



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas



Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Júlia Assumpção de Castro

**Investigação de Ladrilhos Hidráulicos sob a Perspectiva Ambiental:
Avaliação do Ciclo de Vida e Contaminação Ambiental**

Ouro Preto

2022

Júlia Assumpção de Castro

Investigação de Ladrilhos Hidráulicos sob a Perspectiva Ambiental: Avaliação do
Ciclo de Vida e Contaminação Ambiental

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Data da aprovação: 21/12/2022

Área de concentração: Materiais e Construção

Linha de Pesquisa: Engenharia Estrutural e de Materiais

Orientadora: Prof^a. D.Sc. Júlia Castro Mendes – UFOP

Coorientadora: Prof^a. D.Sc. Louise Aparecida Mendes – UFOP

Ouro Preto

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C355i Castro, Julia Assumpcao de.
Investigação de ladrilhos hidráulicos sob a perspectiva ambiental
[manuscrito]: avaliação do ciclo de vida e contaminação ambiental. / Julia
Assumpcao de Castro. - 2022.
103 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Júlia Castro Mendes.
Coorientadora: Profa. Dra. Louise Aparecida Mendes.
Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro
Preto. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil.
Área de Concentração: Estruturas e Construção.

1. Cerâmica - Ladrilho Hidráulico. 2. Impacto ambiental. 3. Créditos
de carbono - CO2 Embutido. 4. Impacto ambiental - Energia Incorporada.
5. Solos - Lixiviação. I. Mendes, Júlia Castro. II. Mendes, Louise Aparecida.
III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624.01

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



FOLHA DE APROVAÇÃO

Júlia Assumpção de Castro

Investigação de Ladrilhos Hidráulicos sob a Perspectiva Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida e Contaminação Ambiental

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em 21 de Dezembro de 2022

Membros da banca

Profa. Dra. Júlia Castro Mendes - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Profa. Dra. Louise Aparecida Mendes - Coorientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Profa. Dra. Wanna Carvalho Fontes - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Pedro Kopschitz Xavier Bastos - Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Lucas Rosse Caldas - Universidade Federal do Rio de Janeiro

Júlia Castro Mendes, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 16/01/2023



Documento assinado eletronicamente por **Julia Castro Mendes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/01/2023, às 10:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0458875** e o código CRC **91D6989E**.

Agradecimentos

Não poderia começar agradecendo a outras pessoas senão a elas, Vó Maria e Vó Joana. Agradeço por ter tido a oportunidade de aprender tanto com tão poucas palavras. Com vocês entendi o verdadeiro significado de persistência, aprendi que a força vem de dentro de nós, mas que o apoio de pessoas especiais faz total diferença.

Falando em pessoas especiais, meus pais, José Antônio e Mariângela, e meu irmão, Fernando, foram a base de tudo. Com eles tive todo o suporte que precisava, emocional e financeiro. Vocês tornaram esse sonho real. Minha família, de Juiz de Fora e de Belo Horizonte, também foi muito importante nesse processo, ver a preocupação de vocês sobre o meu progresso me tornava cada dia mais forte.

Aos meus amigos, agradeço por não me deixarem desistir, me fazendo acreditar que eu era capaz. Hoje, defender a dissertação me mostra que vocês estavam certos, mas saibam que eu não teria conseguido sem o apoio de vocês. Gostaria de agradecer à Laura, em especial, por ter me dado força, aumentado a minha confiança e me feito ver as coisas sob outro ponto de vista.

Como toda pesquisa é feita “sobre os ombros de gigantes”, não poderia faltar o agradecimento a todos os professores que passaram pelo meu caminho. Vocês me deram toda a base, o conhecimento e o suporte técnico que eu precisava. Agradeço, em especial, à minha orientadora, Júlia Mendes, e à minha coorientadora, Louise Mendes. Vocês são exemplos de profissionais e impulsionam todos os seus orientandos a se tornarem verdadeiros pesquisadores.

Um agradecimento especial ao professor Aníbal Santiago, pelo apoio com as análises das águas do tanque de cura e aos laboratórios LEQMA (Laboratório de Estudos em Química Analítica com Aplicações em Materiais, Amostras Ambientais e Alimentos) e LEAQUAA (Laboratório de Espectrometria Atômica e Química Analítica Ambiental) pelas análises químicas realizadas.

Por fim, agradeço aos funcionários e às fábricas de ladrilhos hidráulicos que disponibilizaram seu tempo e seu espaço para nosso estudo. Parte deste trabalho só foi possível devido às informações coletadas nas empresas visitadas.

Resumo

Os ladrilhos hidráulicos são um tipo de revestimento cimentício fabricado de forma artesanal, sem processo de queima. Devido a esses aspectos, eles são comumente comercializados como “materiais sustentáveis”. Entretanto sua produção leva quantidades significativas de cimento, um dos materiais de maior impacto ambiental dentro da construção civil. Apesar dos ladrilhos serem historicamente muito utilizados no Brasil, poucos são os estudos publicados sobre esse material. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é investigar os ladrilhos hidráulicos sob a perspectiva ambiental, contribuindo para a presença de dados primários e de ciclo de vida dos ladrilhos. Para realizar essa investigação, foram analisados (I) o CO₂ embutido, (II) a energia incorporada e (III) a presença de componentes potencialmente tóxicos. O CO₂ embutido e a energia incorporada foram investigados a partir da avaliação do ciclo de vida, na abordagem “do berço ao portão”. A presença de componentes potencialmente tóxicos foi investigada por meio de ensaio de lixiviação (NBR 10004 e 10005) nos próprios ladrilhos hidráulicos e na água do tanque de cura. Os resultados mostram que a média do CO₂ embutido dos ladrilhos hidráulicos é de 8,3258 kgCO₂/m² e 0,2504 kgCO₂/kg. Em comparação com revestimentos cerâmicos, o resultado é 49% maior, embora saiba-se empiricamente que ladrilhos hidráulicos tendem a ter uma longevidade significativamente superior. A energia incorporada encontrada é, em média, de 59,7547 MJ/m² e 1,8011 MJ/kg. Para comparação com outros revestimentos seria necessário analisar a matriz energética dos materiais e padronizar a abordagem. A investigação dos componentes potencialmente tóxicos concluiu que os ladrilhos hidráulicos estudados e as águas dos tanques de cura coletadas não foram classificados como tóxicos. Sendo assim, os indicadores analisados permitem concluir que os ladrilhos hidráulicos apresentam um impacto ambiental similar a outros revestimentos comumente utilizados nas construções brasileiras. Entretanto, deve-se destacar que os ladrilhos possuem, adicionalmente, um forte apelo estético, cultural e histórico.

Palavras-chaves: Ladrilho Hidráulico, Impacto Ambiental, CO₂ embutido, Energia Incorporada, Lixiviação.

Abstract

Cement tiles are a type of cementitious coating manufactured in an artisanal way, without a firing process. Due to these aspects, they are marketed as sustainable materials. However, their production takes significant amounts of cement, one of the materials with the greatest environmental impact within civil construction. Although cement tiles are historically widely used in Brazil, few studies about this material have been published. In this context, the objective of the present work is to investigate the cement tiles from an environmental perspective, contributing to the presence of primary data and the life cycle of the cement tiles. To carry out this investigation, we analyzed (I) the embodied CO₂, (II) the embodied energy and (III) the presence of potentially toxic components. Embodied CO₂ and embodied energy were investigated from the life cycle analysis, in the “cradle to gate” approach. The presence of potentially toxic components was investigated from a leaching test (NBR 10004 and 10005), in the cement tiles and in the water in the curing tank. The results show that the average embodied CO₂ of cement tiles is 8.3258 kgCO₂/m² and 0.2504 kgCO₂/kg. Compared to ceramic tiles, the result is 49% higher, although it is empirically known that cement tiles tend to have a significantly higher longevity. The embodied energy found is, on average, 59.7547 MJ/m² and 1.8011 MJ/kg. For comparison with other coatings, it would be necessary to analyze the energy matrix of the materials and standardize the approach. The investigation of the potentially toxic components concluded that the hydraulic tiles studied and the waters from the curing tanks collected were not classified as toxic. Therefore, the indicators analyzed allow us to conclude that cement tiles have an environmental impact similar to other coverings commonly used in Brazilian constructions. However, it should be noted that the tiles also have a strong aesthetic, cultural and historical appeal.

Keywords: Cement Tiles, Environmental Impact, Embodied CO₂, Embodied Energy, Leaching.

Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplo de revestimento de parede com diversos modelos de ladrilhos hidráulicos decorados	14
Figura 2 - Revestimento de piso feito em ladrilho hidráulico.....	16
Figura 3 - Revestimento de piso feito em ladrilho hidráulico decorado.....	16
Figura 4 - Ladrilhos decorados nos formatos pentagonal, hexagonal e octogonal, presentes em catálogo de fabricante	19
Figura 5 - Pantaleone Arcuri & Spinelli - Fábrica de ladrilhos e mosaicos.....	21
Figura 6 - Catálogo de vendas da empresa Pantaleone Arcuri.	21
Figura 7 - Ladrilho podotátil presente em catálogo de fabricante	22
Figura 8 - Desenho esquemático das camadas dos ladrilhos hidráulicos.....	23
Figura 9 - Corte em ladrilho hidráulico para visualização das camadas	23
Figura 10 - Passo a passo para a fabricação de ladrilhos hidráulicos	24
Figura 11 - Etapa 1 – Aplicar o desmoldante	25
Figura 12 – Etapa 2 - Inserir o molde: a) encaixe do esquadro de ferro; b) encaixe do molde do desenho.....	25
Figura 13 – Etapa 3 - Adicionar o pigmento: a) recipientes com os pigmentos; b) ladrilheiro adicionando o pigmento no molde.	26
Figura 14 – Etapa 4 - Retirar o molde: a) molde sendo limpo em tanque de água; b) resultado dos pigmentos ao retirar o molde	26
Figura 15 - a) Etapa 5 - Adicionar o secante; b) Etapa 6 – Nivelar.....	27
Figura 16 – a) Etapa 7 – Adicionar a misca; b) Etapa 8 – Nivelar.....	27
Figura 17 - Etapa 9 – Cobrir com tampão.....	28
Figura 18 - Etapa 10 – Levar à prensa: a) fôrma posicionada na prensa; b) ladrilheiros utilizando prensa manual.	29

Figura 19 – Etapa 11 – Remover da forma: a) retirada do esquadro de ferro; b) limpeza do esquadro; c) retirada do tampão de ferro	29
Figura 20 – Etapa 11 – Remover da forma: a) ladrilho na base, sem o esquadro e sem o tampão; b) retirada da base; c) ladrilho assim que retirado da base	30
Figura 21 - a) Etapa 12 – Secar ao ar; b) Etapa 13 – Imergir em água	31
Figura 22- a) Etapa 14 – Secar ao ar; b) Etapa 15 – Embalagem e transporte. .	32
Figura 23 – Desenho esquemático das abordagens “berço ao portão”, “berço ao local” e “berço ao túmulo”	37
Figura 24 – Desenho esquemático da abordagem “berço ao berço”.	38
Figura 25 - Emissões de gases do efeito estufa em processos industriais brasileiros em 2016	40
Figura 26 - Fluxograma da metodologia utilizada.	46
Figura 27 - Ladrilho hidráulico em corte: a) Fábrica A; b) Fábrica B; c) Fábrica C.	50
Figura 31 - Amostra da camada decorativa: a) antes da maceração; b) após a maceração e antes do peneiramento; c) após o peneiramento.....	63
Figura 32 - Fluxograma da determinação da solução de extração	64
Figura 33 – a) Balança analítica Shimadzu modelo ATX224; b) Equipamento Elmasonic E30H Elma.....	65
Figura 34 – Fluxograma do ensaio de lixiviação	65
Figura 35 - Agitador rotativo para não voláteis utilizado no ensaio de lixiviação.	66
Figura 36 - Sistema de filtragem da amostra.	66
Figura 37 - Espectrômetro de massas com plasma indutivamente acoplado	67
Figura 38 - Emissão de CO ₂ por material na etapa de materiais utilizados na fabricação dos ladrilhos hidráulicos.....	69
Figura 39 - Emissão de CO ₂ por material na etapa de transporte	71
Figura 40 – Emissão de CO ₂ por modal de transporte	72

Figura 41 - Emissão de CO ₂ por item utilizado no processo produtivo	73
Figura 42 - CO ₂ embutido dos ladrilhos hidráulicos	74
Figura 43 – Energia incorporada por material na etapa de materiais utilizados na fabricação dos ladrilhos hidráulicos.....	79
Figura 44 - Energia incorporada por material na etapa de transporte.....	81
Figura 45 - Energia incorporada por modal de transporte.	82
Figura 46 - Energia incorporada por item utilizado no processo produtivo	83
Figura 47 - Energia incorporada dos ladrilhos hidráulicos.	85

Lista de Quadros

Quadro 1 - Requisitos dos ladrilhos hidráulicos.....	18
Quadro 2 - Metodologias utilizadas para determinação da quantidade de material.	47
Quadro 3 - Identificação das amostras.	63

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Custos de revestimentos de piso	33
Tabela 2 - Consumo energético por setor no Brasil em 2020	42
Tabela 3 - Materiais e traços utilizados na fabricação dos ladrilhos hidráulicos ..	48
Tabela 4 - Espessuras e massas das amostras de ladrilhos hidráulicos coletadas.	49
Tabela 5 - Exemplo de cálculo de volume de argamassa.....	51
Tabela 6 - Massa unitária e massa específica real dos materiais.....	52
Tabela 7 - Quantidade de material utilizado por metro quadrado de ladrilho.....	54
Tabela 8 - Fatores de emissão por material utilizado na produção de ladrilho ...	55
Tabela 9 - Distância entre as fábricas dos materiais e as fábricas de ladrilhos ..	57
Tabela 10 - Potência e tempo de funcionamento dos itens elétricos utilizados nas Fábricas A e B.....	58
Tabela 11 - Fatores médios anuais de emissão de CO ₂ para energia elétrica brasileira.....	59
Tabela 12 - Índices de energia embutida por material utilizado na produção de ladrilho.....	60
Tabela 13 – CO ₂ embutido/kg de ladrilho hidráulico	76
Tabela 14 - Energia incorporada dos ladrilhos hidráulicos (MJ/kg).....	86
Tabela 15 - Energia incorporada de revestimentos	86
Tabela 16 - Concentrações dos componentes potencialmente tóxicos nas amostras de ladrilho	88
Tabela 17 - Concentrações dos componentes potencialmente tóxicos nas amostras de água do tanque de cura.....	89

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Objetivo	15
1.2	Objetivos Específicos	15
2	Revisão Bibliográfica.....	16
2.1	Ladrilhos Hidráulicos	16
2.1.1	Definições e Requisitos.....	17
2.1.2	Histórico	19
2.1.3	Processo Produtivo	22
2.1.4	Vantagens e Limitações	32
2.1.5	Estado da Arte	34
2.2	Aspectos Ambientais da Construção Civil	36
2.2.1	Emissão de Gases do Efeito Estufa.....	39
2.2.2	Consumo de Energia	41
2.2.3	Componentes Potencialmente Tóxicos.....	43
3	Metodologia.....	45
3.1	Emissão de CO ₂	46
3.1.1	Materiais utilizados na fabricação	46
3.1.2	Transporte.....	55
3.1.3	Processo produtivo	57
3.2	Consumo de energia	59
3.2.1	Materiais utilizados na fabricação	59
3.2.2	Transporte.....	61

3.2.3	Processo Produtivo	61
3.3	Componentes potencialmente tóxicos	62
3.3.1	Análise dos ladrilhos hidráulicos	62
3.3.2	Análise da água do tanque de cura.....	67
4	Resultados	68
4.1	Emissão de CO ₂	68
4.1.1	Materiais utilizados na fabricação	68
4.1.2	Transporte.....	70
4.1.3	Processo produtivo	72
4.1.4	CO ₂ embutido total.....	74
4.2	Consumo de energia	78
4.2.1	Materiais utilizados na fabricação	78
4.2.2	Transporte.....	79
4.2.3	Processo produtivo	82
4.2.4	Energia incorporada total	83
4.3	Presença de componentes potencialmente tóxicos.....	87
4.3.1	Análise dos ladrilhos hidráulicos	87
4.3.2	Análise da água do tanque de cura.....	88
5	Conclusão	91
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	92
	Referências.....	93
	Apêndice A – Ensaio de massa unitária.....	100
	Apêndice B – Ensaio de massa específica real	101

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um setor que causa grandes impactos ambientais, muitos deles relacionados com a cadeia produtiva dos materiais utilizados. Estima-se que 24% dos materiais extraídos no planeta sejam consumidos na construção civil e que 36% do uso global de energia ocorram nesse setor (ABERGEL, et al., 2018; BRIBIÁN, et al., 2011).

Para mensurar os impactos ambientais dos materiais de construção, é possível usar alguns indicadores que devem ser analisados nas diversas etapas do ciclo de vida dos materiais. O ciclo de vida é definido como “estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final” (ABNT, 2014). Englobando, portanto, extração, produção, transporte, uso, manutenção, descarte, dentre outras etapas. Alguns dos indicadores ambientais empregados para materiais de construção são: CO₂ embutido, energia incorporada e a presença de componentes potencialmente tóxicos (SAADDE, et al., 2014).

O CO₂ embutido e a energia incorporada significam, respectivamente, a emissão de dióxido de carbono, CO₂, e o uso de energia no ciclo de vida do componente construtivo (ROCK, et al., 2020). Já a análise de componentes potencialmente tóxicos analisa a presença de espécies químicas ou misturas capazes de causar efeitos adversos ao organismo (ABNT, 2004a), como metais e metaloides.

Dentre os diversos materiais usados como revestimento em edificações, os ladrilhos hidráulicos merecem destaque (Figura 1). Eles são um revestimento cimentício em placas para paredes e pisos, compostos basicamente por pigmentos, agregados, água, aditivos e cimento Portland (SAVAZZINI-REIS & FAGUNDES, 2020). Esses materiais são inseridos em um molde, levados a uma prensa manual e depois curados em água, originando os ladrilhos hidráulicos. Dessa forma, os ladrilhos são produtos artesanais e que não são submetidos à queima, diferentemente dos revestimentos cerâmicos convencionais.



Figura 1 – Exemplo de revestimento de parede com diversos modelos de ladrilhos hidráulicos decorados (Fonte: autora)

Por esses motivos, os ladrilhos hidráulicos são comumente vendidos como materiais ambientalmente sustentáveis. Entretanto, sua produção leva quantidades significativas de cimento, um dos produtos de maior impacto ambiental da construção civil. Em 2016, a produção de cimento foi responsável por 22,7% das emissões de CO₂ dos processos industriais brasileiros (BRASIL, 2022a). Estima-se que 7% de toda a emissão global de CO₂ seja referente à indústria do cimento (CSI, 2019).

Embora seja um material muito utilizado historicamente no país, existem poucas pesquisas disponíveis na literatura relacionadas aos aspectos técnicos dos ladrilhos hidráulicos. A maioria dos trabalhos publicados foca nos aspectos históricos, de restauro e design dos ladrilhos (DOMINGUEZ, 2016; LAMAS, et al., 2018; MACIEL, et al., 2020). Trabalhos recentes vêm analisando a incorporação de resíduos na fabricação desse material. Fontes *et al.* (2021) utilizaram rejeito de minério de ferro, Ferreira *et al.* (2018) aproveitaram resíduos finos de rochas ornamentais e Savazzini-Reis e Fagundes (2020) incorporaram resíduos de madeira. Todos os estudos concluíram ser tecnicamente viável a utilização dos resíduos na produção dos ladrilhos.

No estudo de Zveibil *et al.* (2019) foi avaliada a influência do tipo e do teor de pigmento no estado endurecido dos ladrilhos hidráulicos. Os autores concluíram que não houve um padrão de comportamento e que propriedades como resistência à abrasão/flexão, módulo elástico e permeabilidade foram alteradas de formas distintas.

Com base no levantamento de literatura realizado para o presente trabalho, não foi encontrado nenhum estudo que investigue a produção dos ladrilhos hidráulicos sob a perspectiva ambiental. Estudos levantando indicadores como CO₂ embutido, energia incorporada e presença de componentes potencialmente tóxicos dos ladrilhos também não foram encontrados na literatura. Dessa forma, o presente trabalho é inédito ao realizar essas análises e contribui para a presença de dados primários e de ciclo de vida sobre os ladrilhos hidráulicos. Assim, buscamos servir de base para pesquisadores e projetistas, amadurecendo o quesito ambiental da construção civil.

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é investigar a produção dos ladrilhos hidráulicos decorados sob a perspectiva ambiental. Isso será feito por meio dos indicadores de CO₂ embutido, energia incorporada e presença de componentes potencialmente tóxicos.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Compreender o processo de fabricação dos ladrilhos hidráulicos no Brasil.
- Analisar as etapas do ciclo de vida dos ladrilhos hidráulicos;
- Analisar as quantidades de CO₂ embutido, de energia incorporada e a presença de componentes potencialmente tóxicos dos ladrilhos hidráulicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ladrilhos Hidráulicos

Os revestimentos de paredes e pisos são etapas importantes da construção de edifícios. Suas principais funções são: (I) proteger as alvenarias e estruturas contra intempéries e agentes agressivos, (II) auxiliar as vedações no cumprimento de funções como isolamento térmico, isolamento acústico e segurança contra incêndios e (III) contribuir na estética da construção, através de um acabamento decorativo (SABBATINI, 1990). Dentre os principais tipos de revestimentos, podemos citar: pinturas, placas cerâmicas (como porcelanatos e pastilhas cerâmicas), papéis de parede, pedras naturais (como mármore e granito), madeiras e ladrilhos hidráulicos. O presente trabalho investiga os ladrilhos hidráulicos sob a perspectiva ambiental. A Figura 2 apresenta os ladrilhos comumente utilizados em calçadas e a Figura 3 apresenta os ladrilhos hidráulicos decorados, que são o objeto do presente estudo.



Figura 2 - Revestimento de piso feito em ladrilho hidráulico. Fonte: (DECORAR, 2022)



Figura 3 - Revestimento de piso feito em ladrilho hidráulico decorado. (Fonte: autora)

2.1.1 Definições e Requisitos

A Associação Brasileira de Cimento Portland (2010) define os ladrilhos hidráulicos como “placa de concreto de alta resistência ao desgaste para acabamentos de paredes, pisos internos e externos, contendo uma superfície com textura lisa ou em relevo, colorida ou não, de formato quadrado, retangular ou outra forma geométrica definida”. Já a NBR 9457 - “Ladrilhos hidráulicos para pavimentação - especificação e métodos de ensaio” - define o revestimento como “placa cimentícia paralelepípedica de dupla camada, executada por prensagem, com a superfície exposta ao tráfego lisa ou em baixo-relevo” (ABNT, 2013). Essa mesma norma apresenta alguns requisitos para os ladrilhos, descritos no Quadro 1 a seguir.

Cabe ressaltar que NBR 9457 foi revalidada em 2013, substituindo a antiga versão de 1986. A nova versão apresentou atualizações nas especificações dos materiais e nas características técnicas dos ladrilhos, tornando os requisitos mais flexíveis. Entretanto, alguns fabricantes de ladrilhos hidráulicos afirmam que a norma necessita de novas atualizações, como a diminuição da espessura nominal mínima (VENCESLAU, 2022).

Quadro 1 - Requisitos dos ladrilhos hidráulicos. Adaptado de ABNT (2013)

Materiais	<ul style="list-style-type: none">• A argamassa das peças deve ser constituída de cimento Portland, agregados e água, podendo utilizar aditivos e pigmentos, desde que todos os materiais atendam às normas pertinentes;• O cimento Portland utilizado pode ser de qualquer tipo e classe;• Os agregados utilizados podem ser naturais, industriais ou reciclados;• Os pigmentos devem ser de base inorgânica.
Unidade de compra	Metro quadrado (m ²), devendo ser especificado o número de peças por metro quadrado
Dimensões e tolerâncias	Os ladrilhos podem ser produzidos em diversas dimensões, desde que seja respeitado o paralelismo entre as superfícies opostas e atenda aos seguintes critérios: <ul style="list-style-type: none">• Comprimento nominal máximo de 400 mm, com tolerância indicada em norma;• Largura nominal mínima de 100 mm, com tolerância indicada em norma;• Espessura nominal mínima de 18 mm, com tolerância indicada em norma;
Resistência mecânica	As placas cimentícias assentadas sobre camada de apoio devem ter resistência característica à flexão maior ou igual a 3,5 MPa

Os ladrilhos são comercializados, em sua maioria, no formato quadrado 200 x 200 (mm) (ABCP, 2010), mas também existem peças nos formatos pentagonal, hexagonal e octogonal, como mostra a Figura 4. Dessa forma, pode-se afirmar que os ladrilhos hidráulicos são placas cimentícias prismáticas utilizadas para revestimento, decorativo ou não, de pisos e paredes.



Figura 4 - Ladrilhos decorados nos formatos pentagonal, hexagonal e octogonal, presentes em catálogo de fabricante. Adaptado de Mosaicos Amazonas (2022)

2.1.2 Histórico

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (2010), a origem dos ladrilhos hidráulicos remonta aos antigos mosaicos bizantinos. Os estudos de Wamzer (2011) apontam que esse artefato foi criado inicialmente “aproveitando os pequenos pedaços de pedras coloridas, resultantes das ruínas dos mosaicos”.

Ao mesmo tempo, o trabalho de Lamas, Longo e Souza (2018), apresenta a confecção do ladrilho encáustico, ou telha encáustica, como a origem técnica dos ladrilhos hidráulicos. A produção da telha encáustica era uma “atividade artesanal de pequena escala, em que o ladrilho era elaborado a partir do recorte de uma porção de um bloco de argila plástica, em formato de placa, modelado em uma fôrma de madeira” (LAMAS, et al., 2018). Nessas peças, as cores do desenho da superfície eram desenvolvidas a partir de tipos de argilas diferentes (LAMAS, et al., 2018).

