

CAROLINA STRABELLI SONVEZZO

**Desempenho ambiental das argamassas estabilizadas no assentamento
de blocos de alvenaria**

São Paulo

2024

CAROLINA STRABELLI SONVEZZO

**Desempenho ambiental das argamassas estabilizadas de assentamento
de blocos de alvenaria**

Versão Corrigida

(Versão original encontra-se na unidade que aloja o
Programa de Pós-Graduação)

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Área de concentração: Engenharia de
Construção Civil e Urbana

Orientador: Prof. Dr. Vanderley M. John

São Paulo


2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

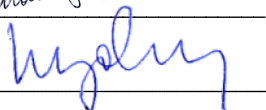
Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 16 de Abril de 2024

Assinatura do autor:



Assinatura do orientador:



Catálogo-na-publicação

Sonvezzo, Carolina

Desempenho ambiental das argamassas estabilizadas no assentamento de blocos de alvenaria / C. Sonvezzo -- versão corr. -- São Paulo, 2014. 156 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.construção civil 2.ciclo de vida (avaliação) 3.sustentabilidade 4.argamassa 5.resíduos de construção I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

Nome: SONVEZZO, Carolina Strabelli

Título: Desempenho ambiental das argamassas estabilizadas de assentamento de blocos de alvenaria

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Aos meus filhos, Laura, Bruno e Theo, que me impulsionam a ser uma pessoa cada dia melhor, e ao meu marido Rodolfo que sempre me apoiou nesse projeto.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Vanderley John, por acreditar em mim desde o início, pela oportunidade de participar do projeto, por compartilhar seus conhecimentos, pelas tantas conversas e palavras de incentivos.

A todos professores que, em aulas presenciais ou online, contribuíram para minha formação.

A CEMtec (National Institute on Advanced Eco-Efficient Cement - Based Technologies), que financiada pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, processo 485340/2013-5) e FAPESP (Fundação de Pesquisa de São Paulo, processo 14/50948-3 INCT/2014), desenvolveu esse projeto.

Ao CONSITRA-E (Consórcio Setorial para Inovação Tecnológica em Revestimento de Argamassas Estabilizadas) e FDTE (Fundação para Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia) pelo apoio ao projeto.

Ao Prof. Rafael Pileggi que fez o projeto acontecer, e equipe, Renata Monte, Fabio Cardoso e Cesar Romano.

A Engemix e Votorantim por nos receber e compartilhar suas experiências e seus dados.

Ao LME (Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência da Poli) e colaboradores que me apoiaram com todos os ensaios em laboratório. Ao Jenicio pelo apoio com a coleta de dados na obra.

Ao IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica) pelo apoio nos ensaios de laboratório.

A todos funcionários da Poli, em especial a Wandréa e Engrácia.

Aos amigos mestrando e doutorando que fizeram parte dessa história. Em especial a Lidiane Oliveira, por me guiar nos primeiros meses, por todos os lembretes que me salvaram, pelas conversas e risadas. Ao Daniel Reis por todo apoio. A Fernanda Belizário por me inspirar.

Ao Vanderley John pela oportunidade de participar da equipe de desenvolvimento do curso ADAC (Desempenho Ambiental da Construção), pelo conhecimento adquirido no processo, e pelo convívio remoto durante a pandemia. Aos amigos envolvidos Sergio Pacca, Diana Csillag,

Fernanda Belizario, Daniel Reis, Kátia Punhagui, Beatriz Gomes, Yazmin Vergara, Lidiane Oliveira e Jonas Santos.

Ao CBCS (Conselho Brasileiro de Construção Sustentável) e V. John por permitirem minha participação no projeto do Sidac, e a toda equipe, Fernanda Belizario S., Sergio A. Pacca, Clarisse Degani, Lidiane S. Oliveira, Daniel C. Reis, Katia Punhagui, Cassio G. Oliveira, Anna C. Fischer, Camila Y. S. Sanchonete, Yasmin, Fabiana R. Cleto, João Felipe von Mühlen, Karine H. Martins, Luciana A. Oliveira, Larissa R. Guerreiro, Celso S. Cachola, Vanessa G. Silva e Lizzie M. Pulgrossi.

A tantos outros colegas que, apesar de não citados aqui, contribuíram de alguma maneira nessa minha jornada.

Por fim aos meus pais, Vanderlei e Sônia, pelo dom da vida, a todo amor, cuidado e valores recebidos que me tornaram a pessoa que sou.

“A simplicidade é o último grau de sofisticação.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

SONVEZZO, C. S. Desempenho ambiental das argamassas estabilizadas de assentamento de blocos de alvenaria. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

O setor da construção responde por 50% dos recursos naturais extraídos no mundo e 38% das emissões antrópicas de CO₂. O cimento sozinho responde por 1/3 desses recursos e 7% das emissões. No Brasil, embora metade do consumo de cimento seja voltado para a produção de argamassas, a literatura tem como foco principal o concreto, havendo escassez de informações sobre as argamassas. Dentro deste contexto, o presente estudo teve como foco principal as argamassas, e o objetivo foi de estudar e comparar o desempenho ambiental das argamassas dosadas em obra e estabilizadas. O estudo se fundamenta no conceito do ciclo de vida, emprega a metodologia do desempenho ambiental da construção e utiliza dados primários das argamassas estabilizadas obtidos em estudo de caso. O inventário do berço-ao-portão deu-se em três centrais dosadoras, e o inventário do portão-à-aplicação deu-se no assentamento de blocos estruturais em edifício entre 2019 e 2021. Os cinco indicadores deste estudo são: emissão de CO₂, consumo de energia, consumo de material, geração de perdas e consumo de água. Os indicadores do berço-ao-portão obtidos foram: 215 kg CO₂/m³ de emissão de CO₂, 1.262 MJ/m³ de consumo energético, 766 kg/m³ de consumo de água, e 2.473 kg/m³ de material, incluída as perdas de 684 kg/m³. Esses dados apontam os processos mais críticos: (i) a produção de cimento responde com aproximadamente 78% das emissões de CO₂ e 49% do consumo energético; (ii) o beneficiamento das areias responde por aproximadamente 63% do consumo de água, e suas perdas representam aproximadamente 23% dos recursos sólidos extraídos; e (iii) o transporte dos insumos responde com 23% do consumo energético e 9% das emissões de CO₂. Considerando a fronteira do berço-à-aplicação, a literatura apresenta um índice de eficiência do uso de recursos das argamassas industrializadas de 42%. Contudo, para o estudo de caso, que considera as perdas ao longo do ciclo de vida, ou seja, inclui perdas no beneficiamento das areias, perdas na produção dos cimentos, e principalmente as perdas incorporadas na edificação, a eficiência do uso de recursos cai para 29%. Os indicadores do berço-à-aplicação da argamassa estabilizada obtidos

foram: 401 kg CO₂/100 m² de emissão de CO₂, 2.205 MJ/100 m² de consumo energético, 1.218 kg/100 m² de consumo de água, e 3.932 kg/100 m² de material, incluída as perdas de 2.795 kg/100 m² e. Esses dados mostram que 71% dos recursos sólidos extraídos da natureza são perdidos durante o processo, sendo que 33% ficam incorporadas na edificação, 10% viram resíduo sólido na obra e 28% é perdido durante a extração e produção das matérias-primas. As argamassas estabilizadas apresentaram melhor desempenho ambiental que as argamassas dosadas em obra devido principalmente a redução de 42% no consumo de cimento, obtido através de traços mais otimizados. Este estudo identificou grande potencial de ganhos no desempenho ambiental das argamassas com melhorias técnicas do processo construtivo.

Palavras-chaves: Argamassa. ACV simplificada. Cimento. Desempenho Ambiental da Construção. Emissão de CO₂.

ABSTRACT

SONVEZZO, C. S. Environmental performance of ready-mix mortar for laying masonry blocks. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

The construction sector accounts for 50% of the natural resources extracted in the world and 38% of anthropogenic CO₂ emissions. Cement alone accounts for one-third of these resources and 7% of emissions. In Brazil, although half of cement consumption is focused on the production of mortars, the literature focuses on concrete, with a lack of information about mortars. Within this context, the present study had mortars as its focus, and the objective was to study and compare the environmental performance of mortars dosed on site and industrialized ready-mixed mortar. This study is based on the product life cycle concept, considers the construction environmental performance methodology and uses ready-mix mortar primary data obtained in a case study. The cradle-to-gate inventory was carried out in three batching plants and the gate-to-application inventory took place on the bricklaying of structural concrete blocks at residential building between 2019 and 2021. The five indicators of this study are: CO₂ emission, energy consumption, material consumption, waste generation and water consumption. The cradle-to-gate indicators obtained was: 215 kg CO₂/m³ of CO₂ emission, 1.262 MJ/m³ of energy consumption, 766 kg/m³ of water consumption, and 2.473 kg/m³ of material, included 684 kg/m³ of waste. These data point to the most critical processes: (i) cement production accounts for approximately 78% of CO₂ emissions and 49% of energy consumption; (ii) sand processing accounts for approximately 63% of water consumption and the wastage is about 23% of solid resources extracted; and (iii) the transport of inputs accounts for 23% of energy consumption and 9% of CO₂ emissions. Considering the cradle-to-application boundary, the literature presents a resource use efficiency index for industrialized mortars of 42%. However, for the case study, which considers all the wastage throughout the life cycle, that is, includes the waste generated during sand processing, the waste generated during cement production, and mainly the waste incorporated in the building, the resource use efficiency index drops to 29%. The ready-mix mortar cradle-to-application indicators obtained were: 401 kg CO₂/100 m² of CO₂ emissions, 2,205 MJ/100 m²

of energy consumption, 1,218 kg/100 m² of water consumption, and 3,932 kg/100 m² of material, including 2,795 kg/100 m² of wastage. These data show that 71% of solid resources extracted from nature are wasted during the process, 33% of which are incorporated into the building, 10% become solid waste on site and 28% is wasted during the extraction and production of raw materials. The ready-mixed mortars presented better environmental performance than mortars dosed on site, mainly due to the 42% reduction in cement consumption, obtained through more optimized mortar mixes. This study identified potential for gains in the environmental performance of mortars with technical improvements to the construction process.

Keywords: Cement. CO₂ Emission. Construction Environmental Performance. Mortar. Simplified LCA.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----------|
| Figura 1: Fluxograma do processo de produção do cimento do berço-ao-portão. Fonte: Autora a partir de (BELIZARIO-SILVA; OLIVEIRA; JOHN, 2022)..... | 34 |
| Figura 2: Fluxogramas dos processos de extração de areia de quartzo pela mineração do solo (esquerda) e de areia artificial a partir da britagem de rochas (direita). Fonte: Autora a partir de (ANEPAC, 2019; SCHMALFUSS; TIMM; PASSUELLO, 2022)..... | 36 |
| Figura 3: Fluxograma do processo de extração do calcário e produção da cal hidratada. Fonte: Autora a partir de (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014; MARTINS; PUNHAGUI; JOHN, 2022)..... | 39 |
| Figura 4: Fluxograma da argamassa estabilizada. Fronteira do berço-à-aplicação. Fonte: A autora. | 41 |
| Figura 5: Fluxograma da argamassa dosada em obra. Fronteira do berço-à-aplicação. Fonte: A autora. | 42 |
| <i>Figura 6: Estocagem de areias na Central da Supermix em Diadema/SP, à esquerda a areia de quartzo estocada em depósito descoberto e à direita a areia artificial estocada em depósito coberto. Fotos tiradas pela autora durante visita técnica.</i> | <i>46</i> |
| Figura 7: Transporte horizontal da argamassa realizada com carrinho de mão no canteiro. Fotos tiradas pela autora durante coleta de dados. | 52 |
| Figura 8: Dimensões de reservatório de argamassa utilizado no canteiro. Fonte: (IW8, 2019). | 53 |
| Figura 9: Dimensões do bloco de concreto e espessura da argamassa conforme especificação de projeto estrutural. Dados utilizados para estimativa do consumo teórico de argamassa para assentamento de bloco estrutural. Valores em mm..... | 54 |
| Figura 10: Processo de quantificar o resíduo sólido: a esquerda coleta da argamassa caída no chão durante o processo de assentamento e transporte da argamassa, e a esquerda pesagem com balança suspensa (precisão de 0.01 kg). Fotos tiradas pela autora durante coleta de dados na obra. | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 11: Esquema ilustrativo do volume das amostras de argamassa estabilizada retirada em obra em três situações distintas: (i) argamassa fresca recém recebida na obra, (ii) argamassa seca não aplicada, e (iii) argamassa seca aplicada. A perda de ar incorporado foi estimada comparando as porosidades das amostras secas (ii) aplicadas e (iii) não aplicadas. | 57 |
| <i>Figura 12: Perdas incorporadas devido à argamassa introduzida acidentalmente nos orifícios dos blocos sem função estrutural. Fotos tiradas pela autora durante coleta de dados na obra.</i> | 59 |
| Figura 13: Consumo d'água para produção de cimento (m ³ /t). Fonte: Autora a partir dos dados de (BOCCIA, 2023; CAC, 2016; CEMBUREAU, 2020; HOLCIM, 2014, 2021; IBICT, 2019; MACK-VERGARA; JOHN, 2017; NESHER, 2012; PCA, 2021; VOTORANTIM, 2016a, 2019b)..... | 61 |
| Figura 14: Quantidade de estoque versus quantidade pesada dos insumos para a produção de argamassa estabilizada na planta de Itaquaquetuba | 73 |
| Figura 15: Consumo de material e perdas para diferentes traços de argamassa estabilizada conforme dados de inventário. Fronteira do berço-ao-portão . Dados por m ³ de argamassa produzida..... | 74 |
| Figura 16: Consumo de energia para diferentes traços de argamassa estabilizada conforme dados de inventário. Fronteira do berço-ao-portão . Dados por m ³ de argamassa produzida. | 75 |
| Figura 17: Emissão de CO₂ para diferentes traços de argamassa estabilizada conforme dados de inventário. Fronteira do berço-ao-portão . Dados por m ³ de argamassa produzida. | 75 |
| Figura 18: Consumo de água para diferentes traços de argamassa estabilizada conforme dados de inventário. Fronteira do berço-ao-portão . Dados por m ³ de argamassa produzida. | 76 |
| Figura 19: Quantidade de água adicionada e água de limpeza consumida durante na produção de argamassas estabilizadas nas plantas de Itaquaquetuba, Americana e Campinas. | 77 |

| | |
|--|-----------|
| Figura 20: Percentual dos indicadores ambientais dado por cada etapa do processo. Fronteira do berço-ao-portão . Valores medianos dos diferentes traços das argamassas estabilizadas do estudo de caso. | 78 |
| <i>Figura 21: Assentamento de alvenaria estrutural executada com colher de pedreiro e argamassa estabilizada fornecida pela Supermix. Fotos tiradas pela autora durante coleta de dados no canteiro.</i> | <i>81</i> |
| Figura 22: Fluxo de argamassa estabilizada e de água para assentamento de 100 m ² de parede de blocos estruturais. Estudo de caso de edifício residencial localizado na cidade de São Paulo de outubro a dezembro de 2020. AS perdas representam 60% de todo material consumido. | 85 |
| Figura 23: Consumo de material para diferentes traços de argamassa estabilizada conforme dados de inventário. Fronteira do berço-a-aplicação . Dados por 100 m ² de argamassa assentada em blocos estruturais..... | 88 |
| Figura 24: Perdas de argamassa na etapa de construção. Fontes: "Estudo de caso" refere-se a argamassa de assentamento de blocos estruturais de concreto (o autor), (AGOPYAN et al., 1998; SOIBELMAN, 1993) são estudos de caso da literatura nacional, sendo que (AGOPYAN et al., 1998) refere-se a argamassa de assentamento de blocos cerâmicos não estruturais, e (SOIBELMAN, 1993) refere-se a argamassa industrializada de revestimento e assentamento de blocos cerâmicos não estruturais..... | 89 |
| Figura 25: Consumo de energia para diferentes traços de argamassa estabilizada conforme dados de inventário. Fronteira do berço-a-aplicação . Dados por 100 m² de argamassa assentada em blocos estruturais. | 90 |
| Figura 26: Emissão de CO₂ para diferentes traços de argamassa estabilizada conforme dados de inventário. Fronteira do berço-a-aplicação . Dados por 100 m² de argamassa assentada em blocos estruturais. | 91 |
| Figura 27: Consumo de água para diferentes traços de argamassa estabilizada conforme dados de inventário. Fronteira do berço-a-aplicação . Dados por 100 m² de argamassa de assentamento em blocos estruturais. | 91 |

| | |
|--|-----|
| Figura 28: Consumo de material e perdas das argamassas estabilizadas para a fronteira do berço-à-aplicação referentes a 100 m ² de parede executada. Valores dados em: mínimo, primeiro quartil, terceiro quartil, máximo e mediana. | 92 |
| Figura 29: Consumo de energia , emissão de CO₂ e consumo de água das argamassas estabilizadas para a fronteira do berço-à-aplicação referentes a 100 m ² de parede executada. Valores dados em: mínimo, primeiro quartil, terceiro quartil, máximo e mediana. | 92 |
| Figura 30: Fluxo de materiais para assentamento de blocos estruturais com argamassa estabilizada em edifício residencial. A fronteira do sistema é do berço-à-aplicação . As perdas e resíduos gerados representam em média 71% de todo recurso extraído na natureza..... | 93 |
| Figura 31: Comparativo do consumo de materiais das argamassas dosadas in loco e argamassas estabilizadas. Valores dados em: mínimo, primeiro quartil, terceiro quartil, máximo e mediana. | 97 |
| Figura 32: Comparativo do consumo de energia das argamassas dosadas in loco e estabilizadas. Valores dados em: mínimo, primeiro quartil, terceiro quartil, máximo e mediana. | 98 |
| Figura 33: Comparativo da emissão de CO₂ das argamassas dosadas in loco e argamassas estabilizadas. Valores dados em: mínimo, primeiro quartil, terceiro quartil, máximo e mediana. | 99 |
| Figura 34: Comparativo do consumo de água das argamassas dosadas in loco e argamassas estabilizadas. Valores dados em: mínimo, primeiro quartil, terceiro quartil, máximo e mediana. | 100 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Divisão por módulos das etapas do ciclo de vida de um edifício conforme DIN EN 15978. Fonte: autores a partir da EN 15978 (EUROPEAN COMMISSION, 2012a, p. 15978)...25 | 25 |
| Tabela 2: Emissão de CO ₂ , consumo de energia, consumo d'água e geração de resíduo para produção de cimento Portland. Dados internacionais e brasileiros.35 | 35 |
| Tabela 3: Consumo de energia, emissão de CO ₂ , consumo d'água e geração de resíduo para extração de areia de quartzo e processamento de brita. Dados da literatura nacional.37 | 37 |
| Tabela 4: Consumo de energia, emissão de CO ₂ , consumo d'água e geração de resíduo para produção da cal hidratada. Dados da literatura nacional.39 | 39 |
| Tabela 5: Consumo de energia, emissão de CO ₂ , consumo d'água e geração de resíduo para produção de aditivos.40 | 40 |
| Tabela 6: Fatores de conversão da eletricidade e do óleo diesel. Dados da literatura nacional.43 | 43 |
| Tabela 7: Indicadores ambientais para produção de cimento CP II E40 considerados neste estudo.63 | 63 |
| Tabela 8: Consumo de energia, emissão de CO ₂ , consumo d'água e geração de resíduo de diferentes argamassas e concretos do Brasil e do mundo. Dados da literatura.64 | 64 |
| <i>Tabela 9: Dados dos inventários das plantas - especificidades.65</i> | 65 |
| Tabela 10: Dados dos inventários das plantas - distâncias de transporte dos insumos de seus fornecedores até as plantas dosadoras, e das plantas até a área de descarte.66 | 66 |
| Tabela 11: Dados dos inventários das plantas - produção de argamassa estabilizada e concreto.....67 | 67 |
| Tabela 12: Dados do inventário da planta de Itaquaquetuba - quantidade em estoque dos materiais.67 | 67 |
| Tabela 13: Dados dos inventários das plantas - consumo de materiais para produção de argamassa estabilizada e concreto.....68 | 68 |

