidades técnicas e condições construtivas dos maquinários oferecidos pela empresa.

6.4.2 Setor Operacional: Fábrica RAACH

A visita técnica à unidade industrial dedicada à produção de TCTC foi realizada em 30 de outubro de 2024, conforme ilustrado na Figura 37. A unidade está localizada na Avenida José Mosson, nº 1022-14332, bairro Serrinha, município de Contenda, Estado do Paraná. A viabilização da atividade ocorreu por meio da colaboração de Alexandre Quaquarini, cuja atuação foi decisiva para o acesso à planta produtiva da empresa RAACH e para o agendamento formal da visita. A recepção *in loco* foi conduzida por Cleiton Raach, responsável por acompanhar este autor ao longo de todas as etapas produtivas e por fornecer as informações operacionais pertinentes.

O objetivo da visita consistiu na análise direta dos processos produtivos relacionados à fabricação dos TCTC, com especial atenção aos equipamentos da empresa ALROMA, previamente abordados na seção 6.4.1. A observação empírica permitiu avaliar a aplicação prática das tecnologias em ambiente fabril, bem como verificar sua aderência aos parâmetros técnicos divulgados pelos fabricantes.

Durante a visita, este autor foi acompanhado por profissionais da área técnica, que apresentaram detalhadamente as etapas da cadeia produtiva, desde o preparo das misturas até o armazenamento dos componentes curados. As informações obtidas possibilitaram uma análise aprofundada das práticas operacionais adotadas pela unidade, permitindo verificar sua conformidade com os princípios de eficiência energética, racionalização de insumos e recursos.

Figura 37 - Visita técnica - RAACH

Fonte: O autor

Entre os pontos observados, destacaram-se aspectos relacionados à organização do fluxo produtivo, à gestão dos recursos humanos, à sistematização dos processos de cura e ao reaproveitamento de materiais. A visita também permitiu validar os dados técnicos previamente coletados, além de revelar nuances operacionais que contribuíram para a construção de um diagnóstico mais preciso sobre o desempenho ambiental e produtivo da unidade.

6.4.2.1 Matéria prima - Terra

A cadeia produtiva da unidade industrial analisada foi estruturada a partir de um insumo primordial: a terra utilizada na fabricação dos componentes TCTC. Esse recurso natural (solo) foi extraído de uma área pertencente ao próprio empreendedor, situada a menos de 2,5 quilômetros da planta fabril. Essa proximidade estratégica

favoreceu a logística de abastecimento, reduzindo significativamente os custos de transporte e conferindo maior eficiência ao processo desde sua origem.

A terra utilizada apresentou composição argilo-arenosa, típica da região, conforme ilustrado na Figura 38. O solo apresenta aproximadamente uma proporção natural de areia entre 40% e 50%, característica que conferiu ao material propriedades aceitáveis para a produção de componentes comprimidos de terra-cimento. Após a extração, o solo foi armazenado nas instalações da unidade (Figura 39), aguardando o momento de ser preparada e corrigida para incorporação ao processo produtivo.

Antes de sua utilização, a terra passou por uma etapa técnica essencial: a correção granulométrica. Nesse procedimento, foi adicionada uma quantidade aproximada de 35% de areia branca, com o objetivo de ajustar sua composição física aos parâmetros técnicos exigidos. Essa correção foi indispensável para garantir a compressão otimizada do material e assegurar que suas propriedades mecânicas estivessem em conformidade com os padrões estabelecidos para a produção de TCTC. De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2004), o teor ideal de areia para esse tipo de componente deve situar-se entre 50% e 70%.

Figura 38 – Terra utilizado na indústria - RAACH

Fonte: O autor

Figura 39 – Estocagem do solo

Fonte: O autor

6.4.2.2 Teores de cimento e aditivos estabilizantes

De acordo com os dados obtidos durante a visita técnica, a composição da mistura utilizada na produção dos TCTC foi formulada com 5% de cimento do tipo CP V ARI[7], marca Cauê, acondicionado em sacos de 40 kg. Como aditivo, empregou-se o superplastificante[8] TITAN-119, fabricado pela empresa Pluroquímica (Figura 40), aplicado na proporção de 10 ml para cada 3 litros de água incorporada à mistura.

O traço em massa adotado seguiu a proporção de 40:735,5:0,4:12,

[7] É fundamental destacar que o cimento do tipo CP V ARI representa uma das alternativas mais impactantes do ponto de vista ambiental, sobretudo devido à sua elevada emissão de dióxido de carbono (CO_2) quando comparado aos cimentos CPII e CPIII. Essa constatação revela uma das principais dicotomias observadas: embora a indústria em questão esteja voltada à produção de componentes construtivos tecnologicamente avançados e com menor agressividade ambiental os chamados “tijolos ecológicos”, paradoxalmente, recorre-se a um insumo cuja pegada de carbono contradiz os princípios sustentáveis que fundamentam sua proposta. Tal contradição evidencia um desafio recorrente na transição para práticas industriais mais sustentáveis: a tensão entre a necessidade de desempenho técnico imediato e os compromissos ambientais de longo prazo. O uso do CP V ARI, embora justificado por suas propriedades de resistência e cura rápida, levanta questionamentos sobre a coerência entre os objetivos declarados da empresa e as escolhas materiais adotadas em sua cadeia produtiva.

[8] O uso do aditivo superplastificante TITAN-119, fornecido pela Pluroquímica, demanda avaliação técnica criteriosa, particularmente pela carência de informações detalhadas sobre sua composição química, mecanismo de ação e potenciais impactos ambientais e ocupacionais. Embora o fabricante aponte contribuições para a trabalhabilidade da mistura e incremento na resistência mecânica dos componentes moldados, esta alegação carece de comprovação científica independente e documentação técnica transparente.

correspondendo, respectivamente, aos teores de cimento, terra, aditivo e água[9]. A quantidade de água utilizada (12 litros) representou aproximadamente 1,5% da composição total e mostrou-se suficiente para viabilizar o processo de cura por confinamento. Esse método baseia-se na retenção da umidade interna durante a reação de hidratação do cimento, aproveitando a evaporação controlada da água como mecanismo de controle da umidade necessária à cura.

Para garantir a eficácia do processo, os elementos moldados foram isolados com filme plástico, criando uma barreira física que impede a dispersão da água para o ambiente externo. Essa técnica favoreceu a continuidade da cura e o desenvolvimento das propriedades mecânicas do material, mesmo em contextos de produção artesanal ou de pequeno porte, nos quais o controle ambiental é limitado. A eficiência na hidratação, assegurada por esse método, foi considerada essencial para garantir a qualidade final dos componentes produzidos e o uso racional do recurso hídrico.

Figura 40 - Estabilizador e aditivo

Fonte: O autor

6.4.2.3 Modelo de produção e produtividade

O processo produtivo observado na unidade RAACH foi estruturado em

[9] A quantidade de água adicionada (1,5%) é inferior àquela comumente indicada na literatura, que varia entre 10% e 14%. No entanto, deve-se considerar que, neste caso, o solo armazenado já contém umidade natural, uma vez que, por permanecer coberto, retém parte da água presente originalmente. Assim, parte dessa umidade contribui para a reação de hidratação do cimento, sendo equivalente à água que seria incorporada ao traço caso o solo estivesse completamente seco.