Em 1824, com a patente do cimento Portland pelo construtor inglês Joseph Aspdin (HELENE & ANDRADE, 2010), o ladrilho hidráulico atual começou a ganhar forma (DOMINGUEZ & SANTOS, 2014). Em 1867, na Exposição Universal de Paris, os ladrilhos foram apresentados como “uma cerâmica que não necessitava de cozimento” (DOMINGUEZ & SANTOS, 2014). Apesar de ter passado pela Revolução Industrial, sua forma de produção não foi alterada, mantendo-se, predominantemente, como um processo artesanal (CAMPOS, 2011).

No final do século XIX e início do século XX, os ladrilhos hidráulicos passaram a ser empregados em larga escala e ganharam destaque com os movimentos artísticos

Art Nouveau e Art Déco (DOMINGUEZ & SANTOS, 2014; WAMZER, 2011). Esse artefato foi utilizado por importantes arquitetos da época, como Antoni Gaudi, Josep Cadafalch e William Morris (DOMINGUEZ & SANTOS, 2014).

No Brasil, os ladrilhos eram inicialmente importados de Portugal, França e Bélgica (WAMZER, 2011; LAMAS, et al., 2018). As primeiras fábricas brasileiras surgiram somente no final do século XIX, quando as técnicas necessárias para produção foram trazidas por imigrantes italianos da cidade de São Paulo (WAMZER, 2011; LAMAS, et al., 2018).

Esses ladrilhos chegaram ao Brasil em um período de expansão imobiliária e passaram a substituir o piso cimentado “vermelhão” (CATOIA, 2007). Segundo o autor, eles foram inicialmente utilizados em áreas “frias” das moradias, tanto nas famílias mais ricas quanto nas mais modestas. O que mudava era a complexidade e número de cores das estampas dos ladrilhos (CATOIA, 2007; DOMINGUEZ & SANTOS, 2014).

Os ladrilhos hidráulicos também foram utilizados em grandes obras. Na cidade do Rio de Janeiro, pode-se citar como exemplo o Museu da República, o Teatro Municipal e o Museu Nacional de Belas Artes (DOMINGUEZ, 2016). Na cidade de São Paulo, tem-se o Museu do Ipiranga, a Igreja Nossa Senhora do Brasil e o Mosteiro de São Bento (CATOIA, 2007). Em Belo Horizonte, alguns exemplos são o Museu das Minas e do Metal, o Cine Teatro Brasil e o Palácio da Liberdade (CAMPOS, 2011).

Vale destacar fábricas famosas da época, como a Pantaleone Arcuri & Spinelli (Figura 5). Essa fábrica foi fundada por uma família de imigrantes italianos em 1895 em Juiz de Fora - Minas Gerais, onde permaneceu até vir a fechar em 1978 (DOMINGUEZ, 2016; UFJF, 2021). A Figura 6 mostra um catálogo de vendas da empresa. Outra fábrica importante é a Fábrica de Mosaicos, fundada por um imigrante português em 1914 em Pelotas - Rio Grande do Sul, onde permanece até os dias atuais (DOMINGUEZ, 2016).



Figura 5 - Pantaleone Arcuri & Spinelli - Fábrica de ladrilhos e mosaicos. Fonte: (LEMOS, 2012)

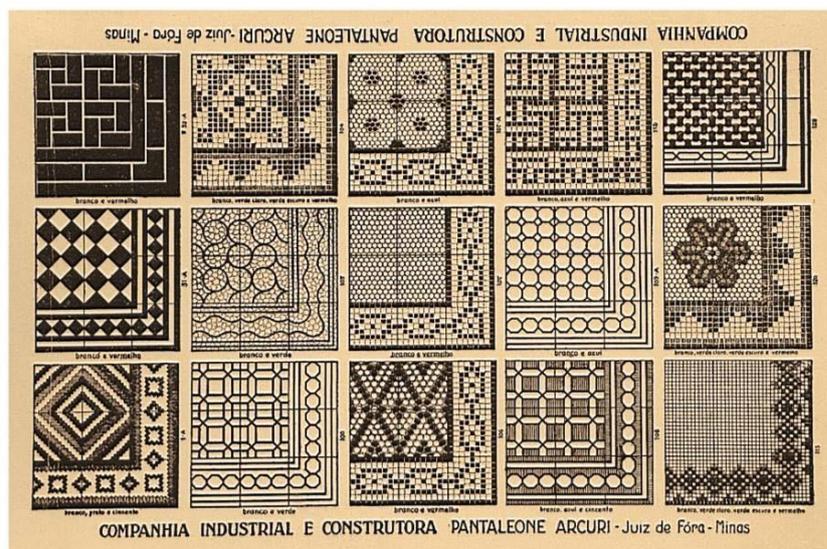


Figura 6 - Catálogo de vendas da empresa Pantaleone Arcuri. Fonte: (FUNALFA, 2014)

Os ladrilhos hidráulicos brasileiros tiveram o seu auge entre 1930 e 1940 (WAMZER, 2011), mas acabaram perdendo mercado com o crescimento das cerâmicas industrializadas em 1960 (CATOIA, 2007). O menor custo e a velocidade de produção das novas indústrias são possíveis causas desse acontecimento. Nessa época, diversos marcos arquitetônicos tiveram boa parte dos seus ladrilhos hidráulicos substituídos, como foi o caso da Catedral da Nossa Senhora da Boa Viagem e o Palácio da Liberdade em Belo Horizonte (CAMPOS, 2011).

Apesar do declínio, a partir da década de 80, os ladrilhos hidráulicos voltaram a ganhar espaço nos projetos arquitetônicos, com sua capacidade de personalização e a possibilidade de desenhar mosaicos sendo algumas causas desse retorno (CATOIA, 2007). De acordo com Campos (2011), outros motivos são o pluralismo da corrente pós-moderna, o retorno do interesse por produtos artesanais e o “esgotamento do impessoal e da frieza da produção em série”.

Atualmente, os ladrilhos hidráulicos são muito usados para a acessibilidade de pessoas com deficiências visuais. Um padrão chamado ladrilho podotátil é frequentemente instalado em calçadas de rua servindo de sinalização tátil (ABCP, 2010). A Figura 7 mostra exemplos de ladrilhos podotáteis.



Figura 7 - Ladrilho podotátil presente em catálogo de fabricante. Adaptado de Mosaicos Amazonas (2022)

Em síntese, os ladrilhos hidráulicos foram capazes de atravessar gerações sem perder suas características primitivas e sem alteração de seu processo produtivo. Isso se deve a sua adaptabilidade às necessidades arquitetônicas e humanas. Atualmente considera-se que os ladrilhos alcançaram o *status* de arte (LAMAS, et al., 2018).

2.1.3 Processo Produtivo

O ladrilho hidráulico é um material composto por cimento Portland, agregados e pigmentos (CAMPOS, 2011). Sua fabricação envolve a preparação de três camadas distintas. A primeira, pela ordem de execução, é onde são elaborados os desenhos dos ladrilhos, denominada de camada decorativa. Ela é constituída, normalmente, por

pigmentos, cimento branco estrutural, água e agregados, estes podem ser areia de quartzo, pó de mármore, dentre outros (LAMAS, et al., 2018; VENCESLAU, 2022). A proporção desses materiais depende da tonalidade pretendida no projeto. A segunda é uma camada intermediária, denominada “secante”. Ela é composta por cimento Portland e agregados, estes podem ser areia calcária, areia de rio, areia de britagem, dentre outros (LAMAS, et al., 2018; VENCESLAU, 2022). Já a terceira camada é o tardo, a parte que ficará diretamente em contato com a argamassa de assentamento. Também denominada de “misca” ou “mescla”, essa camada é geralmente produzida com cimento Portland, água e areia de britagem (LAMAS, et al., 2018; VENCESLAU, 2022). O traço utilizado em cada camada varia conforme a fábrica, a região e o clima do local. A espessura dessas camadas depende do fabricante e do local de aplicação - por exemplo, ladrilhos feitos para revestimento de parede podem possuir espessura menor do que aqueles feitos para revestimento de piso. A Figura 8 mostra um desenho esquemático das camadas e a Figura 9 apresenta um corte em um ladrilho hidráulico, no qual é possível visualizar as três camadas.

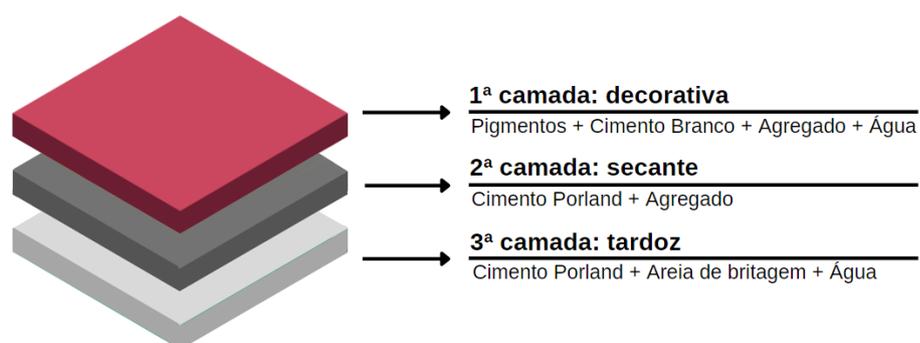


Figura 8 - Desenho esquemático das camadas dos ladrilhos hidráulicos. (Fonte: autora)



Figura 9 - Corte em ladrilho hidráulico para visualização das camadas. (Fonte: autora)

Os funcionários responsáveis pela produção dos ladrilhos são denominados “ladrilheiros”. Eles desenvolvem peça por peça, tornando cada produto único. Como já foi mencionado, o processo produtivo não sofreu grandes alterações ao longo do tempo. De acordo com Lamas *et al.* (2018), o processo ainda pode ser considerado artesanal, visto que o mesmo ladrilheiro participa da produção do ladrilho do início ao fim. O tempo de fabricação de uma única peça depende da complexidade do desenho. Em casos mais complexos dura de 5 a 10 minutos e em casos mais simples pode durar de 2 a 3 minutos (VENCESLAU, 2022). Ainda é preciso considerar o tempo de cura e secagem. O processo produtivo envolve 15 principais etapas que estão esquematizadas na Figura 10.

A primeira etapa é a aplicação do desmoldante na base da forma que, em geral, é feita de ferro fundido. Essa base é usualmente denominada “prato” pelos operários do setor. O desmoldante aplicado varia conforme a fábrica, normalmente compreendendo uma mistura de óleo e querosene. A Figura 11 ilustra essa etapa.



Figura 10 - Passo a passo para a fabricação de ladrilhos hidráulicos. (Fonte: autora)



Figura 11 - Etapa 1 – Aplicar o desmoldante. (Fonte: autora)

A segunda etapa é a inserção do molde, é através dele que são feitos os desenhos pretendidos. Antes de realizar esse encaixe, é necessário fixar um esquadro de ferro, que atua como limitação lateral dos ladrilhos. Atualmente, os moldes são feitos de latão, mas eles já foram confeccionados de ferro e bronze, esses eram considerados mais resistentes do que os atuais (LAMAS, et al., 2018). Algumas empresas atualmente utilizam moldes plásticos fabricados com impressora 3D. A Figura 12 mostra o encaixe do esquadro de ferro e do molde.



Figura 12 – Etapa 2 - Inserir o molde: a) encaixe do esquadro de ferro; b) encaixe do molde do desenho. (Fonte: autora)

A terceira etapa é a adição dos pigmentos, inseridos cuidadosamente pelos ladrilheiros nos vãos de cada cor de acordo com o desenho (Figura 13). A quarta etapa é a retirada do molde, que deve ser feita de forma cautelosa para não causar alterações no desenho. Após retirados, os moldes são imersos em água para rápida limpeza (Figura 14a). A Figura 14b mostra o resultado final desses estágios.

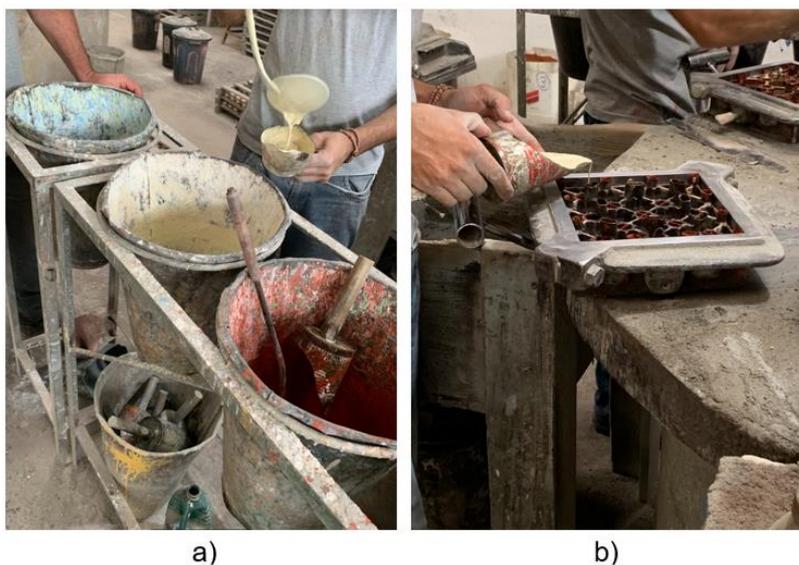


Figura 13 – Etapa 3 - Adicionar o pigmento: a) recipientes com os pigmentos; b) ladrilheiro adicionando o pigmento no molde. (Fonte: autora)

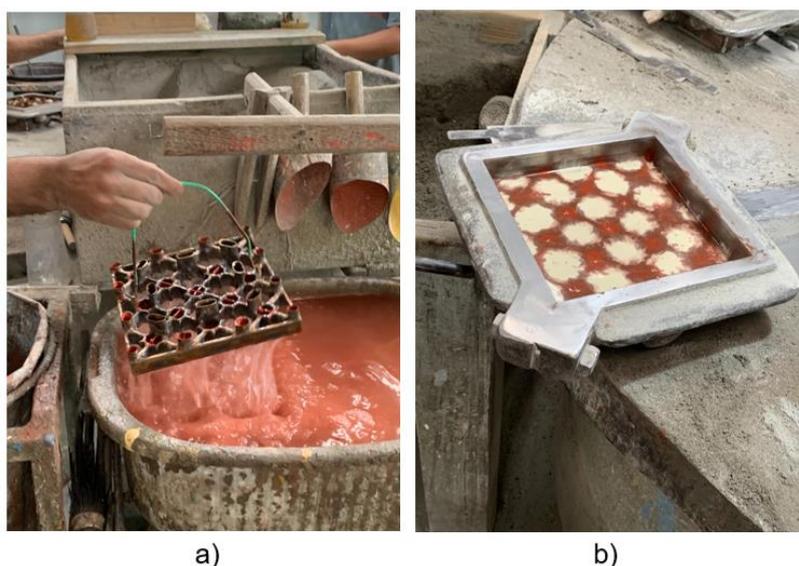


Figura 14 – Etapa 4 - Retirar o molde: a) molde sendo limpo em tanque de água; b) resultado dos pigmentos ao retirar o molde. (Fonte: autora)

A quinta etapa é a adição do secante, que absorve a umidade em excesso da camada dos pigmentos (BECKER & VUOLO, 2009). Em seguida vem a sexta etapa que é o nivelamento do secante. Esses estágios são ilustrados na Figura 15. A sétima etapa é a adição da misca, seguida da oitava etapa que é o seu nivelamento, ambos apresentados na Figura 16.



Figura 15 - a) Etapa 5 - Adicionar o secante; b) Etapa 6 – Nivelar. (Fonte: autora)

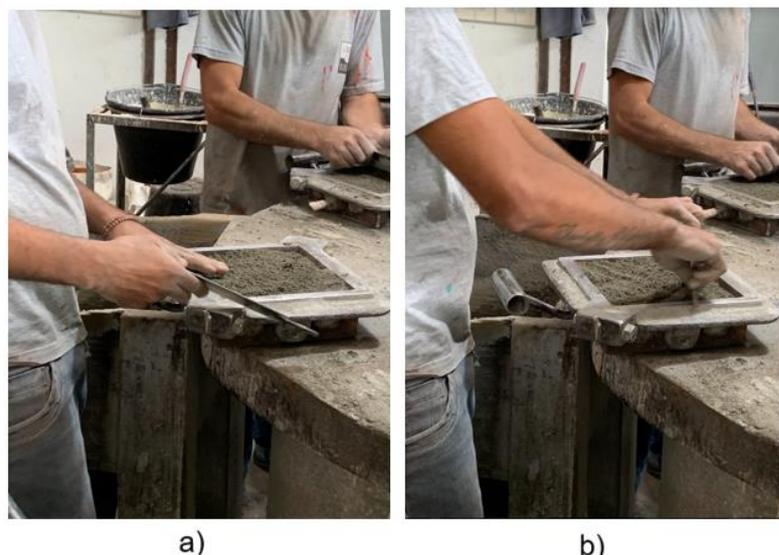


Figura 16 – a) Etapa 7 – Adicionar a misca; b) Etapa 8 – Nivelar. (Fonte: autora)

A nona etapa é o cobrimento do conjunto com um tampão, normalmente feito de ferro. O tampão pode apresentar a logomarca da empresa, de forma que os ladrilhos já saiam da etapa seguinte devidamente identificados. A Figura 17 mostra o tampão cobrindo o conjunto.



Figura 17 - Etapa 9 – Cobrir com tampão. (Fonte: autora)

A décima etapa é a prensagem do conjunto, feita a partir da utilização de uma prensa que pode ser manual, mecânica ou hidráulica (CAMPOS, 2011). A prensa hidráulica pode chegar a aplicar 70 toneladas (CAMPOS, 2011). A prensa manual e mecânica aplica de 12 a 20 toneladas nos ladrilhos, valor que pode variar conforme a força do impulso feita pelo ladrilheiro (CAMPOS, 2011; BECKER & VUOLO, 2009). A prensagem pode ser feita com um ou dois movimentos, nesse ponto é muito importante a experiência do profissional (BECKER & VUOLO, 2009). Segundo Venceslau (2022), a aplicação de pressão insuficiente comprometerá a compacidade e resistência mecânica do ladrilho, enquanto a aplicação de pressão excessiva “veda” excessivamente os poros, dificultando a cura hidráulica posterior.

De forma geral, a prensa aplica uma pressão no tampão de ferro que comprime as três camadas presentes na forma. Se o tampão apresentar a logomarca da empresa, a última camada será marcada por ela, identificando a peça. Essa rápida e intensa compressão proporciona resistência inicial à peça, necessária para o desmolde e manuseio (BECKER & VUOLO, 2009). A Figura 18 ilustra essa etapa.



Figura 18 - Etapa 10 – Levar à prensa: a) fôrma posicionada na prensa; b) ladrilheiros utilizando prensa manual. (Fonte: autora)

Assim que a prensagem é finalizada, inicia-se a 11ª etapa que é a remoção da forma. Nesse ponto o esquadro é retirado (Figura 19a) e limpo (Figura 19b) e o tampão também é removido (Figura 19c e Figura 20a). Em seguida, o ladrilho é retirado da base (Figura 20b) e encontra-se pronto para a próxima fase. A Figura 20c mostra o resultado final dessa etapa.



Figura 19 – Etapa 11 – Remover da forma: a) retirada do esquadro de ferro; b) limpeza do esquadro; c) retirada do tampão de ferro. (Fonte: autora)

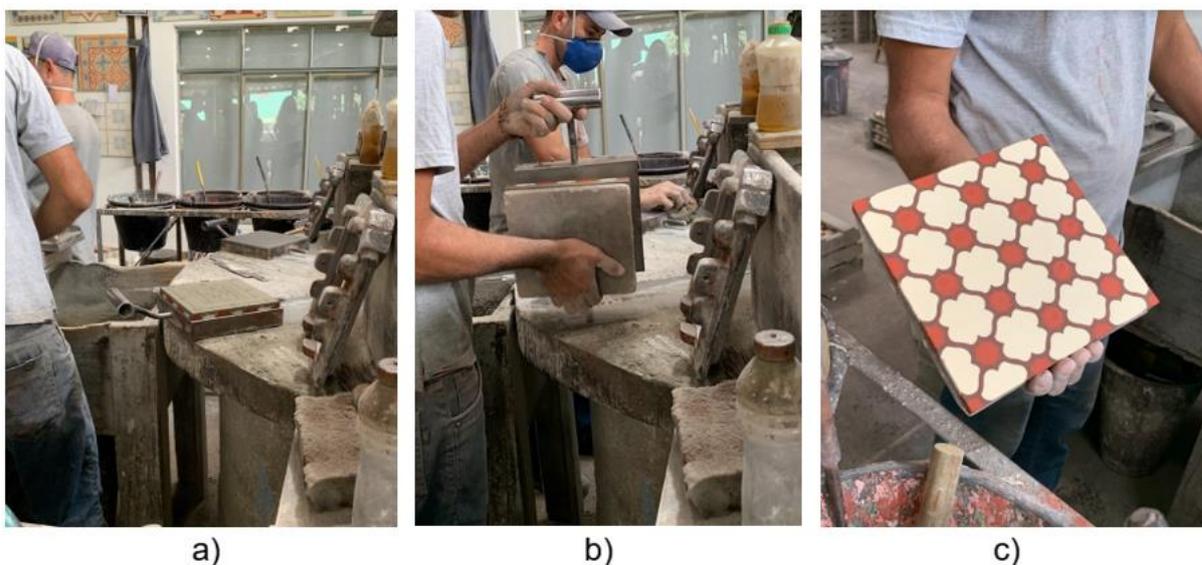


Figura 20 – Etapa 11 – Remover da forma: a) ladrilho na base, sem o esquadro e sem o tampão; b) retirada da base; c) ladrilho assim que retirado da base. (Fonte: autora)

A 12ª etapa é a secagem ao ar. Nesse ponto, os ladrilhos são posicionados na horizontal em estantes ou *pallets*, isso ocorre para evitar o empeno (Figura 21a). Eles ficam de 12 a 24 horas em repouso para ganhar solidez e resistência inicial (CAMPOS, 2011).

Em seguida, ocorre a 13ª etapa, que é a cura em água. Os ladrilhos são posicionados em grades e imersos em água para que ocorra a cura úmida (Figura 21b). O tempo de imersão depende do fabricante. Segundo Campos (2011), esse tempo é de aproximadamente 24 horas. Já de acordo com Becker e Vuolo (2009), isso pode ocorrer em, mais ou menos, 2 horas e depende do olhar atento do funcionário: “o artesão olha o aspecto do ladrilho e sabe quando absorveu a água necessária”.

A água utilizada na cura dos ladrilhos é descartada a cada 2 a 4 dias de uso (VENCESLAU, 2022). Em muitas fábricas, esse descarte é feito direto na rede de esgoto municipal, sem qualquer análise e tratamento prévio. É importante que essa água seja analisada para verificar a presença de componentes potencialmente tóxicos.

Alguns autores informam que a presença de “hidráulico” no nome do ladrilho vem, justamente, dessa cura úmida (BECKER & VUOLO, 2009; LAMAS, et al., 2018; MACIEL, et al., 2020). Já outros autores apontam que o “hidráulico” vem da utilização do aglomerante hidráulico, cimento Portland (CATOIA, 2007; REIS & SANTOS, 2020).

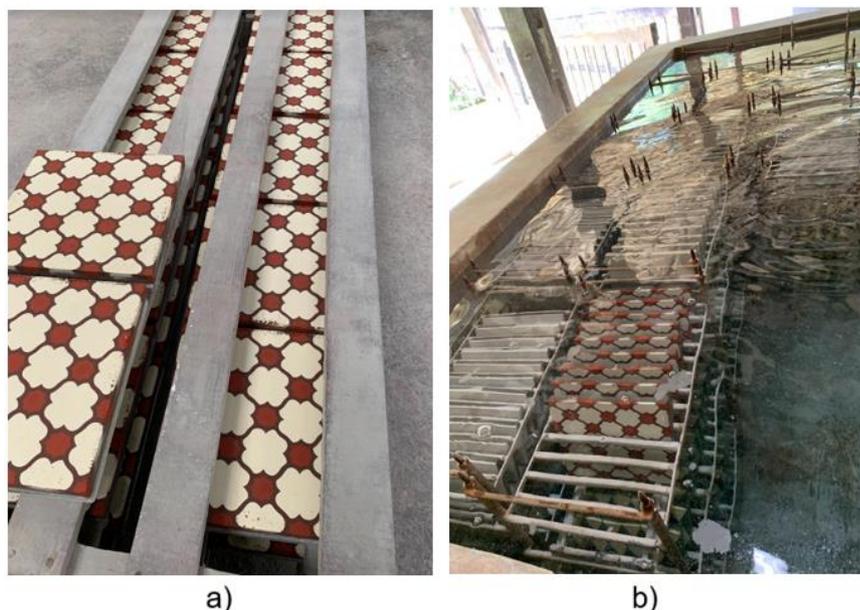


Figura 21 - a) Etapa 12 – Secar ao ar; b) Etapa 13 – Imergir em água. (Fonte: autora)

A 14^a etapa é a secagem ao ar, agora feita em prateleiras para que todas as faces recebam ventilação (Figura 22a). Nessa etapa ocorre o escoamento da água, processo que dura em torno de 24 horas, e a cura, processo que dura em torno de 7 a 17 dias (CAMPOS, 2011). A 15^a etapa é a embalagem e transporte (Figura 22b). Ao todo, o processo produtivo dos ladrilhos hidráulicos dura em torno de 14 a 20 dias.