| | |
|---|----|
| Tabela 14: Dados dos inventários das plantas - consumo de energia, consumo de água, geração de resíduo, consumo energético de mistura e transporte até a obra. | 69 |
| Tabela 15: Consumo de materiais, densidade e teor de água por traço de argamassa estabilizada produzida, calculados a partir dos dados dos inventários das plantas..... | 72 |
| Tabela 16: Dados de inventário das plantas - indicadores ambientais referentes ao transporte da argamassa da central à obra. Dados considerados na etapa A4, etapa de construção. | 79 |
| Tabela 17: Representatividade do berço-ao-portão dos indicadores dos aditivos utilizados na produção de argamassa estabilizada deste estudo. | 80 |
| Tabela 18: Dados de inventário da obra - área de parede inventariada por pavimento..... | 81 |
| Tabela 19: Dados de inventário da obra referente ao processo de assentamento de blocos em prédio residencial de alvenaria estrutural localizado na cidade de São Paulo, no período de outubro a dezembro de 2020. Resistência à compressão (fck) e densidade da argamassa fornecidos pelo produtor da argamassa. | 82 |
| Tabela 20: Dados de inventário da obra - parâmetros utilizados para modelar o consumo de energia do guindaste responsável pelo transporte vertical da argamassa. | 82 |
| Tabela 21: Dados de inventário da obra - distância piso a piso dos pavimentos inventariados na obra..... | 82 |
| Tabela 22: Densidade real, massa e volume de envelopamento da argamassa estabilizada obtidas a partir de amostras coletadas na obra e submetidas a ensaios em laboratório. | 84 |
| Tabela 23: Consumo de material e perdas, consumo de energia, emissão de CO ₂ e consumo de água de argamassa estabilizada de alvenaria. Dados de canteiro. Unidade por 100 m ² de parede executada. | 84 |
| Tabela 24: Consumo de material das argamassas dosadas em obra para assentamento. Fonte: (MME; CBCS, 2022). | 95 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---------------------|--|
| A_w | área total de parede inventariada (m^2) |
| $A_{w,n}$ | área de parede inventariada no pavimento n (m^2) |
| C | quantidade de reservatórios utilizados no período (unidade) |
| D_{ei} | densidade aparente da argamassa não aplicada da amostra i (g/cm^3) |
| D'_{ei} | densidade aparente da argamassa aplicada da amostra i (g/cm^3) |
| D_R | densidade real de argamassa não aplicada (g/cm^3) |
| D'_R | densidade real de argamassa aplicada (g/cm^3) |
| $Dist_i$ | distância de transporte do insumo i (km) |
| D_p | consumo de diesel na planta (litros) |
| $D_{transp,m}$ | consumo de diesel referente ao transporte da argamassa (litros) |
| D_{truck} | consumo específico de diesel do caminhão (l/km) |
| E_p | consumo de eletricidade na planta (kWh) |
| $FA_{w,n}$ | fração de área de parede inventariada no pavimento n (%) |
| $F_{CO_2,diesel}$ | fator de emissão de CO_2 do diesel ($kg CO_2/MJ$) |
| $F_{CO_2,electr}$ | fator de emissão de CO_2 da eletricidade ($Kg CO_2/kWh$) |
| $F_{E,diesel}$ | fator de conversão da energia primária do diesel (MJ/l) |
| $F_{E,electr}$ | fator de conversão da energia primária da eletricidade (MJ/kWh) |
| H_c | total de horas trabalhadas do guindaste (h) |
| $h_{L,n}$ | altura de içamento no pavimento n (m) |
| I_{CO_2p} | indicador de emissão de CO_2 na planta ($kg CO_2/m^3$) |
| I_{CO_2s} | indicador de emissão de CO_2 da obra ($kg CO_2/100 m^2$) |
| $I_{CO_2,transp,i}$ | indicador de emissão de CO_2 referente ao transporte do insumo i ($kg CO_2/m^3$) |
| $I_{E,transp,i}$ | indicador de energia primária referente ao transporte do insumo i (MJ/m^3) |

| | |
|------------------|--|
| $I_{E.transp.m}$ | <i>indicador de energia primária referente ao transporte de argamassa (MJ/m³)</i> |
| I_{Ep} | <i>indicador de energia primária na planta (MJ/m³)</i> |
| I_{Es} | <i>indicador de energia primária na obra (MJ/100 m²)</i> |
| I_{Inc} | <i>indicador da perda incorporada (m³/100 m²)</i> |
| I_{Lair} | <i>indicador da perda volumétrica do ar incorporado (m³/100 m²)</i> |
| I_{Mp} | <i>indicador de material na planta (kg/m³)</i> |
| I_{Ms} | <i>indicador de material na obra (m³/100 m²)</i> |
| I_{Mw} | <i>indicador das perdas na obra (m³/100 m²)</i> |
| $I_{Sw.s}$ | <i>indicador de geração de resíduo sólido na obra (m³/100 m²)</i> |
| $I_{sw.p}$ | <i>indicador de geração de resíduo sólido na planta (kg/m³)</i> |
| I_{Wp} | <i>indicador de água na planta (kg/m³)</i> |
| I_{Ws} | <i>indicador de água na obra (kg/100 m²)</i> |
| $M_{del.n}$ | <i>consumo de argamassa entregue no pavimento n (m³)</i> |
| M_T | <i>consumo teórico de argamassa (m³)</i> |
| N | <i>quantidade de amostras de argamassas não aplicadas (unidade)</i> |
| N' | <i>quantidade de amostras de argamassas aplicadas (unidade)</i> |
| P_C | <i>potência do guindaste com 85% de eficiência (kW)</i> |
| $Prod_p$ | <i>produção de argamassa na planta (m³)</i> |
| P_{truck} | <i>capacidade de carga do caminhão (t)</i> |
| R_{ad} | <i>consumo de aditivos (kg)</i> |
| $R_{art.sand}$ | <i>consumo de areia artificial (kg)</i> |
| R_{sand} | <i>consumo de areia de quartzo (kg)</i> |
| R_c | <i>consumo de cimento (kg)</i> |
| RL_{air} | <i>perda volumétrica de ar incorporado (%)</i> |
| S_C | <i>velocidade de içamento (m/min)</i> |

| | |
|----------------|---|
| S_w | <i>resíduo sólido gerado na obra (m³)</i> |
| $S_{w,n}$ | <i>resíduo sólido gerado na obra no pavimento n (m³)</i> |
| $S_{w,p}$ | <i>resíduo sólido gerado na planta no período (kg)</i> |
| TL_{air} | <i>perda volumétrica total de ar incorporado referente à argamassa aplicada em obra (m³)</i> |
| T_n | <i>número de viagens realizadas no pavimento n</i> |
| $V_{transp,i}$ | <i>massa transportada do insumo i por m³ de argamassa produzida (kg/m³)</i> |
| W_C | <i>consumo de água para lavagem de cada recipiente (kg)</i> |
| W_F | <i>consumo de água de formulação (kg)</i> |
| W_L | <i>volume da película d'água por reservatório (kg)</i> |
| W_T | <i>consumo de água para lavagem de utensílios (kg/100 m²)</i> |
| W_w | <i>consumo de água de limpeza (kg)</i> |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| AGRADECIMENTOS | 3 |
| RESUMO | 6 |
| ABSTRACT | 8 |
| LISTA DE FIGURAS..... | 10 |
| LISTA DE TABELAS..... | 14 |
| LISTA DE ABREVIATURAS..... | 16 |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 22 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 24 |
| 2.1 Análise do Ciclo de Vida (ACV) | 24 |
| 2.2 Normalização da ACV | 24 |
| 2.3 Histórico e aplicações | 25 |
| 2.4 Desafios e a simplificação da ACV na construção..... | 27 |
| 2.5 Argamassas..... | 31 |
| 2.6 Produção dos insumos..... | 32 |
| 2.6.1 Cimento..... | 32 |
| 2.6.2 Areias..... | 35 |
| 2.6.3 Cal hidratada | 38 |
| 2.6.4 Aditivos | 39 |
| 3 METODOLOGIA..... | 40 |
| 3.1 Transporte dos insumos | 43 |
| 3.2 Produção da argamassa na central..... | 44 |
| 3.2.1 Consumo de material..... | 45 |
| 3.2.2 Consumo de energia..... | 46 |
| 3.2.3 Emissão de CO ₂ | 47 |
| 3.2.4 Consumo de água | 48 |
| 3.2.5 Resíduos..... | 48 |
| 3.2.6 Transporte e mistura | 49 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.3 | Aplicação da argamassa estabilizada em obra | 50 |
| 3.3.1 | Consumo de material..... | 50 |
| 3.3.2 | Consumo de energia..... | 51 |
| 3.3.3 | Emissão de CO ₂ | 52 |
| 3.3.4 | Consumo de água | 52 |
| 3.3.5 | Perdas..... | 54 |
| 4 | ESTUDOS DE CASO..... | 60 |
| 4.1 | Dados secundários..... | 60 |
| 4.1.1 | Cimento..... | 60 |
| 4.1.2 | Areias..... | 63 |
| 4.1.3 | Produção das argamassas dosadas <i>in loco</i> | 63 |
| 4.2 | Plantas de produção de argamassa | 64 |
| 4.2.1 | Inventários | 64 |
| 4.2.2 | Resultados e discussões..... | 71 |
| 4.3 | Aplicação da argamassa estabilizada em obra | 80 |
| 4.3.1 | Inventário..... | 81 |
| 4.3.2 | Resultados e discussões..... | 83 |
| 4.4 | Indicadores ambientais da argamassa do " <i>berço-a-aplicação</i> "..... | 88 |
| 5 | COMPARATIVO DA ARGAMASSA DOSADA EM OBRA E ESTABILIZADA..... | 95 |
| 5.1 | Levantamento dos indicadores da argamassa dosada em obra..... | 95 |
| 5.2 | Comparativo: argamassas misturadas em obra x estabilizadas..... | 95 |
| 6 | CONCLUSÕES | 101 |
| 6.1 | Sugestões de trabalhos futuros..... | 102 |
| | REFERÊNCIAS | 104 |
| | APÊNDICES | 113 |

1 INTRODUÇÃO

É cada vez mais frequente a ocorrência de desastres naturais decorrentes principalmente de emissões de gases efeito estufa e da extração desenfreada de recursos naturais, e a população vem sofrendo suas consequências. O setor da construção, em prol de atender as necessidades de infraestrutura da sociedade, é responsável por 38% das emissões de CO₂ (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2020) e 50% de todo recurso natural extraído (JOHN, 2017; STEFFEN et al., 2011). Portanto, a busca por soluções inovadoras e sustentáveis, com o menor impacto ambiental possível, alto desempenho técnico e economicamente viável, passou a ser de vital importância.

O cimento é o produto manufaturado mais consumido no mundo, responsável por 7% das emissões antrópicas de CO₂ (SNIC, 2019), e corresponde a 1/3 dos recursos naturais extraídos (MONTEIRO; MILLER; HORVATH, 2017; UNEP et al., 2018). Nas próximas décadas, estima-se que as demandas de cimento serão de 50 a 100% maiores em países em desenvolvimento como o Brasil, para atender a necessidade de infraestrutura desses países (MONTEIRO; MILLER; HORVATH, 2017; REIS et al., 2021). Embora a literatura sugira que a maior parte do cimento é usada para produzir concreto, a argamassa mantém uma participação de mercado significativa. No Brasil, a argamassa representa de 40% a 50% do uso final do cimento (CETESB, 2017a; REIS; MACK-VERGARA; JOHN, 2019; UNEP et al., 2018, 2018).

Atualmente a rota tecnológica da argamassa mais utilizada no Brasil, com cerca de 96% da participação de mercado, é aquela dosada no canteiro de obra (CETESB, 2017a). Apesar da argamassa industrializada trazer ganhos importantes de eficiência e, conseqüentemente, a redução dos impactos ambientais em relação ao método tradicional, ela representa somente 5% do mercado. O processo de dosagem em central reduz em até 30% as perdas quando comparada com argamassa produzida em obra (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2017). A argamassa industrializada possui menor impacto ambiental devido ao ar incorporado e melhor eficiência na produção, permitindo um potencial de desmaterialização da construção em torno de 20% (REIS; MACK - VERGARA; JOHN, 2019). Portanto, um estudo sistêmico para mensurar os indicadores de desempenho ambiental faz-se necessário para aprofundar o conhecimento das argamassas industrializadas.

O objetivo deste trabalho é comparar o desempenho ambiental das argamassas estabilizadas com as dosadas em obra.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta o conceito da Análise do Ciclo de Vida (ACV), as normas técnicas pertinentes, histórico, aplicações e os desafios dessa metodologia para o setor de construção. Também são apresentados os aspectos ambientais das argamassas e seus insumos.

2.1 Análise do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia que fornece um diagnóstico quantitativo de diversos potenciais impactos ambientais ao longo da vida de um produto, embasando decisões que visam minimizar esses impactos (ABNT, 2014a; GRAEDEL; ALLENBY, 2003; JOHN, 2017). Apresenta a abordagem de ciclo de vida, considerando todas as fases do produto ou processo: desde a extração dos recursos junto à natureza, a produção, seu transporte, o uso, a manutenção e sua disposição final. Se baseia em um inventário dos fluxos de entrada (materiais e energia) e de saída (produto e liberações na atmosfera, no solo e na água) do processo. Esse inventário é convertido em indicadores que quantificam o potencial impacto ambiental. Esses indicadores são dados em uma unidade funcional, definida de acordo com a função do produto e expressa o seu desempenho, ou em unidade de referência (ABNT, 2014a; JOHN, 2017; KULAY; SEO, 2010). A avaliação dos potenciais impactos ambientais do produto é realizada baseada nesses indicadores, conforme as categorias de impactos selecionadas para o estudo, podendo ser mudança climática, depleção de camada de ozônio, depleção de recursos abióticos e bióticos, acidificação e eutrofização, ecotoxicidade entre outros (JOHN, 2017; KULAY; SEO, 2010). Esse método possibilita comparar componentes e processos produtivos de maneira quantitativa, considerando todo o ciclo de vida e avaliando diversos impactos ambientais concomitantemente (JOHN, 2017).

2.2 Normalização da ACV

As normas brasileiras ABNT NBR ISO 14040 e ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2014a, 2014b), que definem as diretrizes de estudos de ACV de qualquer produto ou serviço, divide tais estudos em quatro fases: (1) definição de objetivo e escopo, (2) análise de inventário (ICV), (3) avaliação de impacto (AICV) e (4) interpretação. É na fase de interpretação que as conclusões, limitações e recomendações devem ser apresentadas.

Como o processo de construção tem particularidades em relação a indústria em geral, diretrizes específicas foram desenvolvidas, como a norma técnica europeia EN 15978 (EUROPEAN COMMISSION, 2012b) que divide as etapas do ciclo de vida de edifícios conforme apresenta a Tabela 1. Os módulos A1 a A3, detalhados pela norma europeia EN 15804 (EUROPEAN COMMISSION, 2012a), englobam da extração até a produção dos insumos que serão consumidos em obra, ou seja, do berço-ao-portão da fábrica. O módulo A4 refere-se ao transporte desses insumos e equipamentos, da origem ao canteiro; o módulo A5 inclui todos os fluxos de entrada e saída durante o processo construtivo; as etapas de uso e manutenção desses edifícios estão alocadas no módulo B; o módulo C engloba a desconstrução e demolição dos edifícios; e o potencial de reuso, recuperação e reciclagem são abordadas no módulo D.

Tabela 1: Divisão por módulos das etapas do ciclo de vida de um edifício conforme DIN EN 15978. Fonte: autores a partir da EN 15978 (EUROPEAN COMMISSION, 2012a, p. 15978).

| Etapa de produto | | | Etapa de construção | | Etapa de uso | | | | | | | Etapa de fim de vida | | | | Benefícios e cargas além da fronteira |
|---------------------------|--------------------------|------------|---------------------|-----------------------------------|--------------|------------|--------|--------------|-----------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|------------|--------------------|------------------|--|
| A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B7 | B8 | C1 | C2 | C3 | C4 | D |
| Extração da matéria-prima | Transporte até a fábrica | Fabricação | Transporte | Construção, aplicação, instalação | Uso | Manutenção | Reparo | Substituição | Renovação | Uso operacional de energia | Uso operacional de água | Desconstrução / demolição | Transporte | Reuso / reciclagem | Disposição final | Potencial de reuso, recuperação e reciclagem |

2.3 Histórico e aplicações

O termo ciclo de vida de um produto ou serviço surgiu entre as décadas de 1950 e 1960 nos EUA sob a perspectiva de análise de custos, aplicado inicialmente para o gerenciamento do

orçamento público, e no início da década de 1980 o método estava sendo utilizado inclusive pelo setor privado (CURRAN, 2012). O primeiro registro de estudo realizado para questões ambientais é datado de 1969 e foi realizado pela Coca-Cola para avaliar alternativas de embalagens para o refrigerantes (CURRAN, 2012). No início da década de 1990 aparecem as primeiras metodologias baseadas nesses conceitos e com foco em impacto ambiental, como as *Environmental Priority Strategies (EPS)*, *Swiss Ecoscarcity* e o CML 1992/Holanda (CURRAN, 2012; EUROPEAN, 2010; HAUSCHILD; OLSEN; ROSENBAUM, 2018).

O artigo de Guinée et.al. (GUINÉE et al., 1993) publicado pela *Leiden University* em 1993 (Países Baixos) contém importantes conceitos e diretrizes seguidas até os dias atuais. A primeira publicação da *Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)* também de 1993: *Guideline for Life-Cycle Assessment: A Code of Practice* foi utilizada posteriormente pela *International Organization for Standardization (ISO)* na elaboração da série de normas ISO 14040 entre os anos de 1997 e 2006 (JENSEN; POSTLETHWAITE, 2008).

A SETAC e a *United Nations Environmental Program (UNEP)* juntaram esforços e em 2002 deram início a *Life Cycle Initiative*, organização não governamental que tem como objetivo promover o conhecimento do ciclo de vida, baseado nos impactos sociais, ambientais e econômicos das abordagens circulares (“Life Cycle Initiative”, 2021). Com desenvolvimento contínuo de conceitos, desde então vem disponibilizando diversos materiais (UNEP; SETAP; LIFE CICLE INICIATIVE, 2016), com destaque ao *ILCD Handbook* que atualmente orienta estudos de ACV (EUROPEAN COMMISSION; JRC-IES, 2010). A *Life Cycle Initiative* está presente hoje em todos os continentes, em iniciativas privadas, governamentais e acadêmicas, todos engajados na busca por soluções sustentáveis. No Brasil há registro do uso desse método em empresas como Braskem, Grupo Boticário, Natura entre outras (JOLLIET et al., 2016; WICHE; VALDIVIA, 2014).

A ACV é um método utilizado por empresas, organizações governamentais, pesquisadores e autoridades, na tomada de decisões estratégicas por ser capaz de fornecer análises de impactos ambientais decorrentes de suas ações. Instituições públicas utilizam esse método para conhecer e mensurar os impactos ambientais de vários setores da indústria, informações essas fundamentais para regulamentação de boas práticas ambientais. Empresas utilizam a ACV internamente para medir e monitorar o desempenho de seus produtos e processos, mas também na elaboração de novos produtos (CURRAN, 2012; JOHN, 2017; WOLF et al., 2012).