Nessas condições, estima-se que, para cada milheiro de TCTC produzido, sejam necessários aproximadamente 50 litros de água.

modelo semiautomatizado, conforme ilustrado na Figura 41, composto por um conjunto de equipamentos distribuídos em etapas funcionais. Na primeira etapa (a), foram utilizados uma peneiradora rotativa para correção granulométrica, um carrinho de mão para apoio na estocagem e transporte de resíduos reaproveitados, e uma concha acoplável à empilhadeira, destinada ao abastecimento de material. Na etapa seguinte (b), o multiprocessador com capacidade de 200 litros foi responsável pelo processamento dos insumos, sendo alimentado manualmente por um operador que controlava a dosagem de terra, cimento, aditivo e água.

Figura 41 – Modelo de produção e Layout - Raach

(a) Peneira rotativa-Carrino de mão-Concha para empilhadeira

(b) Multiprocessador

(c) Esteira trnsportadora

(d) Prensa auntomatica

(e) Mesa rotatória ergômica

(f) Empilhadeira

Fonte: O autor

A mistura pronta era então conduzida por uma esteira transportadora de 3

metros (c), direcionando o material até a máquina de compressão automática (d). Essa máquina, equipada com silo incorporado, armazenava a mistura de terra-cimento e liberava a quantidade exata para moldagem de cada unidade de TCTC. O sistema aplicava força de compressão de até 12 MPa, ejetando o componente moldado para fora da forma. Em seguida, um jato de ar comprimido era projetado sobre a superfície do TCTC, removendo partículas não aderidas. O componente era então transportado por uma esteira integrada à própria máquina, encaminhando-o para a etapa de cura.

Na etapa final, os TCTC eram organizados sobre uma mesa rotatória ergonômica (e), que facilitava o processo de estocagem e cura. A movimentação dos paletes era realizada por meio de empilhadeira (f), completando o ciclo produtivo com eficiência e racionalização dos recursos operacionais.

Segundo informações obtidas *in loco*, a produtividade registrada ao longo de uma jornada operacional de 8 horas foi de 2.150 unidades de TCTC. Essa produção foi realizada por uma equipe composta por dois técnicos com mais de quatro anos de experiência na função, o que evidência não apenas o nível de eficiência operacional alcançado pelo arranjo produtivo, mas também o domínio técnico dos operadores envolvidos.

A configuração dos equipamentos e a fluidez do *layout* fabril contribuíram para a otimização dos fluxos de trabalho, permitindo elevada taxa de produção com baixo consumo de mão de obra. Essa combinação entre tecnologia aplicada e qualificação profissional reforçou o desempenho da unidade em termos de produtividade, consistência dos resultados e aderência aos parâmetros técnicos previamente definidos para um modelo de produção semiautomático.

6.4.2.4 Consumo energético nos processos mecânicos

Na unidade operacional dedicada à produção de TCTC, a avaliação da demanda energética foi realizada de forma indireta, em virtude da ausência de instrumentos específicos para medição individualizada do consumo elétrico por equipamento. Como alternativa metodológica, adotou-se a análise dos registros mensais de consumo disponíveis nas faturas emitidas pela concessionária de energia elétrica.

Os dados analisados indicaram um custo médio mensal em torno de R$

400,00[10], valor considerado modesto frente à escala de produção observada. Esse resultado sugere que o consumo de energia elétrica não se configurou como um fator crítico para a operação da unidade, reforçando a hipótese de que os equipamentos empregados apresentaram bom desempenho em termos de eficiência energética.

Essa abordagem, embora limitada em precisão, permitiu uma estimativa confiável do impacto energético dos processos mecânicos, contribuindo para a caracterização do perfil de consumo da unidade e para a análise da viabilidade operacional sob a ótica da sustentabilidade.

6.4.2.5 Condições ambientais de cura e armazenagem

A unidade produtiva adotou o método de cura por confinamento com filme plástico (Figura 42), conforme as diretrizes operacionais recomendadas pela fabricante ALROMA. Essa abordagem permitiu otimizar o aproveitamento da água presente no traço inicial, dispensando o uso de complementações hídricas durante a etapa de cura dos TCTC. O filme plástico foi aplicado sobre as pilhas organizadas nos paletes, criando uma barreira física que impediu a dispersão da umidade intrínseca dos componentes recém-moldados. Essa umidade foi redistribuída internamente, mantendo o conjunto hidratado de forma homogênea.

Trata-se de uma metodologia de cura que aproveita integralmente a água inserida na dosagem original, sem necessidade de reposição. Sob essas condições, estimou-se um consumo de aproximadamente 50[11] litros de água para a produção de um milheiro de TCTC. Embora esse volume represente o maior consumo hídrico dentro do processo produtivo, quando comparado a outros métodos de cura, ele permanece concentrado e controlado, evidenciando a racionalidade do sistema.

---

[10] Esse valor mensal de consumo energético pôde ser desagregado considerando uma média de 20 dias úteis de operação, com uma produção mensal estimada em 43 milheiros de TCTC. A partir desses dados, o custo energético per capita por unidade produzida foi de aproximadamente R$ 0,01, ou R$ 9,31 por milheiro. Esse resultado revela um desempenho altamente satisfatório para o modelo produtivo adotado, uma vez que os gastos com energia elétrica se mantiveram compatíveis com os padrões de unidades de pequeno porte, embora a escala de produção e o nível de automação dos equipamentos se aproximem de configurações típicas de empreendimentos de porte médio. Nesse contexto, a eficiência energética associada à demanda elétrica na fase produtiva foi avaliada de forma positiva, reforçando a viabilidade técnica e econômica do sistema observado.

[11] Isso implica que, para cada unidade de TCTC produzida, são consumidos aproximadamente 50 mL de água, ou, de forma equivalente, com 1 litro de água é possível produzir cerca de 20 unidades de TCTC.

Figura 42 - Processo de cura dos TCTC

Fonte: O autor

Durante a visita técnica, foram observados lotes com até três meses de armazenagem, nos quais se verificou a presença de umidade interna nos paletes, cobrindo toda a superfície dos TCTC (Figura 43). Essa constatação corroborou a eficácia do método de confinamento, assegurando condições adequadas para o desenvolvimento das propriedades mecânicas dos componentes. Segundo os dados técnicos fornecidos pela unidade, os TCTC apresentaram resistência à compressão superior a 6 MPa.

As imagens registradas durante a visita (Figura 44) também revelaram a dinâmica da equipe operacional, evidenciando o cuidado na dosagem dos insumos, no acompanhamento das etapas e na aplicação de práticas voltadas ao reaproveitamento de resíduos. Os TCTC que não atenderam aos padrões de qualidade sejam por inadequações dimensionais ou por falhas visuais foram separados, estocados e posteriormente triturados, sendo reincorporados como matéria-prima ao ciclo produtivo. Essa reintegração foi realizada por meio da mistura dos resíduos à terra utilizada na fabricação dos componentes.

Essa prática representou uma fração mínima da produção diária, variando entre 0,8% e 1%, e demonstrou o compromisso da unidade com os princípios da sustentabilidade. Ao reduzir significativamente o impacto ambiental associado à

geração de resíduos, o empreendimento promoveu uma cadeia produtiva mais consciente, eficiente e ambientalmente responsável.