A partir desse ponto, o produto já pode ser enviado ao usuário, que fica com a responsabilidade de execução do assentamento, rejuntamento e impermeabilização. É recomendado que o assentamento seja feito por um profissional experiente, já que os ladrilhos podem apresentar variações na espessura devido ao processo produtivo, precisando de nivelamento (CATOIA, 2007). Em relação às juntas, os fabricantes sugerem o sistema de junta seca, ou seja, sem a aplicação de argamassa de rejunte. Para a impermeabilização, é recomendado o uso de cera líquida ou selador, que pode ser aplicada pelo usuário ou, preferencialmente, pelo fabricante.



Figura 22- a) Etapa 14 – Secar ao ar; b) Etapa 15 – Embalagem e transporte. (Fonte: autora)

Como já mencionado, os ladrilhos hidráulicos, além de serem produtos artesanais, não são submetidos à queima durante seu processo produtivo. Por esse motivo, diversas fábricas de ladrilhos usam o termo “sustentável” como estratégia de venda do produto. Entretanto, o emprego desse termo depende da abordagem ambiental, social e econômica e não foram encontradas pesquisas que confirmassem a sustentabilidade ambiental dos ladrilhos hidráulicos.

2.1.4 Vantagens e Limitações

Dentre as principais vantagens dos ladrilhos hidráulicos tem-se a sua personalização: os profissionais ou consumidores podem escolher os desenhos e as cores presentes no catálogo dos fabricantes. No caso de não existir o desenho pretendido, é possível desenvolver um molde para aquele projeto. A artesanidade é outra característica importante, que traz a ideia da compra de um produto com significado e que está relacionado com o humano, não com a máquina. Outra vantagem é a alta durabilidade. Os ladrilhos podem alcançar mais de 100 anos de vida útil (CAMPOS, 2011). Sua fácil limpeza e manutenção também são pontos fortes desse material. Na limpeza é recomendado o uso de sabão neutro e cera líquida.

Alguns fabricantes afirmam que na manutenção é possível usar lixa d'água para remover defeitos superficiais, outros já condenam essa prática. Além disso tudo, devido às características anteriores e à carga histórica, o ladrilho também é um acabamento decorativo altamente apreciado e valorizado no meio arquitetônico (FONTES, et al., 2018).

Dentre as principais limitações dos ladrilhos hidráulicos está o alto custo. Esse depende da complexidade do desenho, das cores e da variedade das tonalidades empregadas (CAMPOS, 2011). A Tabela 1 apresenta o valor da composição de custo do serviço de revestimento de piso para ladrilho hidráulico, porcelanato, piso em pedra e revestimento cerâmico. Os valores apresentados nessa tabela foram extraídos do SINAPI – Sistema nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil – no levantamento não desonerado de abril de 2022 no estado de Minas Gerais (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2022). Nele é possível notar que o custo do ladrilho, com a aplicação da resina, é maior do que seus concorrentes diretos. Entretanto, a SINAPI considera o custo do m² do ladrilho como R\$ 48,48, enquanto buscas na internet e visitas às fábricas resultam em valores variando entre R\$ 200,00 a R\$ 500,00 por m² para os ladrilhos decorados (em 2022, sem considerar a aplicação da resina e a instalação). Sendo assim, o custo final real é substancialmente superior ao apresentado no SINAPI.

Tabela 1 - Custos de revestimentos de piso (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2022)

Revestimento	Observação	Código Sinapi	Custo / m²
Ladrilho hidráulico	Inclusa a aplicação de resina	101726	R\$ 149,28
Porcelanato	Dimensão 45x45 cm	87259	R\$ 139,15
Piso em pedra	Ardósia assentada sobre argamassa 1:3	101732	R\$ 71,45
Revestimento cerâmico	Placa tipo esmaltada extra; dimensão 35x35 cm	87247	R\$ 55,72

Outras limitações são a baixa produtividade da fábrica e o fato de ser um produto feito sob encomenda (CATOIA, 2007). Em fábricas de ladrilho é possível encontrar peças para pronta entrega, mas essas, normalmente, são excedentes de encomendas anteriores. Sendo assim, não são encontradas grandes quantidades de peças com a mesma arte. Além dessas limitações, também pode-se citar o alto tempo de produção e a falta de avanços tecnológicos nesse processo.

2.1.5 Estado da Arte

Os estudos recentes relacionados com ladrilhos hidráulicos destacam a incorporação de resíduos na composição dos artefatos. O trabalho de Fontes *et al.* (2021) teve como objetivo avaliar a utilização de rejeito de barragem de minério de ferro nos ladrilhos hidráulicos. Para isso, foram realizadas caracterizações físicas, químicas e mineralógicas. Os resultados obtidos mostraram que o processo de beneficiamento do rejeito resultou em um agregado silicioso de alta qualidade e uma argila rica em ferro. Os autores sugeriram a utilização da argila resultante do rejeito como pigmento e informaram que seu potencial de pigmentação pode melhorar com calcinação e moagem. Os autores concluíram que os ladrilhos hidráulicos obtidos apresentavam aparência e desempenho físico-mecânico satisfatórios quando comparados com os ladrilhos convencionais.

O estudo de Savazzini-Reis e Fagundes (2020) analisou os ladrilhos hidráulicos vibrados produzidos com resíduos de madeira. Para essa análise, os autores produziram os ladrilhos e substituíram a areia pelo resíduo de madeira nos teores de 5 e 10% em massa. Eles avaliaram a resistência à flexão e a absorção de água e fizeram análises dimensionais e geométricas. Os resultados obtidos mostraram que os artefatos desenvolvidos com 5% de resíduo mantinham as propriedades mecânicas dos ladrilhos de referência. Dessa forma, os autores concluíram que era viável a incorporação de 5% de rejeito na produção de ladrilhos hidráulicos vibrados.

O trabalho desenvolvido por Romano *et al.* (2020) destacou a possibilidade de utilização da lama vermelha, vinda da indústria do alumínio, na confecção dos ladrilhos hidráulicos. O objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto de diversos teores de lama vermelha associada ao cimento Portland nas propriedades dos ladrilhos. Para

isso, os autores avaliaram absorção de água, resistência à abrasão e à flexão, porosidade, permeabilidade ao ar e ainda os efeitos causados na cor. Os resultados obtidos foram alteração significativa da cor, melhoria da permeabilidade ao ar e da absorção de água por capilaridade. As demais propriedades avaliadas não apresentaram impactos estatisticamente significativos. Dessa forma, os autores concluíram que a lama vermelha apresenta grande potencial de uso na produção de ladrilhos hidráulicos. Entretanto, foi destacado que o comportamento no processo de lixiviação precisa de melhores avaliações e que as interações físico-químicas entre a lama e o ligante utilizado seguem diferentes tendências.

Já Ferreira *et al.* (2018) fizeram um estudo que tinha como objetivo incorporar os resíduos finos provenientes de rochas ornamentais na fabricação de ladrilhos hidráulicos do tipo podotátil. Para isso, foram realizados os ensaios de picnometria, para obtenção da massa específica, análise granulométrica, absorção de água e ensaio de alterabilidade. Os resultados obtidos foram a classificação da massa específica do resíduo como normal, a diminuição da absorção de água com o aumento do teor de rejeito e a ausência de trincas e quebras nos ladrilhos após o tráfego de pessoas. Os autores concluíram que a utilização de resíduos finos de rochas ornamentais na fabricação de ladrilhos é tecnicamente viável.

Diferentemente dos estudos relacionados com a utilização de resíduos nos ladrilhos, o trabalho de Zveibil *et al.* (2019) teve como objetivo avaliar o impacto do tipo e do teor de pigmentos no estado endurecido dos ladrilhos hidráulicos. Para isso, foram utilizados pigmentos à base de óxido de ferro ou negro de fumo e realizadas misturas com diferentes teores de pigmento. Os autores avaliaram alteração da cor, absorção de água, resistência à abrasão e à flexão, módulo de elasticidade e permeabilidade. Os resultados encontrados mostraram que essas propriedades alteravam de forma distinta e que não ocorreu um padrão com relação ao pigmento.

Também é importante ressaltar os estudos de Catoia (2007) e Campos (2011). O primeiro trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de ladrilhos hidráulicos de alto desempenho e alta resistência por meio da produção de argamassas com a tecnologia de concretos de alto desempenho. Para a realização desse estudo, o autor selecionou diferentes tipos de agregados, aglomerantes e aditivos superplastificantes e analisou

diferentes composições, teores de aditivo e técnicas de empacotamento. Foram confeccionados ladrilhos e realizados os seguintes ensaios: compressão axial simples, tração na compressão diametral, módulo de elasticidade e de flexão, desgaste por abrasão, absorção de água, retração por secagem, ação química e determinação da variação de dimensões em diferentes tempos de cura. Ainda foram realizados testes práticos e uma análise de custos. Os resultados obtidos mostraram que os ladrilhos desenvolvidos apresentaram alto desempenho e alcançaram bons resultados nos ensaios submetidos. O autor concluiu que a produção desses ladrilhos é viável e que é possível confeccionar uma diversidade de tipos, cores, formas e texturas de revestimentos.

Já o trabalho de Campos (2011) teve como objetivo investigar a presença do ladrilho hidráulico em Belo Horizonte. Foram analisados três momentos diferentes: o primeiro foi o ladrilho em seu esplendor, o segundo foi o desuso e o terceiro foi a reapropriação. Os resultados obtidos mostraram que a técnica e o uso desse artefato foram recuperados no final do século XX e início do século XXI, mas apresentaram novos significados e valores, trazendo o ladrilho como o protagonista dos *designs*.

Não foi encontrada nenhuma associação técnica ou comercial que representasse as fábricas de ladrilhos no Brasil. Os revestimentos cerâmicos, por exemplo, são representados pela Associação Brasileira de Cerâmica. Os ladrilhos hidráulicos estão incluídos no escopo da Associação Brasileira de Cimento Portland, entretanto não são o foco principal da associação. Por esse motivo é difícil encontrar dados relacionados à produção brasileira de ladrilhos, como número de fábricas existentes e o total produzido a cada ano.

2.2 Aspectos Ambientais da Construção Civil

Para analisar os aspectos ambientais da construção civil, é necessária a compreensão do conceito de ciclo de vida e das suas abordagens. Assim, de acordo com a ABNT (2014), o ciclo de vida pode ser definido como “estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final”. O ciclo de vida pode ser analisado em diferentes abordagens que impõem limites para o estudo.

A primeira é “do berço ao portão”, ela considera todas as atividades desde a extração da matéria-prima (berço) até o produto estar pronto para sair da fábrica (portão) (CIRCULAR ECOLOGY, 2019). A segunda abordagem é “do berço ao local”, ela inclui todas as etapas anteriores mais o transporte até o local de uso (local) (CIRCULAR ECOLOGY, 2019). A terceira abordagem é “do berço ao túmulo”, ela inclui toda a abordagem anterior mais as etapas de uso, manutenção e o fim da vida útil (túmulo), que pode ser por descarte, reutilização ou reciclagem (CIRCULAR ECOLOGY, 2019). As três abordagens citadas estão representadas na Figura 23. A quarta, e última, é “do berço ao berço” que, além das etapas citadas, traz a ideia de economia circular. Nela, os produtos são desenvolvidos de forma que possam ser prontamente reutilizados ou reciclados no final da vida útil (CIRCULAR ECOLOGY, 2019). A quarta abordagem está representada na Figura 24.

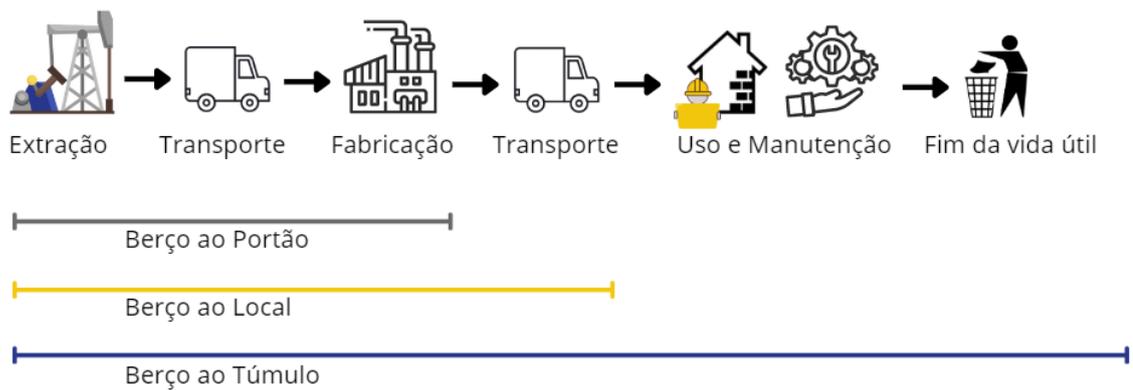


Figura 23 – Desenho esquemático das abordagens “berço ao portão”, “berço ao local” e “berço ao túmulo”. (Fonte: autora)

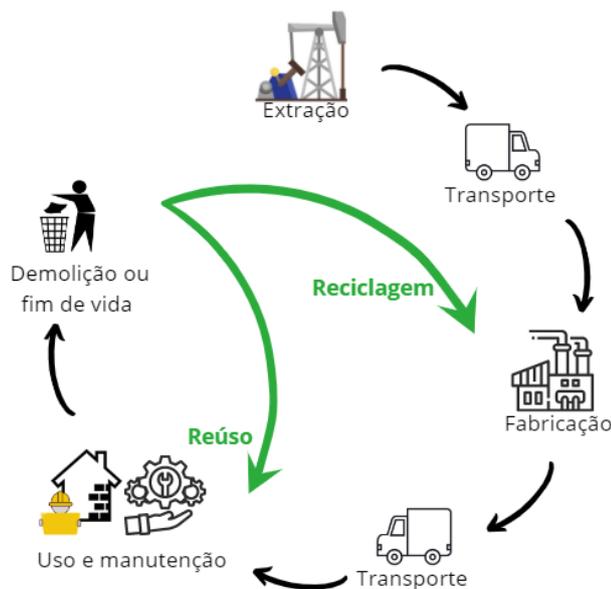


Figura 24 – Desenho esquemático da abordagem “berço ao berço”. (Fonte: autora)

Os materiais de construção e os edifícios podem ser analisados de acordo com seu ciclo de vida. Dessa forma, é possível investigar os aspectos ambientais presentes em toda a cadeia da construção civil. Esse é um setor reconhecido por seu alto consumo de recursos e seus expressivos efeitos negativos no meio ambiente. Dentre esses impactos, pode-se citar (DIAS, 1999):

- Impermeabilização do solo e alteração no fluxo das águas, causada pelos serviços de drenagem dos lotes;
- Degradação da fauna e da flora, causada pela limpeza dos terrenos;
- Degradação dos horizontes do solo, como erosão e sedimentação;
- Poluição sonora, causada pelo ruído de máquinas e equipamentos;
- Geração excessiva de resíduos;
- Emissão de gases do efeito estufa;
- Elevado consumo de energia;
- Presença de componentes potencialmente tóxicos.

Nos tópicos a seguir serão descritos e analisados os seguintes aspectos ambientais: (I) emissão de gases do efeito estufa, (II) consumo de energia e (III) presença de componentes potencialmente tóxicos.

2.2.1 Emissão de Gases do Efeito Estufa

O efeito estufa é um fenômeno natural do planeta que permite que o calor seja retido na atmosfera, mantendo-a em uma temperatura de equilíbrio (DALAZEN, et al., 2022). Esse fenômeno ocorre a partir dos chamados gases do efeito estufa, que deixam passar a luz solar, mas aprisionam o calor. O principal deles é o dióxido de carbono (CO₂), mas ainda participam do fenômeno o metano (CH₄), o óxido nítrico (NO), o óxido nitroso (NO₂), dentre outros (MOHSIN, et al., 2021; PROCLIMA, 2007).

O efeito estufa é fundamental para a manutenção da vida na terra, mas o excesso dos gases do efeito estufa leva ao aquecimento global (DALAZEN, et al., 2022). Por esse motivo, é importante investigar as principais fontes emissoras desses gases e traçar políticas de controle e redução das emissões.

Dentro deste contexto, diversos acordos e conferências mundiais vêm ocorrendo com o objetivo de minimizar as emissões dos gases do efeito estufa, como o Acordo de Paris e as Conferências do Clima. Em 2021, o governo brasileiro lançou o Programa Nacional de Crescimento Verde. Esse programa possui como principais objetivos “aliar redução das emissões de carbono, conservação de florestas e uso racional de recursos naturais com geração de emprego verde e crescimento econômico” (BRASIL, 2021). Através dele, pretende-se neutralizar a emissão de carbono no país até 2050 (BRASIL, 2022b).

Na contramão desse objetivo, as emissões mundiais referentes à operação de edifícios atingiram seu maior nível em 2019 (UNEP, 2020). As emissões de CO₂ referentes à energia aumentaram mesmo com o consumo de energia permanecendo estável (UNEP, 2020). Isso mostra que houve um aumento no fator de emissão da energia. Quando foram somadas as emissões da indústria da construção civil e as emissões operacionais, o setor alcançou 38% do total de emissões globais de CO₂ referentes à energia (UNEP, 2020).

Estima-se que 40% das emissões globais de carbono, ligadas à energia, estejam relacionadas com a construção civil e as edificações (UNEP, 2020). As emissões de gases do efeito estufa referentes aos processos industriais brasileiros em 2020 estão apresentadas na Figura 25 (BRASIL, 2022a). Nesse gráfico, é possível notar que a indústria do cimento, sozinha, é responsável por 22,7% das emissões. Outros setores,

como a indústria metalúrgica e a produção de cal também estão relacionadas com a construção civil.

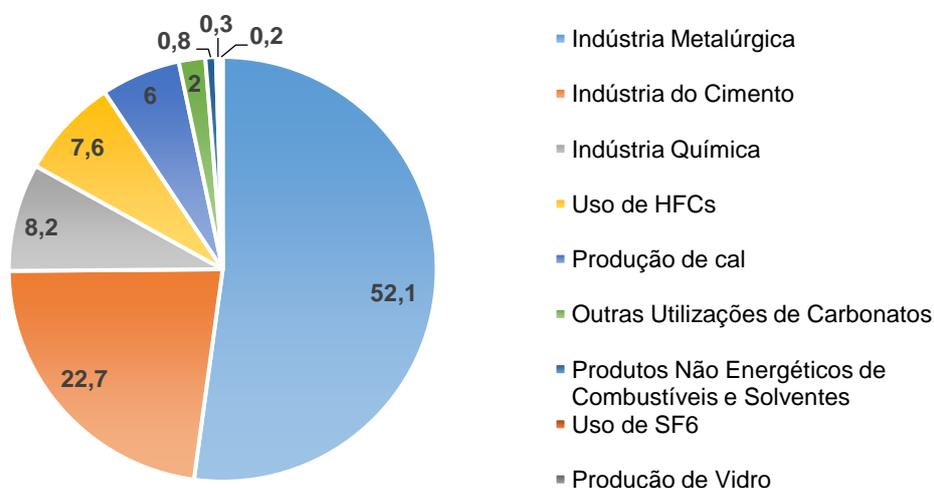


Figura 25 - Emissões de gases do efeito estufa em processos industriais brasileiros em 2016 (BRASIL, 2022a)

A indústria do cimento é responsável por cerca de 7% de toda a emissão de CO₂ do mundo (CSI, 2019). Esse número expressivo está relacionado com o processo produtivo do cimento. De acordo com World Business Council for Sustainable Development - WBCSD (2012), aproximadamente 50% das emissões são do processo de conversão química do calcário (CaCO₃) em óxido de cálcio (CaO), 40% são referentes à queima dos combustíveis fósseis durante a produção e o restante está relacionado com emissões durante o transporte e queima de combustíveis para a geração da eletricidade.

O Brasil reduziu 19% das emissões de CO₂ da indústria do cimento de 1990 a 2019 e é o país que apresenta a menor emissão de carbono por tonelada de cimento, de acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2020). Isto se deve ao uso de matérias-primas e adições alternativas em substituição ao clínquer, à utilização de combustíveis alternativos, como biomassa e resíduos com poder energético, à eficiência energética, diminuindo o consumo térmico/elétrico e ao uso de tecnologias inovadoras e emergentes, através do investimento em pesquisa e desenvolvimento (SNIC, 2020).

As emissões de CO₂ relacionadas às atividades de produção de uma mercadoria ou edificação ao longo de seu ciclo de vida são traduzidas em um indicador denominado CO₂ embutido. Já as emissões de todos os gases do efeito estufa são transformadas numericamente em emissões de CO₂, proporcionalmente ao potencial de aquecimento global de cada um, dando origem ao indicador CO₂ equivalente.

Diversos estudos foram realizados para determinar o CO₂ emitido na produção de materiais de construção. Essas emissões foram quantificadas através da avaliação do ciclo de vida e transformadas em fatores de emissão. Dessa forma, é possível encontrar na literatura diversos dados relacionados aos fatores de emissão e, inclusive, inventários desses fatores. O CO₂ embutido e o CO₂ equivalente totais de um produto ou edificação são determinados pelo somatório do produto entre o fator de emissão e a quantidade dos materiais utilizados. Este cálculo será melhor apresentado no capítulo de Metodologia.

2.2.2 Consumo de Energia

A produção de energia está relacionada com diversos impactos ambientais. Como exemplo desses impactos, pode-se citar emissões de gases do efeito estufa, poluição do ar, da água e sonora, modificação de ecossistemas, dentre outros (MOURA & MOTTA, 2013).

Esses impactos variam de acordo com a fonte energética, que pode ser renovável ou não-renovável. Alguns exemplos de fontes renováveis são: hidráulica, eólica, solar, biomassa e biodiesel. Já as fontes não-renováveis são: petróleo e derivados, gás natural, carvão mineral, urânio, dentre outros. No Brasil, as fontes renováveis representam 48,4% da matriz energética do país, enquanto as não renováveis ocupam 51,6% (MME & EPE, 2021).

Na construção civil, o consumo de energia ocorre em quatro etapas (CBCS, et al., 2014):

- (I) Extração, fabricação, produção e transporte de materiais de construção;
- (II) Construção, energia no canteiro de obras;
- (III) Operação de edificações e o ambiente urbano;

(IV) Demolição e fim de vida.

De acordo com Moura e Motta (2013), 10 a 20% das emissões relacionadas com energia ocorrem nas etapas (I), (II) e (IV), enquanto 80 a 90% ocorrem na etapa (III). Dessa forma, os estudos de consumo energético da construção civil devem ter como prioridade a etapa de operação de edificações. Esse consumo de energia é traduzido em um indicador denominado energia incorporada ou energia embutida.

A Tabela 2 apresenta o percentual do consumo energético dos setores brasileiros em 2020 (MME & EPE, 2021). Dentre esses setores, as indústrias, as residências e os serviços são considerados edificações, juntos eles totalizam 47,6% do consumo energético no Brasil.

Tabela 2 - Consumo energético por setor no Brasil em 2020 (MME & EPE, 2021)

Setor	Consumo Energético (%)
Indústrias	32,1
Transportes	31,2
Setor Energético	11,2
Residências	10,8
Agropecuária	5,1
Uso não-energético	4,9
Serviços	4,7

Na produção e no consumo de energia, a emissão de CO₂ *per capita* brasileira representa 1/7 da emissão americana e 1/3 da emissão chinesa ou europeia (MME & EPE, 2021). Isto se deve ao grande percentual das fontes renováveis na matriz energética brasileira. Entretanto, deve-se ter cuidado ao tratar desses dados, já que emitir menos não implica em emitir pouco.

As emissões de CO₂ equivalente associadas à matriz energética brasileira atingiram 398,3 milhões de toneladas apenas no ano de 2020 (MME & EPE, 2021). Desses, 90,1 milhões de toneladas foram de edificações (MME & EPE, 2021). Indo na contramão da neutralização de carbono, essas emissões possuem uma taxa média de crescimento anual de 1,6% de 2000 a 2020 e projeta-se um crescimento anual de 2% de 2020 a 2030 (MME & EPE, 2021).

De acordo com Tavares (2006), o cimento, a cerâmica vermelha, o aço e a cerâmica de revestimento são os materiais com os mais significativos valores de energia incorporada nas edificações. Sendo assim, uma das formas de reduzir a energia incorporada total de uma edificação é diminuir o consumo desses materiais.

Assim como a emissão de CO₂, existem índices de energia embutida para os diversos materiais de construção. Esses índices foram determinados por diversos estudos que analisaram o ciclo de vida dos produtos. Dessa forma, a energia embutida total de um sistema ou edificação pode ser encontrada pelo somatório do produto entre o índice de energia incorporada de cada material pela quantidade de material utilizado. Esse cálculo será melhor apresentado no capítulo de Metodologia.

2.2.3 Componentes Potencialmente Tóxicos

De acordo com a NBR 10004 – “Resíduos Sólidos – Classificação” (ABNT, 2004a), a toxicidade pode ser definida como “propriedade potencial que o agente tóxico possui de provocar, em maior ou menor grau, um efeito adverso em consequência de sua interação com o organismo”. Esse agente tóxico pode ser qualquer espécie química ou mistura que cause esses efeitos adversos (ABNT, 2004a).

Na construção civil, ainda ocorre o uso de materiais de construção que são tóxicos (TORGAL & JALALI, 2010). Isto se deve à influência de questões econômicas nas normas de limites de toxicidade e à falta de formação de profissionais na área (TORGAL & JALALI, 2010). Alguns exemplos desses materiais são os inseticidas e fungicidas aplicados para a preservação de madeiras, os materiais que liberam fumaças tóxicas em incêndios, como isolantes térmicos contendo polietileno e poliuretano, e materiais radioativos, como resíduos utilizados como subprodutos, caso do fosfogesso, escória de alto forno e algumas cinzas volantes (TORGAL & JALALI, 2010).