Empresas como Natura e Braskem são exemplos desse tipo de abordagem, embora de maneira pontual e esporádica (BRASKEN, 2021; NATURA, 2021). Para instituições setoriais, como por exemplo a indústria cimentícia, a ACV pode ser utilizada para comparar diferentes rotas tecnológicas de produtos similares, permitindo melhorias consideráveis principalmente no tocante a emissão de CO₂ e ao consumo de materiais (JOHN et al., 2020).

2.4 Desafios e a simplificação da ACV na construção

São muitas as certificações ou selos de sustentabilidade disponíveis no mercado mundial, porém 72% deles não apresentam equivalência entre si (GOLDEN et al., 2010) e, portanto, não são comparáveis. Apesar da quantidade crescente de selos de sustentabilidade, a eficácia em gerar resultados sustentáveis é duvidosa (GOLDEN et al., 2010). Segundo John (JOHN, 2017), poucos são os selos desenvolvidos com métodos conhecidos, discutidos abertamente, e embasados em avaliações técnicas criteriosas.

Por outro lado, a ACV é um método normalizado que mensura potenciais impactos ambientais capaz de englobar o ciclo de vida completo de um produto. Com abordagem objetiva, ele apresenta dados quantitativos e comparáveis. Para o setor da construção, considerar o ciclo de vida completo de uma edificação é relevante devido a sua ampla vida útil, pois além do complexo processo de construção (BELIZARIO-SILVA, 2022), utiliza recursos diversos e em grande volume. Por ser um método mensurável, fornece indicadores quantitativos, facilitando as análises e, posteriormente, o monitoramento das ações tomadas. Outra característica importante é sua capacidade de avaliar vários potenciais impactos simultaneamente (JOHN et al., 2020). Ademais, é o método recomendado internacionalmente para o setor da construção através das normas ISO 21930 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2017) e EN 15804 (EUROPEAN COMMISSION, 2012a), responsáveis por regular as Declarações Ambientais de Produto (DAPs). As DAPs informam o desempenho ambiental de produtos, permitindo a comparação entre produtos similares de diferentes fornecedores, auxiliando produtores que visualizam potencial de melhorias, e consumidores que podem fazer escolhas mais sustentáveis.

Um estudo de ACV convencional demanda extenso volume de dados, abrangendo toda a cadeia de suprimentos de toda gama de insumos. Deve considerar fluxos de entrada e saída de todos recursos, tanto de materiais como energia, inclusive resíduos desprendidos na atmosfera, no solo e na água (CURRAN; YOUNG, 1996; FILHO; JUNIOR; LUEDEMANN, 2016). É necessário que os dados sejam representativos, com abrangência temporal, tecnológica e geográfica (EUROPEAN COMMISSION; JRC-IES, 2010; KULAY; SEO, 2010). Ademais, quanto maior o número de categorias de impactos ambientais considerados no estudo, maior a quantidade de fluxos a serem inventariados (BELIZARIO-SILVA, 2022). Portanto, o levantamento de 100% de dados primários para um estudo de ACV é impraticável. A alternativa é a utilização de bancos de dados de estudos similares disponíveis. Devido à carência de dados nacionais, os estudos de ACV realizados no Brasil usualmente utilizam banco de dados internacionais. Porém, estima-se que as divergências em decorrência ao uso de dados secundários são na ordem de 10% a 225% (BELIZARIO-SILVA; OLIVEIRA; ARDUIN, 2017), apesar da adaptação da matriz energética brasileira (IBICT, 2019). Os bancos de dados internacionais mais utilizados são GaBi, EcoInvent, ELCD (MOROPOULOU et al., 2006; TURK et al., 2015; XING; XU; JUN, 2008). No Brasil, o Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) trabalhou no desenvolvimento de um banco de dados nacional, o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil), porém os dados são escassos, desatualizados e pouco representativos. Por exemplo, a produção de cimento considera o processo produtivo de uma fábrica localizada no México com adaptação da matriz energética brasileira (SICV, 2005).

Apesar da EN 15804 (EUROPEAN COMMISSION, 2012a) apresentar 16 categorias de impacto ambiental a serem analisados em um estudo de ACV, o artigo de (BELIZARIO-SILVA et al., 2020) mostra que um grupo reduzido dessas categorias é suficiente para atender as demandas da maioria dos produtos de construção. Como exemplo tem-se a radiação ionizante, uma vez que deixar de medi-la não compromete os resultados das avaliações ambientais realizadas. Isso significa deixar de medir uma quantidade considerável de fluxos elementares que pouco ou nada se relacionam com a cadeia da construção. Por outro lado, a mesma norma não apresenta os fluxos de elementos como o dióxido de silício (areia) e o calcário como sendo necessários no cálculo dos indicadores de depleção de recursos naturais. Esses recursos são os mais utilizados em massa na construção e transformam a paisagem local onde são extraídos. A escassez regional da areia já é uma realidade e obriga construtores a buscarem por estes recursos em regiões cada vez mais distantes. Na região metropolitana de São Paulo, onde outrora a disponibilidade de areia local era uma realidade, atualmente é transportada

por 200 km para suprir o setor, conforme observado no estudo de caso. Estudo da Suíça (IOANNIDOU et al., 2017) apresenta uma metodologia para avaliar a criticidade da disponibilidade de areia local em regiões desse país, com o objetivo de preparar os setores de regiões mais críticas na busca por soluções sustentáveis de fornecimento.

Portanto, a utilização de banco de dados secundários em estudos de ACV no setor da construção, mesmo seguindo as normas internacionais vigentes (EUROPEAN COMMISSION, 2012a), podem não refletir a realidade local, apresentar divergências significativas e, conseqüentemente, conduzir a análises equivocadas (CALDAS; CARVALHO; TOLEDO FILHO, 2020; CURRAN; YOUNG, 1996; JOHN et al., 2013; MEDEIROS; DURANTE; CALLEJAS, 2018).

A simplificação da ACV não é uma necessidade recente, o relatório de (CURRAN; YOUNG, 1996) mostra o assunto sendo debatido em 1996. No Brasil, a simplificação da ACV está prevista na norma ABNT ISO NBR 14044 quando diz que a “exclusão de (...) entradas ou saídas só é permitida se isso não provocar uma mudança significativa nas conclusões gerais do estudo” (ABNT, 2014b). O relatório da *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) apresenta as seguintes categorias de indicadores do ciclo de vida como sendo os mais críticos para o setor construtivo imobiliário: energia, emissão de gases de efeito estufa, água e material (WBCSD, 2016).

O artigo de (OLIVEIRA; PACCA; JOHN, 2016) mostra que mesmo para processos similares, com mesma rota tecnológica de empresas localizadas no mesmo país, as divergências nos resultados podem ser alarmantes. No referido estudo, dados primários de 29 produtores de blocos de concreto de diferentes regiões do Brasil foram levantados. Dados de insumos foram retirados de literatura nacional. Os fabricantes apresentaram resultados com variação de 2,6 a 3,3 vezes para emissão de CO₂, e variação de 3,5 a 4,0 vezes para consumo de energia. Essas variações devem-se principalmente ao consumo de cimento. Os resultados apresentados mostram o potencial do setor em alcançar menores impactos ambientais.

O método da Avaliação o Desempenho Ambiental da Construção (ADAC) proposto por (JOHN et al., 2020) é uma simplificação da ACV, que nasce com o objetivo de apoiar na tomada de decisão, quantificando os impactos de maneira prática, identificando prioridades, monitorando e comunicando os avanços obtidos. É baseado em dez princípios, sendo eles: priorizar os impactos ambientais mais urgentes (com foco nos processos de responsabilidade do agente gestor ou por ele influenciáveis), manter a perspectiva do ciclo de vida, ser universal

e adaptável, permitir diferenciar empresas (permitindo escolhas mais sustentáveis pelos consumidores), viabilizar *benchmarks* setoriais, privilegiar dados primários, explicitar a incerteza de dados genéricos, facilitar a compreensão (tornando a informação acessível a todos profissionais envolvidos), integrar sistemas de gestão e promover a melhoria contínua (JOHN et al., 2020). Por ser uma simplificação da ACV, seu escopo é reduzido, a coleta de dados é simples e pode ser realizada pelo próprio produtor. Os dados coletados são convertidos em cinco indicadores de desempenho ambiental, sendo: consumo de energia, emissão de CO₂, consumo de água, consumo de materiais e geração de resíduos. Esses indicadores abrangem as principais questões ambientais da construção como a desmaterialização, a reciclagem, a redução de perdas e resíduos, a diminuição de aterros, a eficiência energética, a utilização de energias renováveis, o estresse hídrico principalmente em centros urbanos, e as emissões de gases de efeito estufa (JOHN et al., 2020). Importante ressaltar que o método da ADAC não confronta com a ACV convencional, porém, requer menor quantidade de dados e propõe indicadores de fácil entendimento, tornando-a mais acessível para o setor da construção (JOHN et al., 2020).

A tese de doutorado de (BELIZARIO-SILVA, 2022) é uma proposta de simplificação de ACV que propõe os seguintes indicadores para medir o desempenho ambiental das construções: de material, de energia, emissão de CO₂, de água, e ocupação do solo. A geração de resíduo está contemplada no indicador de material. Segundo a autora, esses indicadores “apresentam baixa correlação entre si, avaliam aspectos ambientais prioritários e que podem ser influenciados pelo setor da construção, podendo ser facilmente medidos e compreendidos”.

O artigo de (OLIVEIRA; PACCA; JOHN, 2016), o método da Avaliação do Desempenho Ambiental da Construção (JOHN et al., 2020) e a tese de (BELIZARIO-SILVA, 2022) se destacam pelo escopo reduzido, bem como pela coleta de dados primários realizada pelos próprios produtores e construtores. Como a coleta de dados é realizada de maneira descomplicada e de fácil compreensão, torna-se acessível para o setor da construção.

O Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac¹) (BELIZARIO-SILVA et al., 2022; MME; CBCS, 2022) nasceu a partir da proposta apresentada em (JOHN et al., 2020). Lançado em 2022, o sistema permite o cálculo dos indicadores de energia primária e

¹ <https://sidac.org.br/>

emissão de CO₂ para as principais atividades da construção civil (JOHN et al., 2021). Desenvolvido pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), Ministério de Minas e Energia (MME) e Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ), mobilizou um grupo de pesquisadores empenhados no levantamento de dados primários e confiáveis na literatura nacional com o objetivo de garantir dados de qualidade para o setor.

2.5 Argamassas

A **produção de argamassas** possui três rotas tecnológicas, a dosada em obra, a industrializada tradicional e a argamassa estabilizada. A dosada em obra é a mais utilizada, composta por cimento, cal hidratada, areia e água. A argamassa industrializada tradicional é entregue na obra como uma mistura seca em sacos ou silos e precisa ser misturada com água. A argamassa estabilizada é entregue via caminhão betoneira pronta para uso, produzida com aditivo que retarda as reações de hidratação até a sua aplicação. Esta última é uma novidade no mercado.

As **argamassas estabilizadas** levam em sua composição os componentes básicos de qualquer argamassa (cimento, areia e água); o aditivo incorporador de ar, que garante melhor trabalhabilidade do produto; e o aditivo inibidor de hidratação, que aumenta o tempo de início de pega, permitindo a utilização da argamassa em até 72 horas. O aditivo retardador, como também é conhecido, viabiliza logística muito diferente: a argamassa é produzida em central (garantindo melhor controle de dosagem e menores perdas), transportada em caminhões betoneiras, armazenada na obra em caixas plásticas niveladas, e é colocado filme d'água para garantir a sua umidade. Desta maneira é possível maior disponibilidade do produto na obra, mesmo nas primeiras horas do dia, aumentando a produtividade na aplicação. Como a argamassa não é misturada em obra, outras vantagens podem ser destacadas como a diminuição de área de canteiro destinada ao estoque de matéria-prima e produção, redução de mão-de-obra para mistura, menor geração de resíduos (não há descarte de embalagens de cimento), melhor controle de qualidade durante o processo e redução de perdas. As argamassas estabilizadas disponíveis no mercado podem ser utilizadas em revestimentos internos e externos, contrapiso, assentamento de blocos de vedação e estrutural (BENNTER, 2019; CONCRESERV, 2019; ITAMBÉ, 2019; SUPERMIX, 2019;

VOTORANTIM, 2019a; “Webinar: A norma NBR 13281 e o impacto para argamassa estabilizada”, 2023).

Na Europa, a primeira **norma técnica de argamassas estabilizadas** é de 1981, a *British Standard 4721*, substituída em 2015/2016 pela BS EN 998-1 e 998-2 (MPA MORTAR, 2015, 2016a, 2016b). Nos Estados Unidos, a argamassa estabilizada começou a ser utilizada no início dos anos 80 e a ASTM publicou em 1982 um artigo sobre suas propriedades (GATES; NELSON; PISTILLI, 1990). Na China, a *Municipal Commission of Beijing* proibiu a mistura de argamassas em canteiros em todas as capitais desde 2015, e para execução de alvenaria somente a argamassa estabilizada vem sendo utilizada (BEIJING MUNICIPAL COMMISSION, 2015). Em países como Canadá, Egito e Brasil, a argamassa estabilizada também é oferecida no mercado da construção (BENNTER, 2019; LAFARGE, 2021a, 2021b; SUPERMIX, 2019; VOTORANTIM, 2019a).

Não foram encontrados na literatura estudos de ACV que incluem **perdas no processo de assentamento de alvenaria**. Porém, estima-se que as perdas durante a aplicação de argamassa de revestimento e assentamento podem chegar entre 50 e 100% (FORMOSO et al., 2002a). Portanto, as perdas no processo do berço-à-aplicação da argamassa são significativas e precisam ser consideradas nos estudos de impacto ambiental. Estudos como os de (FORMOSO; ISATTO; HIROTA, 1999; LI et al., 2013) apresentam modelos para quantificar as taxas de perdas e desperdícios na construção.

2.6 Produção dos insumos

A análise detalhada do processo de produção das matérias-primas, frequentemente referido como processos background, é apresentada a seguir. Além disso, são fornecidos dados referentes ao consumo de energia e emissões de CO₂ associadas a cada matéria-prima.

2.6.1 Cimento

A emissão de CO₂ durante a produção de cimento é um tema amplamente discutido na literatura, com variações de 220 a 770 kg CO₂/t, conforme relatado em estudos globais (OLIVEIRA et al., 2014; WORRELL et al., 2001). No contexto brasileiro, as emissões foram estimadas em aproximadamente 700 kg CO₂/t em 1990, reduzindo para 564 kg CO₂/t em 2014, o que representa uma redução de 18% (SNIC, 2019). Essa melhoria é atribuída aos investimentos em pesquisa e desenvolvimento realizados pelo setor cimentício (SNIC, 2019). O Roadmap do cimento, estabelecido pelo SNIC (2019), estipula uma redução ainda mais expressiva, de 33%, das emissões de CO₂ até 2050, apesar das projeções de aumento no consumo de cimento em 65%, destacando a necessidade de esforços contínuos no setor (SNIC, 2019), destacando a necessidade de esforços contínuos no .

A queima de combustível no forno é responsável por aproximadamente um terço das emissões de CO₂ durante a produção de clínquer, enquanto as reações químicas durante a calcinação contribuem com dois terços (SNIC, 2019). O setor brasileiro já adota estratégias de mitigação, como a redução na taxa de clínquer, e investe em pesquisas para avançar nesse sentido (SNIC, 2019). Ademais, há potencial de mitigação ao reduzir a proporção de clínquer em cimentos destinados à produção de argamassas, uma vez que estas geralmente não requerem altas resistências.

A implementação de tecnologias mais eficientes energeticamente e o uso de combustíveis alternativos também são vistas como estratégias promissoras de mitigação (SNIC, 2019). No Brasil, o consumo elétrico na produção de cimento contribui com cerca de 1% das emissões de CO₂, sendo estimado em 101 kWh/t (EPE, 2021), principalmente devido a atividades como moagem e transporte dos insumos (WORRELL et al., 2001). Há potencial de mitigação dessas emissões através da implementação de tecnologias de recuperação de calor para produção de energia elétrica (SNIC, 2019). Além disso, investimentos em inovação, como a captura, armazenamento e utilização do CO₂, são fundamentais para mitigar as emissões no setor (SNIC, 2019).

A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo de produção de cimento, desde o berço até o portão da fábrica.

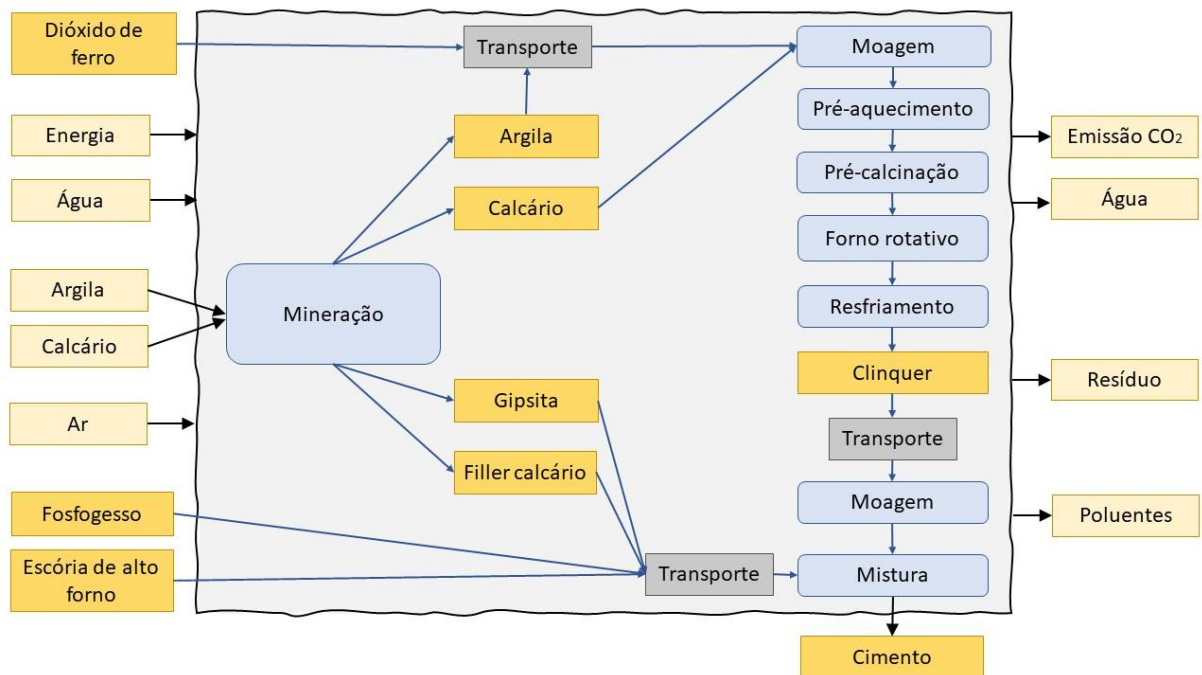


Figura 1: Fluxograma do processo de produção do cimento do berço-ao-portão. Fonte: Autora a partir de (BELIZARIO-SILVA; OLIVEIRA; JOHN, 2022)

Os indicadores ambientais nacionais e internacionais do cimento disponíveis na literatura estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Emissão de CO₂, consumo de energia, consumo d'água e geração de resíduo para produção de cimento Portland. Dados internacionais e brasileiros.