Figura 43 - Otimização d'água durante a cura dos TCTC

Fonte: O autor

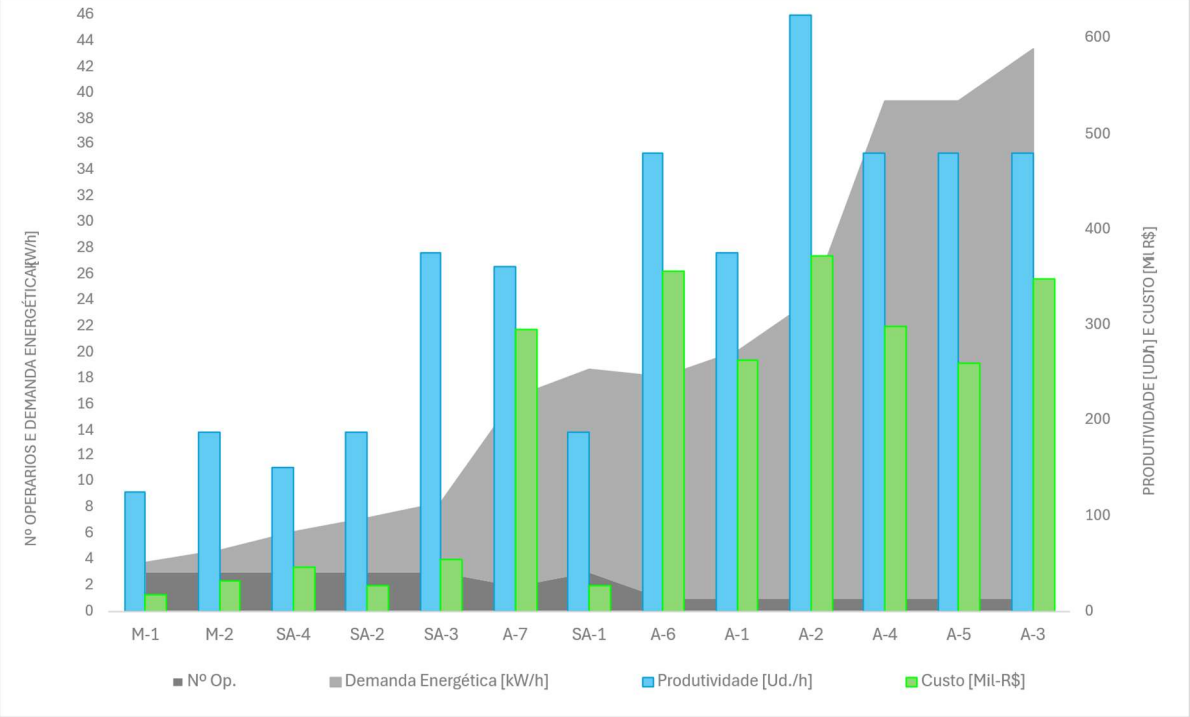
Figura 44 - Sistemática de reaproveitamento de resíduos

Fonte: O autor

6.5 RESULTADOS PARCIAIS

Nesta etapa, serão apresentados os resultados parciais obtidos a partir da análise dos dados referentes à energia elétrica incorporada na produção dos TCTC, considerando diferentes escalas e modelos produtivos. A Figura 45 evidenciou uma relação direta entre o grau de automação dos modelos de produção e a demanda energética, indicando que quanto mais sofisticado o sistema, maior sua dependência de energia elétrica e menor a exigência de mão de obra.

Figura 45 - Comportamento da demanda energética na produção de TCTC



Legenda: (**M**) Modelo manual; (**AS**) Modelo semiautomático; (**A**) Automático
Fonte: O autor

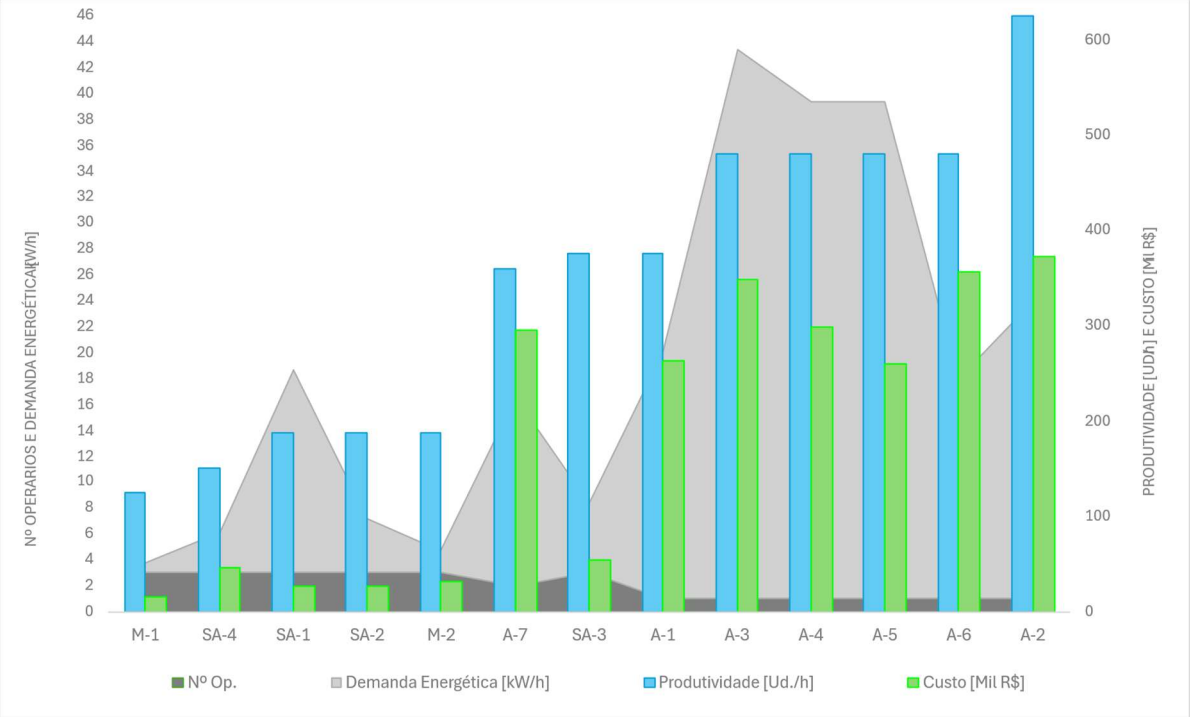
A partir da análise da produtividade, conforme os dados da Tabela 16 e representações da Figura 46, observou-se que determinados modelos semiautomáticos (SA-4, SA-1 e SA-2) apresentaram desempenho inferior ao modelo manual (M-2). Adicionalmente, verificou-se que a produtividade não esteve diretamente relacionada à demanda energética. O modelo automático A-2, por exemplo, demonstrou maior produtividade e eficiência energética em comparação aos demais modelos automáticos (A-1, A-3, A-4, A-5 e A-6), ainda que seu custo de aquisição tenha sido o mais elevado entre os analisados.

Tabela 16 - Produtividade e outras variáveis envolvidos na produção de TCTC

Modelo	Nº Op.	Demanda Energética [kW/h]	Produtividade [Ud./h]	Custo [Mil R$]
M-1	3	0,75	125,00	16,20
SA-4	3	3,05	150,00	46,06
SA-1	3	15,60	187,50	26,33
SA-2	3	4,15	187,50	26,33
M-2	3	1,69	187,50	32,00
A-7	2	14,48	360,00	294,50
SA-3	3	5,39	375,00	53,50
A-1	1	19,00	375,00	262,90
A-3	1	42,30	480,00	347,90
A-4	1	38,30	480,00	297,90
A-5	1	38,30	480,00	258,90
A-6	1	16,98	480,00	355,50
A-2	1	23,00	625,00	371,90

Legenda: (**M**) Modelo manual; (**AS**) Modelo semiautomático; (**A**) Automático
Fonte: O autor

Figura 46 - Produtividade dos modelos de produção de TCTC



Legenda: (**M**) Modelo manual; (**AS**) Modelo semiautomático; (**A**) Automático
Fonte: O autor

Na Tabela 17 detalha-se os custos das maquinárias envolvidas nos diferentes modelos de produção. Os modelos manuais apresentaram valores entre R$ 16.200,00 e R$ 32.000,00, enquanto os semiautomáticos variaram entre R$ 26.330,00 e R$

53.500,00. Já os modelos automáticos ultrapassaram R$ 250.000,00, evidenciando uma disparidade significativa nos investimentos necessários para sua implementação.