Outro importante caso na construção civil são os materiais que contêm amianto, como telhas e caixas d'água. Em novembro de 2017, o Supremo Tribunal Federal proibiu no Brasil a extração, produção, venda e uso do amianto crisótilo, por ser um

produto extremamente cancerígeno (G1, 2020). Entretanto, em julho de 2019, o governo de Goiás sancionou uma lei que autorizava a extração desse material, restringindo-a para exportação (G1, 2020). O governo alegou atender ao compromisso de preservação dos empregos e geração de renda (G1, 2020).

Para determinar a presença de componentes potencialmente tóxicos em materiais de construção, é necessário realizar ensaio de lixiviação. Após esse ensaio, o extrato lixiviado é analisado e comparado com a NBR 10004, que estabelece limite máximo permitido de metais e metaloides no extrato (ABNT, 2004a). Essa norma classifica resíduos sólidos em “perigosos” ou “não-perigosos” de acordo com a concentração dos componentes (ABNT, 2004a).

3 METODOLOGIA

Para investigar os ladrilhos hidráulicos sob a perspectiva ambiental, foram realizadas as análises de emissão de CO₂, consumo de energia e componentes potencialmente tóxicos. O primeiro passo para a realização do estudo foi efetuar visitas técnicas em fábricas de produção de ladrilhos decorados. Essas visitas foram importantes para a visualização do processo produtivo como um todo, coleta de informações e coleta de amostras de ladrilhos. Assim, foram feitas visitas a três fábricas, nos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro ao longo do ano de 2022. Essas fábricas foram escolhidas devido à proximidade logística com a instituição da autora. As empresas serão identificadas como Fábrica A, Fábrica B e Fábrica C. Todas as empresas autorizaram o uso das informações coletadas nas entrevistas realizadas.

A partir dos dados coletados foi possível iniciar a investigação do presente estudo e realizar um inventário do ciclo de vida dos ladrilhos hidráulicos. A emissão de CO₂ e o consumo de energia foram levantados a partir da avaliação do ciclo de vida do berço ao portão, em conjunto com indicadores obtidos da literatura. Já os componentes potencialmente tóxicos foram avaliados nos ladrilhos hidráulicos e na água do tanque de cura. Essas análises foram feitas a partir da investigação da presença de metais e metaloides por meio do ensaio de lixiviação. Os tópicos 3.1 a 3.3 descrevem a metodologia abordada para a realização de cada investigação.

Após a realização da parte experimental, os resultados encontrados foram comparados com os dados de outros revestimentos, obtidos na literatura. A Figura 26 ilustra a metodologia simplificada em formato de fluxograma.

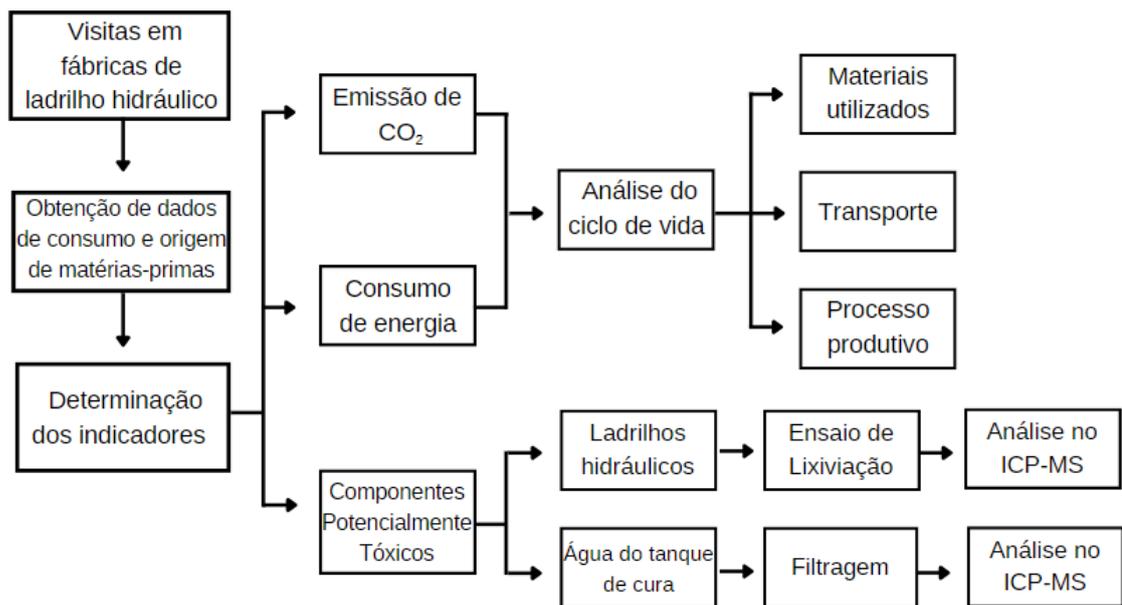


Figura 26 - Fluxograma da metodologia utilizada.

3.1 Emissão de CO₂

A quantidade de CO₂ embutido dos ladrilhos hidráulicos foi determinada a partir da avaliação do ciclo de vida. A abordagem adotada foi “do berço ao portão”, que avalia as atividades desde a extração de matérias-primas até a fabricação final dos materiais (portão da fábrica). Dessa forma, foram avaliadas as emissões referentes: (I) aos materiais utilizados na fabricação, (II) ao transporte até a fábrica e (III) ao processo produtivo.

3.1.1 Materiais utilizados na fabricação

As emissões de CO₂ nessa etapa podem ser estimadas multiplicando a quantidade de material pelo seu fator de emissão. Este cálculo está apresentado na Equação 1 a seguir:

$$ECO2mat = FEmat \times Q \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que, ECO₂mat é a emissão de CO₂ referente aos materiais, em kgCO₂, FEmat é o fator de emissão, em kgCO₂/unidade de medida e Q é a quantidade de material utilizado, em massa ou volume.

3.1.1.1 Determinação da quantidade de material

Por se tratar de uma produção artesanal e empírica, as fábricas visitadas não souberam informar a quantidade precisa de material que era utilizada para produzir 1 m² de ladrilho. Por este motivo, os valores precisaram ser determinados. Essa determinação variou conforme fábrica e camada. O Quadro 2 apresenta um resumo da metodologia utilizada para cada fábrica e camada. Essa metodologia será melhor detalhada ao longo desse tópico.

Quadro 2 - Metodologias utilizadas para determinação da quantidade de material.
(Fonte: autora)

Camada	Fábrica	Metodologia
Decorativa	A	Cálculo do volume da argamassa, a partir do traço, e posterior proporção com o volume da camada
	B	
	C	
Secante	A	Proporção entre o traço e o volume da camada. Foi considerado efeito de empacotamento e compactação dos materiais
	B	
	C	Proporção entre o traço e a informação de massa e volume necessários para a produção de um ladrilho
Tardoiz	A	Proporção entre o traço e a informação de rendimento do traço
	B	Cálculo do volume da argamassa, a partir do traço, e posterior proporção com o volume da camada
	C	Proporção entre o traço e a informação de massa e volume necessários para a produção de um ladrilho

Durante as visitas técnicas realizadas, os funcionários forneceram amostras de ladrilhos e as informações necessárias para os cálculos. A Tabela 3 apresenta um resumo das informações de materiais e traços utilizados em cada fábrica. Na camada decorativa, o consumo de pigmento apresentado é para a tonalidade vermelha. Foi determinado que a tonalidade estudada seria vermelha, devido à ampla utilização histórica e à inviabilidade de analisar todas as tonalidades.

Tabela 3 - Materiais e traços utilizados na fabricação dos ladrilhos hidráulicos
 (Fonte: autora, com base nas informações obtidas com os responsáveis por cada fábrica)

Camada	Informação	Fábrica A	Fábrica B	Fábrica C
Decorativa	Materiais	Cimento branco	Cimento branco	CP-II-F 32
		Areia de quartzo	Pó de mármore	Pó de mármore
		Pigmento	Pigmento	Pigmento
		Água	Água	Água
	Traço	1:1 (em massa)	1:1 (em massa)	1:0,5 (em volume)
	Consumo de pigmento	50 g/kg de cimento	20 g/kg de cimento	50 g/kg de cimento
Secante	Materiais	CP-II-E 32	CP-III 32 RS	CP-II-F 32
		Areia calcária	Areia de britagem	Areia de britagem
	Traço	1:1 (em volume)	1:1,5 (em volume)	1:1,3 (em volume)
Tardoz	Materiais	CP-II-E 32	CP-III 32 RS	CP-II-F 32
		Areia de britagem	Areia de britagem	Areia de rio
		Água	Água	Água
	Traço	1:1,2 (em volume)	1:2 (em volume)	1:3 (em volume)

Todas as fábricas informaram que há uma grande variação na quantidade de água utilizada na produção das camadas decorativa e tardoz. Essa variação ocorre de acordo com temperatura, umidade, funcionário, tonalidade da pigmentação, dentre outros fatores. Somente a Fábrica B informou um fator água / cimento médio utilizado: 0,6 na camada decorativa e 0,3 na camada de tardoz. Esse último foi comprovado na literatura (CATOIA, 2007). As demais fábricas não souberam informar um fator médio. Sendo assim, adotou-se para elas o mesmo fator informado pela Fábrica B.

A partir desse ponto, foi necessário calcular o volume de cada camada. Esse cálculo foi desenvolvido a partir das amostras de ladrilho e feito da seguinte forma:

1. Pesar a amostra de ladrilho;
2. Quebrar a amostra de ladrilho no meio;

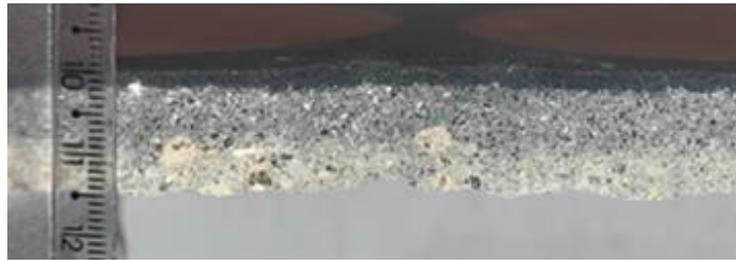
3. Medir a altura das três camadas, em três pontos distintos, com o uso de paquímetro;
4. Determinar a altura média de cada camada.
5. Calcular o volume de cada camada por m² de ladrilho, multiplicando a altura média pelo seu comprimento (1 m) e por sua largura (1 m);

A Tabela 4 apresenta as informações obtidas a partir das amostras de ladrilhos coletadas, são elas: (I) valores médios das espessuras de cada camada; (II) valor médio da espessura do ladrilho hidráulico e (III) massa dos ladrilhos. A massa dos ladrilhos foi determinada com uso de balança digital. A Figura 27 os ladrilhos das Fábricas A, B e C em corte.

Somente a Fábrica C apresentou a massa e o volume da quantidade de secante e tardez necessários para a produção de um ladrilho. Isso foi possível já que essa fábrica trabalha com recipientes padronizados na linha de produção. Neste caso, as quantidades de material foram determinadas a partir da proporcionalidade do traço.

Tabela 4 - Espessuras e massas das amostras de ladrilhos hidráulicos coletadas.
(Fonte: autora)

Fábrica	Espessura média das camadas (mm)			Espessura média do ladrilho (mm)	Massa do ladrilho (kg)
	Decorativa	Secante	Tardoz		
A	2,77	7,97	5,27	16,01	1,312
B	5,17	5,60	4,90	15,67	1,289
C	3,27	6,65	5,12	15,04	1,385



(a)



(b)



(c)

**Figura 27 - Ladrilho hidráulico em corte: a) Fábrica A; b) Fábrica B; c) Fábrica C.
(Fonte: autora)**

A Fábrica A informou a quantidade de material que utilizava para fazer um traço da camada de tardoiz e esclareceu que esse traço rendia $11,72 \text{ m}^2$ de ladrilho. Dessa forma, na camada de tardoiz da Fábrica A, o cálculo das quantidades de materiais gastos por m^2 de ladrilho produzido foi feito dividindo-se as quantidades informadas para mistura da argamassa pelo seu rendimento.

Para todas as camadas decorativas e para a camada de tardoiz da Fábrica B foi necessário calcular o volume de argamassa que um traço gerava. Sendo assim, a determinação das quantidades de materiais foi realizada de acordo com os seguintes passos:

1. Os traços que estavam em volume foram transformados para massa. Essa transformação foi feita a partir da multiplicação de cada material por sua massa unitária. Depois dessa multiplicação, foram obtidas as proporções

para o traço unitário em massa. Como exemplo, para a Fábrica B, o traço em volume 1:2 foi convertido em um traço em massa 1:2,36, a partir das massas unitárias do cimento (1,17 kg/dm³) e da areia de britagem (1,38 kg/dm³).

2. Com o traço em massa, foi possível calcular o volume de argamassa obtido. Esse volume é calculado a partir do somatório dos volumes absolutos de cada material da mistura, ou seja, somatório do quociente da massa pela massa específica real de cada material, incluindo a água. A Tabela 5 apresenta um exemplo dessa transformação realizada para a camada de tardo de da Fábrica B.

Tabela 5 - Exemplo de cálculo de volume de argamassa. (Fonte: autora)

	Traço em massa	Massa específica real	Volume
CP-III 32 RS	1	3,09 kg/dm ³	$\frac{1}{3,09} \cong 0,32$
Areia de britagem	2,36	2,67 kg/dm ³	$\frac{2,36}{2,67} \cong 0,89$
Água	0,30	1,00 kg/dm ³	$\frac{0,30}{1,00} \cong 0,30$
Total (Σ)	-	-	0,32+0,89+0,30 = 1,51 dm ³

3. A partir de regra de três, as quantidades de material foram ajustadas para o volume que havia em um m² cada camada.
4. Em alguns casos, foi necessário transformar as quantidades de materiais de massa para volume ou de volume para massa, devido à unidade do fator de emissão de CO₂ utilizado. Nesses casos, essa transformação foi feita utilizando os valores de massa unitária.

Nas camadas de secante das Fábricas A e B, como não há adição de água, foi necessário considerar o efeito do empacotamento dos materiais e da prensagem do conjunto. Em um experimento realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Juiz de Fora foi observado que, para a Fábrica A, ao misturar

1 unidade de volume de cimento com 1 unidade de volume de areia calcária obtinha-se 1,5 unidade de volume de mistura. Na Fábrica B, a mistura de 1 unidade de volume de cimento com 1,5 unidade de volume de areia de britagem resultava em 2 unidades de volume de mistura. Além disso, ao comparar a massa unitária solta e massa unitária compactada, observou-se que o volume do agregado solto era 20% maior do que o seu volume compactado. A partir dessas informações, foi possível determinar a quantidade de material utilizada na camada de secante.

Para a realização desses cálculos foi necessário obter os valores de massa unitária e massa específica real de cada material. A Fábrica A não deu autorização para o recolhimento de amostras dos materiais. Entretanto, foi possível coletar amostras da areia de britagem diretamente com o seu fornecedor. A Fábrica B deu autorização para a coleta da areia de britagem e pó de mármore. E a Fábrica C, por sua vez, deu autorização para a coleta da areia de britagem e areia de rio. Sendo assim, os materiais coletados foram submetidos a ensaios.

A massa unitária foi determinada seguindo a NBR 16.972 – Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios (ABNT, 2021). Enquanto a massa específica real foi determinada de acordo com a NM 52 – Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente (AMN, 2002). Os detalhes desses ensaios encontram-se no Apêndice A e B. A Tabela 6 apresenta os valores de massa unitária e massa específica real adotados no presente trabalho. Os materiais que não foram coletados tiveram seus valores obtidos a partir da literatura. Para as areias de quartzo e calcário, a massa unitária foi determinada pela média dos valores de densidade mínima encontrados no trabalho de Brandes (2011) e a massa específica real foi determinada pela média dos valores também apresentados no trabalho de Brandes (2011).

A partir desses cálculos e considerações foi possível determinar a quantidade de material que era utilizada em cada camada. O resultado encontrado está apresentado na Tabela 7.

Tabela 6 - Massa unitária e massa específica real dos materiais

Materiais	Massa unitária		Massa específica real	
	Valor (kg/dm ³)	Fonte	Valor (kg/dm ³)	Fonte
Areia calcária	1,377	(BRANDES, 2011)	2,770	(BRANDES, 2011)
Areia de britagem Fábrica A	1,510	Autora	2,700	Autora
Areia de britagem Fábrica B	1,380	Autora	2,670	Autora
Areia de britagem Fábrica C	1,460	Autora	2,780	Autora
Areia de quartzo	1,417	(BRANDES, 2011)	2,690	(BRANDES, 2011)
Areia de rio	1,290	Autora	2,560	Autora
Cimento branco ¹	1,142	(ALDAHASH, 2018)	2,960	(CARBONE, et al., 2013)
CP-II-E 32	1,090	(GIROTTO & BARBOSA, 2013)	3,050	(GIROTTO & BARBOSA, 2013)
CP-II-F 32	1,060	(SANTOS, 2008)	2,980	(SANTOS, 2008)
CP-III 32 RS	1,170	(VOTORAN, 2022)	3,090	(RODRIGUES & BERALDO, 2010)
Pó de mármore	1,570	Autora	2,940	Autora

¹ Valor retirado da literatura, pois o site do fabricante não apresentava ficha técnica do produto. Contatos por e-mail e ligação não foram respondidos.

Tabela 7 - Quantidade de material utilizado por metro quadrado de ladrilho. (Fonte: autora)

Camada	Material	Unidade de medida	Quantidade de material por m ²		
			Fábrica A	Fábrica B	Fábrica C
1ª camada Decorativa	Pigmento	kg	0,1058	0,08	0,1377
	Cimento Branco	kg	2,1152	4,0455	0
	CP-II-F 32	kg	0	0	2,7544
	Areia de quartzo	m ³	0,0015	0	0
	Pó de mármore	m ³	0	0,0026	0,0013
2ª camada Secante	CP-II-E 32	kg	6,9498	0	0
	CP-II-F 32	kg	0	0	4,6375
	CP-III 32 RS	kg	0	3,9312	0
	Areia calcária	m ³	0,0064	0	0
	Areia de britagem	m ³	0	0,0050	0,0057
3ª camada Tardo	CP-II-E 32	kg	4,2662	0	0
	CP-II-F 32	kg	0	0	3,4394
	CP-III 32 RS	kg	0	3,2298	0
	Areia de britagem	m ³	0,0046	0,0055	0
	Areia de rio	m ³	0	0	0,0097

3.1.1.2 Determinação dos fatores de emissão

Os fatores de emissão foram adotados a partir da literatura e estão apresentados na Tabela 8. A referência utilizada foi o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção – Sidac (MME & CBCS, 2022). Esse sistema apresenta valores mínimos e máximos dos indicadores para cada material. Para o presente estudo foi utilizada a média desses valores. No caso das areias, o valor máximo apresentado no Sidac foi transformado de kgCO₂/kg para kgCO₂/m³, a partir do produto entre o fator de emissão e a massa unitária do material. Nessa base de dados, não foram encontrados dados relacionados ao pigmento e ao cimento branco. Por esse motivo, foram utilizadas fontes alternativas ou fatores de emissão de materiais com composição similar. No caso do cimento branco, foi utilizado o fator de emissão do cimento CP-I-S 32, devido à proximidade dos limites de composição estabelecidos na NBR 16697 – Cimento Portland - Requisitos (ABNT, 2018). Destaca-se que para o pó de mármore, por se tratar de um subproduto do corte e beneficiamento de rochas ornamentais, não foi considerado o CO₂ embutido nessa etapa (será considerado apenas na etapa seguinte, de transporte).

Tabela 8 - Fatores de emissão por material utilizado na produção de ladrilho

Material	Unidade de medida (UM)	Fator de emissão (kgCO ₂ /UM)		
		Mínimo	Máximo	Adotado
Pigmento	kg	-	-	1,558 ¹
Cimento Branco	kg	-	-	0,51 ²
Areia de quartzo	m ³	0,01 ²	17,7267	8,8683
Pó de mármore	kg	-	-	0,00
CP-II-E 32	kg	0,4433	0,9348	0,6891
CP-II-F 32	kg	0,652	0,8734	0,7627
CP-III 32 RS	kg	0,2353	0,6817	0,4585
Areia calcária	m ³	0,01 ²	17,2263	8,6181
Areia de britagem	kg	0	0,004669	0,002334
Areia de rio	m ³	0,01 ²	16,1379	8,0739

¹ (IBU, 2022); ² (BODE & GONÇALVES, 2015)

3.1.2 Transporte

Os materiais utilizados na fabricação dos ladrilhos são transportados pelo modal rodoviário e/ou hidroviário. O transporte rodoviário acontece por caminhões a diesel, enquanto o transporte hidroviário acontece por navio. A emissão de CO₂ referente ao transporte depende do modal, da distância percorrida, do peso carregado no transporte e do tamanho do caminhão/navio utilizado.

Nas visitas realizadas, as fábricas informaram que os fornecedores entregavam os materiais em caminhões de variados tamanhos. Essa variabilidade pode ser explicada pela dinâmica comercial dos fornecedores. É importante destacar que a emissão de CO₂ equivalente varia conforme diversos fatores, como o tipo de caminhão, o ano de fabricação, a eficiência do veículo, a qualidade do diesel, a velocidade média, a condição da estrada, dentre outros (CAMPOS, et al., 2011). Dentro desse contexto, foi necessário utilizar um fator de emissão mais abrangente, mas que traduzisse o impacto da matriz nacional de transportes. De acordo com CAMPOS *et al.* (2011), o fator de emissão para o modal rodoviário feito por caminhões a diesel no Brasil varia de 12,8 gCO₂/t.km a 50,6 gCO₂/t.km, com a mediana sendo 37gCO₂/t.km. Para o presente estudo foi utilizado o valor da mediana.

De acordo com *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014), o modal hidroviário por navios com contêineres no oceano possui um fator de emissão que varia de 5 a 25 gCO₂/t.km. Para o presente estudo foi utilizado o valor médio de emissão, 15 gCO₂/t.km.

Dessa forma, a emissão pode ser estimada multiplicando o fator de emissão pela distância e pelo peso do material. Esse cálculo está apresentado na Equação 2.

$$ECO2t = FEt \times D \times M \quad (\text{Equação 2})$$

Em que ECO2t é a emissão de CO₂ referente ao transporte, em kgCO₂, FEt é o fator de emissão, em kgCO₂/t.km, D é a distância percorrida pelo veículo, em quilômetros, e M é a massa do material, em toneladas.

Nas visitas técnicas realizadas, as fábricas informaram a localização dos seus fornecedores. Por motivos de sigilo industrial não será apresentada a localização, mas sim a distância, informação necessária para o cálculo.

As distâncias do modal rodoviário foram estimadas com o auxílio do Google Maps. Já as distâncias do modal hidroviário foram obtidas nas páginas da internet “Portos e Navios” e “Ports” (OLIVEIRA, 2014; PORTS, 2022). Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 9.

Novamente, foram utilizadas as quantidades necessárias para a produção de um m² de ladrilho. Quando foi necessário transformar volume em massa, foram utilizadas as massas unitárias apresentadas na Tabela 6.

Tabela 9 - Distância entre as fábricas dos materiais e as fábricas de ladrilhos. (Fonte: autora)

Material	Modal de transporte	Distância (km)		
		Fábrica A	Fábrica B	Fábrica C
Pigmento	Rodoviário	585	526	692
	Hidroviário	20.429,4	20.429,4	20.429,4
Cimento Branco	Rodoviário	585	526	N/A
	Hidroviário	13.951,12	13.951,12	N/A
Areia de quartzo	Rodoviário	191,0	N/A	N/A
Pó de mármore	Rodoviário	N/A	99	143
CP-II-E 32	Rodoviário	69,4	N/A	N/A
CP-II-F 32	Rodoviário	N/A	N/A	263
CP-III 32 RS	Rodoviário	N/A	100	N/A
Areia calcária	Rodoviário	88,1	N/A	N/A
Areia de britagem	Rodoviário	77,1	10	10
Areia de rio	Rodoviário	N/A	N/A	99

N/A: não aplicável

3.1.3 Processo produtivo

Nessa etapa serão contabilizadas as emissões referentes ao processo produtivo, desconsiderando as emissões relacionadas aos insumos de escritório e apoio necessários. Assim, nessa etapa serão consideradas apenas as emissões referentes ao consumo de energia elétrica. Como as fábricas visitadas utilizam prensa manual, esse consumo ocorreu somente com o uso de lâmpadas e betoneiras elétricas.

Nas visitas técnicas realizadas observou-se semelhança entre as fábricas no uso das lâmpadas. Sendo assim, para todas as fábricas foi considerado o uso de 1 lâmpada de LED de 9W, durante o tempo de 3 horas. Esse é o tempo necessário para a preparação dos materiais, produção do ladrilho e empacotamento de 1 m² do produto. Não foi contabilizado o tempo necessário para a cura, visto que não há necessidade de iluminação nesse processo.

A betoneira elétrica utilizada na Fábrica A e na Fábrica C era de 220 V, com capacidade do tambor de 400 litros. Entretanto, essas fábricas não souberam informar dados como marca e potência. Por esse motivo, optou-se por utilizar nos cálculos os

dados de uma betoneira da marca CSM, amplamente utilizada no Brasil. Essa betoneira funciona com tensão de 220 V e possui potência de 2 cv - aproximadamente 1470 W (DRAGUETTI, et al., 2020). Nas Fábricas A e C, a betoneira fica ligada 6 minutos e 15 minutos por traço, respectivamente.