| | Descrição | Consumo de energia (MJ/kg) | Emissão de CO ₂ (kg CO ₂ /kg) | Consumo d'água (kg/kg) | Geração de resíduo (kg/kg) | Fonte e/ou observações |
|----------------------|-------------------------------|----------------------------|---|------------------------|----------------------------|---|
| Brasil | CP II E | 2,489-5,622 | 0,4433-0,9348 | - | - | Sidac (MME; CBCS, 2022) |
| | CP II E | - | 0,607* | 0,183 | 0,3 ~ 0,6 | ecoinvent V3.16 (IBICT, 2019) |
| | CP | - | - | 0,594** | - | Votorantim (BOCCIA, 2023) |
| | CP II E 40 | 2,520 | 0,7891* | 5,5 | 0,000168 | S-P-00895 (20/06/21) (VOTORANTIM, 2016a) |
| | Todas as obras (CP II F/Z 32) | 2,394 | 0,682* | 4,71 | 0,00355 | S-P-01123 (02/12/24) (VOTORANTIM, 2019b) |
| Dados internacionais | CP | - | - | 0,185-1,333 | - | (MACK-VERGARA; JOHN, 2017) |
| | CP, UE | 5,039 | 0,803* | 7 | 0,0018904 | DAP (24/02/25) (CEMBUREAU, 2020) |
| | CP, EUA | 4,218 | 0,922* | 1,04 | 0,309 | DAP 195 (03/12/26) (PCA, 2021) |
| | CP, Chicago | 3,826 | 0,863* | 0,4 | 0,0001 | DAP 179 (26/02/26) (HOLCIM, 2021) |
| | CP, Canada | 6,910 | 0,8405* | 1,8 | 0,00097 | DAP 5357-9431 (20/03/21) (CAC, 2016) |
| | CP, Romênia | 1,961 | 0,504* | 1,26 | 0,0089696 | S-P-00527 (04/06/25) (HOLCIM, 2014) |
| | CEMII 42.5 N/B-I Israel | 3,200 | 0,670* | 0,985 | 0,0008283 | S-P-00524, (14/01/19) (NESHER, 2012) |

*Potencial de aquecimento global em kg CO₂equiv

**Dado o consumo de 0,625 m³ de água/t clínquer e considerando 0,800 t clínquer/t cimento (BELIZARIO-SILVA, 2022; VOTORANTIM, 2016a)

2.6.2 Areias

A areia predominante na composição da argamassa é a de quartzo, encontrada no Brasil principalmente em leitos de rios, mas também encontrada em planícies aluviais, várzeas, etc

(SCHMALFUSS; TIMM; PASSUELLO, 2022). A extração dá-se por dragagem, desmonte hidráulico ou escavação mecânica, a depender da origem (SCHMALFUSS; TIMM; PASSUELLO, 2022). O processo pode ser dividido em três etapas: a extração propriamente dita, a lavagem e a classificação granulométrica (ANEPAC, 2019; SCHMALFUSS; TIMM; PASSUELLO, 2022). O consumo de d'água ocorre durante a extração ou a lavagem, a depender do processo. O consumo de energia dá-se para o funcionamento de equipamentos como tratores, escavadeiras, carregadeiras, dragas, flutuantes, barcos ou bombas; e uma menor parcela de eletricidade é responsável pelo funcionamento de esteiras transportadoras e outros equipamentos menores (ANEPAC, 2019; SCHMALFUSS; TIMM; PASSUELLO, 2022). Os resíduos gerados durante a extração da areia provêm do decapeamento da área a ser explorada, ou são finos decorrente da lavagem da areia (ANEPAC, 2019). A Figura 2 (à esquerda) apresenta o fluxograma de extração da areia pela rota de mineração do solo. Optou-se por ilustrar essa rota por ser o processo de extração utilizado do estudo de caso.

A areia artificial pode ser utilizada em alguns tipos de argamassa e é obtida a partir do processo de produção da brita, através da lavagem do pó de pedra que diminui a fração fina do produto (ANEPAC, 2019), conforme ilustrado na Figura 2 (à direita).

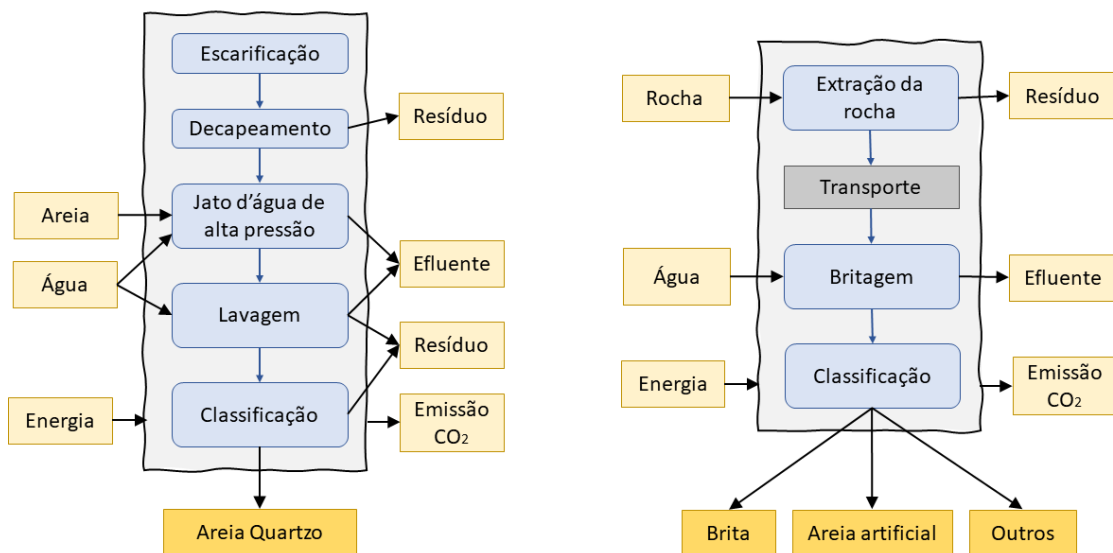


Figura 2: Fluxogramas dos processos de extração de areia de quartzo pela mineração do solo (esquerda) e de areia artificial a partir da britagem de rochas (direita). Fonte: Autora a partir de (ANEPAC, 2019; SCHMALFUSS; TIMM; PASSUELLO, 2022).

Pelo fato da areia ser considerada um recurso natural abundante no mundo, não são encontrados dados de depleção de recursos abióticos da areia em estudos de ACV convencional (HABERT et al., 2010). Entretanto, sua escassez em alguns centros urbanos já é uma realidade, obrigando mineradoras a buscarem esse mineral em jazidas cada vez mais distantes, aumentando a pegada energética do insumo devido ao transporte.

O mercado informal de areia é expressivo no Brasil, e apesar de apresentar vantagens econômicas imediatas para o consumidor, o custo ambiental dessa prática é muito alto, acarretando uso ineficiente do solo, baixa produtividade, degradação de áreas exploradas sem política de recuperação ambiental, uso inadequado do recurso hídrico, despejo de efluente não tratado e o aumento da pegada de CO₂ (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2017).

A Tabela 3 apresenta indicadores ambientais da areia disponíveis na literatura nacional. O Sidac (MME; CBCS, 2022) apresenta dados nacionais de consumo de energia e emissão de CO₂ referentes a extração e processamento da areia e da brita, obtidos a partir de nove referências como artigos científicos, relatórios institucionais, artigo de congresso, teses de mestrado e doutorado, trabalhos acadêmicos e banco de dados (SCHMALFUSS; TIMM; PASSUELLO, 2022). O processo de extração da areia artificial é concomitante ao processo de extração da brita, portanto pode-se assumir os mesmos indicadores para a areia artificial. O trabalho de (REIS; MACK-VERGARA; JOHN, 2019) apresenta o consumo de água e geração de resíduo obtidos a partir do balanço de massas da produção de argamassa no mercado brasileiro durante 2015.

Tabela 3: Consumo de energia, emissão de CO₂, consumo d'água e geração de resíduo para extração de areia de quartzo e processamento de brita. Dados da literatura nacional.

| Descrição | Consumo de energia (MJ/kg) | Emissão de CO ₂ (kg CO ₂ /kg) | Consumo d'água (kg/kg) | Geração de resíduo (kg/kg) | Fonte |
|-------------------------|----------------------------|---|------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Areia de quartzo | | | | | |
| Dados brasileiros | 0-0,1934 | 0-0,01251 | - | - | Sidac (MME; CBCS, 2022) |
| | - | - | 0,296 | 0,35* | (REIS; MACK-VERGARA; JOHN, 2019) |
| Brita | | | | | |
| Dados brasileiros | 0,002051-0,09613 | 0-0,004669 | - | - | Sidac (MME; CBCS, 2022) |
| | - | - | 0,296 | 0,35* | (REIS; MACK-VERGARA; JOHN, 2019) |
| Dados internacionais | | | 0,116-2,0 | | (MACK-VERGARA; JOHN, 2017) |

*Geração de resíduo inclui finos e estéril de mineração

2.6.3 Cal hidratada

A produção da cal inicia com a **mineração** do calcário realizada com explosivos ou utilizando rompedor e retroescavadeira (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014). A pá carregadeira é utilizada para a movimentação interna dessa matéria-prima (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014; MARTINS; PUNHAGUI; JOHN, 2022). Após extração, o calcário processado é transportado até a fábrica de cal por meio de caminhão à diesel (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014; MARTINS; PUNHAGUI; JOHN, 2022). Na fábrica, o calcário é cominuído em **britadeiras** antes de entrar nos fornos de **calcinação**, correias transportadoras elétricas são comuns nesse processo (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014; MARTINS; PUNHAGUI; JOHN, 2022). As tecnologias dos fornos empregados no Brasil variam consideravelmente, há grandes empresas que operam com fornos de alta eficiência energética, com uso de lenha ou resíduo industrial provenientes de madeira plantada, são empresas engajadas na busca pela produtividade e soluções que mitigam as emissões de CO₂ (MARTINS; PUNHAGUI; JOHN, 2022). Porém, muitos produtores médios e pequenos operam fornos artesanais de baixa eficiência energética, alimentados com biomassa de procedência diversa, inclusive madeira nativa de fonte ilegal (MARTINS; PUNHAGUI; JOHN, 2022). As principais fontes energéticas do setor provêm da biomassa (lenha) e do coque de petróleo, 43% e 41% respectivamente (MARTINS; PUNHAGUI; JOHN, 2022). A cal virgem produzida é submetida à **moagem** a fim de se obter granulometria adequada (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014; MARTINS; PUNHAGUI; JOHN, 2022). O processo de **hidratação**, responsável por transformar a cal virgem na cal hidratada, é realizada por equipamentos elétricos e adição de água (MARTINS; PUNHAGUI; JOHN, 2022). Parte dessa água será absorvida durante o processo e parte será liberada em forma de vapor d'água (MARTINS; PUNHAGUI; JOHN, 2022). A Figura 3 ilustra o processo descrito.

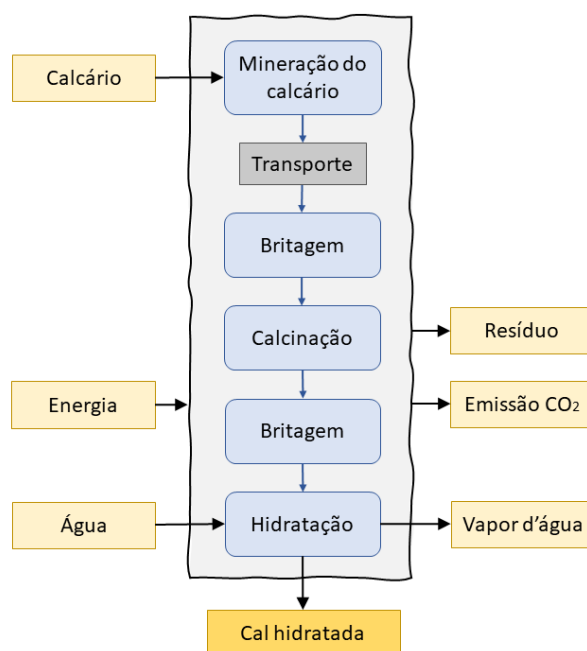


Figura 3: Fluxograma do processo de extração do calcário e produção da cal hidratada. Fonte: Autora a partir de (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014; MARTINS; PUNHAGUI; JOHN, 2022).

O relatório de (MARTINS; PUNHAGUI; JOHN, 2022), elaborado pela equipe desenvolvedora do Sidac, apresenta o levantamento de dados de emissão de CO₂ e consumo de energia das cales baseado na média e desvio padrão amostral de dados coletados na literatura que representam o cenário nacional. Os dados foram extraídos de trabalhos científicos e relatórios setoriais, obtidos em entrevistas com fornecedor local ou fornecidos pela Associação Brasileira de Produtores de Cal (ABPC). Os dados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Consumo de energia, emissão de CO₂, consumo d'água e geração de resíduo para produção da cal hidratada. Dados da literatura nacional.

| Descrição | Consumo de energia (MJ/kg) | Emissão de CO ₂ (kg CO ₂ /kg) | Consumo d'água (kg/kg) | Geração de resíduo (kg/kg) |
|--|----------------------------|---|------------------------|----------------------------|
| Cal hidratada - dados brasileiros | | | | |
| CH-I | | 0,6868-0,9477 | | |
| CH-II | 3,989-5,065 | 0,6741-0,9645 | 0,4817-0,5683 | 0,318-1,526 |
| CH-III | | 0,5674-0,8968 | | |

*Fonte: (MME; CBCS, 2022).

2.6.4 Aditivos

Os fabricantes de aditivos no Brasil não disponibilizam DAPs de seus produtos. A literatura internacional disponibiliza DAPs de aditivos conforme apresentado na Tabela 5 (EFCA, 2015a, 2015b).

Tabela 5: Consumo de energia, emissão de CO₂, consumo d'água e geração de resíduo para produção de aditivos.

| Descrição | Consumo de energia (MJ/kg) | Emissão de CO ₂ (kg CO ₂ /kg) | Consumo d'água (kg/kg) | Geração de resíduo (kg/kg) | Fonte |
|------------------------------------|----------------------------|---|------------------------|----------------------------|---------------|
| Plastificante e superplastificante | 32,91 | 1,88 | 0,00604 | 0,0265 | (EFCA, 2015a) |
| Retardador | 30,37 | 1,31 | 0,00575 | 1,66134 | (EFCA, 2015b) |

3 METODOLOGIA

Esta dissertação é parte do estudo multidisciplinar do Consórcio Setorial para Inovação em Tecnologia de Revestimentos de Argamassa (Consitra) em parceria com a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), cujo objetivo é melhorar a eficiência técnica e ambiental das argamassas estabilizadas.

Foi utilizada a abordagem do **ciclo de vida** conforme diretrizes introduzidas por (JOHN et al., 2020) e desenvolvidas no Sidac (MME; CBCS, 2022). Essa metodologia é baseada nos conceitos da ACV, porém de forma simplificada, considerando somente parâmetros representativos ambientalmente, possíveis de serem medidos pela equipe técnica responsável da obra, reduzindo a complexidade do levantamento de dados e tornando o estudo viável (BELIZARIO-SILVA et al., 2023). Os cinco indicadores de desempenho ambiental adotados neste estudo são: consumo de energia, emissão de CO₂, consumo de água, consumo de material e perdas.

A **fronteira do sistema** considerada foi do berço-à-aplicação, ou seja, começa com a produção dos insumos e seu transporte até a central, inclui o processo de mistura da argamassa e transporte até o canteiro, e finaliza com sua aplicação, módulos A1 a A5 da DIN EN 15978. As etapas de uso, fim de vida e benefícios / cargas além da fronteira não foram consideradas neste estudo (módulos B a D da DIN EN 15978) (EUROPEAN COMMISSION, 2012b).

Os estudos de caso sobre a produção das argamassas foram realizados em três centrais: a Central de Itaquaquetuba da empresa Supermix, e as Centrais de Americana e Campinas da

empresa Engemix, pertencentes à Votorantim Cimentos, todas localizadas no estado de São Paulo. O estudo de caso sobre a aplicação da argamassa estabilizada em obra ocorreu em um canteiro localizado na cidade de São Paulo, durante execução de alvenaria estrutural com blocos de concreto. Todos os dados foram coletados no local, por meio de formulários disponibilizados aos responsáveis, e processados em formato de inventário. Foram considerados dados nacionais de fontes confiáveis para a produção dos insumos e a dosagem de argamassa em obra.

O fluxograma da argamassa estabilizada está ilustrado na Figura 4, enquanto o da argamassa dosada in loco está na Figura 5.

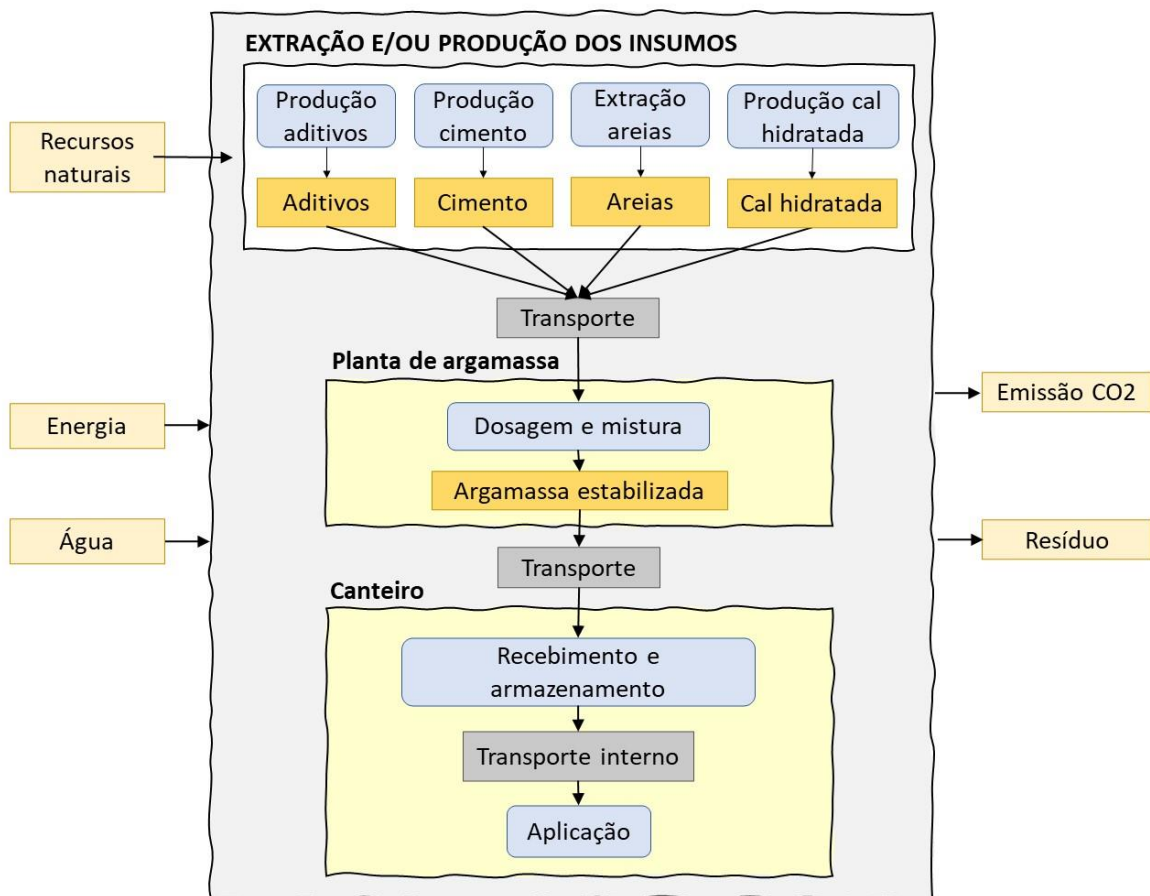


Figura 4: Fluxograma da argamassa estabilizada. Fronteira do berço-à-aplicação. Fonte: A autora.