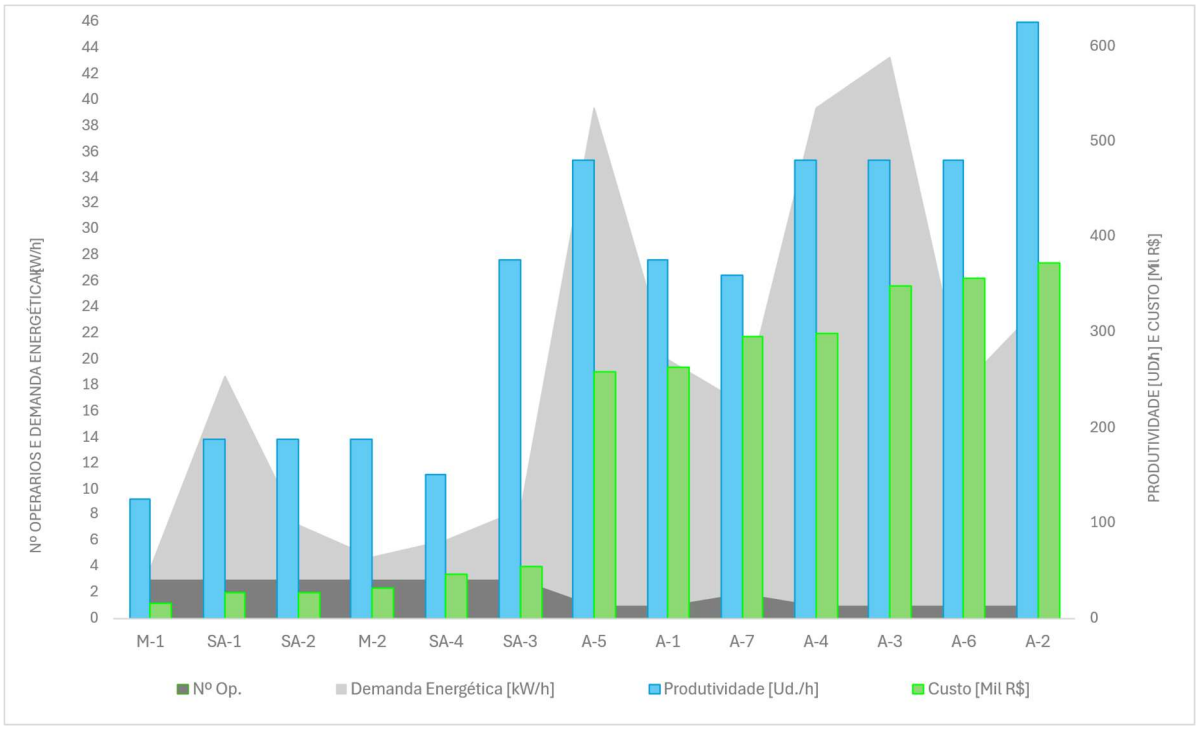
Tabela 17 - Custo das maquinárias segundo seu modelo de produção de TCTC

Modelo	Nº Op.	Demanda Energética [kW/h]	Produtividade [Ud./h]	Custo [Mil R$]
M-1	3	0,75	125,00	16,20
SA-1	3	15,60	187,50	26,33
SA-2	3	4,15	187,50	26,33
M-2	3	1,69	187,50	32,00
SA-4	3	3,05	150,00	46,06
SA-3	3	5,39	375,00	53,50
A-5	1	38,30	480,00	258,90
A-1	1	19,00	375,00	262,90
A-7	2	14,48	360,00	294,50
A-4	1	38,30	480,00	297,90
A-3	1	42,30	480,00	347,90
A-6	1	16,98	480,00	355,50
A-2	1	23,00	625,00	371,90

Legenda: (**M**) Modelo manual; (**AS**) Modelo semiautomático; (**A**) Automático
Fonte: O autor

A Figura 47 mostra-se que, embora a produtividade justifique o investimento em modelos mais avançados, o consumo energético não acompanha essa tendência em todos os casos. Modelos como **A-3**, **A-4 e A-5** registraram os maiores consumos de energia elétrica, o que comprometeu sua eficiência energética relativa.

Figura 47 - Custos das maquinárias segundo o modelo produção de TCTC



Legenda: (**M**) Modelo manual; (**AS**) Modelo semiautomático; (**A**) Automático
Fonte: O autor

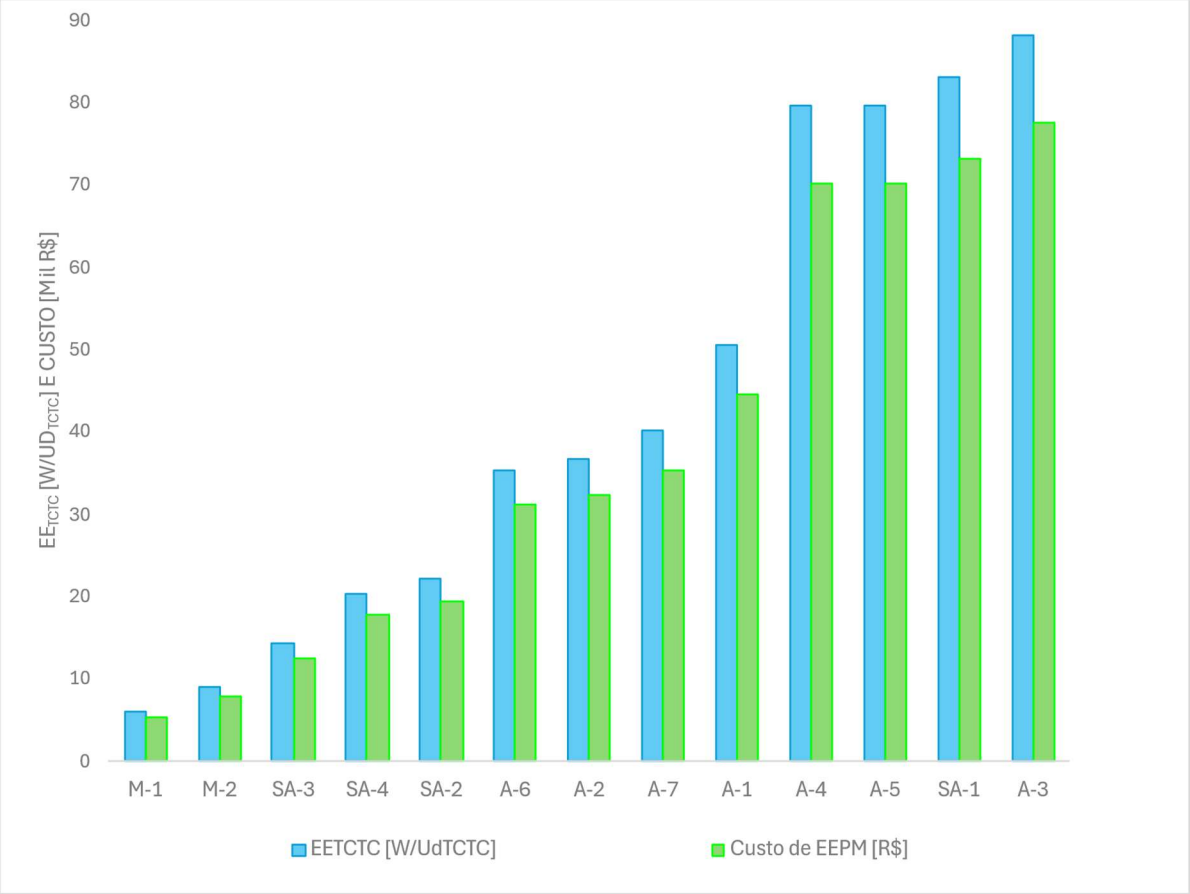
Na Tabela 18 se apresenta a mensuração da energia elétrica incorporada por unidade de TCTC, revelando variações entre 6 W (modelo M-1) e 88,13 W (modelo A-3). Esse incremento de até 15 vezes na energia elétrica incorporada refletiu a evolução dos processos produtivos, mas também implicou em custos energéticos que oscilaram entre R$ 5,28 e R$ 77,55 por milheiro de TCTC. Os modelos manuais mantiveram custos inferiores a R$ 10,00, atribuídos principalmente ao uso de equipamentos complementares como trituradores e peneiradoras elétricas. Adicionalmente, conforme a Figura 48, entre os modelos automáticos, o A-6 destacou-se por apresentar a menor demanda energética para produção de um milheiro de TCTC, com custo de R$ 31,13, demonstrando maior eficiência relativa dentro de sua categoria.