A betoneira elétrica utilizada na Fábrica B é do tipo horizontal. Novamente, a Fábrica não soube informar dados como marca e potência. Por esse motivo, optou-se por utilizar nos cálculos os dados de uma betoneira horizontal da marca CSM. Essa betoneira funciona com tensão de 220 V e possui potência de 2 cv - aproximadamente 1470 W (DRAGUETTI, et al., 2020). Na Fábrica B, a betoneira fica ligada, normalmente, 3 minutos por traço. A Tabela 10 mostra os dados de potência e tempo de funcionamento da lâmpada e da betoneira das Fábricas A, B e C. Nessa tabela, os dados referentes à lâmpada são para a produção de 1 m² de ladrilho, enquanto os dados referentes à betoneira são para a produção de 1 traço da camada de tardo.

Tabela 10 - Potência e tempo de funcionamento dos itens elétricos utilizados nas Fábricas A e B. (Fonte: autora)

Itens	Fábrica A		Fábrica B		Fábrica C	
	Potência (W)	Tempo de func. (h)	Potência (W)	Tempo de func. (h)	Potência (W)	Tempo de func.
Betoneira	1470	0,1	1470	0,05	1470	0,25
Lâmpada	9	3	9	3	9	3

O total de emissão de CO₂ na etapa de processo produtivo pode ser determinado multiplicando o fator de emissão pela potência e pelo tempo de funcionamento dos equipamentos elétricos (Equação 3). No caso da betoneira, foi necessário ajustar a emissão para o volume de material proporcional a 1 m² de ladrilho hidráulico produzido. Na Fábrica A, um traço da camada de tardo tem um rendimento de 11,72 m², na Fábrica B tem um rendimento de 3,10 m² e na Fábrica C, 4,60 m². Dessa forma, os resultados finais foram divididos por seus respectivos rendimentos.

$$ECO2PP = FEPP \times P \times T \quad \text{(Equação 3)}$$

Em que, $ECO2PP$ é a emissão de CO_2 referente ao processo produtivo, $FEPP$ é o fator de emissão para o processo produtivo, em $kgCO_2/MWh$, P é a potência, em megawatt, e T é o tempo de funcionamento dos equipamentos, medido em horas.

O fator de emissão utilizado foi a média dos fatores médios anuais de 2019, 2020 e 2021 de emissão de CO_2 para energia elétrica brasileira (MCTIC, 2022), mostrados na Tabela 11. Essa decisão foi tomada visto que a emissão de 2021 era consideravelmente mais alta, devido ao aumento do uso das termelétricas, ocasionado por condições climáticas específicas daquele ano (MCTIC, 2022).

Tabela 11 - Fatores médios anuais de emissão de CO_2 para energia elétrica brasileira (MCTIC, 2022)

Ano	Fator médio ($kgCO_2/MWh$)
2019	75,0
2020	61,7
2021	126,4
Média	87,7

3.2 Consumo de energia

A determinação da energia incorporada nos ladrilhos hidráulicos foi realizada de forma similar à emissão de CO_2 . A avaliação do ciclo de vida foi realizada novamente com a abordagem “do berço ao portão”. Dessa forma, as etapas analisadas foram: (I) os materiais utilizados na fabricação, (II) o transporte até a fábrica e (III) o processo produtivo.

3.2.1 Materiais utilizados na fabricação

A energia incorporada nessa etapa pode ser estimada multiplicando a quantidade de material pelo seu índice de energia embutida. Este cálculo está apresentado na Equação 4 a seguir:

$$EE_{mat} = IE_{mat} \times Q \quad (\text{Equação 4})$$

Em que EEmat é a energia incorporada referente aos materiais, em MJ, IEmat é o índice de energia embutida, em MJ/unidade de medida e Q é a quantidade de material utilizado, em massa ou volume.

A quantidade de material foi a mesma determinada para a análise da emissão de CO₂ (Tabela 7). O índice de energia embutida foi adotado a partir da literatura e está apresentado na Tabela 12 a seguir. Novamente, a referência utilizada foi o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção – Sidac (MME & CBCS, 2022). O valor utilizado foi a média dos indicadores mínimo e máximo apresentados nesse sistema para cada material. No caso das areias, o valor máximo apresentado no Sidac foi transformado de kgCO₂/kg para kgCO₂/m³, a partir do produto entre o índice de energia e a massa unitária do material. Mais uma vez, para o pigmento e para o cimento branco foram utilizadas fontes alternativas ou índices de energia de materiais com composição similar. No caso do cimento branco, foi utilizado o índice de energia do cimento CP-I-S 32, devido à proximidade dos limites de composição estabelecidos na NBR 16697 – Cimento Portland - Requisitos (ABNT, 2018). Destaca-se que para o pó de mármore, por se tratar de um subproduto do corte e beneficiamento de rochas ornamentais, não foi considerado o CO₂ embutido nessa etapa (será considerado apenas na etapa seguinte, de transporte).

Tabela 12 - Índices de energia embutida por material utilizado na produção de ladrilho

Material	Unidade de medida (UM)	Índice de energia (MJ/UM)		
		Mínimo	Máximo	Adotado
Pigmento	kg	-	-	36,0589 ¹
Cimento Branco	kg	-	-	3,37 ²
Areia de quartzo	m ³	0,03 ²	274,0478	137,0389
Pó de mármore	kg	-	-	0,00
CP-II-E 32	kg	2,489	5,622	4,0555
CP-II-F 32	kg	3,096	5,527	4,3115
CP-III 32 RS	kg	1,839	4,426	3,1325
Areia calcária	m ³	0,03 ²	266,3118	133,1709
Areia de britagem	kg	0,002051	0,09613	0,04909
Areia de rio	m ³	0,03 ²	249,486	124,758

¹ (IBU, 2022); ² (BODE & GONÇALVES, 2015)

3.2.2 Transporte

A energia incorporada na etapa de transportes pode ser estimada multiplicando o índice de energia pela distância e pelo peso do material (Equação 5). Este cálculo está apresentado na Equação 5 a seguir.

$$EEt = IEt \times D \times M \quad (\text{Equação 5})$$

Em que EEt é a energia embutida referente ao transporte, em MJ, IEt é o índice de energia, em MJ/t.km, D é a distância percorrida pelo veículo, em quilômetros e M é a massa do material, em toneladas.

As distâncias e as massas dos materiais utilizados foram as mesmas determinadas para a análise da emissão de CO₂ (Tabela 7 e Tabela 9). Já o índice de energia embutida varia de acordo com o meio de transporte. De acordo com IFIB (1995 apud TAVARES, 2006), o índice de energia para navio de carga oceânico é de 0,13 MJ/km.t. Como foi discutido no tópico de transporte do CO₂ embutido, durante as entregas dos materiais há uma variabilidade no tamanho dos caminhões. Por este motivo, para o presente trabalho foi utilizado o valor médio apresentado no estudo de Tavares (2006), 1,62 MJ/km.t.

3.2.3 Processo Produtivo

A energia incorporada na etapa do processo produtivo pode ser determinada multiplicando a potência pelo tempo de funcionamento dos equipamentos. Como a potência está em Watts e o tempo em horas, foi necessário realizar a conversão de kWh para MJ, visto que essa é a unidade usual de medida de energia incorporada. Essa conversão é feita multiplicando o valor em kWh por 3,6. A Equação 6 apresenta o cálculo para a determinação da energia incorporada na etapa do processo produtivo.

$$EEPP = 3,6 \times P \times T \quad (\text{Equação 6})$$

Em que EEPP é a energia incorporada referente ao processo produtivo, em MJ, P é a potência, em kilowatt, e T é o tempo de funcionamento dos equipamentos, medido em horas. Os equipamentos, potências e tempos de funcionamento são os mesmos apresentados na Tabela 10 do tópico 3.1.3.

3.3 Componentes potencialmente tóxicos

A análise dos componentes potencialmente tóxicos foi realizada para duas situações distintas. A primeira foi a investigação dos ladrilhos hidráulicos, já a segunda foi a análise da água do tanque de cura dos ladrilhos, que é geralmente descartada na rede de esgoto municipal.

3.3.1 Análise dos ladrilhos hidráulicos

O primeiro passo para a análise dos componentes potencialmente tóxicos presentes nos ladrilhos foi a definição da amostra. Devido ao custo, ao tempo consumido e à similaridade entre os materiais, optou-se por não realizar a análise para os ladrilhos das três fábricas visitadas. A investigação da camada decorativa foi feita separadamente, em relação às camadas de secante e tardo, devido à presença do pigmento. Nesse ponto, optou-se por analisar conjuntamente as camadas de secante e tardo devido à dificuldade de diferenciação e separação entre as camadas e devido à semelhança entre seus componentes.

Determinou-se que o ladrilho analisado seria da Fábrica A e com pigmento vermelho. Essa escolha foi devido à ampla utilização histórica e à inviabilidade de analisar todas as tonalidades. As Fábricas A e C apresentavam o mesmo fornecedor de pigmento, enquanto a Fábrica B apresentava um fornecedor diferente. Sendo assim, foi decidido que também seria importante analisar a camada decorativa da Fábrica B. Dessa forma, tivemos ao todo 3 amostras investigadas: decorativa da Fábrica A, decorativa da Fábrica B e secante+tardo da Fábrica A. Essas amostras foram identificadas, respectivamente, por D-A, D-B e ST-A. O Quadro 3 apresenta essas identificações.

Quadro 3 - Identificação das amostras. (Fonte: autora)

Identificação	Amostra
D-A	Amostra da camada decorativa da Fábrica A
D-B	Amostra da camada decorativa da Fábrica B
ST-A	Amostra da camada de secante-tardoz da Fábrica A

O próximo passo foi a preparação das amostras. Os ladrilhos das Fábricas A e B foram quebrados com o uso de talhadeira e martelo, e fragmentos das camadas decorativa e secante+tardoz foram separadas. Em seguida, todas as amostras passaram pelo processo de maceração, com o uso de almofariz e pistilo, e peneiramento na malha #200 (75 µm). A Figura 28 apresenta a amostra D-A, antes da maceração, depois da maceração e depois do peneiramento.

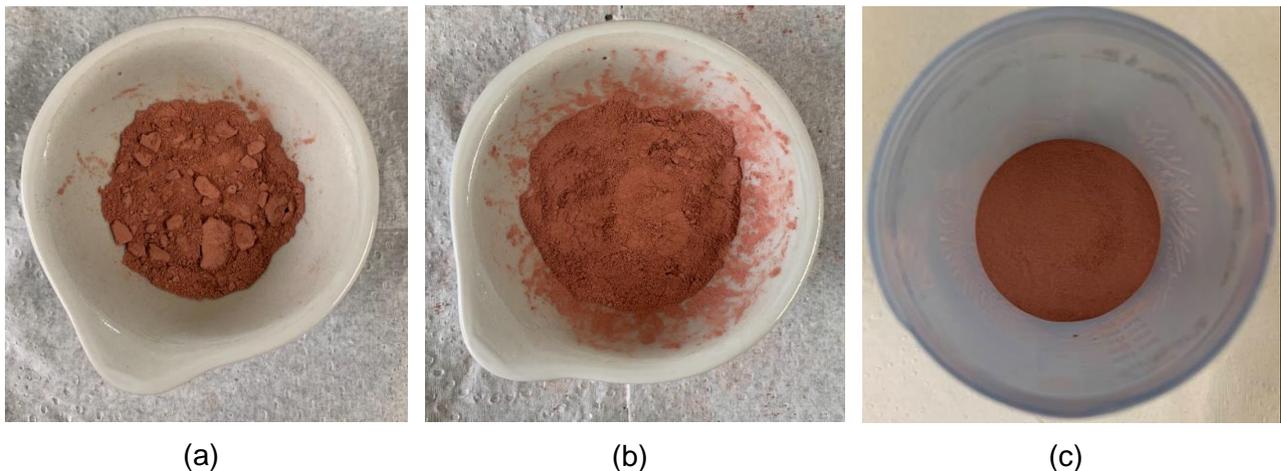


Figura 28 - Amostra da camada decorativa: a) antes da maceração; b) após a maceração e antes do peneiramento; c) após o peneiramento (Fonte: autora)

A partir desse ponto, a análise foi feita de acordo com a NBR 10005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos (ABNT, 2004b). Como todas as amostras analisadas eram sólidas, o primeiro passo foi a determinação da solução de extração. A Figura 29 ilustra esse procedimento em formato de fluxograma. De acordo com a NBR 10005 (ABNT, 2004b), existem duas possíveis soluções extratoras, são elas:

- a) Solução de extração 1: adicionar 5,7 ml de ácido acético glacial à água preparada conforme tópico 4.2.1 da norma. Adicionar 64,3 ml de NaOH 1,0 N. Completar o volume a 1 l. Por fim, o pH da solução deve ser $4,93 \pm 0,05$;
- b) Solução de extração 2: adicionar 5,7 ml de ácido acético glacial à água preparada conforme tópico 4.2.1 da norma. Completar o volume a 1 l. Por fim, o pH da solução deve ser $2,88 \pm 0,05$;

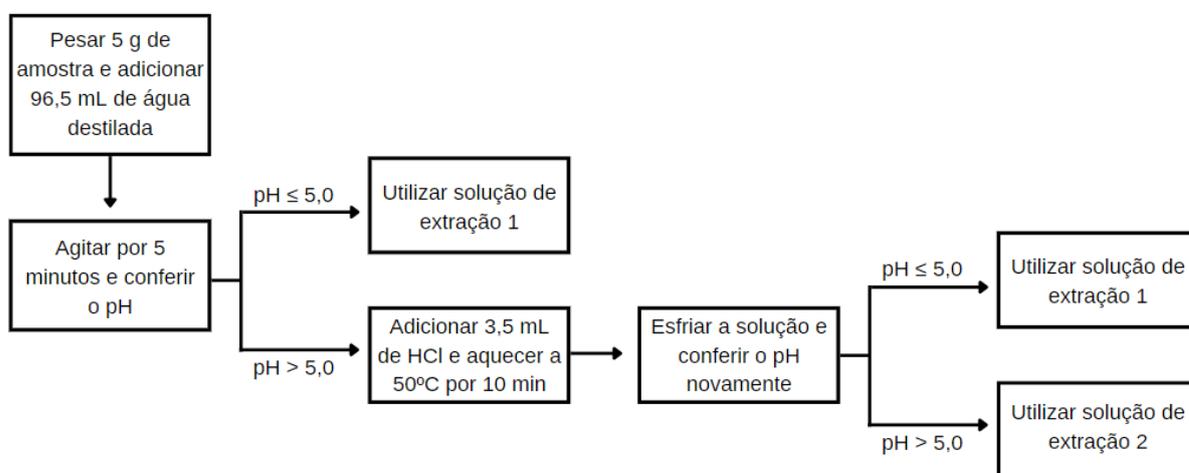


Figura 29 - Fluxograma da determinação da solução de extração. (Fonte: autora baseada na NBR 10005 (ABNT, 2004b))

Devido ao pequeno volume disponível de amostras, dada a dificuldade da separação entre as camadas, foi necessário reduzir as quantidades em cinco vezes. Sendo assim, foi pesado 1 g de amostra e utilizado 19,3 ml de água destilada. Todas as pesagens foram realizadas em uma balança analítica Shimadzu modelo ATX224 (Figura 30a). Em seguida as amostras foram agitadas e o pH foi medido. Todas as soluções apresentaram $\text{pH} > 5$. Assim, o próximo passo foi adicionar 0,7 mL de HCl e aquecer a 50°C por 10 minutos. As soluções foram aquecidas em banho ultrassônico no equipamento Elmasonic E30H Elma (Figura 30b). Após o aquecimento, foi necessário esfriar a solução para medir o pH novamente. Nesse ponto, as amostras D-A e ST-A apresentaram $\text{pH} < 5$ e a amostra D-B apresentou $\text{pH} > 5$. Sendo assim, foi utilizada a solução 1 para as amostras D-A e ST-A e a solução 2 para a amostra D-B.



(a)



(b)

Figura 30 – a) Balança analítica Shimadzu modelo ATX224; b) Equipamento Elmasonic E30H Elma (Fonte: autora)

A partir da determinação da solução de extração, o próximo passo foi realizar o ensaio de lixiviação de não-voláteis. A Figura 31 ilustra esse procedimento.

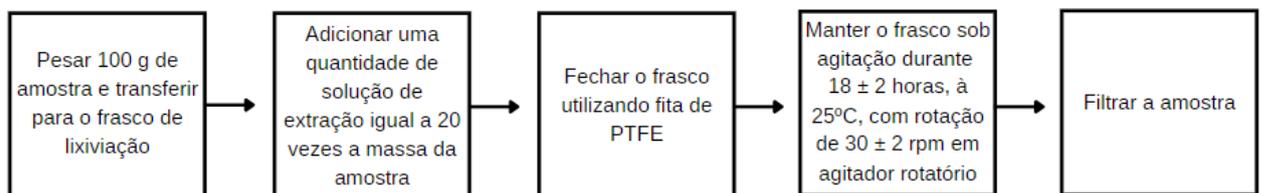


Figura 31 – Fluxograma do ensaio de lixiviação. (Fonte: autora, baseada na NBR 10005 (ABNT, 2004b))

Novamente, devido ao pequeno volume de amostras, foi necessário reduzir a quantidade utilizada. Nesse caso, a redução foi feita em 10 vezes. Sendo assim, foram pesados 10 g de amostra e adicionados 200 mL de solução de extração. A agitação foi feita durante 18 horas, a 25°C, com rotação de 30 rpm. O equipamento utilizado foi o agitador rotativo para não-voláteis, marca Tecnal, modelo TE-743 (Figura 32). Em seguida, a amostra foi filtrada no esquema apresentado na Figura 33. A membrana utilizada na filtragem foi da marca Millipore, 47 mm, 0,45 μm . Esse procedimento foi

realizado para as amostras D-A, D-B, ST-A e para as amostras de solução 1 e 2, para efeito comparativo.



Figura 32 - Agitador rotativo para não voláteis utilizado no ensaio de lixiviação. (Fonte: autora)



Figura 33 - Sistema de filtragem da amostra. (Fonte: autora)

Com a lixiviação feita, as amostras foram encaminhadas para análise no Laboratório de Espectrometria Atômica e Química Analítica Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais. Foi utilizado o equipamento espectrômetro de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS), marca Agilent modelo 7700x, apresentado na Figura 34. Por fim, a análise dos resultados foi feita de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004a).



Figura 34 - Espectrômetro de massas com plasma indutivamente acoplado. (Fonte: autora)

3.3.2 Análise da água do tanque de cura

Por fim, foi realizada a coleta e análise da água dos tanques de cura das fábricas de ladrilho. Novamente, devido ao custo da análise e à similaridade entre os processos produtivos, optou-se por não realizar a análise de todas as fábricas visitadas. Nesse contexto, a investigação foi feita para as Fábricas A e B. Determinou-se a coleta de 200 ml do objeto de estudo.

As amostras foram coletadas e armazenadas em frascos virgens. Em seguida, passaram pelo sistema de filtragem apresentado na Figura 33. Por fim, as amostras foram levadas para análise no instrumento ICP-MS para quantificação de metais e metaloides (Figura 34).

4 RESULTADOS

4.1 Emissão de CO₂

Os resultados para a emissão de CO₂ serão apresentados de acordo com as etapas calculadas, são elas (I) materiais utilizados na fabricação, (II) transporte e (III) processo produtivo. Por fim, será apresentado o CO₂ embutido global do material, através do somatório das emissões referentes a cada etapa. Para uma melhor apresentação dos dados, as emissões referentes às areias foram somadas, nomeadas como “agregados”, e não há diferenciação entre os cimentos CP-II-E 32, CP-II-F 32 e o CP-III 32 RS, ambos representados por “cimento”.

4.1.1 Materiais utilizados na fabricação

Os resultados encontrados para a etapa dos materiais utilizados na fabricação estão apresentados na Figura 35. Esses resultados são apresentados por material e por fábrica. A emissão total referente aos materiais corresponde a 9,0569, 5,5052 e 8,5735 kgCO₂/m² de ladrilho produzido nas Fábricas A, B e C, respectivamente. A emissão de CO₂ na Fábrica A é superior à da Fábrica C que é superior à da Fábrica B.

Para a camada de secante e tardoz, na Fábrica A é utilizado o CP-II-E 32, na Fábrica B é utilizado o CP-III 32 RS e na Fábrica C é utilizado o CP-II-F 32. Apesar do cimento CP-II E 32 possuir o fator de emissão menor do que o CP-II F 32, a emissão da Fábrica A nessa etapa foi maior do que da Fábrica C. Essa diferença pode ser explicada porque a Fábrica A utiliza uma maior quantidade de cimento por m² quando comparada às demais.

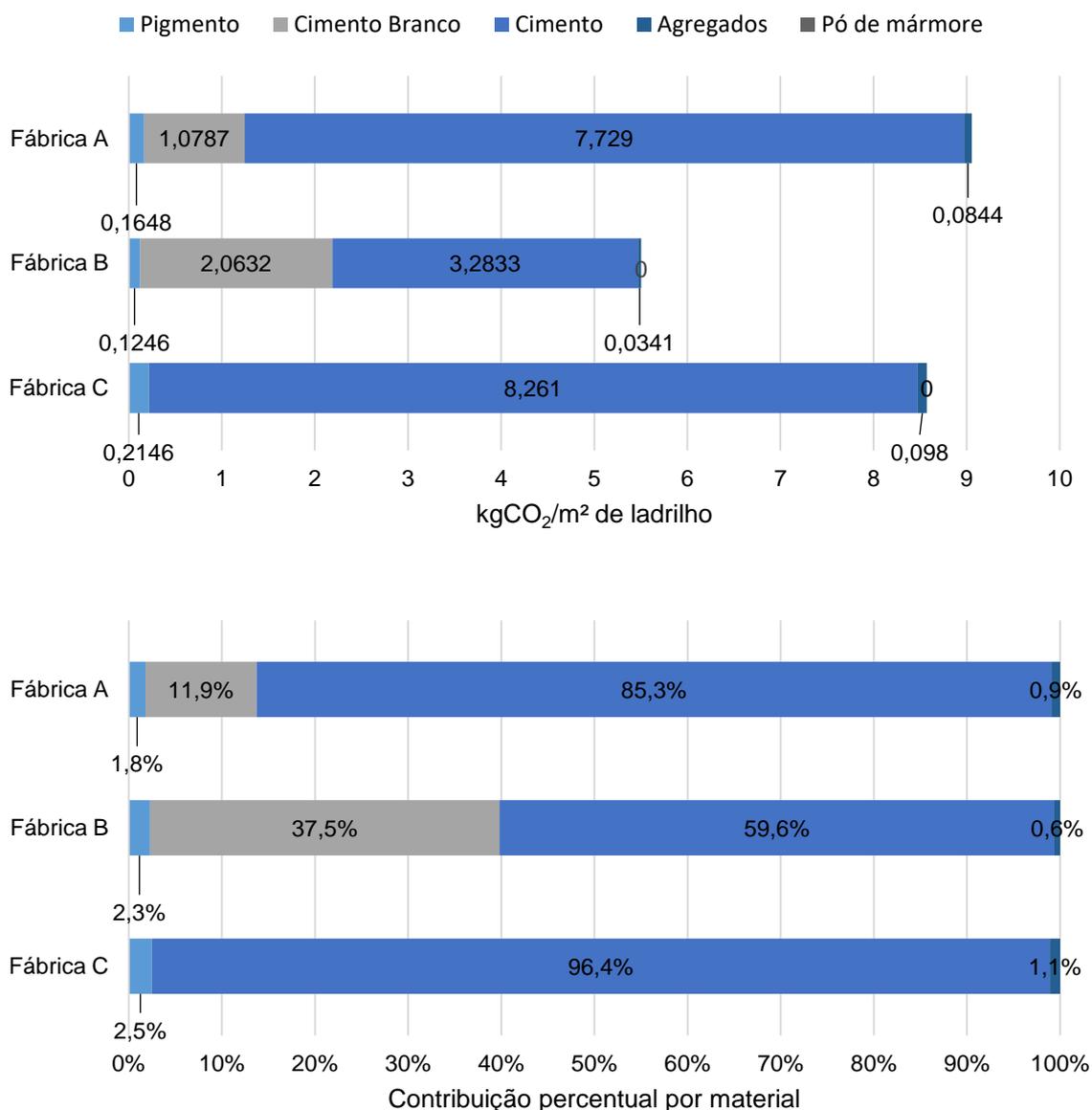


Figura 35 - Emissão de CO₂ por material na etapa de materiais utilizados na fabricação dos ladrilhos hidráulicos. (Fonte: autora)

De acordo com a figura apresentada, o material de maior contribuição percentual de emissão nas três fábricas visitadas é o cimento, com mais de 96% em todas. Esse resultado mostra como o cimento impacta no CO₂ embutido dos ladrilhos hidráulicos e destaca a importância da escolha dos materiais. Em todas as empresas, a contribuição percentual dos agregados miúdos (areias e pó de mármore) é menor que 2%.

Nesse ponto destaca-se que a Fábrica B é a empresa que possui a maior contribuição percentual relativa ao cimento branco. Esse resultado pode estar relacionado a um maior consumo de cimento branco nessa fábrica, devido à maior espessura da camada decorativa do ladrilho hidráulico. Essa camada é a única que leva cimento branco. Além disso, essa fábrica utiliza nas demais camadas o CP-III 32 RS, cimento com a menor emissão de CO₂. Sendo assim, na Fábrica B, o maior consumo de cimento branco juntamente com a menor emissão referente ao CP-III 32 RS levam ao aumento da contribuição percentual do cimento branco.