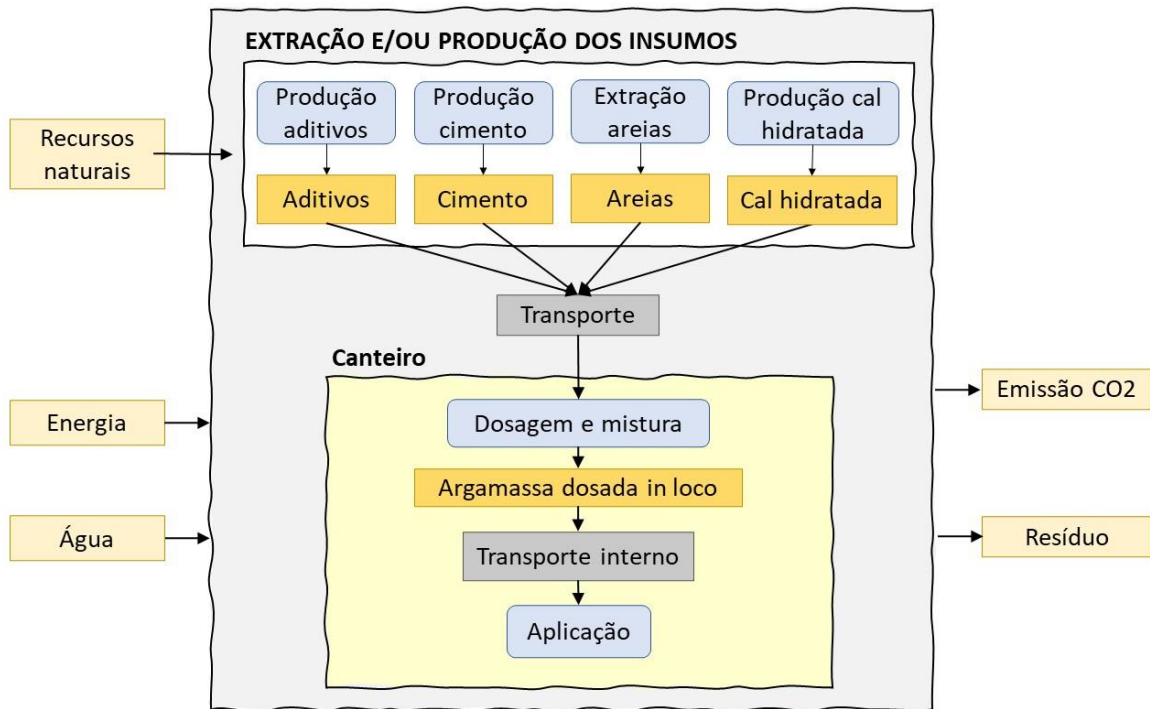


Figura 5: Fluxograma da argamassa dosada em obra. Fronteira do berço-à-aplicação. Fonte: A autora.

A **unidade de referência** (UR) adotada no estudo foi 100 m² de parede executada, exceto na análise das etapas A1 a A3 (do berço-ao-portão) que foi m³ de argamassa produzida. O processo de aplicação das argamassas é relevante, visto que o volume das perdas geradas depende da rota de aplicação, tanto relacionada ao tipo de aplicação (assentamento ou revestimento) quanto ao equipamento utilizado (colher de pedreiro ou bomba projetora). Como este trabalho trata do assentamento de blocos estruturais com argamassas estabilizada, aplicada com espátula de pedreiro, é importante salientar que o foco do estudo é a argamassa. Portanto, a fabricação e transporte de blocos de concreto está fora do escopo.

Este estudo não previu os impactos ambientais decorrentes da fabricação e manutenção de maquinário e equipamentos, nem da construção e utilização da infraestrutura utilizada. Apenas impactos diretos decorrentes do processo produtivo foram incluídos.

O consumo acumulado de energia primária de um produto inclui o consumo de todos os recursos energéticos consumidos durante o processo, tanto os recursos renováveis como os não renováveis. Portanto, foram considerados os combustíveis fósseis (gasolina, diesel, óleo diesel, gás natural etc.), os combustíveis biogênicos (etanol, carvão vegetal, biodiesel, bagaço-

de-cana, melação etc.) e outras fontes de energia como a de origem solar, eólica, hidráulica e nuclear. A energia consumida durante o processo será convertida em energia primária.

A energia consumida durante a extração, beneficiamento e distribuição dos combustíveis fósseis e biogênicos não está incluída nesse estudo. O consumo de energia considerado refere-se somente à combustão direta. Da mesma forma, não está incluída a infraestrutura e equipamentos para geração e distribuição de energia de outras fontes, como solar, eólica, hidráulica e nuclear. O transporte das pessoas de suas casas até o local de trabalho e a energia metabólica decorrente de trabalhos manuais não foram consideradas, mesmo que estejam contidos na fronteira do sistema.

Neste estudo adotou-se o poder calorífico e fator de emissão de CO₂ do diesel e da eletricidade conforme dados pelo Sidac (MME; CBCS, 2022) apresentados na Tabela 6. O fator de emissão de CO₂ da eletricidade considera os dados médios dos anos de 2018 até 2020 disponibilizados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2020), que inclui todas as usinas que estão gerando eletricidade, não apenas aquelas que estão operando na margem. O fator de conversão do consumo de eletricidade em kWh para energia primária (MJ) considera a matriz energética brasileira formada por diferentes fontes de energia, e os cálculos incluem as perdas durante a transformação, bem como perdas e desvios não contabilizados pelo sistema fiscal. Detalhes das considerações assumidas no Sidac estão disponíveis em (GUERREIRO; CACHOLA; PACCA, 2022).

Tabela 6: Fatores de conversão da eletricidade e do óleo diesel. Dados da literatura nacional.

| | Fator de conversão em energia primária | Fator de emissão de CO₂ |
|--------------|---|---|
| Eletricidade | 5,22 MJ / kWh | 0,07 kg CO ₂ / kWh |
| Diesel | 35,21 MJ / l | 2,6 kg CO ₂ / l |

Fonte: (MME; CBCS, 2022).

3.1 Transporte dos insumos

O cálculo dos indicadores referente ao transporte dos insumos foi realizado seguindo as diretrizes do Sidac, detalhado em (GUERREIRO; CACHOLA; PACCA, 2022). O transporte dos insumos da origem até a central dosadora aconteceu via rodovia e foi estimado com base na unidade tonelada.kilômetro (t.km). O endereço dos fornecedores e o tipo de caminhão

utilizado foram fornecidos pelo responsável da central misturadora. A distância de transporte foi estimada a partir do Google Maps®. Baseado nas informações recebidas pela central, foram considerados veículos compostos por carreta de 3 eixos e cavalo mecânico de 5 eixos com capacidade de carga de 25 toneladas. Foi considerado o veículo retornando vazio, ou seja, ida e volta do veículo, e o consumo de óleo diesel de 0,665 l/km (CETESB, 2017b). A perda de matéria-prima durante o transporte e o consumo de óleos e lubrificantes de manutenção foram negligenciados.

O indicador de energia primária decorrente do transporte dos insumos é dado pela Equação 1 e o indicador de emissão de CO₂ é dado pela Equação 2.

$$I_{E.transp.i} = 2 \times \frac{D_{truck}}{P_{truck}} \times F_{E.diesel} \times Dist_i \times (V_{transp.i} \div 1000) \quad \text{Equação 1}$$

$$I_{CO2.transp.i} = 2 \times \frac{D_{truck}}{P_{truck}} \times F_{CO2.diesel} \times Dist_i \times (V_{transp.i} \div 1000) \quad \text{Equação 2}$$

Onde: $I_{E.transp.i}$ é o indicador de energia primária referente ao transporte do insumo i (MJ/m³), D_{truck} é o consumo específico de diesel do caminhão (l/km), P_{truck} é a capacidade de carga do caminhão (t), $F_{E.diesel}$ é o fator de conversão de energia primária do diesel (MJ/l), $Dist_i$ é a distância de transporte do insumo i (km), $V_{transp.i}$ é a massa transportada do insumo i por m³ de argamassa produzida (kg/m³);

$I_{CO2.transp.i}$ é o indicador de emissão de CO₂ referente ao transporte do insumo i (MJ/m³), D_{truck} é o consumo específico de diesel do caminhão (l/km), P_{truck} é a capacidade de carga do caminhão (t), $F_{CO2.diesel}$ é o fator de emissão de CO₂ do diesel (kg CO₂/l), $Dist_i$ é a distância de transporte do insumo i (km) e $V_{transp.i}$ é a massa transportada do insumo i por m³ de argamassa produzida (kg/m³).

3.2 Produção da argamassa estabilizada

O processo de produção de argamassa estabilizada observado em visita técnica na central da Supermix (planta de Diadema/SP) pode ser resumido da seguinte maneira:

- a) Os aditivos são medidos (volume) ou pesados (balança) e colocados no balão do caminhão betoneira. Esse processo pode acontecer de maneira manual ou automatizada, dependendo da tecnologia disponível na central. Na central de Itaquaquecetuba o processo é manual.
- b) Adição dos demais insumos no balão do caminhão: cimento, areia de quartzo e/ou areia artificial e água. Os insumos são pesados automaticamente pelo sistema de balança da central. Na planta de Itaquaquecetuba os parâmetros de tolerância na

automação são de 1% para o cimento e 3% para os agregados, sendo essa premissa replicada para as plantas de Americana e Campinas.

- c) Lavagem externa do caminhão após pesagem dos materiais.
- d) Mistura da argamassa dentro do caminhão. O tempo de mistura pode variar conforme parâmetros definidos pela empresa.
- e) Realização de ensaios de densidade e *slump test* conforme procedimento definido pela empresa;
- f) Transporte até a obra/cliente.
- g) Descarregamento da argamassa no(s) reservatório(s). Se a utilização do produto não for imediata, deve ser colocada película d'água de 1 cm.

3.2.1 Consumo de material

Existem duas maneiras de quantificar o consumo dos insumos: (i) *quantidade pesada*, que consiste na quantidade de material pesado no sistema de balança durante a dosagem da argamassa; e (ii) *quantidade de estoque*, que consiste na quantidade de material em estoque no início do período, somado com a quantidade adquirida desse insumo, subtraído da quantidade em estoque ao final do intervalo de tempo considerado. Um balanço de massas de cada insumo é realizado com as quantidades (i) e (ii), ou seja, a *quantidade de estoque* (ii) subtraído a *quantidade pesada* (i) resulta nas perdas durante o processo. Na ausência dos dados (i) e (ii), o consumo de material pode ser estimado a partir dos traços das argamassas, porém não é possível quantificar as perdas.

Dados de densidade das areias e dos aditivos foram solicitados pelos fabricantes devido à necessidade da conversão da unidade de medida desses materiais, visto que são recebidos e estocados por volume (m^3 e litros, respectivamente) e pesados (kg) no sistema da balança. O monitoramento da umidade das areias faz-se necessário uma vez que são armazenadas em locais suscetíveis a chuvas e/ou umidade do ambiente (Figura 6). A depender da central dosadora, a leitura de umidade é automatizada ou manual. Nesse último caso, os dados de umidade são inseridos pelo responsável no sistema da balança. Nas duas situações, o software

da balança já desconta o volume de água referente a umidade no momento da pesagem. Portanto, dados de umidade das areias foram fornecidos pelas responsáveis das centrais e considerados nas estimativas de consumo de água.



Figura 6: Estocagem de areias na Central da Supermix em Diadema/SP, à esquerda a areia de quartzo estocada em depósito descoberto e à direita a areia artificial estocada em depósito coberto. Fotos tiradas pela autora durante visita técnica.

O indicador de material foi estimado a partir da Equação 3.

$$I_{Mp} = \frac{(R_c + R_{sand} + R_{art.sand} + R_{ad})}{Prod_p} \quad \text{Equação 3}$$

Onde: I_{Mp} é o indicador de material na planta (kg/m^3), R_c é o consumo de cimento (kg), R_{sand} é o consumo de areia de quartzo (kg), $R_{art.sand}$ é o consumo de areia artificial (kg), R_{ad} é o consumo de aditivos (kg) e $Prod_p$ é a produção de argamassa na planta (m^3).

Segundo a norma europeia EN 15804 (EUROPEAN COMMISSION, 2012a) que estabelece as regras básicas para a realização de Declarações Ambientais de Produtos (DAPs) para produtos de construção, permite ignorar fluxos que representem menos de 1% das entradas em massa (ou energéticas) de um determinado processo, desde que os fluxos ignorados somados não exceda 5% do consumo de energia e da massa total. As diretrizes dados por (JOHN et al., 2021) também permite ignorar fluxos que representem menos de 1% das entradas em massa de um determinado processo. Portanto, neste estudo, optou-se por ignorar o consumo de aditivos do processo.

3.2.2 Consumo de energia

As centrais dosadoras utilizam energia elétrica para operação de balanças, iluminação, atividades administrativas e captação de água subterrânea quando aplicável. As pás carregadeiras são responsáveis pela movimentação dos insumos e utilizam diesel na operação. Ambas atendem tanto a produção de argamassa como a produção de concreto, tendo sido necessário o fracionamento pelas respectivas produções.

A mistura da argamassa é realizada por caminhões betoneiras que também são responsáveis pelo seu transporte até a obra. Como é inviável quantificar separadamente o consumo de diesel de cada atividade, será contabilizado integralmente na etapa de transporte.

O consumo de energia na central foi estimado a partir da Equação 4.

$$I_{Ep} = \frac{(E_p * F_{E.electr} + D_p * F_{E.diesel})}{Prod_p} \quad \text{Equação 4}$$

Onde: I_{Ep} é o indicador de energia primária na planta (MJ/m^3), E_p é o consumo de eletricidade na planta (kWh), $F_{E.electr}$ é o fator de conversão de energia primária da eletricidade (MJ/kWh), D_p é o consumo de diesel na planta (litros), $F_{E.diesel}$ é o fator de conversão de energia primária do diesel (MJ/l) e $Prod_p$ é a produção de argamassa na planta (m^3).

A energia consumida referente ao transporte da água de sua origem até a planta dosadora foi contabilizada. No caso de captação de água subterrânea, a bomba é geralmente alimentada pela rede elétrica local cujo consumo mensal foi contabilizado. O consumo de energia referente ao transporte da água via caminhão pipa foi estimada a partir da Equação 1, e suas emissões através da Equação 2. Para o consumo de água fornecida pela concessionária local foi considerado o indicador de 0,00357 MJ/kg conforme dados de (SABESP, 2021).

3.2.3 Emissão de CO₂

A emissão de CO₂ foi estimada a partir dos consumos de energia elétrica e do óleo diesel conforme apresentado na Equação 5.

$$I_{CO2p} = \frac{(E_p * F_{CO2.electr}) + (D_p * F_{E.diesel} * F_{CO2.diesel})}{Prod_p} \quad \text{Equação 5}$$

Onde: I_{CO2p} é o indicador de emissão de CO₂ na planta ($kg CO_2/m^3$), E_p é o consumo de eletricidade na planta (kWh), $F_{CO2.electr}$ é o fator de emissão de CO₂ da eletricidade ($Kg CO_2/kWh$), D_p é o consumo de diesel na planta (litros), $F_{E.diesel}$ é o fator de conversão de energia primária do diesel (MJ/l), $F_{CO2.diesel}$ é o fator de emissão de CO₂ do diesel ($kg CO_2/MJ$) e $Prod_p$ é a produção de argamassa na planta (m^3).

3.2.4 Consumo de água

O consumo de água representa a água incorporada no produto e aquela consumida para suspensão de poeira, lavagem dos caminhões e limpeza de pátio da central. A água proveniente de chuva coletada no chão do pátio da planta era canalizada para o sistema municipal de coleta de águas pluviais e foi negligenciada. A água incorporada no produto é aquela adicionada na mistura automaticamente durante a pesagem na balança, ou manualmente durante a mistura na betoneira do caminhão. Também é contabilizada como água incorporada a umidade das areias e a água contida nos aditivos. As umidades das areias foram fornecidas pelas centrais. A água contida nos aditivos foi contabilizada a partir das densidades fornecidas pelos fabricantes. Portanto a água de chuva contida nas areias foi contabilizada, enquanto a água de chuva evaporada foi negligenciada. O consumo de água destinado ao consumo humano da equipe produtiva e administrativa foi negligenciado neste estudo.

O consumo de água foi solicitado para os responsáveis das plantas a partir da sua origem: concessionária local, superficial, subterrânea, reaproveitamento da chuva ou reúso. Também foi solicitado o volume de água adicionado na mistura durante a dosagem da argamassa na balança. Foi considerado que a diferença entre o fluxo de água que entra na central e o fluxo de água adicionado na dosagem de produto, corresponde ao fluxo de água destinado à limpeza de pátio, suspensão de poeira e lavagem dos caminhões. O indicador de água foi estimado a partir da Equação 6.

$$I_{wp} = \frac{(W_F + W_w)}{Prod_p} \quad \text{Equação 6}$$

Onde: I_{wp} é o indicador de água na planta (kg/m^3), W_F é o consumo de água de formulação (kg), W_w é o consumo de água de limpeza (kg) e $Prod_p$ é a produção de argamassa na planta (m^3).

3.2.5 Resíduos

O resíduo gerado na central provém de material rejeitado pelo cliente, material proveniente de ensaios, lastro da betoneira não reaproveitado, resíduo de lavagem do caminhão e do pátio. Esse material é depositado em local apropriado para secagem, em seguida é

armazenado em caçambas e transportado para descarte. O levantamento da quantidade de resíduo gerado deu-se a partir do volume de resíduo retirado da planta, quantificado através da Equação 7.

$$I_{sw,p} = \frac{S_{w,p}}{Prod_p} \quad \text{Equação 7}$$

Onde: $I_{sw,p}$ é o indicador de geração de resíduo sólido na planta (kg/m^3), $S_{w,p}$ é o resíduo sólido retirado da planta no período (kg) e $Prod_p$ é a produção de argamassa na planta (m^3).

Foi necessário fracionar o resíduo sólido retirado na planta em função do volume produzido de argamassa e concreto, bem como converter de volume para massa. A densidade utilizada nessa conversão foi estimada para cada planta, calculada a partir do consumo dos materiais secos dividido pela produção de argamassa.

Como a planta de Itaquaquetuba não disponibilizou a quantidade de resíduo gerado, foi considerado o volume de argamassa necessária para realização dos ensaios no período e o valor obtido foi analisado.

A água contida na mistura do resíduo fresco evaporada durante o processo de secagem foi negligenciada. Os resíduos gerados referentes às embalagens dos aditivos não foram considerados.

O lastro é o volume de argamassa depositado no fundo do balão da betoneira do caminhão que, impossibilitado geometricamente de ser descarregado, retorna às centrais. Quando os caminhões são de uso exclusivo da produção de argamassa, o lastro é aproveitado na entrega seguinte, podendo ser adicionado aditivo estabilizador para manter o produto fresco por até 48 horas aos finais de semana. Quando os caminhões são de uso compartilhado, é necessária a lavagem da betoneira para retirada do lastro sempre que houver mudança do tipo de produto (argamassa ou concreto), evitando a contaminação por resquícios de aditivos que podem alterar as características do produto.

3.2.6 Transporte e mistura

Caminhões betoneiras transportam a argamassa pronta da central até a obra. Esses caminhões são de responsabilidade das centrais, portanto o consumo de combustível foi informado por elas. Além do transporte da central até a obra e a operação da betoneira, o consumo de diesel inclui o retorno do caminhão vazio à central. Considerando que o transporte de argamassa da central à obra faz parte da etapa de construção, e que a energia consumida na mistura da argamassa é mínima, esse indicador será considerado no item 4.3 *Aplicação da argamassa no canteiro*. O consumo de energia referente ao transporte da argamassa foi estimado a partir da Equação 8.

$$I_{E.transp.m} = \frac{D_{transp.m} * F_{E.diesel}}{Prod_p} \quad \text{Equação 8}$$

Onde: $I_{E.transp.m}$ é o indicador de energia referente ao transporte de argamassa (MJ/m³), $D_{transp.m}$ é o consumo de diesel referente ao transporte da argamassa (litros), $F_{E.diesel}$ é o fator de conversão de energia primária do diesel (MJ/l) e $Prod_p$ é a produção de argamassa na planta (m³).