Tabela 18 - Energia elétrica incorporada na produção no TCTC

Modelo	Nº Op.	Demanda Energética [kW/h]	Produtividade [Ud./h]	EE_{TCTC} [W/Ud_{TCTC}]	Custo de EEPM [R$]
M-1	3	0,75	125,00	6,00	R$ 5,28
M-2	3	1,69	187,50	9,01	R$ 7,93
SA-3	3	5,39	375,00	14,37	R$ 12,65
SA-4	3	3,05	150,00	20,33	R$ 17,89
SA-2	3	4,15	187,50	22,13	R$ 19,48
A-6	**1**	**16,98**	**480,00**	**35,38**	**R$ 31,13**
A-2	1	23,00	625,00	36,80	R$ 32,38
A-7	2	14,48	360,00	40,22	R$ 35,40
A-1	1	19,00	375,00	50,67	R$ 44,59
A-4	1	38,30	480,00	79,79	R$ 70,22
A-5	1	38,30	480,00	79,79	R$ 70,22
SA-1	3	15,60	187,50	83,20	R$ 73,22
A-3	1	42,30	480,00	88,13	R$ 77,55

Legenda: (**M**) Modelo manual; (**AS**) Modelo semiautomático; (**A**) Automático
Fonte: O autor

Figura 48 - Energia elétrica incorporada na produção dos TCTC



Legenda: (**M**) Modelo manual; (**AS**) Modelo semiautomático; (**A**) Automático
Fonte: O autor

A partir da observação direta dos processos produtivos nas unidades ALROMA e RAACH, foram consolidados dados empíricos que complementam e validam os parâmetros técnicos previamente analisados nesta pesquisa. As visitas permitiram verificar *in loco* aspectos operacionais, tecnológicos e ambientais relacionados à produção dos TCTC, com destaque para a eficiência energética, o reaproveitamento de insumos e a racionalização dos recursos.

Na unidade ALROMA, especializada na fabricação de equipamentos, observou-se a operação de multiprocessadores integrados que realizam, em um único sistema, as etapas de trituração, peneiramento, mistura e dosagem. Esses equipamentos demonstraram elevada produtividade (até 480 unidades/hora) com apenas dois operadores, ocupando área física compacta (60 m²) e operando exclusivamente com energia solar. A adoção de robôs paletizadores e mesas rotatórias ergonômicas otimizou o fluxo de trabalho e reduziu o esforço físico, evidenciando o compromisso da empresa com a sustentabilidade e a inovação tecnológica.

Na unidade RAACH, dedicada à produção dos TCTC, foi observado um modelo semiautomatizado composto por peneiradora rotativa, multiprocessador de 200 litros, prensa automática com força de compressão de até 12 MPa e esteiras transportadoras. A produtividade registrada foi de 2.150 unidades por jornada de 8 horas, operada por dois técnicos experientes. O traço utilizado incorporou 5% de cimento CP V ARI e aditivo superplastificante TITAN-119, com consumo estimado de 50 litros de água por milheiro de TCTC, aproveitado integralmente por meio do método de cura por confinamento com filme plástico.

O consumo energético foi estimado com base nas faturas mensais da concessionária, totalizando cerca de R$ 400,00 por mês, o que equivale a R$ 9,31 por milheiro produzido. Esse valor revela um desempenho energético satisfatório, compatível com unidades de pequeno porte, mesmo com o uso de equipamentos típicos de empreendimentos de médio porte.

Os dados coletados confirmam que a eficiência produtiva dos TCTC está fortemente associada à integração tecnológica e à qualificação da mão de obra. A unidade ALROMA demonstrou que é possível alcançar alta produtividade com baixo impacto ambiental, especialmente pelo uso exclusivo de energia solar e pelo reaproveitamento de resíduos. Já a unidade RAACH evidenciou que modelos

semiautomatizados podem atingir desempenho técnico elevado com custos energéticos e operacionais reduzidos.

A análise também revelou uma contradição relevante: embora os TCTC sejam promovidos como alternativa ecológica, o uso do cimento CP V ARI com alta pegada de carbono compromete parte dos benefícios ambientais da técnica. Essa tensão entre desempenho técnico e sustentabilidade materializa um dos principais desafios na transição para práticas construtivas mais responsáveis.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação empreendeu uma análise comparativa multidimensional dos modelos de produção de TCTC, orientada pelo objetivo central de avaliar seu desempenho ambiental mediante a tríade energia incorporada, uso de cimento e grau de compressão. A investigação, ao concatenar Revisão Sistemática da Literatura (RSL), Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA) e observação empírica em campo, não apenas respondeu ao problema proposto como também revelou nuances e tensões inerentes à sustentabilidade alegada desta tecnologia.

7.1 ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS

O cumprimento dos objetivos específicos desdobrou um panorama complexo, onde eficiência, escala e impacto ambiental nem sempre convergem:

7.1.1 Quantificação Da Energia Elétrica Incorporada

Os dados compilados na Tabela 15 expõem uma disparidade energética gritante entre os modelos. Enquanto o modelo manual (M-1) opera com uma demanda ínfima de 0,75 kW/h, o modelo automático (A-3) consome 42,30 kW/h. No entanto, uma análise superficial que condene a automação pelo seu consumo absoluto é enganosa. A produtividade do modelo A-3 (480 TCTC/h) é quase quatro vezes superior à do M-1 (125 TCTC/h). Isto significa que, por unidade produzida, o sistema automatizado pode ser mais eficiente, otimizando o insumo energético. A visita à ALROMA, que opera com energia solar fotovoltaica, aponta um caminho crucial para a reconciliação entre automação e sustentabilidade: a descarbonização da fonte de energia. Como observado, "o uso exclusivo de energia solar como fonte elétrica em toda a operação fabril" mitiga significativamente o impacto da alta demanda energética, deslocando o foco da quantidade de energia para a sua origem e eficiência no uso.