4.1.2 Transporte

Os resultados encontrados para a etapa do transporte são apresentados na Figura 36. Esses resultados são apresentados por material e por fábrica. A emissão total referente ao transporte corresponde a 0,6153, 0,9981 e 0,2110 kgCO₂/m² de ladrilho produzido nas Fábricas A, B e C, respectivamente. A emissão de CO₂ na Fábrica B é superior à da Fábrica A que é superior à da Fábrica C. Isso pode ser explicado pelo maior consumo de cimento branco na Fábrica B, visto que esse material percorre uma longa distância. A Fábrica C, por não utilizar esse material, possui uma emissão nessa etapa consideravelmente inferior às demais empresas.

De acordo com a Figura 36, o material de maior contribuição percentual nas Fábricas A e B é o cimento branco. Isso pode ser explicado por ele ser um material importado e percorrer longas distâncias no modal hidroviário. A contribuição percentual desse material na Fábrica B (92,7%) é superior à da Fábrica A (79,4%). Isso se deve ao maior consumo de cimento branco na Fábrica B, mesmo a distância de transporte sendo ligeiramente menor.

Já na Fábrica C, o material de maior contribuição percentual é o cimento. Isso pode ser explicado pela grande quantidade utilizada na produção, já que esse material é empregado nas três camadas. Nessa empresa destaca-se a alta contribuição do pigmento e dos agregados. No caso do pigmento, isso pode ser explicado por ser um

material importado. No caso dos agregados, a alta contribuição se deve ao grande volume utilizado.

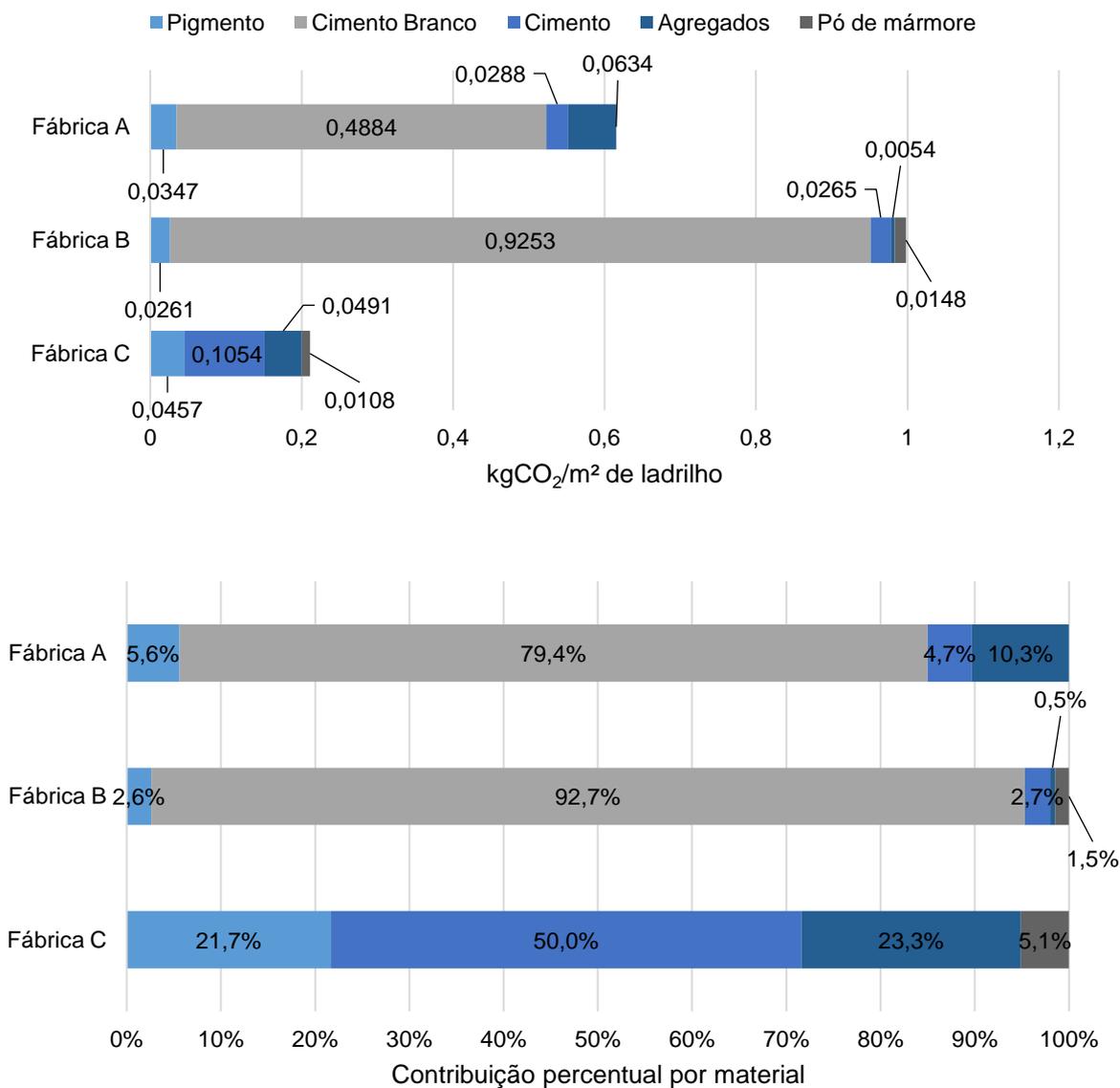


Figura 36 - Emissão de CO₂ por material na etapa de transporte. (Fonte: autora).

A Figura 37 compara as emissões referentes ao modal rodoviário e hidroviário. Nas Fábricas A e B, a maior emissão é referente ao modal hidroviário, enquanto na Fábrica C é referente ao modal rodoviário. Essa diferença se deve ao uso do cimento

branco importado nas duas primeiras fábricas, sendo que a Fábrica B consome uma maior quantidade desse material.

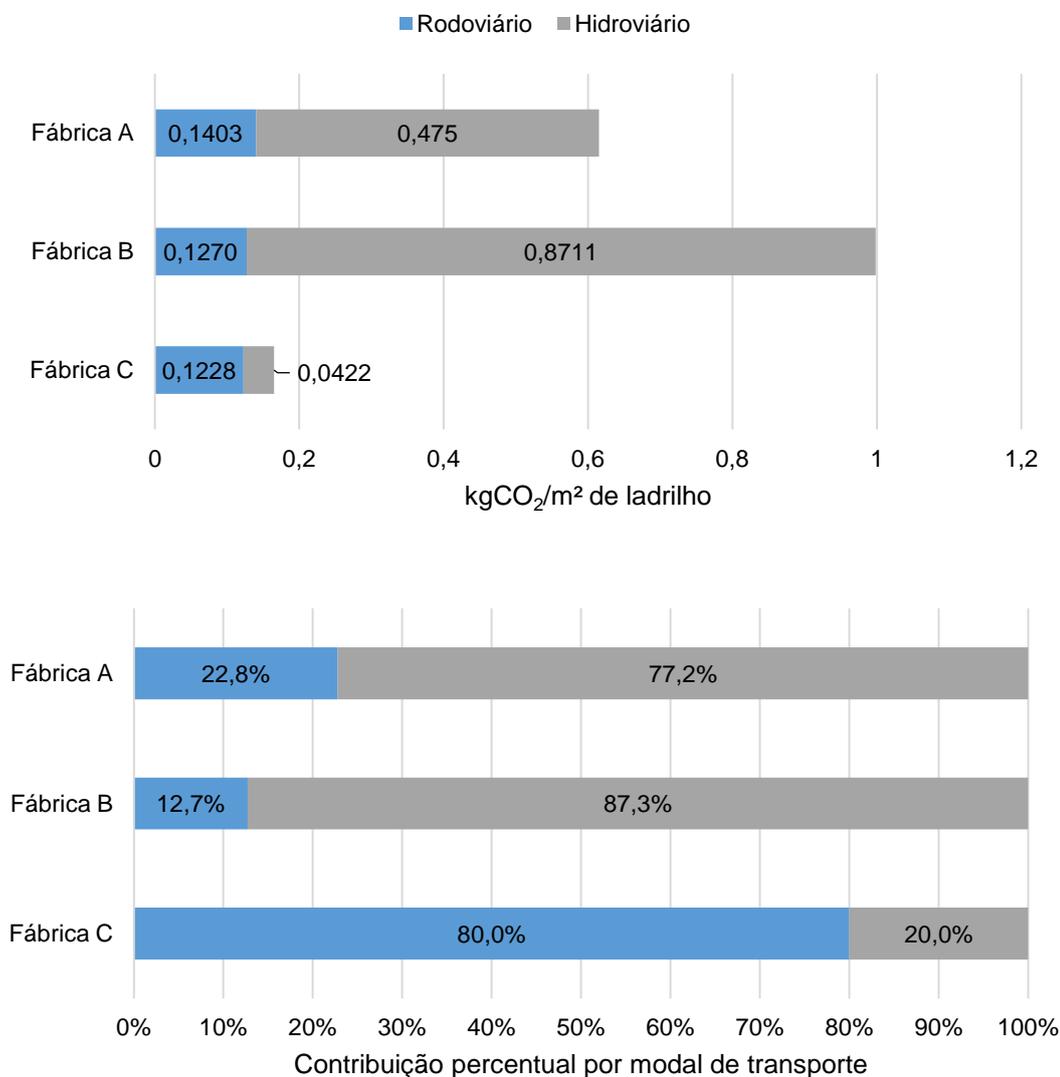


Figura 37 – Emissão de CO₂ por modal de transporte. (Fonte: autora)

4.1.3 Processo produtivo

Os resultados encontrados para a etapa de processo produtivo estão descritos na Figura 38. São apresentados os resultados em kgCO₂ por m² de ladrilho produzido por item utilizado e a contribuição percentual de cada item. A emissão total referente ao processo produtivo corresponde a 0,0035, 0,0044 e 0,0094 kgCO₂/m² de ladrilho produzido nas Fábricas A, B e C, respectivamente. A emissão de CO₂ na Fábrica C é

superior à da Fábrica B que é superior à da Fábrica A. Dois fatores principais impactam nesse resultado: o tempo que a betoneira fica ligada e o volume de material por betonada. A Fábrica C é a empresa que deixa a betoneira ligada por mais tempo (15 minutos), fato que justifica a maior emissão nessa fábrica. Já a Fábrica A é a empresa que insere o maior volume de material na betoneira, justificando sua baixa emissão. A emissão referente às lâmpadas é a mesma em todas as empresas, devido à similaridade entre os ambientes de trabalho. Nota-se que nenhuma das empresas visitadas utilizava prensas hidráulicas em seus processos produtivos, o que aumentaria o CO₂ embutido nessa etapa.

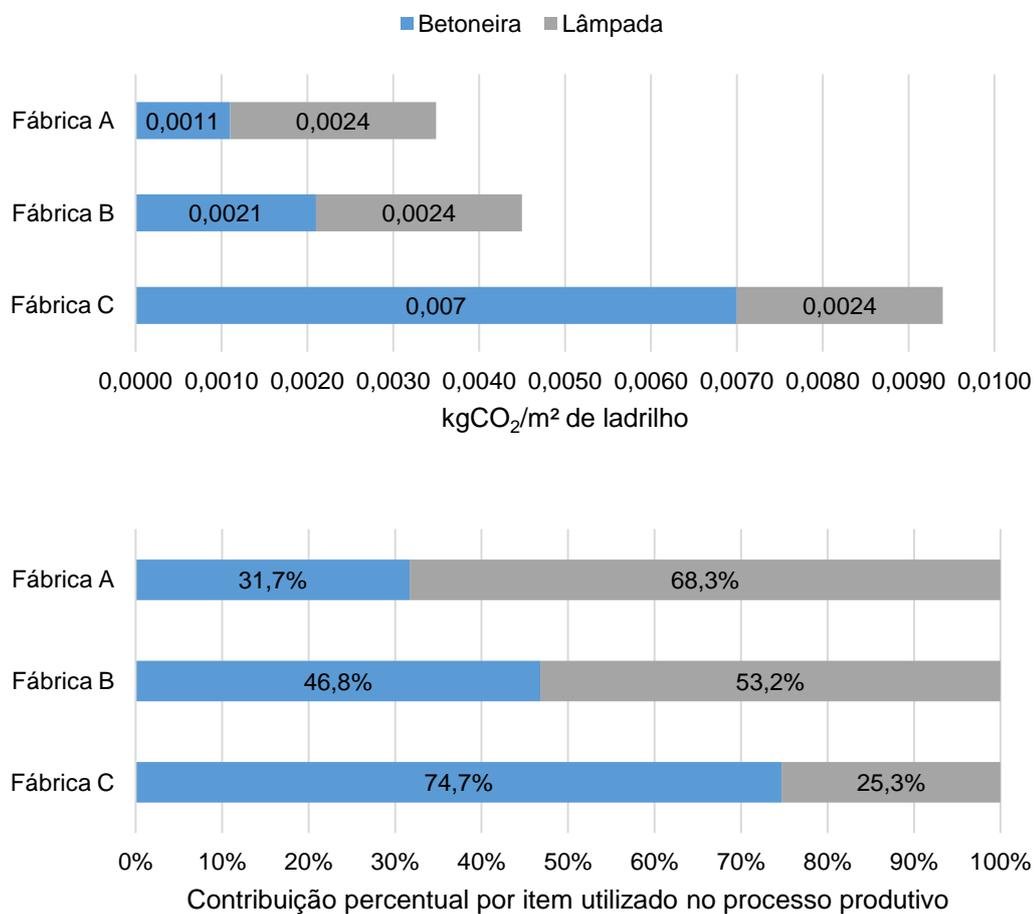


Figura 38 - Emissão de CO₂ por item utilizado no processo produtivo. (Fonte: autora)

4.1.4 CO₂ embutido total

Neste tópico será apresentado o resultado do CO₂ embutido total dos ladrilhos hidráulicos das Fábricas A, B e C. Esse resultado foi calculado a partir do somatório das 3 etapas analisadas anteriormente: (I) materiais utilizados na fabricação, (II) transporte e (III) processo produtivo. A Figura 39 apresenta o resultado do CO₂ embutido total por metro quadrado de ladrilho hidráulico e a contribuição percentual de cada etapa.

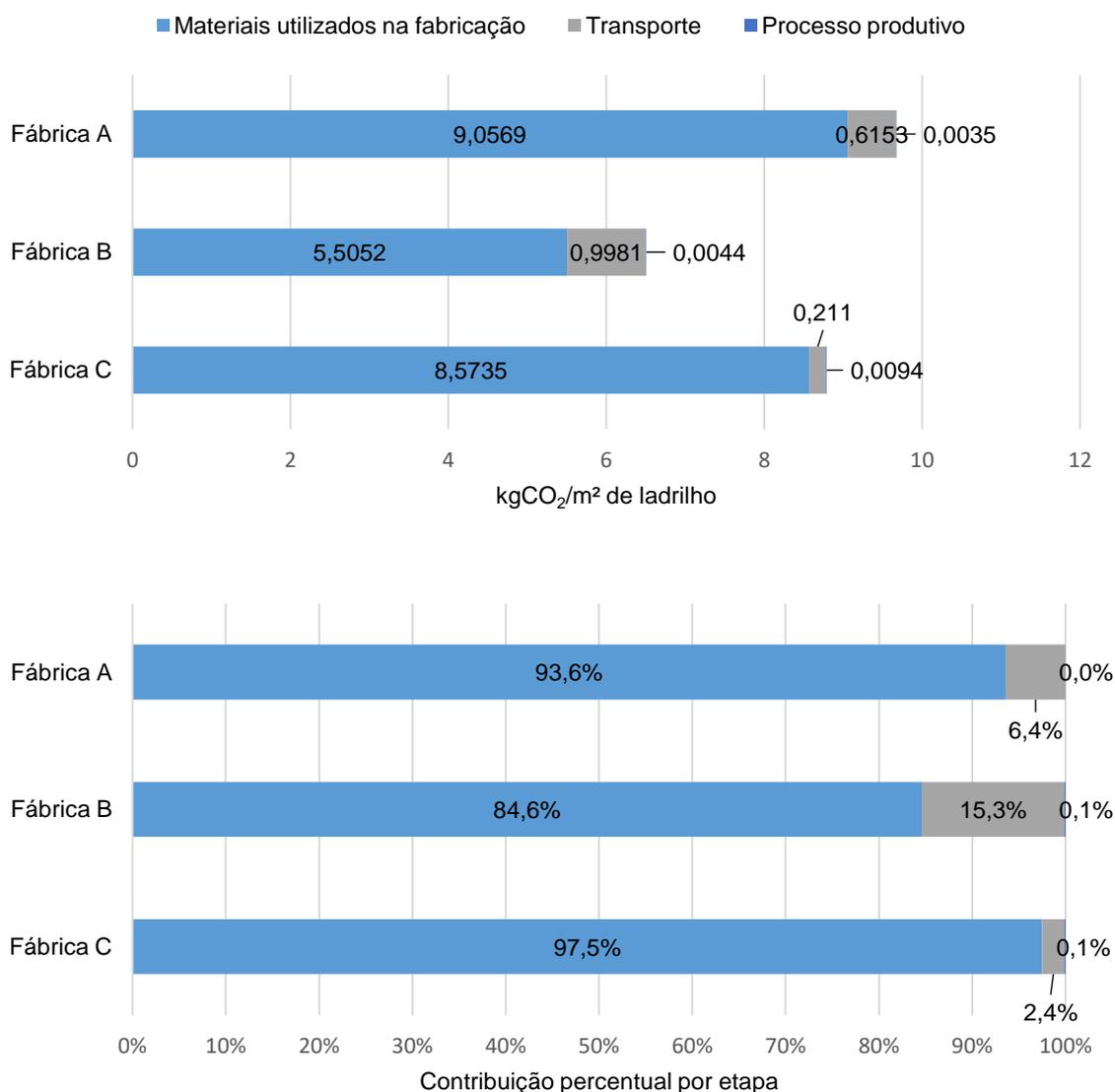


Figura 39 - CO₂ embutido dos ladrilhos hidráulicos. (Fonte: autora)

O CO₂ embutido total dos ladrilhos hidráulicos corresponde a 9,6757, 6,5078 e 8,7939 kgCO₂/m² de ladrilho produzido nas Fábricas A, B e C, respectivamente. A emissão de CO₂ na Fábrica A é superior à da Fábrica C que é superior à da Fábrica B. Isso pode ser explicado pelo traço e pelo tipo de cimento utilizado em cada empresa, já que este é um material de alto fator de emissão e grande volume utilizado.

De acordo com a Figura 39, a etapa de maior contribuição percentual é a de materiais utilizados, seguida da etapa de transporte. A contribuição relativa da etapa de processo produtivo se aproxima de zero, fato que se justifica pela artesanidade do processo de fabricação dos ladrilhos. A Fábrica B apresenta a maior contribuição percentual da etapa de transporte. Isso pode ser explicado pelo aumento da emissão de CO₂ nessa etapa e diminuição da emissão de CO₂ na etapa de materiais utilizados, quando comparado às demais empresas. A Fábrica C apresenta a maior contribuição percentual da etapa de materiais utilizados. Isso pode ser explicado pelo uso do CP-II-F 32 nas camadas de secante e tardez e pela baixa emissão na etapa de transportes.

A média dos valores de CO₂ embutido das três empresas analisadas é de 8,3258 kgCO₂/m² de ladrilho, com um desvio padrão de 1,6350 kgCO₂/m², 19,6% em relação à média. É importante destacar que esse valor é referente aos ladrilhos com a camada decorativa vermelha. Tonalidades diferentes alteram os materiais e traços da camada decorativa. As três fábricas visitadas apontaram que, dependendo da tonalidade pretendida, utilizavam cimento comum ou cimento branco na camada decorativa em diferentes consumos, o que impacta ligeiramente nos valores finais de CO₂ embutido. Entretanto, devido às dezenas de cores disponíveis em cada fábrica, seria inviável fazer essa análise para cada pigmento, de forma que a cor vermelha (historicamente amplamente utilizada) foi selecionada para a análise.

Assim, pode-se concluir que a escolha dos materiais utilizados possui um significativo impacto no CO₂ embutido. A Fábrica B foi a empresa que apresentou o menor valor total de CO₂ embutido. Essa empresa utiliza o CP-III 32 RS na sua produção, cimento com maior percentual de escória e, portanto, menor emissão de CO₂. Isso mostra que pequenas mudanças podem trazer significativas diminuições no impacto ambiental do material. Dentre essas mudanças, pode-se citar, o tipo de

cimento, a compra em fornecedores locais, a incorporação de resíduos na fabricação, dentre outros.

Para fins de comparação, de acordo com Costa (2012), os revestimentos cerâmicos possuem um fator de emissão de 0,1873 kgCO₂/kg, considerando a abordagem “do berço ao local”. Esta abordagem leva em consideração todas as etapas que foram abordadas neste estudo mais a etapa de transporte da fábrica até o consumidor, em que foi considerada a distância de 778 km. Para transformar o fator de emissão dos ladrilhos de m² para kg, foi necessário determinar a massa de 1 m² de ladrilho. Esse cálculo foi feito multiplicando a massa de cada ladrilho, apresentada na Tabela 4, por 25 (quantidade de ladrilhos por m²). Dessa forma, o fator de emissão por quilograma de ladrilho hidráulico pode ser calculado dividindo o CO₂ embutido total calculado pela massa de 1 m².

Para comparar os resultados entre ladrilhos e revestimentos cerâmicos, foi determinado o CO₂ embutido do ladrilho na abordagem do berço ao local. Para isso, foi considerado um transporte rodoviário com a mesma distância de 778 km entre a fábrica e o consumidor final. Para esse cálculo foi utilizado o mesmo fator de emissão utilizado no presente trabalho. Essa escolha foi feita apenas para a comparação com o trabalho de Costa (2012), entretanto é importante destacar a necessidade de um estudo futuro de dinâmica comercial para a determinação de um resultado mais fidedigno. A Tabela 13 apresenta o resultado encontrado.

Tabela 13 – CO₂ embutido/kg de ladrilho hidráulico. (Fonte: autora)

Fábrica	Massa (kg/m²)	CO₂ embutido - Berço ao portão (kgCO₂/m²)	CO₂ embutido - Berço ao portão (kgCO₂/kg)	CO₂ embutido - Transporte¹ (kgCO₂/kg)	CO₂ embutido - Berço ao local¹ (kgCO₂/kg)
A	32,8	9,6757	0,2950	0,0288	0,3238
B	32,2	6,5078	0,2021	0,0288	0,2309
C	34,6	8,7939	0,2542	0,0288	0,2830
Média	33,2	8,3258	0,2504	0,0288	0,2792

¹ Considerando a distância de 778 km para fins de comparação com a literatura

O resultado mostra que a média do CO₂ embutido total dos ladrilhos hidráulicos estudados é de 0,2792 kgCO₂/kg. Esse resultado é 49% superior ao dos revestimentos cerâmicos. Esse resultado mostra que, apesar de não possuir uma etapa de queima, os ladrilhos hidráulicos possuem um valor de CO₂ embutido superior ao dos revestimentos cerâmicos, o que está relacionado ao alto consumo de cimento na produção dos ladrilhos.

Cabe ressaltar que a distância de entrega equivalente à dos pisos cerâmicos calculada para os ladrilhos hidráulicos para fins de comparação é provavelmente superestimada. Diferentemente das fábricas de pisos cerâmicos, que são grandes indústrias localizadas em pontos espaçados e normalmente próximos de grandes capitais, as fábricas de ladrilho hidráulico são pequenas e pulverizadas pelo território brasileiro. Adicionalmente, os responsáveis de todas as fábricas visitadas mencionaram que entregam para todo o Brasil, mas a maior parte da produção é vendida para os maiores centros urbanos mais próximos (capitais ou grandes cidades). Isso dá uma distância de 70km para a Fábrica B a 175km para a Fábrica A. Um estudo mais aprofundado é recomendado no futuro, para que seja possível calcular com maior realismo a ACV do berço ao local.

Também é importante destacar que os ladrilhos são um material de alto custo comparado aos pisos cerâmicos, mas possuem características atemporais e são conhecidos por sua alta durabilidade. Apesar de não ter sido encontrado nenhum estudo sobre a durabilidade dos ladrilhos, todas as fábricas visitadas informaram que eles duram mais de 100 anos, o que é comprovado por sua presença em diversas edificações brasileiras históricas. Já os revestimentos cerâmicos são encontrados com baixo custo, estão ligados às tendências do mercado e, de acordo com Tavares (2006), possuem uma durabilidade média de 30 anos. Dessa forma, em uma construção, o revestimento cerâmico tende a ser trocado em um intervalo de tempo menor que o ladrilho hidráulico. Sendo assim, os ladrilhos potencialmente se tornam mais ambientalmente vantajosos a longo prazo.

4.2 Consumo de energia

Os resultados para o consumo de energia serão apresentados de acordo com as etapas calculadas, são elas: (I) materiais utilizados na fabricação, (II) transporte e (III) processo produtivo. Por fim, será apresentada a energia incorporada do material, através do somatório das emissões referentes a cada etapa. Para uma melhor apresentação dos dados, da mesma forma que para o CO₂ embutido, as energias incorporadas referentes às areias foram somadas, nomeadas como “agregados”, e não há diferenciação entre os cimentos CP-II-E 32, CP-II-F 32 e o CP-III 32 RS, ambos representados por “cimento”.