3.3 Aplicação da argamassa

A argamassa estabilizada, entregue pela central dosadora por meio de caminhão betoneira, é armazenada em containers com capacidade para 1 m³ de produto, exclusivamente designados para esse fim e etiquetados com a data de validade. O transporte interno da argamassa no canteiro é realizado de forma semelhante a qualquer outro tipo de argamassa, utilizando-se grua ou elevador, além de pá e carrinho de mão, até chegar ao local de aplicação.

3.3.1 Consumo de material

O consumo de argamassa na obra ($M_{del.n}$) é o volume de argamassa recebida (m³) no pavimento n . As quantidades de argamassa recebida eram conferidas pelo responsável do almoxarifado da obra. O indicador de material (I_M) foi estimado através da Equação 9 e o resultado apresentado em m³/100 m² de parede executada.

$$I_{Ms} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(M_{del.n} \times FA_{w.n} \times 100)}{A_{w.n}} \right] \quad \text{Equação 9}$$

Onde: I_{Ms} é o indicador de material na obra ($m^3/100 m^2$), $M_{del.n}$ é o consumo de argamassa entregue no pavimento n (m^3), $FA_{w.n}$ é a fração de área de parede inventariada no pavimento n (%) e $A_{w.n}$ é a área de parede inventariada no pavimento n (m^2).

3.3.2 Consumo de energia

O consumo de energia na fase da obra deve-se ao transporte vertical e horizontal da argamassa, geralmente realizado com equipamentos elétricos como elevadores, cremalheira, guindastes e bombas. O transporte também pode acontecer de forma manual, com o uso do carrinho de mão, e nesse caso não será contabilizada a energia humana decorrente desse trabalho.

Na obra em estudo, o transporte vertical da argamassa do pavimento térreo até o local da aplicação foi realizado com guindaste elétrico. Devido à inviabilidade da quantificação do consumo elétrico destinado ao guindaste, visto que existiam outros equipamentos sendo utilizados na obra, optou-se por calcular o consumo a partir da potência do equipamento. A Equação 10 estima o indicador de energia, que correlaciona a potência energética do guindaste em quilowatts e o tempo de trabalho em horas com a área da parede executada. O consumo de energia está apresentado em MJ/100 m^2 de parede executada.

$$I_{Es} = \frac{H_c \times P_c \times F_{E.electr} \times 100}{A_{w.n}} \quad \text{Equação 10}$$

Onde: I_{Es} é o indicador de energia primária na obra (MJ/100 m^2), H_c é o total de horas trabalhadas do guindaste (h), P_c é a potência do guindaste com 85% de eficiência (kW), $F_{E.electr}$ é o fator de conversão de energia primária da eletricidade (MJ/kWh) e $A_{w.n}$ é a área de parede inventariada no pavimento n (m^2).

A potência do guindaste foi obtida a partir do catálogo do fabricante (Bauscher, 2013) conforme especificação do equipamento utilizado na obra (1,5 toneladas), considerando 85% de eficiência. O tempo de funcionamento do guindaste foi estimado a partir da Equação 11, que considera os seguintes dados: a altura de içamento de cada pavimento, o número de viagens realizadas e a velocidade de içamento. O número de viagens foi estimado dividindo o consumo de argamassa entregue na área inventariada pela capacidade do reservatório do guindaste.

$$H_c = \sum_{i=1}^n \left[\frac{h_{L.n} \times T_n}{S_c \times 60} \right] \quad \text{Equação 11}$$

Onde: H_c é o total de horas trabalhadas do guindaste (h), $h_{L,n}$ é a altura de içamento no pavimento n (m), T_n é o número de viagens realizadas no pavimento n e S_c é a velocidade de içamento (m/min).

Após ser transportada através do guindaste até o pavimento de aplicação, a argamassa era descarregada manualmente. Para o transporte horizontal foram utilizados pá e carrinho de mão (Figura 7). O procedimento de assentamento foi realizado com colher de pedreiro. A energia metabólica utilizada nessas atividades não foi incluída neste estudo.



Figura 7: Transporte horizontal da argamassa realizada com carrinho de mão no canteiro. Fotos tiradas pela autora durante coleta de dados.

3.3.3 Emissão de CO₂

A emissão de CO₂ na obra foi estimada com base na potência e o tempo de funcionamento do guindaste (calculados no item anterior) e os resultados são apresentados em kg CO₂/100 m² de parede executada, conforme apresentado na Equação 12.

$$I_{CO_2s} = \frac{H_c \times P_c \times F_{CO_2.electr} \times 100}{A_w} \quad \text{Equação 12}$$

Onde: I_{CO_2s} é o indicador de emissão de CO₂ da obra (kg CO₂/100 m²), H_c é o total de horas trabalhadas do guindaste (h), P_c é a potência do guindaste com 85% de eficiência (kW), $F_{CO_2.electr}$ é o fator de emissão de CO₂ da eletricidade (Kg CO₂/kWh) e A_w é a área total de parede inventariada (m²).

3.3.4 Consumo de água

O consumo de água na obra é o volume de água utilizada durante a execução da alvenaria e foi estimado usando a Equação 13, sendo seus resultados apresentados em kg/m² de parede executada. Como a argamassa estabilizada é entregue na obra pronta para uso, a água de mistura está contabilizada na fase de produção da argamassa. A proposta inicial era medir o consumo de água utilizando um hidrômetro fixado em uma torneira que serviria somente a demanda da atividade de assentamento, porém não foi possível pois outros serviços acabavam utilizando água desse mesmo ponto.

Desta maneira, o consumo de água na obra foi estimado considerando a água utilizada em três atividades: lavagem de ferramentas, lavagem dos reservatórios de argamassa e película d'água. A película d'água consiste na aplicação de 10 mm de espessura de água no topo do reservatório de argamassa para evitar a hidratação precoce e manter o tempo de estabilização, conforme sugerido pelas especificações técnicas do produto. Esta água deve ser descartada imediatamente antes do uso da argamassa (IW8, 2019, p. 8). O volume da película d'água foi estimado considerando a dimensão da área do reservatório (Figura 8) e a espessura da água de 10 mm, ou seja, 33 kg / reservatório.

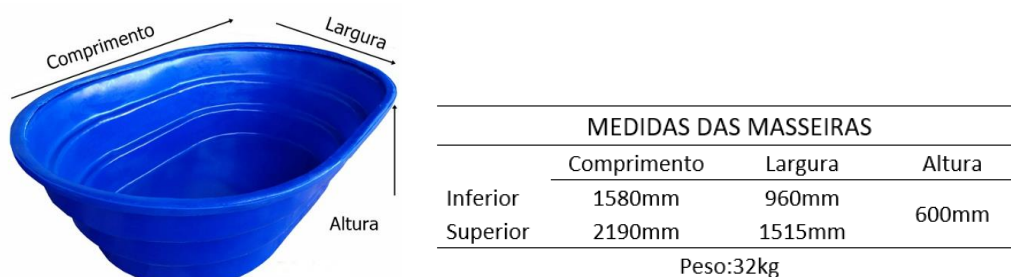


Figura 8: Dimensões de reservatório de argamassa utilizado no canteiro. Fonte: (IW8, 2019).

Após o uso, os recipientes de argamassa eram lavados com um balde de água de 20 litros. Considerando que a capacidade de cada recipiente era de 1 m³ de argamassa, o consumo de água para lavagem de cada recipiente foi de 20 kg/reservatório. A quantidade de reservatórios utilizados no período foi coletada na obra.

Para estimar o consumo de água de lavagem das ferramentas, foi utilizado um recipiente cilíndrico de 200 litros por pavimento, onde as atividades de lavagem eram realizadas ao final de cada dia de trabalho. A água do recipiente cilíndrico foi substituída a cada pavimento. Considerando que em cada pavimento eram executados 757 m² de parede, o consumo de água para lavagem de utensílios foi de 26 kg / 100 m².

$$I_{Ws} = \frac{W_L \times C \times 100}{A_w} + \frac{W_C \times C \times 100}{A_w} + W_T$$

Equação 13

Onde: I_{Ws} é o indicador de água na obra (kg/100 m²), W_L é o volume da película d'água por reservatório (kg), C é a quantidade de reservatórios utilizados no período (unidade), A_w é o total de parede inventariada (m²), W_C é o consumo de água para lavagem de cada recipiente (kg) e W_T é o consumo de água para lavagem de utensílios (kg/100 m²).

3.3.5 Perdas

As perdas na obra representam o excesso de material consumido durante o processo de construção em comparação ao consumo teórico de argamassa. O consumo teórico é estimado a partir das especificações de projeto. São consideradas perdas: o resíduo sólido gerado, a perda incorporada, e a perda volumétrica de ar incorporado. As perdas são todas apresentadas em volume (m³).

O consumo teórico de argamassa foi calculado com base nas dimensões dos blocos (Figura 9), nas quantidades de blocos por pavimento tipo, e na espessura mínima de argamassa, conforme especificado no projeto estrutural fornecido pela construtora. Não foi incluído nenhum tipo de resíduo no cálculo do consumo teórico. O consumo teórico calculado foi de 4,8 m³ por pavimento tipo.

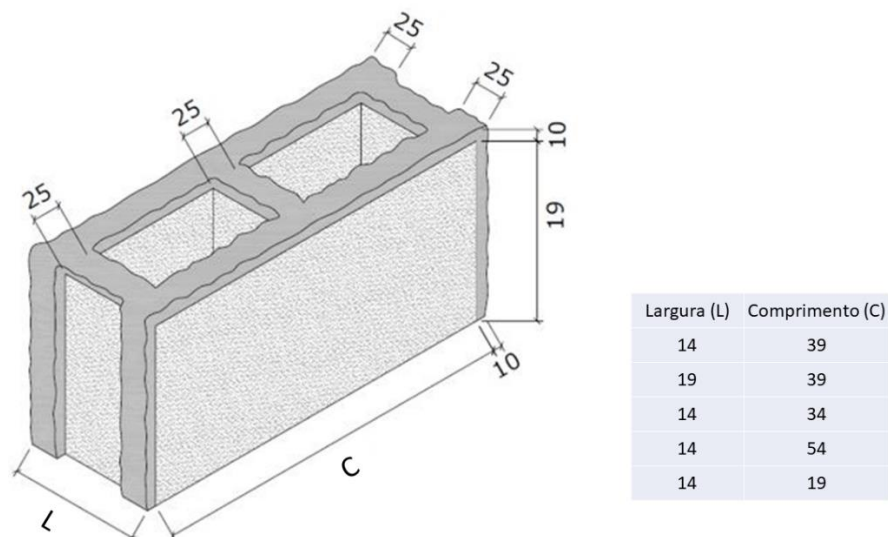


Figura 9: Dimensões do bloco de concreto e espessura da argamassa conforme especificação de projeto estrutural. Dados utilizados para estimativa do consumo teórico de argamassa para assentamento de bloco estrutural. Valores em mm.

Como a quantidade de parede a ser executada por pavimento tipo é 757 m², o consumo teórico de argamassa é de 0,64 m³/100 m². Normalmente os manuais de construção brasileiros estimam o consumo teórico de argamassa para assentamento de blocos entre 1,03 e 1,11 m³/100 m² (PINI, 2010; SINAPI, 2017; ValeMassa, 2015). Isso significa que o mercado espera cerca de 61% a 73% de perda de argamassa no canteiro de obras.

Os encargos ambientais referentes a extração, produção e transporte da argamassa perdida no canteiro foram contabilizados na etapa de construção (etapa A5).

3.3.5.1 Resíduo sólido

O resíduo sólido gerado na obra (S_w) é toda argamassa recebida na obra e não aplicada no assentamento de blocos. Esse tipo de resíduo é gerado quando a argamassa (i) cai no chão durante a aplicação ou transporte, (ii) endurece antes do uso ou (iii) vence antes da aplicação. Neste estudo, os casos (ii) e (iii) não foram observados durante o período de inventário e, por isso, são considerados nulos. Toda a argamassa que caiu no chão (i) foi recolhida e pesada em balança suspensa (precisão de 0,01 kg), conforme pode ser observado na Figura 10.



Figura 10: Processo de quantificar o resíduo sólido: a esquerda coleta da argamassa caída no chão durante o processo de assentamento e transporte da argamassa, e a esquerda pesagem com balança suspensa (precisão de 0.01 kg). Fotos tiradas pela autora durante coleta de dados na obra.

O resíduo sólido pesado em massa foi convertido em volume usando a densidade da argamassa fornecida pela central dosadora. O indicador de resíduo sólido ($I_{sw.s}$) foi estimado usando a Equação 14.

$$I_{sw.s} = \frac{S_w \times 100}{A_w} \quad \text{Equação 14}$$

Onde: $I_{sw.s}$ é o indicador de geração de resíduo sólido na obra ($m^3/100 m^2$), S_w é o resíduo sólido gerado na obra (m^3) e A_w é a área total de parede inventariada (m^2).

O resíduo sólido recolhido na obra foi reaproveitado para aterro de corredores de passagem, portanto não houve transporte de resíduo para descarte.

3.3.5.2 Perda volumétrica de ar incorporado

O aditivo incorporador de ar introduz pequenas bolhas de ar na argamassa, melhorando a trabalhabilidade e aumentando seu volume, contribuindo para a desmaterialização do produto, substituindo material por ar. Algumas dessas bolhas são perdidas para a atmosfera durante o transporte e aplicação da argamassa, reduzindo o volume da argamassa disponível para aplicação. A perda volumétrica do ar incorporado durante a aplicação de argamassas normalmente não é incluída nos estudos ambientais. No entanto, este é um parâmetro importante, pois influencia no consumo de material – a perda de ar incorporado durante a aplicação resulta em maior consumo de argamassa. O indicador da perda volumétrica do ar incorporado (I_{Lair}) mede o volume de ar dissipado durante o assentamento de blocos. Ele foi estimado comparando a porosidade de amostras secas retiradas na obra em duas situações: antes da aplicação da argamassa e imediatamente após sua aplicação, conforme ilustrado na Figura 11.

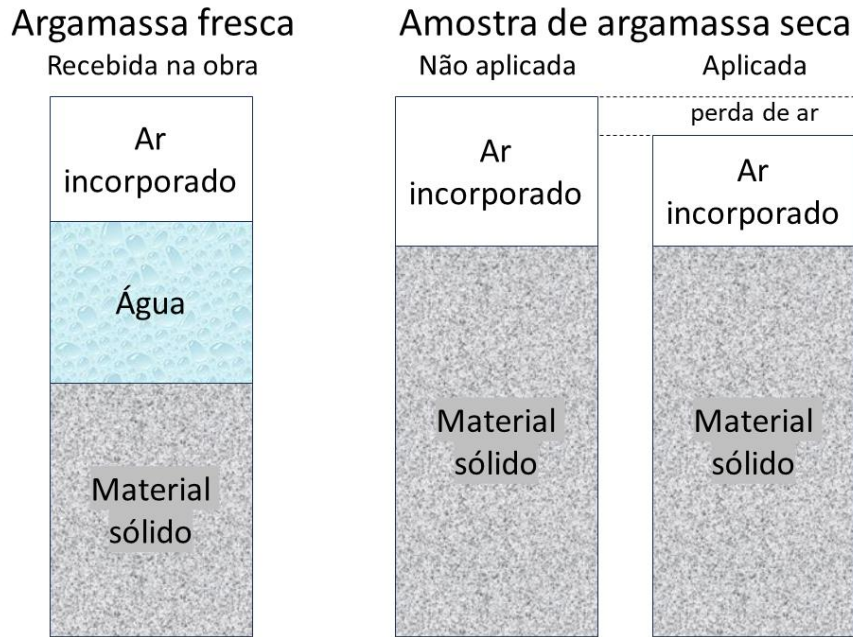


Figura 11: Esquema ilustrativo do volume das amostras de argamassa estabilizada retirada em obra em três situações distintas: (i) argamassa fresca recém recebida na obra, (ii) argamassa seca não aplicada, e (iii) argamassa seca aplicada. A perda de ar incorporado foi estimada comparando as porosidades das amostras secas (ii) aplicadas e (iii) não aplicadas.

Para estimar as porosidades (%), foram coletadas duas amostras de argamassa no canteiro de obras em dois locais distintos: uma do carrinho de mão (não aplicada) e outra da parede imediatamente após a aplicação (o bloco de concreto foi retirado para coleta da amostra de argamassa). No laboratório, as amostras foram aquecidas a 40 °C em uma câmara termicamente isolada por 12 h para secagem.

O equipamento Accupyc II 1345 da Micrometrics foi usado para determinar as densidades reais de argamassa (D_R) das amostras. Na sequência, cada amostra foi dividida em três partes. O Scanner MDS500 ("MDS500 Dental Scanner", 2007) foi usado para determinar o volume de cada amostra. Uma balança com precisão de 0,001 g) foi utilizada para determinar a massa dessas amostras. Então a densidade aparente da argamassa (D_{ei}) foi calculada para cada amostra. A perda volumétrica de ar incorporado (RL_{air}) foi estimada a partir da variação média da porosidade entre as amostras não aplicadas da argamassa (N) e as amostras aplicadas (N'), conforme mostrado na Equação 15. A perda total de ar incorporado (TL_{air}) foi calculada usando a Equação 16 e seu indicador (I_{Lair}) usando a Equação 17.

$$RL_{air} = \frac{\sum_{i=1}^N [100 (1 - D_{ei}/D_R)]}{N} - \frac{\sum_{i=1}^{N'} [100 (1 - D'_{ei}/D'_R)]}{N'} \quad \text{Equação 15}$$

$$TL_{air} = \sum_{i=1}^n \{[(M_{del.n} \times F_{Aw.n}) - S_{w.n}] \times RL_{air}\} \quad \text{Equação 16}$$

$$I_{Lair} = \frac{TL_{air} \times 100}{A_w} \quad \text{Equação 17}$$

Onde: RL_{air} é a perda volumétrica de ar incorporado (%), D_{ei} é a densidade aparente da argamassa não aplicada da amostra i (g/cm^3), D_R é a densidade real de argamassa não aplicada (g/cm^3), N é a quantidade de amostras de argamassas não aplicadas (unidade), D'_{ei} é a densidade aparente da argamassa aplicada da amostra i (g/cm^3), D'_R é a densidade real de argamassa aplicada (g/cm^3), N' é a quantidade de amostras de argamassas aplicadas (unidade);

TL_{air} é a perda volumétrica total de ar incorporado referente à argamassa aplicada em obra (m^3), $M_{del.n}$ é o consumo de argamassa entregue no pavimento n (m^3), $F_{Aw.n}$ é a fração de área de parede inventariada no pavimento n (%), $S_{w.n}$ é o resíduo sólido gerado na obra no pavimento n (m^3), RL_{air} é a perda volumétrica de ar incorporado (%);

I_{Lair} é o indicador da perda volumétrica do ar incorporado ($m^3/100 m^2$), TL_{air} é a perda volumétrica total de ar incorporado referente à argamassa aplicada em obra (m^3) e A_w é a área total de parede inventariada (m^2).

3.3.5.3 Perda incorporada

A perda incorporada é a argamassa adicional incorporada na edificação sem função estrutural e pode ocorrer em duas situações: (i) a espessura da argamassa ser maior que a especificada pelo projeto estrutural, e (ii) a argamassa penetrar nos furos dos blocos, conforme pode ser observado na Figura 12. A espessura de argamassa (i) horizontal foi verificada em obra medindo a distância piso a piso dos pavimentos inventariados e comparando com a medida de projeto de 2,60 m. E a espessura de argamassa (i) vertical foi verificada observando o alinhamento das paredes e medidas de projeto.



Figura 12: Perdas incorporadas devido à argamassa introduzida acidentalmente nos orifícios dos blocos sem função estrutural. Fotos tiradas pela autora durante coleta de dados na obra.