7.1.2 Mensuração Do Uso De Cimento

O cimento confirmou seu papel de vilão ambiental e econômico na produção de TCTC. Conforme os cálculos de Jarfel & Sahara (2024c), ele responde por 39,82% do custo de produção por milheiro, e sua pegada de carbono é o principal passivo

ambiental do material, dado que a "indústria cimenteira responde por aproximadamente 8% das emissões globais de CO_2" (GLOBALABC, 2020). A RSL, sintetizada nas Tabelas 10 a 12, corrobora que teores entre 6% e 10% são suficientes para atender à norma ABNT NBR 8492 (≥2 MPa). Contudo, o dado mais revelador emerge da interação entre força de compressão e teor de cimento. Verificou-se que "forças de prensagem iguais ou superiores a 15 MPa" permitem alcançar resistências estruturais (acima de 10 MPa) com apenas 5% de cimento, enquanto "forças de compactação em torno de 10 MPa exigiram teores de cimento superiores a 10% para alcançar resistências equivalentes". Esta é uma descoberta fundamental: a aplicação de alta compressão é a alavanca mais eficaz para reduzir a dependência do cimento, mitigando tanto o custo financeiro quanto o ambiental. A visita à RAACH, que utiliza 5% de CP V ARI, ilustra essa possibilidade, mas também expõe uma contradição: o uso de um cimento de alto impacto (CP V ARI) em um produto denominado "ecológico" revela um déficit de coerência na cadeia produtiva, onde o desempenho técnico imediato sobrepõe-se à otimização ambiental holística.

7.1.3 Influência Da Força De Compressão

A análise das variáveis técnicas mecânicas (Capítulo 4) e da RSL (Capítulo 5) estabelece a compressão como a variável primordial para a qualidade do TCTC. A Figura 24 e os dados da Tabela 10 demonstram que, mesmo sem cimento, o aumento da força de compressão de 0,39 MPa para 3,16 MPa eleva a resistência mecânica de 0,50 MPa para 4,01 MPa. Isto ressalta que a compactação não é meramente um processo de conformação, mas sim o principal mecanismo de densificação e ganho de resistência. A Equação (1), desenvolvida para estimar o grau de compressão a partir da densidade seca, consolida esta relação direta. A crítica que emerge aqui é a supervalorização do cimento como único agente de resistência, muitas vezes em detrimento do investimento em equipamentos de prensagem mais eficientes. A preferência por prensas manuais ou semiautomáticas de baixa pressão, ainda que economicamente acessíveis, condena o produto a um desempenho medíocre ou a um consumo excessivo de cimento para compensar a compactação deficiente.

7.1.4 Eficiência Energética Dos Processos

A avaliação da eficiência deve considerar um quadro mais amplo que o

simples consumo elétrico. O modelo manual, embora de baixíssimo consumo energético, é intensivo em mão de obra e possui produtividade limitada, fatores que impactam sua viabilidade econômica e escalabilidade. Em contrapartida, os sistemas automatizados, como o observado na ALROMA, com "apenas um operador para supervisão geral do sistema" e produção de 5.760 TCTC/dia, otimizam o recurso humano e garantiam padronização. A eficiência energética real, portanto, é uma métrica multifatorial que pondera energia elétrica, produtividade, mão de obra e qualidade do produto. Neste aspecto, os sistemas semiautomáticos (ex.: SA-3) apresentam um ponto de equilíbrio interessante, com demanda energética moderada (5,39 kW/h) e produtividade significativa (375 TCTC/h), representando uma transição tecnológica viável para muitas realidades.

7.2 CONTRIBUIÇÕES E LIMITAÇÕES: UMA AVALIAÇÃO CRÍTICA

Esta pesquisa contribui para a literatura ao desmistificar a suposta neutralidade ambiental dos TCTC. Eles são, de fato, uma alternativa superior aos tijolos cerâmicos, com "reduções de até 77% nas emissões de CO_2 equivalente" (CALDAS; DIAS; FILHO, 2021). No entanto, seu desempenho ambiental não é inerente; é condicionado por escolhas técnicas específicas: o tipo de cimento, a intensidade da compressão e a fonte de energia.

A principal limitação deste estudo reside na impossibilidade de realizar medições diretas e contínuas de consumo energético e hídrico nas unidades produtivas visitadas. Os dados de energia foram obtidos a partir de especificações de fabricante (Tabelas 13 e 14), e não de medições *in loco* durante um ciclo produtivo completo. Da mesma forma, o consumo hídrico na RAACH foi uma estimativa ("aproximadamente 50 litros por milheiro"), não uma medição precisa. Ademais, a exclusão dos componentes terrosos do escopo do SIDAC (Sistema de Avaliação da Conformidade) persiste como uma barreira normativa que limita a certificação e a ampla aceitação dos TCTC no mercado formal, um paradoxo criticado por Schroeder (2012) e confirmado por esta investigação.

7.3 PERSPECTIVAS FUTURAS

Para consolidar os TCTC como uma tecnologia verdadeiramente sustentável, futuras pesquisas devem:

- Realizar Avaliações do Ciclo de Vida (ACV) completas, integrando os dados de energia incorporada, transporte de insumos e durabilidade.
- Investigar a fundo a substituição parcial do cimento por pozolanas locais e resíduos industriais, aprofundando os resultados de Röck et al. (2020) e Caldas et al. (2021).
- Desenvolver e propor normas técnicas específicas para a produção e avaliação ambiental de TCTC, suprindo a lacuna atual.
- Estudar a integração de fontes renováveis de energia em larga escala nas plantas produtivas, seguindo o exemplo pioneiro da ALROMA.

7.4 CONCLUSÃO REFLEXIVA

Em última análise, esta dissertação demonstra que a sustentabilidade dos TCTC não é um atributo fixo, mas um espectro de possibilidades definido por escolhas técnicas e gerenciais. A transição de uma produção artesanal e de baixo impacto para sistemas industriais com maior volume de produção não é isenta de *trade-offs*, mas é indispensável para atender à escala do desafio habitacional e ambiental contemporâneo. O futuro desta tecnologia promissora dependerá não apenas da inovação em prensagem e dosagem, mas da capacidade de harmonizar a eficiência produtiva com a responsabilidade ambiental em toda a cadeia de valor, desde a extração da terra até a cura do tijolo, transformando a "narrativa ecológica" em uma prática comprovada e mensurável.

8. REFERÊNCIAS

ABCP. *BT-111: Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais*. . São Paulo: [s.n.], 1 jun. 2000. Disponível em: <https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2016/01/BT-111.pdf>. Acesso em: 2 maio 2023.

ABCP. *ET-35: Dosagem das misturas de solo-cimento - Normas de dosagem e métodos de ensaios*. . São Paulo: [s.n.], 1 ago. 2004. Disponível em: <https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2016/01/ET-35_Solo_cimento_Normas_dosagem_metodos_ensaios.pdf>. Acesso em: 2 maio 2023.

ABCP. *Manual de Construção com Solo-cimento*. . São Paulo: [s.n.], 1984. . Acesso em: 2 maio 2023.

ABNT. *NBR 16868-1: Alvenaria estrutural - Parte 1: Projeto*. . Rio de Janeiro: [s.n.], 2020.