4.2.1 Materiais utilizados na fabricação

Os resultados encontrados para a etapa dos materiais utilizados na fabricação estão apresentados na Figura 40. A energia incorporada total referente aos materiais corresponde a 57,8276, 39,6664 e 49,9222 MJ/m² de ladrilho produzido nas Fábricas A, B e C, respectivamente. A energia incorporada da Fábrica A é superior ao da Fábrica C que é superior ao da Fábrica B. Isso pode ser explicado pelo traço e pelo tipo de cimento utilizado. Como já foi visto, as Fábricas A e C utilizam os cimentos CP-II-E 32 e CP-II-F 32, respectivamente, enquanto a Fábrica B utiliza o CP-III 32 RS. O cimento CP-III 32 RS possui um índice de energia inferior ao demais tipos, diminuindo assim a energia incorporada na Fábrica B. Além disso, a Fábrica A utiliza um maior volume de cimento na produção dos ladrilhos.

De acordo com a Figura 40, o material de maior contribuição percentual nas três fábricas visitadas é o cimento. Esse resultado está de acordo com o ocorrido na análise de CO₂ embutido, já que não há variação nos quantitativos dos materiais. Também é importante destacar a elevada contribuição do pigmento e a baixa contribuição dos agregados.

Ao somar o percentual do cimento branco com o cimento em todas as fábricas, nota-se que a contribuição fica superior a 86%. Similarmente ao cálculo do CO₂ embutido, é possível observar o significativo impacto gerado pelo cimento e a importância da escolha dos materiais. A escolha do cimento CP-III 32 RS na Fábrica

B gerou uma diminuição de mais de 10 MJ/m² de ladrilho produzido quando comparado às demais fábricas.

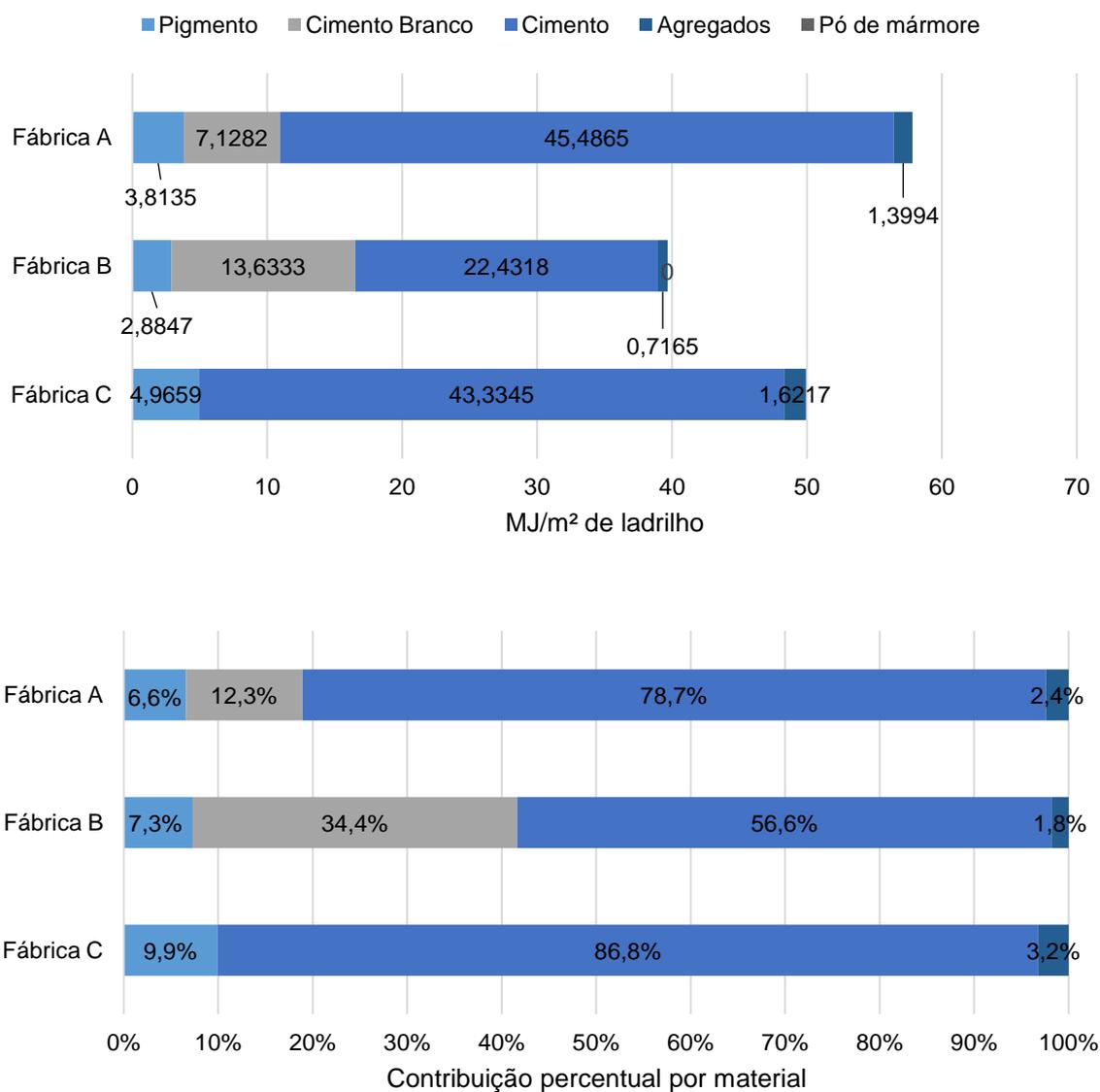


Figura 40 – Energia incorporada por material na etapa de materiais utilizados na fabricação dos ladrilhos hidráulicos. (Fonte: autora)

4.2.2 Transporte

Os resultados encontrados para a etapa do transporte são apresentados na Figura 41. Esses resultados são apresentados por material e por fábrica. A energia incorporada total referente ao transporte corresponde a 10,2655, 13,1162 e 7,7551

MJ/m² de ladrilho produzido nas Fábricas A, B e C, respectivamente. A energia incorporada da Fábrica B é superior à da Fábrica A, que é superior à da Fábrica C. Isso pode ser explicado pelo consumo de cimento branco, já que esse material percorre longas distâncias. A Fábrica B é a empresa que utiliza a maior quantidade desse material, seguido da Fábrica A e, por fim, a Fábrica C, que não faz uso do cimento branco na tonalidade estudada.

Outro ponto a ser destacado é o maior valor de energia incorporada referente ao cimento na Fábrica C. Isso pode ser explicado pela distância entre o fornecedor e a fábrica, que é superior às demais empresas, e pelo maior volume de material utilizado, visto que o cimento é utilizado nas três camadas. Além disso, destaca-se o menor valor de energia incorporada referente aos agregados na Fábrica B. Esse resultado pode estar relacionado com o fato dessa empresa utilizar apenas a areia de britagem como agregado e comprar de fornecedores locais.

De acordo com a Figura 41, o material de maior contribuição percentual nas Fábricas A e B é o cimento branco, enquanto na Fábrica C é o cimento. Esse resultado está de acordo com o observado na análise de CO₂ embutido e reforça o significativo impacto do cimento na produção dos ladrilhos hidráulicos.

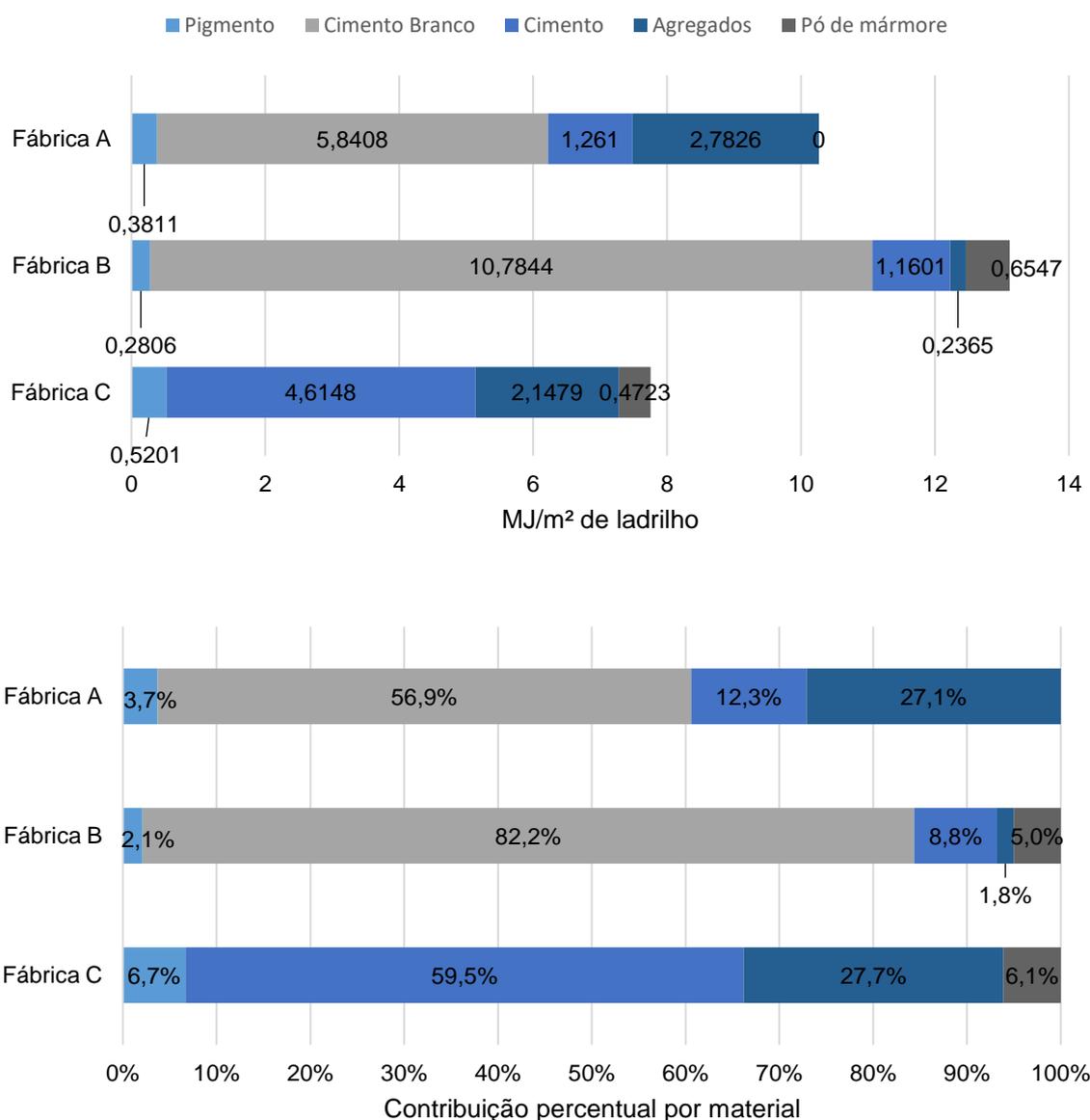


Figura 41 - Energia incorporada por material na etapa de transporte. (Fonte: autora).

A Figura 42 compara as emissões referentes ao modal rodoviário e hidroviário. Nas Fábricas A e C, a maior emissão é referente ao modal rodoviário, enquanto na Fábrica B é referente ao modal hidroviário. Esse resultado difere do observado na análise de CO₂ embutido. Naquela análise as contribuições percentuais do modal hidroviário eram significativamente superiores e a Fábrica A possuía o modal hidroviário como o principal emissor. Essa mudança pode ser explicada pela relação entre os fatores de emissão e índices de energia dos dois modais. Na análise de CO₂

embutido, o fator de emissão do modal rodoviário é aproximadamente, 147% superior ao modal hidroviário. Já na análise de energia incorporada, o índice de energia do modal rodoviário é 1146% superior ao modal hidroviário. Sendo assim, o modal rodoviário teve um maior impacto na análise de energia incorporada.

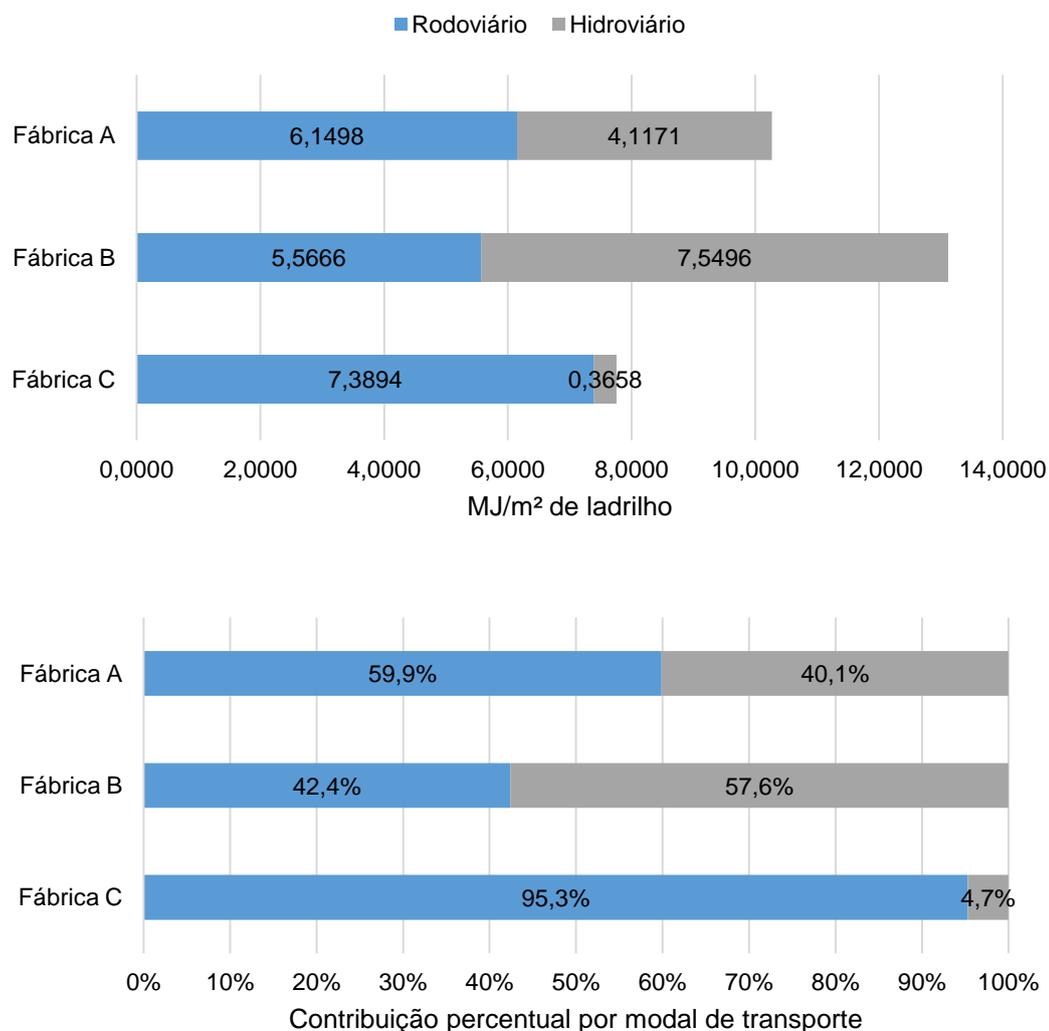


Figura 42 - Energia incorporada por modal de transporte. (Fonte: autora)

4.2.3 Processo produtivo

Os resultados encontrados para a etapa de processo produtivo estão descritos na Figura 43. A energia incorporada total referente ao processo produtivo corresponde a 0,1424, 0,1826 e 0,3848 MJ/m² de ladrilho produzido nas Fábricas A, B e C, respectivamente. A energia incorporada da Fábrica C é superior à da Fábrica B que é

superior à da Fábrica A. Novamente, os dois principais fatores que impactam nesse resultado são o tempo que a betoneira fica ligada e o volume de material por betonada. Sendo assim, repete-se o que ocorreu na análise de CO₂ embutido, já que não há variação no processo produtivo. Inclusive não há variação nos percentuais de contribuição de cada item ao comparar a análise de CO₂ embutido com a de energia incorporada.

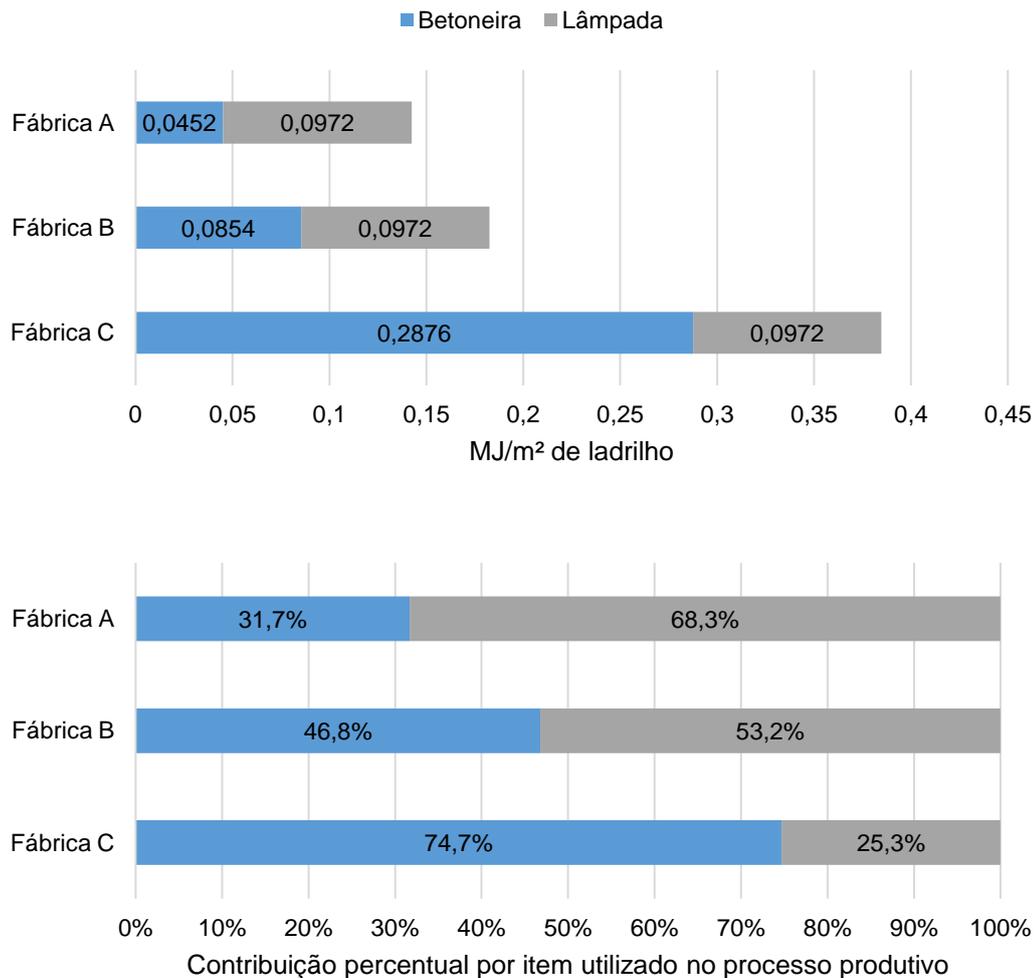


Figura 43 - Energia incorporada por item utilizado no processo produtivo. (Fonte: autora)

4.2.4 Energia incorporada total

Neste tópico será apresentado o resultado da energia incorporada total dos ladrilhos hidráulicos das Fábricas A, B e C. Esse resultado foi calculado a partir do somatório das 3 etapas analisadas anteriormente: (I) materiais utilizados na

fabricação, (II) transporte e (III) processo produtivo. A Figura 44 apresenta o resultado da energia incorporada total por metro quadrado de ladrilho hidráulico e a contribuição percentual de cada etapa no total de energia embutida dos ladrilhos hidráulicos das Fábricas A, B e C. É importante destacar que o valor encontrado é referente aos ladrilhos hidráulicos com a camada decorativa vermelha.

A energia incorporada total dos ladrilhos hidráulicos corresponde a 68,2369, 52,9652 e 58,0621 MJ/m² de ladrilho produzido nas Fábricas A, B e C, respectivamente. A média dos valores é de 59,7547 MJ/m² de ladrilho, com um desvio padrão de 7,7753 MJ/m², 13,0% em relação à média. A energia incorporada na Fábrica A é superior à da Fábrica C que é superior à da Fábrica B. A diferença entre a Fábrica A e a C aparece, principalmente, na etapa de materiais utilizados na fabricação. Essa diferença foi melhor explicada no tópico 4.2.1 e é justificada pelo traço e pelo tipo de cimento. A Fábrica B apresenta o menor valor de energia incorporada total. Isso pode ser explicado pelo uso do cimento CP-III 32 RS, que possui um menor teor de clínquer (ABNT, 2018) e, portanto, um menor consumo de energia.

De acordo com a Figura 44, a etapa de maior contribuição percentual é a de materiais utilizados, seguida da etapa de transportes. Novamente, a contribuição da etapa de processo produtivo é significativamente inferior às demais. Isso ocorre devido à artesanidade do processo de fabricação. Esse resultado está de acordo com o observado na análise de CO₂ embutido. A Fábrica B apresenta a maior contribuição percentual da etapa de transportes, fato que se justifica pelo maior consumo de cimento branco e utilização do CP-III 32 RS, que diminui a energia incorporada da etapa de materiais utilizados. A Fábrica C, por sua vez, apresenta as maiores contribuições percentuais das etapas de materiais utilizados e processo produtivo. Isso pode ser explicado pela menor energia incorporada na etapa de transportes e pelo maior tempo de uso da betoneira, respectivamente.

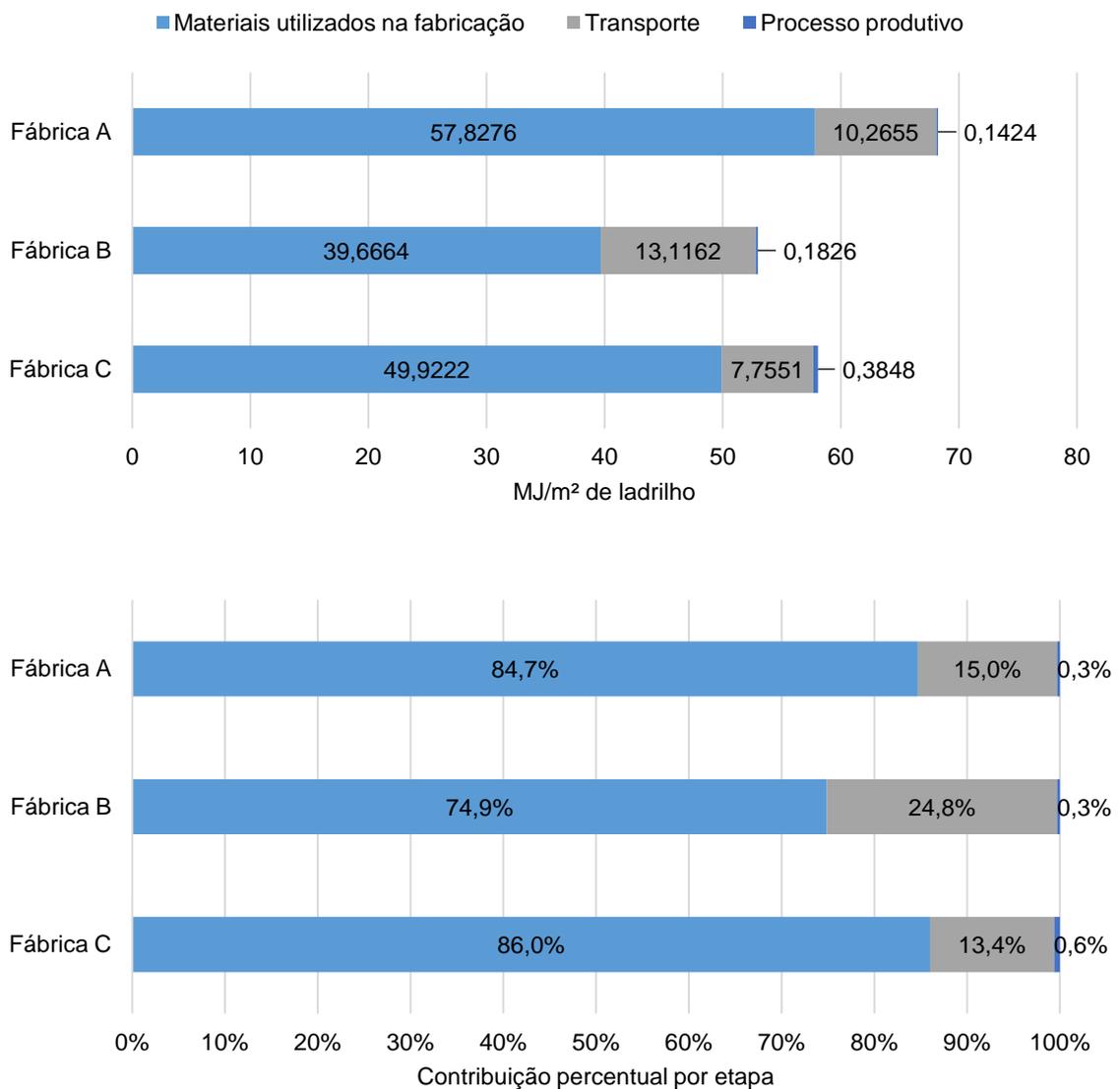


Figura 44 - Energia incorporada dos ladrilhos hidráulicos. (Fonte: autora)

Para fins de comparação, o estudo de Tavares (2006) apresenta valores de energia incorporada para revestimentos de piso e parede na abordagem “berço ao túmulo”. Esses valores são apresentados em MJ/kg. Para realizar a comparação entre o ladrilho hidráulico e os demais revestimentos, foi necessário transformar a energia incorporada do ladrilho de MJ/m² para MJ/kg. Essa transformação foi feita dividindo-se a energia incorporada pela massa dos ladrilhos das Fábricas A, B e C. A Tabela 14 apresenta os resultados encontrados para essa transformação e a Tabela 15

apresenta os valores de energia incorporada para os ladrilhos e os demais revestimentos.