Pela dificuldade de medir a perda incorporada, este indicador foi estimado com base no princípio do balanço de massas, considerando a diferença entre o consumo de argamassa na obra ($M_{del.n}$) e os volumes de argamassa estimados nas seções anteriores – consumo teórico de argamassa (M_T), resíduo sólido gerado na obra (S_w) e perda volumétrica total de ar incorporado (TL_{air}). O indicador da perda incorporada foi calculado conforme apresenta a Equação 18.

$$I_{Inc} = \left\{ \sum_{i=1}^n [(M_{del.n} \times FA_{w.n}) - M_T - S_w - TL_{air}] \right\} \times \frac{100}{A_w} \quad \text{Equação 18}$$

Onde: I_{inc} é o indicador da perda incorporada ($m^3/100 m^2$), $M_{del.n}$ é o consumo de argamassa entregue no pavimento n (m^3), $FA_{w.n}$ é a fração de área de parede inventariada no pavimento n (%), M_T é o consumo teórico de argamassa (m^3), S_w é o resíduo sólido gerado na obra (m^3), TL_{air} é a perda volumétrica total de ar incorporado referente à argamassa aplicada em obra (m^3) e A_w é a área total de parede inventariada (m^2).

3.3.5.4 Indicador das perdas

O indicador das perdas na obra é a soma dos seguintes indicadores: resíduo sólido (I_{sw}), perda de ar incorporado (I_{Lair}) e perda incorporada (I_{inc}), conforme representado na Equação 19.

$$I_{Mw} = I_{Sw.s} + I_{Lair} + I_{Inc} \quad \text{Equação 19}$$

Onde: I_{Mw} é o indicador das perdas na obra ($m^3/100 m^2$), $I_{sw.s}$ é o indicador de geração de resíduo sólido na obra ($m^3/100 m^2$), I_{Lair} é o indicador da perda volumétrica do ar incorporado ($m^3/100 m^2$) e I_{inc} é o indicador da perda incorporada ($m^3/100 m^2$).

4 ESTUDOS DE CASO

A seguir serão apresentados os estudos de caso das plantas de produção de argamassa estabilizada, além do estudo da obra na qual a argamassa estabilizada foi aplicada em assentamento de blocos.

4.1 Dados secundários

Os dados secundários considerados neste estudo foram os indicadores ambientais e as perdas do processo de fabricação das matérias-primas (cimento, areia de quartzo, areia artificial), o consumo de diesel dos veículos de transporte dessas matérias primas, e os indicadores das argamassas dosadas em obra. Foram considerados os dados nacionais mais próximos da realidade e mais confiáveis, conforme detalhado nos itens subsequentes.

4.1.1 Cimento

Como o cimento utilizado no estudo de caso foi o Votorantim CP II E 40, considerou-se o consumo de **energia** e **emissão de CO₂** dados pela DAP S-P-00895 (VOTORANTIM, 2016a) em vigor no período do estudo (Tabela 2). A referida DAP apresenta o potencial de aquecimento global em kg de CO_{2equiv}, sendo necessário ponderar esse indicador para kg de CO₂. Essa estimativa foi baseada no banco de dados doecoinvent v 3.16 pois refere-se a dados primários brasileiros de 2016 do cimento CP II E composto por 0,66% de clínquer, sendo que 96,4% da emissão total é proveniente da produção do clínquer (BELIZARIO-SILVA; OLIVEIRA; JOHN, 2022; ECOINVENT, 2019). A quantidade de CO₂ absorvido pelo processo de carbonatação do cimento não foi contabilizada.

O consumo de **água** para produção de cimento pode variar de 0,185 a 1,333 kg de água por quilograma de cimento produzido segundo (MACK-VERGARA; JOHN, 2017). Um gráfico comparativo desses dados com dados de DAPs de fabricantes de cimento (Tabela 2) está apresentado na Figura 13 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Pode ser observado que

a faixa de valores apresentada por Mack-Vergara e John está compatível com a maioria das DAPs, exceto as DAPs do Brasil e da União Europeia que apresentam, em média, consumos seis vezes maiores. Essa dispersão nos valores pode ser decorrente de diferentes considerações adotadas para os fluxos d'água. Segundo (MACK-VERGARA; JOHN, 2017) há grande dispersão nos dados de inventário de água para produção das matérias primas do concreto na literatura.

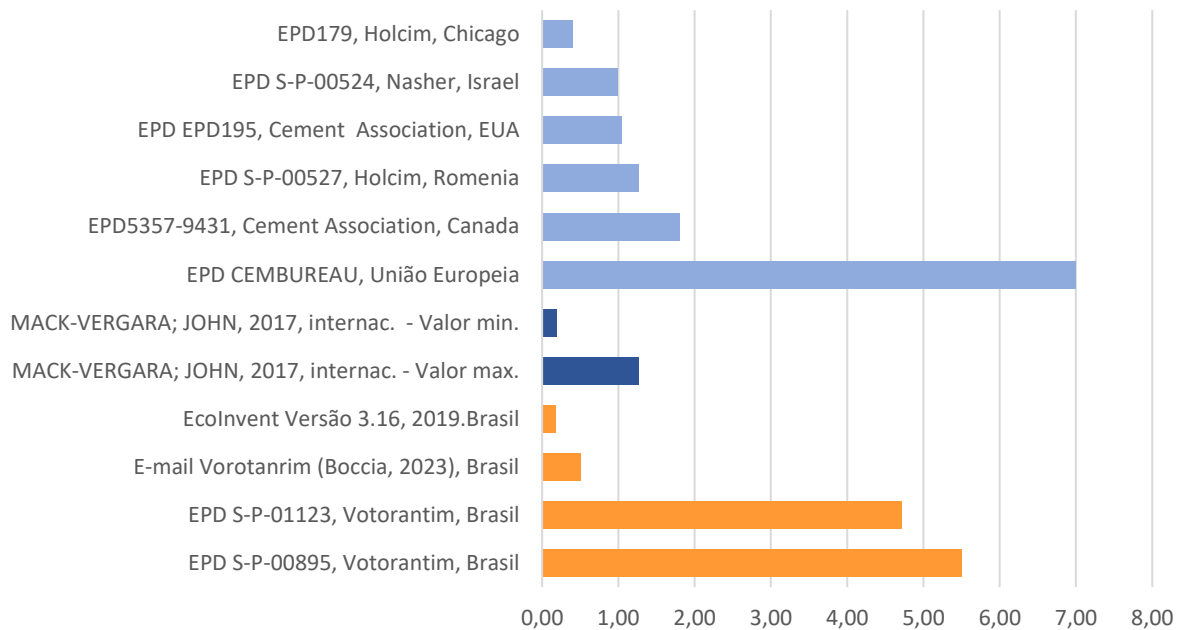


Figura 13: Consumo d'água para produção de cimento (m³/t). Fonte: Autora a partir dos dados de (BOCCIA, 2023; CAC, 2016; CEMBUROU, 2020; HOLCIM, 2014, 2021; IBICT, 2019; MACK-VERGARA; JOHN, 2017; NESHER, 2012; PCA, 2021; VOTORANTIM, 2016a, 2019b)

A DAP S-P-000895 da Votorantim foi elaborada baseada na *WBCSD-CSI Tool for concrete and cement EPDs*, (v1.4 de 08/11/2017), e na *Global Cement and Concrete Association (GCCA) Tool for EPD of concrete and cement* (v2.0). Tanto a WBCSD quanto a GCCA não disponibilizam as considerações adotadas das referidas ferramentas, só possuem acesso a essa informação os profissionais envolvidos na emissão de DAPs.

Segundo (MACK-VERGARA; JOHN, 2017) “o primeiro aspecto a ser considerado quando são comparadas metodologias é o uso da água *off-stream* ou *in-stream*”. O uso *off-stream* é o mais utilizado em estudos de ACV, é definido como o fluxo de água retirado do seu curso natural durante o ciclo de vida de um produto. O uso *in-stream* é definido como o fluxo de água utilizado no seu curso natural, como na navegação, na extração de areia natural ou para

geração de energia elétrica (MACK-VERGARA; JOHN, 2017). Isto posto, e considerando que a matriz elétrica do Brasil tem predominância de usinas hidrelétricas (EPE, 2021), é possível supor que o alto consumo de água apresentado na DAP S-P-000895 pode ser explicado pela adoção do uso *in-stream* da água. Porém, não é possível a verificação dessa suposição visto que a WBCSD e a GCCA não disponibilizam as considerações adotadas das referidas ferramentas, conforme já explicado anteriormente.

Representante da Votorantim Brasil foi contactado e não soube informar a origem do consumo de água apresentado na referida DAP, informando via e-mail que o consumo de água para a produção de clínquer em suas unidades no Brasil é 0,625 m³ de água para cada tonelada de clínquer produzido (BOCCIA, 2023). Como o consumo de material secundário nesse tipo de cimento é 200 kg/t (VOTORANTIM, 2016a), temos que o consumo de água é de 0,5 kg por kg de cimento CP II E produzido. Porém, é necessário considerar também o consumo de água para produção da escória, dado não informado por (BOCCIA, 2023), que segundo dados internacionais apresentados por (MACK-VERGARA; JOHN, 2017) varia de 0,75 a 1,2 kg/kg, e dados nacionais apresentados em relatório do Sidac (BELIZARIO-SILVA; OLIVEIRA; JOHN, 2022) apresenta valor ainda menor de 0,47 kg/kg. Considerando dados nacionais, temos o consumo de 0,094 kg de água por 200 kg de escória produzida. Portanto, considerando o consumo de água informado por (BOCCIA, 2023) somado ao consumo de água de produção da escória temos 0,594 kg/kg, valor compatível com a maioria dos dados internacionais conforme pode ser observado na Figura 13 **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

A DAP S-P-00895 (VOTORANTIM, 2016a) não considera a geração de **resíduo** durante a extração e transporte de insumos (etapas A1 e A2), mas informa que durante a produção do cimento o resíduo gerado é de 168 g/t, sugerindo que está sendo considerado somente a geração de poeira do processo de fabricação. O consumo de calcário e argila para a produção de 1 kg de clínquer é de 1,45±0,067 e 0,12±0,046 kg, respectivamente, conforme dados do Sidac (MME; CBCS, 2022). Adotando os valores máximos dados pelo Sidac, considerando que o consumo de clínquer para produção do cimento CP II E é de 800 kg/t (VOTORANTIM, 2016a), e considerando o resíduo gerado durante a produção (DAP S-P-00895), tem-se que o consumo de material é de 1,35 kg/kg de cimento produzido, ou seja, a geração de resíduos é de 0,35 kg/kg. Este valor está dentro dos valores dados pelo (ECOINVENT, 2019) do cimento brasileiro de 0,3 a 0,6 kg/kg.

A Tabela 7 sintetiza os dados secundários adotados neste estudo para a produção do cimento.

Tabela 7: Indicadores ambientais para produção de cimento CP II E40 considerados neste estudo.

| Indicador | Unid./kg | Valor | Fonte |
|-------------------------|--------------------|-------|-----------------------------------|
| Consumo de energia | MJ | 2,52 | DAP S-P-00895 (VOTORANTIM, 2016a) |
| Emissão CO ₂ | kg CO ₂ | 0,770 | DAP S-P-00895 (VOTORANTIM, 2016a) |
| Consumo d'água | kg | 0,594 | (BOCCIA, 2023) |
| Consumo de material | kg | 1,35 | (ECOINVENT, 2019) |

4.1.2 Areias

Era prevista a coleta de dados de extração das areias (quartzo e artificial) junto às mineradoras fornecedoras das centrais, porém as restrições impostas pela pandemia do Covid-19 inviabilizaram o projeto. Portanto foi considerado dados da literatura nacional conforme apresentado na Tabela 3. Os indicadores da areia artificial são os mesmos da brita pois os processos são concomitantes. Optou-se pelos dados mais conservadores da faixa de valores apresentados no (MME; CBCS, 2022).

4.1.3 Produção das argamassas dosadas *in loco*

A Tabela 8 sintetiza dados da literatura referente ao consumo de energia, emissão de CO₂, consumo d'água e geração de resíduo de diferentes argamassas dosadas em obra. Os indicadores ambientais da argamassa dosada em obra do Sidac (MME; CBCS, 2022) foram calculados conforme detalhado no relatório de (SONVEZZO; JOHN, 2022), no qual os traços foram definidos conforme as práticas mais comuns do Brasil e não contemplam perdas de insumos no canteiro.

Tabela 8: Consumo de energia, emissão de CO₂, consumo d'água e geração de resíduo de diferentes argamassas e concretos do Brasil e do mundo. Dados da literatura.

| Descrição | Unid. | Consumo de energia MJ/unid. | Emissão de CO ₂ kg/unid. | Consumo d'água kg/unid. | Geração de resíduo kg/unid. | Fonte |
|--|----------------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Argamassa dosada em obra | | | | | | |
| Traço 1:2:8 | m ³ | 1.881-2.462 | 270,1-330,9 | 190-360 * ¹ | --- | (MME; CBCS, 2022) |
| Traço 1:2:9 | | 1.814-2.401 | 258,8-317,7 | | | |
| Traço 1:1:6 | | 1.937-2.642 | 283,2-348,4 | | | |
| Traço 1:6 | | 1.408-2.198 | 202,5-268,3 | | | |
| Argamassa fresca | | | | | | |
| a:c 0,53 a 0,7 | m ³ | 2.849-3.532 | 475-594* ² | --- | --- | (PASSUELLO et al., 2019) |
| a:c 0,45 a 0,77 | | 2.600-3.700 | 440-640* ² | 15.000-21.000 | | (JIANG et al., 2014) |
| Argamassa industrializada seca – Brasil (DAP S-P-01121 e S-P-01122) | | | | | | |
| Múltiplo uso | t | 1.194 | 142* ² | 3.540* ³ | 0,06 | (VOTORANTIM, 2019c) |
| | | 1.601 | 194* ² | 3.940* ³ | 33,98 | (VOTORANTIM, 2019d) |
| DAP de argamassa industrializada estabilizada – Israel (DAP S-P-006620) | | | | | | |
| 48 horas | m ³ | 1.516 | 284* ² | 6.060 | 22 | (READYMIX INDUSTRIES, 2022) |

*¹ Calculado pelo autor conforme traços do Sidac e relação a:c dado por LME EPUSP. Somente água de mistura.

*² Potencial de aquecimento global em Kg CO₂equiv.

*³ Não contém água de mistura.

4.2 Plantas de produção de argamassa

Os estudos de caso foram conduzidos nas centrais da empresa Engemix, localizadas em Americana e Campinas, e da empresa Supermix, situada no município de Itaquaquetuba, na Região Metropolitana de São Paulo. Os dados foram fornecidos separadamente por planta dosadora.

4.2.1 Inventários

A Tabela 9 apresenta as especificidades de cada planta dosadora. Os aditivos Tecno e EcoTecMix, (incorporador de ar e retardador da cura, respectivamente) foram fornecidos pela GCP Applied Technologies, que disponibilizou para a planta de Itaquaquetuba o Certificado de Análise dos Aditivos com as densidades reais dos produtos entregues. Para as plantas de Americana e Campinas as densidades reais dos aditivos foram informadas pela equipe da central. Os dias úteis foram estimados a partir da página da web (“Calcule o número de dias úteis”, [s.d.]). Como a planta de Itaquaquetuba não possui sistema de sonda automatizada,

eram realizadas três leituras de umidade por dia para cada tipo de areia e alimentado manualmente o *software* da balança que já descontava, no momento da pesagem, o volume de água proveniente da umidade. Apesar de não ter sido especificada a tecnologia utilizada na compensação da umidade das areias nas plantas de Americana e Campinas, foi informado que essa compensação era realizada.

Tabela 9: Dados dos inventários das plantas - especificidades.

| Descrição | Itaquaquecetuba | Americana | Campinas |
|--|--|--|--|
| Período de coleta de dados | 01/01/19 a 31/07/19 7 meses | 01/06/20 a 31/01/21 8 meses | 01/06/19 a 31/05/20 12 meses |
| Dias úteis | 148 | 170 | 253 |
| Dados de consumo de material disponibilizados | quantidade pesada e quantidade de estoque | estimado a partir dos traços | estimado a partir dos traços |
| Tipo de cimento e fabricante | CP II E 40 Votorantim | CP II E 40 Votorantim | CP II E 40 Votorantim |
| Sistema de sonda (umidade da areia) | manual | não informado | não informado |
| Teor de umidade | | | |
| Areia quartzo | 5,4% | 5% | 5% |
| Areia artificial | 7,0% | 1,7% | 1,7% |
| Densidade (kg/m³) | | | |
| Areia quartzo | 1.464 | --- | --- |
| Areia artificial | 1.653 | --- | --- |
| Aditivo EcoTecMix (estab.) | 1.203 | 1.120 | 1.120 |
| Aditivo TecNol (ar) | 1.011 | 1.020 | 1.020 |
| Origem da água | caminhão pipa | concessionária + subterrânea | concessionária + subterrânea |
| Consumo de água para lavagem do caminhão betoneira (l/caminhão) | não informado | 500 | 500 |
| Lastro do caminhão (kg/caminhão) | não informado | 600 | 600 |
| Quantidade de caminhões dedicados a argamassa | Uso compartilhado | 1 | 2 |
| Estimativa da quantidade de resíduo gerado | a partir da quantidade de ensaios realizados na planta | quantidade de resíduo retirado da planta | quantidade de resíduo retirado da planta |

As distâncias de transporte dos insumos, partindo dos fornecedores até a central, e o transporte dos resíduos da central até o descarte final estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10: Dados dos inventários das plantas - distâncias de transporte dos insumos de seus fornecedores até as plantas dosadoras, e das plantas até a área de descarte.

| Insumo | Origem | Distância de transporte (km) | | |
|----------------------------------|---|------------------------------|-----------|----------|
| | | Itaquaquecetuba | Americana | Campinas |
| Cimento | Votorantim Cimentos Unid. Santa Helena, Av. Comendador Pereira Inácio 16, Votorantim/SP | 148 | 129 | 115 |
| Areia Quartzo | Areia Nova, Bofete/SP | 243 | 80 | 76,9 |
| Areia Artificial | Geocal, Estr. Ana Procópio de Moraes, Várzea de Souza, Santana de Parnaíba/SP | 79,2 | --- | --- |
| | Basalto Pedreira Sandmix Mineradora, R. Limeira 367, Limeira, SP | --- | 0 | --- |
| Aditivos | GCP Applied Technology, R. Paraná 4690, Sorocaba/SP | 122 | 104 | 89,2 |
| | Ecoponto Industrial Werner Plaas | --- | 6,9 | --- |
| | Ecoponto Nova Carioba | --- | 4,3 | --- |
| Descarte de resíduo de argamassa | Ecoponto Antônio Zanaga | --- | 2,5 | --- |
| | Ecoponto Catharina Zanaga | --- | 8,1 | --- |
| | Ecoponto Jardim dos Lírios | --- | 18,2 | --- |
| | Ecoponto - Jardim São Gabriel | --- | --- | 12,6 |
| | Ecoponto - Parque Via Norte | --- | --- | 10,2 |
| | Ponto Verde - Carlos Grimaldi | --- | --- | 11,7 |
| | Média | --- | 8,0 | 11,5 |
| Água | Rua Santo Antônio, 151 - Vila Perracini, Poá - SP | 4,1 | --- | --- |

As quantidades produzidas de argamassas e concretos para cada planta durante os referidos períodos estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11: Dados dos inventários das plantas - produção de argamassa estabilizada e concreto.

| Produto | Produção de argamassa por planta (m³) | | |
|------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------|
| | Itaquaquecetuba | Americana | Campinas |
| Argamassa total | 5.689,0 | 667,0 | 5.658,0 |
| Argamassa estabilizada básica 12 h | --- | --- | 7,0 |
| Argamassa estabilizada básica 36 h | 4.685,0 | 501,0 | 4.187,0 |
| Argamassa estabilizada básica 72 h | 320,0 | --- | 700,0 |
| Argamassa estabilizada não fluída | --- | --- | 9,0 |
| Argamassa estabilizada 4 MPa 36 h | 185,5 | 150,0 | --- |
| Argamassa estabilizada 5 MPa 36 h | 4,0 | 16,0 | --- |
| Argamassa estabilizada 6 MPa 36 h | 229,5 | --- | --- |
| Argamassa estabilizada 7 MPa 36 h | --- | --- | 376,0 |
| Argamassa estabilizada 8 MPa 36 h | 55,5 | --- | --- |
| Argamassa estabilizada 10 MPa 36 h | 8,0 | --- | --- |
| Argamassa estabilizada 12 MPa 36 h | 78,5 | --- | --- |
| Argamassa estabilizada 14 MPa 36 h | 31,0 | --- | 356,0 |
| Argamassa estabilizada 23 MPa 36 h | 92,0 | --- | --- |
| Argamassa estabilizada 7 MPa 72 h | --- | --- | 23,0 |
| Concreto total | 28.768,5 | 11.492,0 | 60.670,0 |
| Total | 34.457,5 | 12.159,0 | 66.328,0 |

Os responsáveis das plantas de Americana e Campinas não disponibilizaram dados de quantidade de estoque dos insumos. Portanto, não foi possível realizar o balanço de massa e, conseqüentemente, as perdas durante o processo de dosagem da argamassa. As quantidades em estoque informadas pelo responsável da planta de Itaquaquecetuba estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Dados do inventário da planta de Itaquaquecetuba - quantidade em estoque dos materiais.

| Insumo | unid. | Estoque inicial | Quant. adquirida no período | Estoque final |
|-----------------------------------|-------|-----------------|-----------------------------|---------------|
| CP II E 40 Votorantim | Kg | 61.738 | 6.126.810 | 60.372 |
| Areia Quartzo | m³ | 308 | 15.101.765 | 597 |
| Areia Artificial | m³ | 354 | 10.789.200 | 432 |
| Aditivo estabilizador Ecotecmix | l | 2.233 | 9.474 | 2.150 |
| Aditivo incorporador de ar Tecnol | l | 300 | 1.692 | 380 |

Foram fornecidas as quantidades de insumos efetivamente pesadas dos produtos dosados na planta de Itaquaquecetuba, porém sem detalhar por traço de argamassa. Para as plantas de Americana e Campinas foram recebidos os traços das argamassas produzidas. A Tabela 13 contém esses dados de consumo de materiais.