ABNT. *NBR ISO-14001: Sistemas de gestão ambiental - Requisitos com orientações para uso*. . [S.l: s.n.], 2015a. Disponível em: <www.abnt.org.br>.

ABNT. *NBR ISO-14031: Gestão Ambiental - Avaliação de desempenho ambiental - Diretrizes*. . [S.l: s.n.], 2015b.

ABNT. *NBR-8491: Tijolo de Solo Cimento - Requisitos*. . Rio de Janeiro: [s.n.], 10 dez. 2012.

ALROMA. *Multiprocessador 400L Alroma*. Disponível em: <https://www.alroma.com.br/maquina-detalhes/7/multiprocessador-400l>. Acesso em: 30 out. 2025a.

ALROMA. *Prensa Automática Alroma*. Disponível em: <https://www.alroma.com.br/maquina-detalhes/9/prensa-autom%C3%A1tica>. Acesso em: 30 out. 2025b.

ALVES DE AZEREDO, G. *et al.* Comportamento Estrutural de Alvenarias Construídas com Blocos de Terra Compactados (BTC). In: DE SOUZA KAZMIERCZAK, C.; MÁRCIO MINTO, F. (Org.). . *Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: Materiais e Sustentabilidade*. Porto Alegre: Editora Scienza, 2016. p. 271–294. Disponível em: <http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/978-85-5953-005-6.2016C009>.

BAHAR, R.; BENAZZOUG, M.; KENAI, S. Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cement and Concrete Composites*, v. 26, n. 7, p. 811–820, out. 2004. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez350.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0958946504000058>. Acesso em: 18 jun. 2025.

CALDAS, L. R.; DIAS, R.; FILHO, T. Avaliação ambiental do sistema construtivo de alvenaria de blocos de solo-cimento considerando diferentes especificações de projeto. *Gestão & Tecnologia de Projetos*, v. 16, n. 2, p. 149–172, 12 mar. 2021. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/161978>. Acesso em: 22 maio 2024.

CATTON, M. D. Early Soil-Cement Research and Development. *Journal of the Highway Division*, v. 85, n. 1, p. 1–16, 1 jan. 1959. Disponível em: </doi/pdf/10.1061/JHCEA2.0000078?download=true>. Acesso em: 2 set. 2025.

CID-FALCETO, J.; MAZARRÓN, F. R.; CAÑAS, I. Assessment of compressed earth blocks made in Spain: International durability tests. *Construction and Building Materials*, v. 37, p. 738–745, dez. 2012. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez350.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0950061812006022>. Acesso em: 19 jun. 2025.

DALLACORT, R. *et al.* Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, n. 3, p. 511–518, dez. 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/LYJGLZyQZfvGJHQGT63NMCS/?lang=pt>. Acesso em: 3 set. 2025.

DANSO, H. Influence of Compacting Rate on the Properties of Compressed Earth Blocks. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2016, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/308573768_Influence_of_Compacting_Rate_on_the_Properties_of_Compressed_Earth_Blocks>. Acesso em: 4 jul. 2025.

DAWSON, A. Alternative and recycled materials for earth construction. *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications*, p. 172–203, 1 jan. 2012. Acesso em: 29 jun. 2023.

DOS SANTOS, T.; FARIA, P.; SILVA, V. Caracterização de argamassa pré-doseada de terra. 2014. Disponível em: <https://www.embarro.com/wp-content/uploads/Characteriza%C3%83%C2%A7%C3%83%C2%A3o-EMBARRO-Universal-a-base-DIN-18947.pdf>. Acesso em: 3 set. 2025.

ECO MÁQUINAS. *Catálogo 2024*. . Santa Catarina: [s.n.], 15 jan. 2024a.

ECO MÁQUINAS. *Eco Mix Multiprocessador*. Disponível em: <https://ecomaquinas.com.br/maquina/eco-mix/>. Acesso em: 17 mar. 2024b.

ECO MÁQUINAS. *Máquina hidráulica automática de tijolo ecológico*. Disponível em: <https://ecomaquinas.com.br/maquina/eco-super-master/>. Acesso em: 17 mar. 2024c.

ECO MÁQUINAS. *Triturador ECO 7*. Disponível em: <https://ecomaquinas.com.br/maquina/triturador-eco-7/>. Acesso em: 17 mar. 2024d.

GATE. Compressed Earth Blocks. *Building Advisory Service and Information Network - BASIN*, v. 1, n. 1, p. 1–28, 1991.

GHG PROTOCOL. *Servicio de Revisión | Protocolo de GEI*. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/review-service>. Acesso em: 26 jul. 2025.

GLOBALABC. *2020 Global Status Report for Buildings and Construction*. . França: [s.n.], 16 dez. 2020. Disponível em: <https://globalabc.org/resources/publications/2020-global-status-report-buildings-and-construction>. Acesso em: 13 jun. 2024.

HEATHCOTE, K. Compressive strength of cement stabilized pressed earth blocks. *Building Research and Information*, v. 19, n. 2, p. 101–105, 1 mar. 1991. Disponível em: <https://www-tandfonline-com.ez350.periodicos.capes.gov.br/doi/abs/10.1080/09613219108727106>. Acesso em: 7 jul. 2025.

HEWLETT, P. C.; LISKA, M. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete | ScienceDirect*. 5. ed. Oxford: Elsevier, 2019. v. 1. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780081007730/leas-chemistry-of-cement-and-concrete#book-info>. Acesso em: 3 nov. 2025.

IEA. *Global Status Report for Buildings and Construction 2019 – Analysis*. . Paris: [s.n.], 1 dez. 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>. Acesso em: 13 jun. 2024.

ISLAM, M. S. *et al.* Effectiveness of fly ash and cement for compressed stabilized earth block construction. *Construction and Building Materials*, v. 255, 20 set. 2020. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez350.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0950061820313970>. Acesso em: 19 jun. 2025.

ISO. *ISO 14031: Gestión ambiental -Evaluación del desempeño ambiental - Directrices*. *ISO*. [S.l: s.n.], 2013. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14031:ed-2:v1:es>. Acesso em: 1 maio 2024.

JARFEL; SAHARA. *Máquina Hidráulica de Tijolo - Prensa HM para Tijolos Ecológicos*. Disponível em: <https://www.jarfel.com.br/prensa-para-tijolos-ecologicos/prensa-hm-tijolo-ecologico/>. Acesso em: 17 mar. 2024a.

JARFEL; SAHARA. *Prensa Profissional Manual*. Disponível em: <https://www.jarfel.com.br/prensa-para-tijolos-ecologicos/prensa-profissional-manual-para-tijolos-ecologicos/>. Acesso em: 14 mar. 2024b.

JARFEL; SAHARA. *Tijolos Ecológicos Solo Cimento*. Disponível em: <https://www.jarfel.com.br/informativos/tijolos-ecologicos-solo-cimento/>. Acesso em: 15 fev. 2024c.

JARFEL; SAHARA. *Triturador de solo JAG*. Disponível em: <https://www.jarfel.com.br/acessorios/triturador-de-solo-jag/>. Acesso em: 17 mar. 2024d.

LEKOBRASIL. *Tijolo Canaleta Ecológico*. Disponível em: <https://www.lekodesign.com/tijolocanaletaecol%C3%B3gico>. Acesso em: 15 fev. 2024.