Tabela 14 - Energia incorporada dos ladrilhos hidráulicos (MJ/kg). (Fonte: autora)

Fábrica	Massa (kg/m²)	Energia incorporada (MJ/m²)	Energia incorporada (MJ/kg)
A	32,8	68,2369	2,0804
B	32,2	52,9652	1,6449
C	34,6	58,0621	1,6781
Média	33,2	59,7547	1,8011

Tabela 15 - Energia incorporada de revestimentos

Revestimento	EI (MJ/kg)	Fonte	Abordagem
Ladrilho hidráulico	1,80	Autora	Berço ao portão
Cerâmica - azulejo	6,20	(TAVARES, 2006)	Berço ao túmulo
Cerâmica - porcelanato	13,00	(TAVARES, 2006)	Berço ao túmulo
Cerâmica – piso esmaltado	5,00	(TAVARES, 2006)	Berço ao túmulo
Madeira – laminada colada	7,50	(TAVARES, 2006)	Berço ao túmulo
Papel de parede	36,40	(TAVARES, 2006)	Berço ao túmulo

Os valores apresentados na Tabela 15 estão em abordagens diferentes e, por esse motivo, é preciso ter cautela na comparação e alguns pontos precisam ter atenção. O primeiro deles é que os valores de energia incorporada estão em MJ/kg. O papel de parede, por exemplo, apresenta um valor significativamente superior aos demais, entretanto 1 kg de papel de parede faz o revestimento de uma área maior do que 1 kg de ladrilho hidráulico. Para uma melhor comparação seria necessário que os valores estivessem em MJ/m² de revestimento. Conforme pesquisa da autora em peças disponíveis atualmente no mercado, porcelanatos pesam em média 18-28 kg/m², pisos cerâmicos esmaltados, 6-16 kg/m² e madeira laminada, 5-8 kg/m².

Assumindo valores médios para cada item, tem-se que o consumo energético de porcelanatos seria 299 MJ/m², de pisos cerâmicos convencionais, 55 MJ/m² e de pisos laminados, 48,75 MJ/m². Portanto, os porcelanatos apresentam energia incorporada significativamente superior aos demais. Para comparação desses valores com os ladrilhos hidráulicos, seria necessário calcular o valor da energia incorporada dos ladrilhos na abordagem do berço ao túmulo.

Outro ponto que precisa de atenção é a matriz energética. É necessário verificarmos o valor da energia embutida do material, mas é igualmente necessário verificar a fonte dessa energia. Um material pode apresentar valor de energia incorporada superior aos demais, mas utilizar, em sua maioria, fontes renováveis de energia. Assim, esse material com maior energia incorporada pode possuir um menor impacto ambiental do que outro com energia incorporada inferior, mas que utiliza, em sua maioria, fontes não-renováveis. Sendo assim, a discussão sobre a energia incorporada não deve ficar apenas no patamar de qual é superior/inferior aos demais, mas sim aprofundar a discussão sobre as fontes de energia utilizadas.

4.3 Presença de componentes potencialmente tóxicos

Os resultados para a presença de componentes potencialmente tóxicos serão apresentados para as duas análises feitas. Foram investigados os ladrilhos hidráulicos e a água do tanque de cura, apresentados nos tópicos 4.3.1 e 4.3.2, respectivamente.

4.3.1 Análise dos ladrilhos hidráulicos

As amostras coletadas foram submetidas ao ensaio de lixiviação e à análise no espectrômetro de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS). Os resultados encontrados nessas análises estão apresentados na Tabela 16. Essas análises foram realizadas para os componentes inorgânicos. Os limites máximos de concentração foram definidos de acordo com o Anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004a).

Tabela 16 - Concentrações dos componentes potencialmente tóxicos nas amostras de ladrilho.
(Fonte: autora)

Parâmetro	Limite máx. (mg/L) (ABNT, 2004a)	Concentração nas amostras (mg/L)		
		D-A	D-B	ST-A
Arsênio	1,0	0,00036	0,00085	0,000098
Bário	70,0	<LD	0,181	0,118
Cádmio	0,5	<LD	<LD	<LD
Chumbo	1,0	<LD	<LD	<LD
Cromo total	5,0	0,039	0,0417	0,072
Mercúrio	0,1	0,00028	0,00096	0,00011
Prata	5,0	<LD	<LD	<LD
Selênio	1,0	<LD	0,00462	<LD

LD: Limite de Detecção

Os resultados encontrados mostram que todos os parâmetros analisados tiveram concentrações inferiores aos limites apresentados na NBR 10004 (ABNT, 2004a). Os elementos cádmio, chumbo e prata tiveram concentrações inferiores ao limite de detecção do equipamento. Sendo assim, para os parâmetros analisados, as amostras são classificadas como não-tóxicas e, portanto, não provocam efeito adverso após interação com o organismo.

Devido ao aspecto inédito do estudo, não foi possível realizar comparações com outros resultados referentes aos ladrilhos hidráulicos. Quanto aos demais revestimentos, não foram encontrados estudos que realizassem análise similar, apenas estudos referentes aos efluentes dos processos produtivos.

4.3.2 Análise da água do tanque de cura

As amostras coletadas foram filtradas e submetidas à análise no espectrômetro de massas com plasma indutivamente acoplado. A Tabela 17 apresenta o resultado encontrado nessa análise. Como visto, a água do tanque de cura é descartada diretamente na rede de esgoto municipal. Sendo assim, foram analisados os limites máximos estaduais e federais para lançamento de efluentes. O limite máximo estadual analisado foi o imposto em Minas Gerais pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 08, de 21 de novembro de 2022 (COPAM; CERH-MG, 2022).

Já o limite máximo federal foi o imposto pela Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (CONAMA, 2011).

Tabela 17 - Concentrações dos componentes potencialmente tóxicos nas amostras de água do tanque de cura. (Fonte: autora)

Parâmetro	Limite máximo (mg/L)		Concentração nas amostras (mg/L)	
	Minas Gerais (COPAM; CERH-MG, 2022)	Federal (CONAMA, 2011)	Fábrica A	Fábrica B
Arsênio	0,2	0,5	0,000047	0,00029
Bário	5,0	5,0	0,394	0,00951
Cádmio	0,1	0,2	<LD	<LD
Chumbo	0,1	0,5	0,000048	<LD
Cromo	0,1 ¹	0,1 ¹	0,024	0,0398
Mercúrio	0,01	0,01	0,00252	0,00228
Prata	0,1	0,1	<LD	<LD
Selênio	0,3	0,3	<LD	<LD

¹ Limite referente ao cromo hexavalente / LD: Limite de Detecção

Os resultados encontrados mostram que todos os parâmetros analisados apresentam concentração inferior ao limite máximo exigido pela deliberação normativa. Os elementos cádmio, prata e selênio tiveram concentração inferior ao limite de detecção do equipamento. Nesse contexto, para os parâmetros analisados, a água do tanque de cura não é classificada como tóxica e, portanto, não apresenta periculosidade ao ser descartada na rede de esgoto municipal. Entretanto, antes de ser descartada, outros critérios regulamentados pela Deliberação Normativa Conjunta nº 8 (COPAM; CERH-MG, 2022) e Resolução nº 430 (CONAMA, 2011) precisam ser avaliados. Dentre eles, pode-se citar os parâmetros orgânicos, o pH e a temperatura (COPAM; CERH-MG, 2022; CONAMA, 2011).

O estudo de Ferrari (2000) analisou (por via úmida) os efluentes líquidos do processo de fabricação de placas de revestimentos cerâmicos. As análises químicas realizadas apontaram uma toxicidade positiva nos efluentes (FERRARI, 2000). De acordo com o estudo em questão, esse resultado está relacionado com a composição química dos insumos utilizados na decoração dos revestimentos. Esses insumos são esmaltes, corantes, fritas, argilas, carbonatos, dentre outros (FERRARI, 2000). Nesse

contexto, os efluentes originados da produção dos ladrilhos hidráulicos, quando comparados aos efluentes dos revestimentos cerâmicos, apresentam um menor impacto ambiental.

5 CONCLUSÃO

Os ladrilhos hidráulicos são um revestimento cimentício amplamente utilizado no Brasil e no mundo. Entretanto, existem poucas pesquisas sobre os aspectos técnicos e ambientais desse material. O presente estudo teve como objetivo a investigação dos ladrilhos hidráulicos sob a perspectiva ambiental. Essa investigação foi feita a partir de três indicadores: CO₂ embutido, energia incorporada e presença de componentes potencialmente tóxicos. Os dois primeiros foram investigados a partir da avaliação do ciclo de vida na abordagem “do berço ao portão”. Já o terceiro indicador foi analisado a partir de ensaio de lixiviação dos ladrilhos hidráulicos e pela análise da água do tanque de cura.

A análise do CO₂ embutido mostrou que o valor médio dos ladrilhos hidráulicos estudados é 8,3258 kgCO₂/m² ou 0,2504 kgCO₂/kg na abordagem do berço ao portão. Ao utilizar uma distância média de 778 km para determinar o CO₂ embutido na abordagem do berço ao local (calculada para pisos cerâmicos), o valor encontrado foi de 0,2792 kgCO₂/kg de ladrilho. Esse resultado é 49% superior ao dos revestimentos cerâmicos. Entretanto, devido à pulverização no território brasileiro, as fábricas de ladrilhos tendem a não ser tão distantes dos pontos de consumo e, além disso, os ladrilhos tendem a ser mais vantajosos ambientalmente a longo prazo devido a sua alta durabilidade.

A investigação da energia incorporada mostrou que o valor médio dos ladrilhos estudados é de 59,7547 MJ/m² ou 1,8011 MJ/kg na abordagem do berço ao portão. Os pisos cerâmicos convencionais apresentam energia incorporada média de 55 MJ/m², já os porcelanatos possuem 299 MJ/m² e os pisos laminados possuem energia embutida de 48,75 MJ/m² - valores na abordagem do berço ao túmulo. Para melhor comparação, seria necessário padronizar a abordagem e considerar o impacto da matriz energética de cada material.

Em ambas as análises realizadas, a etapa de materiais utilizados representou mais de 74% do total CO₂ embutido e energia incorporada, seguido pelo transporte e por fim pelo processo produtivo, que teve uma contribuição sempre inferior a 1%. Dentre os materiais utilizados, o cimento foi o que apresentou maior contribuição. Com essas informações, possíveis formas de diminuir a contribuição da etapa de materiais

utilizados são a escolha de cimentos com menor impacto ambiental, como o CP-III 32 RS, e a incorporação de resíduos na produção dos ladrilhos. Recomenda-se mais estudos e análises de sensibilidade nesse sentido.

Por fim, a análise da presença dos componentes potencialmente tóxicos mostrou que todos os parâmetros analisados apresentavam concentrações inferiores aos limites impostos pela NBR 10004, pela Deliberação Normativa Conjunta nº 08 da COPAM/CERH-MG e pela Resolução nº 430 da CONAMA. Portanto, para esses parâmetros, os ladrilhos hidráulicos não eram classificados como tóxicos e a água do tanque de cura não apresentava periculosidade ao ser descartada na rede de esgoto municipal. Entretanto, reiteramos a necessidade de análise de outros critérios regulamentados pelos órgãos estaduais e federais. Esse resultado é diferente do observado na literatura para os revestimentos cerâmicos, em que os efluentes do processo de fabricação apontam toxicidade positiva.

Dessa forma, os indicadores analisados permitem concluir que os ladrilhos hidráulicos apresentam um impacto ambiental similar a outros revestimentos comumente utilizados nas construções brasileiras. Entretanto, deve-se destacar que os ladrilhos possuem, adicionalmente, um forte apelo social, estético e histórico. Assim, com esse trabalho, busca-se aprimorar o conhecimento técnico relativo a este revestimento tão utilizado em edificações brasileiras e facilitar o processo de tomada de decisão de profissionais e clientes em relação ao impacto ambiental dos materiais de construção.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação da abordagem do estudo, indo além da abordagem “do berço ao portão” e visitando um maior número de fábricas, em regiões distintas. A investigação de outros indicadores também é interessante, dentre eles pode-se citar a pegada hídrica e a emissão de compostos orgânicos voláteis. Ainda sugere-se realizar a análise de aspectos técnicos dos ladrilhos, como a durabilidade.

REFERÊNCIAS

- ABCP, 2010. *Manual de Ladrilho Hidráulico: Passeio Público*. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, p. 28.
- ABERGEL, T. et al., 2018. *Global Status Report - Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*. s.l., s.n.
- ABNT, 2004a. *NBR 10004 - Resíduos Sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT, 2004b. *NBR 10005 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT, 2013. *NBR 9457: Ladrilhos hidráulicos para pavimentação - especificação e métodos de ensaio*. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT, 2014. *NBR ISO 14.040: gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura*. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 30.
- ABNT, 2018. *NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT, 2021. *NBR 16972 - Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios*. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ALDAHASH, S. A., 2018. Optimum manufacturing parameters in selective laser sintering of PA12 with white cement additives. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20 Janeiro, pp. 257-270.
- AMN, 2002. *Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. s.l., Associação Mercosul de Normalização.
- BECKER, A. W. & VUOLO, C. M., 2009. O mago dos ladrilhos hidráulicos. *Pós: Revista do Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo*, Junho, 16(25), pp. 27-32.
- BODE, K. & GONÇALVES, J. C. S., 2015. *Edifício Ambiental*. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos.

BRANDES, H. G., 2011. Simple Shear Behavior of Calcareous and Quartz Sands. *Geotech Geol Eng*, pp. p. 113-126.

BRASIL, 2021. *Programa Nacional de Crescimento Verde*, Brasília: Ministério da Economia e Ministério do Meio Ambiente.

BRASIL, 2022a. *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*, Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.

BRASIL, 2022b. *Ministério do Meio Ambiente: Programa Nacional de Crescimento Verde*. [Online] Available at: <https://www.gov.br/mma/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/programa-nacional-de-crescimento-verde-2-1#:~:text=Com%20o%20pacote%20de%20incentivos,impacto%20e%20investimento%20de%20risco>. [Acesso em 30 Maio 2022].

BRIBIÁN, I. Z., CAPILLA, A. V. & USÓN, A. A., 2011. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46(5), pp. 1133-1140.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2022. *SINAPI: Custo de Composições Sintético*, Brasília: Brasil, Governo Federal.

CAMPOS, C. F., 2011. *Trajatória e significado do ladrilho hidráulico em Belo Horizonte*, Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável): Universidade Federal de Minas Gerais.

CAMPOS, E. F., PUNHAGI, K. R. & JOHN, V. M., 2011. Emissão de CO₂ do transporte de madeira nativa da Amazônia. *Ambiente Construído*, 11(2), pp. p. 157-172.

CARBONE, C. E., SANTOS, H., ROMANO, R. C. O. & PILEGGI, R. G., 2013. Efeito da adição de látex nas pastas de cimento branco no estado endurecido. *Ambiente Construído*, 13(3), pp. 317-330.

CATOIA, T., 2007. *Ladrilhos e Revestimentos Hidráulicos de Alto Desempenho*, São Carlos: Universidade de São Paulo.

CBCS, MMA & PNUMA, 2014. *Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas*, Brasília: CBCS, MMA e PNUMA.

CIRCULAR ECOLOGY, 2019. *Environmental Glossary of Terms and Definitions*. [Online]. Available at: <https://circularecology.com/glossary-of-terms-and-definitions.html>. [Acesso em 30 Maio 2022].

CONAMA, 2011. *Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.*. Brasília, Diário Oficial da União.

COPAM; CERH-MG, 2022. *Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 08*. Minas Gerais, Diário do Executivo – Minas Gerais.

COSTA, B. L. C., 2012. *Quantificação das emissões de CO2 geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil*, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CSI, 2019. *Getting the Numbers Right (GNR)*, WBCSD: Cement Sustainability Initiative.

DALAZEN, L. L. et al., 2022. As práticas sustentáveis para a mitigação dos gases de efeito estufa: uma revisão sistemática de literatura. *Brazilian Journal of Developmen*, 8(5), pp. 37685-37708.

DECORAR, B., 2022. *Brasil Decorar - Piso Tátil e Ladrilhos Hidráulicos*. [Online] Available at: <https://www.pisohidraulico.com.br/> [Acesso em 05 Dezembro 2022].

DIAS, M. C. O., 1999. *Manual de impactos ambientais: orientações básicas sobre aspectos de atividades produtivas*. Fortaleza: Banco do Nordeste.

DOMINGUEZ, A. A. & SANTOS, C. A. A., 2014. *Tapetes em massa de cimento: ladrilhos hidráulicos em Pelotas*. Pelotas, XIII Seminário de História da Arte.

DOMINGUEZ, A. J. A., 2016. *Ladrilhos hidráulicos: bens integrados aos prédios tombados de Pelotas - RS*, Pelotas: Universidade Federal de Pelotas.

DRAGUETTI, B., LIMA, V. & RIOS, A., 2020. *Avaliação do gasto energético nas etapas do beneficiamento do arroz branco*. s.l., Anais do 6º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão da UNIPAMPA: Salão de Pesquisa .

FERRARI, K., 2000. *Aspectos ambientais do processo de fabricação de placas de revestimentos cerâmicos (via úmida), com ênfase nos efluentes líquidos*, Tese (Doutorado em Ciências): Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

FERREIRA, T. E. D., FERREIRA, E. E., CHAVES, M. B. D. S. & GONÇALVES, P. H., 2018. Aproveitamento de resíduos finos de rochas ornamentais na fabricação de ladrilho hidráulico piso tátil para a orientação de deficientes visuais. *Revista Eletrônica Engenharia de Interesse Social*, 1(3), pp. 1-15.

FONTES, W. C. et al., 2021. Hydraulic Tiles Produced with Fine Aggregates and Pigments Reclaimed from Iron Ore Tailings. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 7(1), pp. 151-165.

FONTES, W. et al., 2018. Iron ore tailings in the production of cement tiles: a value analysis on building sustainability. *Ambiente Construído*, out./dez., pp. 395-412.

FUNALFA, 2014. *Ladrilhos da cidade* , Juiz de Fora: Prefeitura de Juiz de Fora.

G1, 2020. *Amianto em Goiás: entenda a disputa jurídica*. [Online] Available at: <https://g1.globo.com/go/goias/noticia/2020/11/23/amianto-em-goias-entenda-a-disputa-juridica.ghtml> [Acesso em 31 Maio 2022].

GIROTTI, L. & BARBOSA, M., 2013. Investigação da fissuração por retração plástica da argamassa do concreto auto-adensável. *Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto*.

HELENE, P. & ANDRADE, T., 2010. Capítulo 29 - Concreto de Cimento Portland. Em: G. C. Isaia, ed. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: IBRACON, p. 40.

IBU, 2022. *Environmental Product Declaration: Bayferrox 130 - Iron Oxide Red Pigment (Fe₂O₃)*, Berlim: INSTITUT BAUEN UND UMWELT.

IPCC, 2014. *Chapter 8: Transport - Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the*

Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press.

LAMAS, M. L., LONGO, O. C. & SOUZA, V. C., 2018. A produção de ladrilho e o ofício de ladrilhar: método de produção de ladrilhos do século XVIII aos dias atuais. *Anais do Museu Paulista*, 26(9), pp. 1-22.

LEMOS, M. J., 2012. *Pantaleone Arcuri & Spinelli, Fábrica de Ladrilhos e Mosaicos*, Juiz de Fora: Blog Maria do Resguardo.

MACIEL, R. C., ENGLER, R. C. & PINHO, I. S., 2020. O design e os ladrilhos hidráulicos na cidade. *Anais do Colóquio Internacional de Design 2020*, pp. 1157-1170.

MCTIC, 2022. *Fator médio - Inventários corporativos*, Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações.

MME & CBCS, 2022. *Sidac - Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção*, São Paulo: s.n.

MME & EPE, 2021. *Balanço Energético Nacional - Relatório Síntese 2021, Ano Base 2020*, Brasília: Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética.

MOHSIN, M. et al., 2021. COVID-19 and Greenhouse Gas Emission Mitigation: Modeling the Impact on Environmental Sustainability and Policies. *Frontiers in Environmental Scienc*, Volume 9.

Mosaicos Amazonas, 2022. *Catálogo*. [Online] Available at: <http://www.mosaicosamazonas.com.br/catalogo/#book/> [Acesso em 23 Maio 2022].

MOURA, M. & MOTTA, A. L. T. S., 2013. O fator energia na construção civil. *IX Congresso Nacional de Excelência em Gestão*, 20 Junho.

OLIVEIRA, D., 2014. *Portos e Navios*. [Online] Available at: <https://www.portosenavios.com.br/>. [Acesso em 16 Agosto 2022].

PORTS, 2022. *Ports.com*. [Online]. Available at: <http://ports.com/sea-route/port-of-istanbul,turkey/port-of-santos,brazil/>. [Acesso em 25 Agosto 2022].

PROCLIMA, 2007. *Gases do efeito estufa*. [Online] Available at: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/> [Acesso em 30 Maio 2022].

REIS, M. S. & SANTOS, D. M., 2020. Materiais e processos na fabricação de ladrilhos hidráulicos, caso São Luís - MA. *Tríades*, 9(1), pp. 21-33.

ROCK, M. et al., 2020. Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, 15 Janeiro, Volume 258.

RODRIGUES, M. & BERALDO, A., 2010. Caracterização física e mecânica de argamassas à base de cimento portland e cinza de casca de arroz residual. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, Março, 30(2), pp. 193-204.

ROMANO, R. C. O. et al., 2020. Influência da utilização de diferentes teores de lama vermelha nas propriedades de ladrilhos hidráulicos. *Ambiente Construído*, 20(3), pp. 647-659.

SAADDE, M. R. M. et al., 2014. Material eco-efficiency indicators for Brazilian buildings. *Smart and Sustainable Built Environment*, 3(1), pp. 54-71.

SABBATINI, F. H., 1990. *Tecnologia de execução de revestimentos de argamassa*. São Paulo, s.n.

SANTOS, M., 2008. *Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil*, Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais): Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SAVAZZINI-REIS, A. & FAGUNDES, A. F., 2020. Incorporação de resíduo de madeira em ladrilho. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 16(nEspecial), p. p.0.

SNIC, 2020. *Relatório Anual - 2020*, s.l.: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento.

TAVARES, S. F., 2006. *Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras*, Tese (Doutorado em Engenharia Civil): Universidade Federal de Santa Catarina.

TORGAL, F. P. & JALALI, S., 2010. Toxicidade de materiais de construção: uma questão incontornável na construção sustentável. *Ambiente Construído*, 10(3), pp. 41-53.

UFJF, 2021. *UFJF: Arquivo central*. [Online] Available at: <https://www2.ufjf.br/arquivocentral/2021/08/07/apresentacao-fundo-pantaleone-arcuri/>. [Acesso em 24 Maio 2022].

UNEP, 2020. *Emissões do setor de construção civil atingiram recordes em 2019 - relatório da ONU*. [Online]. Available at: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/emissoes-do-setor-de-construcao-civil-atingiram#:~:text=Isto%20equivale%20a%20uma%20queda,devido%20%C3%A0%20pandemia%20em%202020>. [Acesso em 30 Maio 2022].

VENCESLAU, W., 2022. *Visita na Fábrica Ladrilhos Barbacena* [Entrevista] (14 Abril 2022).

VOTORAN, 2022. *Massa unitária do cimento CP-III 32 RS* [Entrevista] (28 Outubro 2022).

WAMZER, R. L. K., 2011. *O ladrilho hidráulico em interface com a arte e o design em Mato-Grosso*, Cuiabá: Universidade Federal de Mato Grosso.

WBCSD, 2012. *Diretrizes para o Relatório e Monitoramento das Emissões na Indústria de Cimento*, s.l.: World Business Council for Sustainable Development.

ZVEIBIL, F. N., ROMANO, R. C. O. & PILEGGI, R. G., 2019. Influência do tipo e teor de pigmento no estado endurecido de ladrilhos hidráulicos. *Cerâmica*, 65(1), pp. 506-514.

APÊNDICE A – ENSAIOS DE MASSA UNITÁRIA

	Fábrica A	Fábrica B	Fábrica C	Fábrica C	Fábrica C
	Areia de britagem	Areia de britagem	Pó de mármore	Areia de britagem	Areia de rio
1ª medida	565,6 g	520,7 g	588,1 g	549,4 g	475,2 g
2ª medida	568,4 g	517,3 g	586,5 g	546,2 g	486,5 g
3ª medida	570,2 g	517,9 g	587,0 g	547,1 g	490,5 g
Média	568,1 g	518,6 g	587,2 g	547,6 g	484,1 g
Massa unit.	1,51 kg/dm ³	1,38 kg/dm ³	1,57 kg/dm ³	1,46 kg/dm ³	1,29 kg/dm ³

		
Recipiente vazio (Volume = 375 ml)	Areia de britagem Fábrica A	Areia de britagem Fábrica B
		
Pó de mármore Fábrica B	Areia de britagem Fábrica C	Areia de rio Fábrica C

APÊNDICE B – ENSAIOS DE MASSA ESPECÍFICA REAL

	Fábrica A	Fábrica B	Fábrica C		
	Areia de britagem	Areia de britagem	Pó de mármore	Areia de britagem	Areia de rio
Leitura	385 ml	387 ml	370 ml	380 ml	395 ml
Massa esp. real	2,70 kg/dm ³	2,67 kg/dm ³	2,94 kg/dm ³	2,78 kg/dm ³	2,56 kg/dm ³

					
Recipiente com água	Areia de britagem	Areia de britagem	Pó de mármore	Areia de britagem	Areia de rio
-	Fábrica A	Fábrica B	Fábrica B	Fábrica C	Fábrica C