LISIAS IPINGE, I. Durabilidad de bloques de tierra estabilizada comprimida. 2012. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/46374231/Durability_of_Compressed_Stabilised_Earth_Blocks.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2025.

MANSOUR, M. BEN *et al.* Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Construction and Building Materials*, v. 104, p. 44–51, 1 fev. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815306887>. Acesso em: 9 jul. 2025.

MARTINS, A. *et al.* Avaliação do ciclo de vida de compósitos solo-cimento-fibras de sisal considerando diferentes distâncias de transporte. *Congresso de arquitetura e construção com terra no Brasil*, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Lucas-Caldas-2/publication/329020684_AVALIACAO_DO_CICLO_DE_VIDA_DE_COMPOSITOS_SOLO-CIMENTO-FIBRAS_DE_SISAL_CONSIDERANDO_DIFERENTES_DISTANCIAS_DE_TRANSPORTE/links/5bf09e134585150b2bbdda4b/AVALIACAO-DO-CICLO-DE-VIDA-DE-COMPOSITOS-SOLO-CIMENTO-FIBRAS-DE-SISAL-CONSIDERANDO-DIFERENTES-DISTANCIAS-DE-TRANSPORTE.pdf>. Acesso em: 3 set. 2025.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006. v. 1. . Acesso em: 3 nov. 2025.

MELIÀ, P. *et al.* Environmental impacts of natural and conventional building materials: a case study on earth plasters. *Journal of Cleaner Production*, v. 80, p. 179–186, 1 out. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652614005514?via%3Dihub>. Acesso em: 3 set. 2025.

MELO, A. B. *et al.* Desempenho estrutural de protótipo de alvenaria construída com blocos de terra crua estabilizada. *Ambiente Construído*, v. 11, n. 2, p. 111–124, jun. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/ac/a/T8PTL9YmdjbdVdDZdfSnPKG/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 24 jul. 2021.

MOREL, J. C.; PKLA, A.; WALKER, P. Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, v. 21, n. 2, p. 303–309, fev. 2007. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez350.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0950061805002631>. Acesso em: 14 jun. 2025.

MOURA, E. M. DE *et al.* Characterization and use of sugarcane bagasse ash in soil-cement bricks. *Ambiente Construído*, v. 21, n. 1, p. 69–80, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100494>. Acesso em: 5 maio 2023.

ONU. *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | As Nações Unidas no Brasil*. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 30 out. 2025.

OTI, J. E.; KINUTHIA, J. M.; BAI, J. Engineering properties of unfired clay masonry bricks. *Engineering Geology*, v. 107, n. 3–4, p. 130–139, 14 ago. 2009. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez350.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0013795209001197>. Acesso em: 18 jun. 2025.

PINHEIRO, M. L. *et al.* Avaliação experimental de blocos prensados de solo-cimento com adição de grits. *Ambiente Construído*, v. 13, n. 2, p. 29–46, jun. 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/QnRxjLGC65S7kQL9Dfh773J/?lang=pt>. Acesso em: 3 set. 2025.

REDDI, L. N.; JAIN, A. K.; YUN, H. B. Soil materials for earth construction: properties, classification and suitability testing. *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications*, p. 155–171, 1 jan. 2012. Acesso em: 29 jun. 2023.

RIBAS SILVA, M. O Uso do Solo-Cimento na Construção. In: FALCÃO BAUER, L. A. (Org.). . *Materiais de Construção 2*. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2008. p. 704–728.

ROCHA SILVA, B. *et al.* Soil cement brick production process: literature review. *MOJ Civil Engineering*, v. 7, n. 1, p. 19–26, 16 ago. 2023. Acesso em: 3 nov. 2025.

RÖCK, M. *et al.* Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, v. 258, p. 114107, 15 jan. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919317945?via%3Dihub>. Acesso em: 3 set. 2025.

SCHROEDER, H. Modern earth building codes, standards and normative development. *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications*, p. 72–109, 1 jan. 2012. Acesso em: 26 jun. 2023.

SIDAC. *Sidac - Página inicial*. Disponível em: <https://sidac.org.br/>. Acesso em: 30 out. 2025.

SOTERO, Y. *et al.* TECNOLOGIA DOS MATERIAIS: A UTIZAÇÃO DO TIJOLO DE SOLO-CIMENTO NA CONSTRUÇÃO CIVIL. *Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - SERGIPE*, v. 3, n. 3, p. 11–11, 24 out. 2016. Disponível em: <https://periodicos.grupotiradentes.com/cadernoexatas/article/view/2882>. Acesso em: 20 fev. 2024.

SOUZA, M. I. B.; SEGANTINI, A. A. S.; PEREIRA, J. A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, n. 2, p. 205–212, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/Qx3zyWVxQJPst4DWZyY3WqD/?lang=pt>. Acesso em: 2 jul. 2023.

TAYLOR, H. F. W. *Cement chemistry*. 2. ed. Londres: Emerald Publishing Limited, 1997. v. 1. . Acesso em: 3 nov. 2025.

UCHIMURA, M. S. *Solo cimento*. *Dossiê Técnico*. Paraná: [s.n.], 20 nov. 2021. Disponível em: <http://respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/MzA1>. Acesso em: 2 maio 2023.

VENKATARAMA REDDY, B. V. Stabilised soil blocks for structural masonry in earth construction. *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications*, p. 324–363, 1 jan. 2012. Acesso em: 30 jun. 2023.

VENKATARAMA REDDY, B. V.; GUPTA, A. Influence of sand grading on the characteristics of mortars and soil–cement block masonry. *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 8, p. 1614–1623, 1 ago. 2008. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez350.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0950061807001766?via%3Dihub>. Acesso em: 4 jul. 2025.

VERDE EQUIPAMENTOS. *Esteira Transportadora*. Disponível em: <https://verdeequipamentos.com.br/produtos/esteira-transportadora/>. Acesso em: 17 mar. 2024a.

VERDE EQUIPAMENTOS. *Máquina de Tijolo Ecológico Hidráulica*. Disponível em: <https://verdeequipamentos.com.br/produtos/maquina-de-tijolo-ecologico-hidraulica/>. Acesso em: 17 mar. 2024b.

VERDE EQUIPAMENTOS. *Máquina de Tijolo Ecológico Manual*. Disponível em: <https://verdeequipamentos.com.br/produtos/maquina-de-tijolo-ecologico-manual/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw48-vBhBbEiwAzqrZVMeOm2oD21Gm4aeqsaiuYC7ey31eSVzRQttbDJc8iSh6_7rVA0rwhRoCB1kQAvD_BwE>. Acesso em: 14 mar. 2024.

VERDE EQUIPAMENTOS. *Prensa de Tijolo Ecológico Automática*. Disponível em: <https://verdeequipamentos.com.br/produtos/prensa-de-tijolo-ecologico-automatica/>. Acesso em: 17 mar. 2024c.

VERDE EQUIPAMENTOS. *Processador Multi Fácil*. Disponível em: <https://verdeequipamentos.com.br/produtos/processador-multi-facil/>. Acesso em: 17 mar. 2024d.

VERDE EQUIPAMENTOS. *Triturador de Terra*. Disponível em: <https://verdeequipamentos.com.br/produtos/triturador-de-terra-2/>. Acesso em: 17 mar. 2024e.

WALKER, P. J. Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks. *Cement and Concrete Composites*, v. 17, n. 4, p. 301–310, 1 jan. 1995. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez350.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/0958946595000199?via%3Dihub>. Acesso em: 9 jul. 2025.