Tabela 13: Dados dos inventários das plantas - consumo de materiais para produção de argamassa estabilizada e concreto.

| Argamassa estabilizada | Cimento (kg) | Areia (kg) | | Aditivo (l) | | Água (kg) |
|--|--------------|------------|------------|-------------|------------|-----------|
| | | Quartzo | Artificial | Estabiliz. | Incorp. ar | |
| ITAQUAQUECETUBA (quantidade total no período) | | | | | | |
| Média (ITA) | 1.182.008 | 8.042.178 | 411.089 | 8.189 | 1.364 | 651.202 |
| Concreto | 5.076.503 | 15.377.596 | 10.296.623 | 0 | 0 | 3.928.043 |
| AMERICANA (unid./m³ de argamassa) | | | | | | |
| Básica 12 h | 190 | 1.401 | 0 | 0,3 | 0,3 | 210 |
| Básica 36 h (AM1) | 205 | 1.494 | 0 | 2,1 | 0,2 | 210 |
| Básica 72 h | 200 | 1.339 | 0 | 2,8 | 0,5 | 200 |
| Não fluida 12 h | 250 | 0 | 1.649 | 0,4 | 0,4 | 200 |
| Estrutural 4 MPa 36 h (AM2) | 180 | 1.596 | 0 | 2,1 | 0,1 | 190 |
| Estrutural 5 MPa 36 h (AM3) | 180 | 1.596 | 0 | 2,1 | 0,1 | 190 |
| Estrutural 7 MPa 36 h | 210 | 1.569 | 0 | 2,4 | 0,1 | 190 |
| Estrutural 10 MPa 36 h | 240 | 1.543 | 0 | 2,8 | 0,1 | 190 |
| Estrutural 14 MPa 36 h | 280 | 1.507 | 0 | 3,2 | 0,1 | 190 |
| Estrutural 5 MPa 72 h | 180 | 1.596 | 0 | 2,4 | 0,2 | 190 |
| Estrutural 7 MPa 72 h | 210 | 1.569 | 0 | 2,8 | 0,2 | 190 |
| Estrutural 10 MPa 72 h | 240 | 1.543 | 0 | 3,2 | 0,2 | 190 |
| Estrutural 14 MPa 72 h | 280 | 1.507 | 0 | 3,8 | 0,3 | 190 |
| Concreto | 250 | 650 | 650 | 0,0 | 0,0 | 180 |
| CAMPINAS (unid./m³ de argamassa) | | | | | | |
| Básica 12 h (CA1) | 190 | 1.401 | 0 | 0,3 | 0,3 | 210 |
| Básica 36 h (CA2) | 190 | 1.401 | 0 | 2,2 | 0,2 | 210 |
| Básica 72 h (CA3) | 200 | 1.339 | 0 | 2,8 | 0,5 | 200 |
| Não fluida 12 h (CA4) | 250 | 0 | 1.649 | 0,4 | 0,4 | 200 |
| Estrutural 4 MPa 36 h | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0,0 | 0 |
| Estrutural 5 MPa 36 h | 230 | 1.552 | 0 | 2,6 | 0,1 | 190 |
| Estrutural 7 MPa 36 h (CA5) | 260 | 1.525 | 0 | 3,0 | 0,1 | 190 |
| Estrutural 10 MPa 36 h | 290 | 1.498 | 0 | 3,3 | 0,1 | 190 |
| Estrutural 14 MPa 36 h (CA6) | 330 | 1.463 | 0 | 3,8 | 0,2 | 190 |
| Estrutural 5 MPa 72 h | 230 | 1.552 | 0 | 3,1 | 0,2 | 190 |
| Estrutural 7 MPa 72 h (CA7) | 260 | 1.525 | 0 | 3,5 | 0,3 | 190 |
| Estrutural 10 MPa 72 h | 290 | 1.498 | 0 | 3,9 | 0,3 | 190 |
| Estrutural 14 MPa 72 h | 330 | 1.463 | 0 | 4,5 | 0,3 | 190 |
| Concreto | 250 | 650 | 650 | 0,0 | 0,0 | 180 |

A Tabela 14 contém os dados de consumo d'água, geração de resíduo, consumo de eletricidade e consumo de diesel dos equipamentos.

Tabela 14: Dados dos inventários das plantas - consumo de energia, consumo de água, geração de resíduo, consumo energético de mistura e transporte até a obra.

| Descrição | Unid. | Itaquaquetuba | Americana | Campinas |
|--|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Consumo de água | | | | |
| Concessionária | kg | 140.000 ⁽¹⁾ | 691.000 ⁽⁴⁾ | 12.000 ⁽¹⁾ |
| Caminhão pipa | kg | 6.311.000 ⁽⁵⁾ | --- | --- |
| Subterrânea | kg | --- | 1.212.000 ⁽²⁾ | 1.288.000 ⁽⁴⁾ |
| Geração de resíduo | | | | |
| Produtos ⁽³⁾ | m ³ | Não informado | 1.200 | 1.800 |
| Óleo lubrificante ⁽³⁾ | l | Não informado | 651 | 1.677 |
| Consumo de energia na central | | | | |
| Energia elétrica | kWh | 30.030 ⁽³⁾ | 6.420 ⁽⁶⁾ | 8.707 ⁽⁶⁾ |
| Diesel para pá carregadeira | l | 2.491 ⁽⁸⁾ | 19.929 ⁽³⁾ | 31.628 ⁽³⁾ |
| Consumo de diesel dos caminhões betoneira | | | | |
| Caminhão BT 1387 ⁽⁷⁾ | l | 2.040 | --- | --- |
| Caminhão BT 1159 ⁽⁷⁾ | l | 1.980 | --- | --- |
| Caminhão BT 1391 ⁽⁷⁾ | l | 1.475 | --- | --- |
| Caminhão BT 1389 ⁽⁷⁾ | l | 1.119 | --- | --- |
| Caminhão de argamassa | l | --- | 12.408 | 16.684 |
| Caminhão de concreto | l | --- | 186.240 | 236.782 |
| Produção por equipamento | | | | |
| Caminhão BT 1387 ⁽⁷⁾ | m ³ | 699 | --- | --- |
| Caminhão BT 1159 ⁽⁷⁾ | m ³ | 729 | --- | --- |
| Caminhão BT 1391 ⁽⁷⁾ | m ³ | 508 | --- | --- |
| Caminhão BT 1389 ⁽⁷⁾ | m ³ | 292 | --- | --- |
| Pá carregadeira ⁽⁸⁾ | m ³ | 18.431,5 | --- | --- |
| Outros | | | | |
| Número de viagens do caminhão betoneira | Unid. | 867 | 469 | 594 |

(1) consumo administrativo

(2) referente a produção de concreto, suspensão de poeira, limpeza de pátio e caminhões

(3) referente a produção de concreto e argamassa

(4) consumo de referente a produção de argamassa, suspensão de poeira, limpeza de pátio e caminhões

(5) consumo referente a produção de argamassa e concreto, suspensão de poeira, limpeza de pátio e caminhões

(6) referente a produção de argamassa

(7) operação de junho e julho de 2019

(8) operação de maio a julho de 2019

O abastecimento de água para a produção de argamassa e concreto, suspensão de poeira e limpeza do pátio e caminhões na planta de Itaquaquetuba aconteceu via caminhão pipa, e o fornecimento da concessionária local atendeu ao consumo humano administrativo. Na

planta de Americana, a água proveniente do abastecimento subterrâneo era dedicada à formulação do concreto, enquanto o abastecimento proveniente da concessionária local era destinado à formulação da argamassa, limpeza do pátio e lavagem de caminhões. Já na planta de Campinas, a água de origem subterrânea era dedicada à produção de argamassa, suspensão de poeira, limpeza de pátio e lavagem de caminhões, o fornecimento da concessionária local atendeu ao consumo humano administrativo. A suspensão de poeira, limpeza do pátio e lavagem de caminhões são serviços que atendem tanto à produção da argamassa como a de concreto, portanto a unidade de referência considerada refere-se à produção total dos produtos.

O responsável pela planta de Itaquaquecetuba não informou o volume de resíduo gerado na planta, mas observou-se que após o tempo de mistura da argamassa no caminhão betoneira era retirado aproximadamente 20 litros de amostra para realização de ensaio de *slump* e densidade. Como esse material era descartado após a realização dos ensaios, foi considerado como sendo resíduo. Portanto, nesse caso, a geração de resíduo foi calculada considerando o número de viagens no período e o volume de produto descartado referente ao ensaio realizado a cada carregamento. Porém, esse dado não contempla o resíduo gerado decorrente do lastro das betoneiras dos caminhões que, por serem compartilhados com a produção de concreto, precisavam ser esvaziados e lavados toda vez que há mudança de tipo de carga devido às diferentes características dos aditivos utilizados. O consumo de diesel dos caminhões betoneiras são referentes aos meses de junho e julho de 2019, e das pás carregadeiras são referentes aos meses de maio a julho de 2019, sendo que as respectivas produções também foram fornecidas.

Foi informado para as plantas de Americana e Campinas a retirada de 150 m³ de resíduo de produção por mês de cada planta, e esse resíduo era tanto de argamassa como de concreto. Para essas plantas, os caminhões betoneiras eram de dedicação exclusiva (Tabela 9). Portanto, no final de cada expediente eram acrescentados 200 litros de água no balão da betoneira e esse volume era descontado no primeiro carregamento realizado no próximo dia útil. Em finais de semana e feriados era acrescentado também aditivo para que a argamassa permanecesse fresca até o próximo dia útil.

Não foi informado o resíduo de óleo lubrificante dos equipamentos na planta de Itaquaquecetuba, pois a troca era realizada em oficina externa.

Os dados referentes ao consumo de diesel dos caminhões betoneira exclusivos da produção de argamassa das plantas de Americana e Campinas foram informados. Porém, como na planta de Itaquaquecetuba não havia caminhão dedicado à produção de argamassa apenas, foram fornecidos dados referentes a quatro diferentes veículos operando na produção de argamassa durante os meses de maio a julho de 2019. Desses dados, aqueles referentes ao mês de maio apresentaram inconsistência e somente os meses de junho e julho foram considerados.

Devido à amplitude da faixa de valores do consumo de eletricidade nas plantas foi solicitado revisão dos dados enviados pelos responsáveis das plantas. A solicitação foi atendida e os valores foram checados e confirmados via *e-mail*.

4.2.2 Resultados e discussões

A Tabela 15 apresenta o consumo de materiais, densidade e teor de água por traço de argamassa calculados a partir dos dados de inventário. Estão sendo apresentados valores médios para as argamassas produzidas em Itaquaquecetuba, visto que não foram fornecidos os dados por traço de argamassa. As densidades das argamassas de 1.802 a 1.987 kg/m³ e os teores de água de 11% a 13% calculados são valores esperados para argamassas de assentamento.

Tabela 15: Consumo de materiais, densidade e teor de água por traço de argamassa estabilizada produzida, calculados a partir dos dados dos inventários das plantas.

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg) | | | | Recursos líquidos (kg) | | | | Densid. (kg/m ³) | Teor de água (%) |
|----------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|------------------------|-------|-------|-------|------------------------------|------------------|
| | Cim. | Areia | Adit. | Total | Água | Areia | Adit. | Total | | |
| ITAQUAQUECETUBA | | | | | | | | | | |
| ITA Média | 208 | 1.404 | 0,3 | 1.613 | 114 | 81 | 2 | 198 | 1.810 | 12% |
| AMERICANA | | | | | | | | | | |
| AM1 Básica 36 h | 205 | 1.494 | 0,2 | 1.699 | 133 | 75 | 2 | 210 | 1.909 | 12% |
| AM2 Estrutural 4 MPa 36 h | 180 | 1.596 | 0,2 | 1.776 | 108 | 80 | 2 | 190 | 1.966 | 11% |
| AM3 Estrutural 5 MPa 36 h | 180 | 1.596 | 0,3 | 1.777 | 108 | 80 | 2 | 190 | 1.966 | 11% |
| CAMPINAS | | | | | | | | | | |
| CA1 Básica 12 h | 190 | 1.401 | 0,6 | 1.592 | 139 | 70 | 1 | 210 | 1.802 | 13% |
| CA2 Básica 36 h | 190 | 1.401 | 2,7 | 1.596 | 138 | 70 | 2 | 210 | 1.804 | 13% |
| CA3 Básica 72 h | 200 | 1.339 | 3,6 | 1.546 | 130 | 67 | 3 | 200 | 1.743 | 13% |
| CA4 Não fluida 12 h | 250 | 1.649 | 0,8 | 1.901 | 117 | 82 | 1 | 200 | 2.100 | 11% |
| CA5 Estrutural 7 MPa 36 h | 260 | 1.525 | 3,5 | 1.792 | 111 | 76 | 3 | 190 | 1.978 | 11% |
| CA6 Estrutural 14 MPa 36 h | 330 | 1.463 | 4,4 | 1.802 | 113 | 73 | 4 | 190 | 1.987 | 11% |
| CA7 Estrutural 7 MPa 72 h | 260 | 1.525 | 4,2 | 1.793 | 110 | 76 | 4 | 190 | 1.979 | 11% |

A Figura 14 apresenta a quantidade de estoque e a quantidade pesada dos insumos consumidos na planta de **Itaquaquetuba** conforme dados coletados. É esperado que a quantidade pesada seja maior que a quantidade de estoque, o que não foi observado para a areia de quartzo. Essa inconsistência pode ser decorrente da falta de precisão humana ao quantificar os estoques pelo método visual volumétrico, da variação da densidade da areia devido à umidade ou por divergências nas quantidades de areia comprada *versus* entregue. Considerando que a imprecisão da balança é de 2,5% (conforme informado pelo responsável) a diferença entre as quantidades *de estoque x pesada* do cimento e da areia artificial estão dentro dessa margem, 2,1% e 0,8% respectivamente. Portanto, a estimativa de geração de perdas no processo de pesagem seria possível somente para os aditivos, pois apresentaram quantidades *de estoque* maiores que as quantidades *pesadas*, visto que esses insumos são de fácil quantificação. Porém, como os aditivos representam menos de 1% em massa, essas perdas não serão detalhadas neste trabalho. Os consumos de cimento e areias considerados (R_c , R_{sand} e $R_{art.sand}$) foram as quantidades pesadas na balança de dosagem. por esse motivo, a perda dos insumos secos durante o transporte até a pesagem está sendo negligenciada.

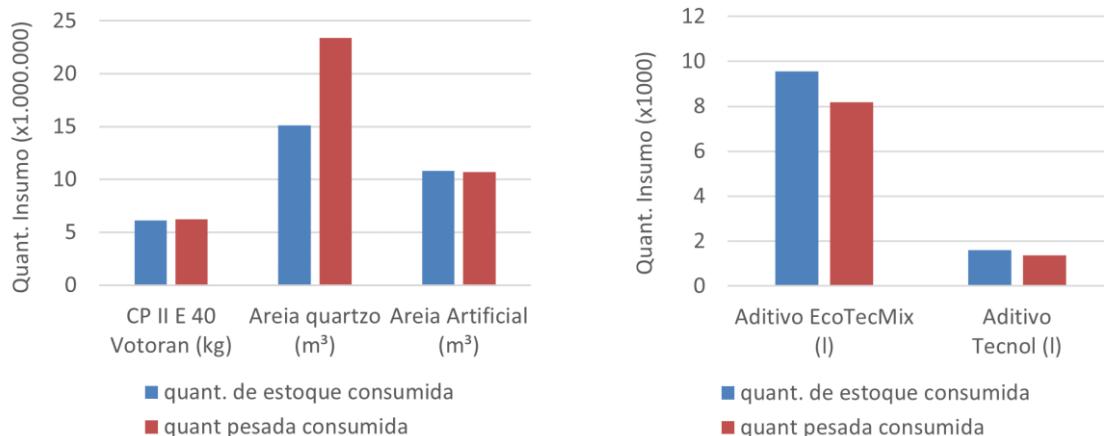


Figura 14: Quantidade de estoque versus quantidade pesada dos insumos para a produção de argamassa estabilizada na planta de **Itaquaquetuba**.

Para as plantas de Americana e Campinas, os consumos de materiais foram calculados a partir da formulação das argamassas produzidas e entregues (Tabela 11 e Apêndice A), não contemplando as perdas durante a pesagem dos insumos. Recomenda-se que em futuros estudos os dados de estoque dos insumos sejam coletados para que se faça a análise completa das perdas desse processo.

A Figura 15, Figura 16, Figura 17 e Figura 18 ilustram e comparam os indicadores ambientais do berço-ao-portão das argamassas estabilizadas de diferentes traços produzidas nas plantas de Americana e Campinas (detalhes no Apêndice B). A etapa A1 refere-se à produção das matérias-primas na fronteira do berço-ao-portão, a etapa A2 refere-se ao transporte desses insumos até as respectivas plantas de argamassa, inclusive os aditivos, e a etapa A3 trata da dosagem e mistura da argamassa nas centrais. Não considerado na análise os dados da planta de Itaquaquetuba por não ter sido disponibilizado dados de perdas.

A Figura 15 mostra o consumo de material nas etapas de produção das matérias-primas, inclusive as perdas durante o processo. O consumo de material nas centrais é decorrente das perdas de argamassa. É importante observar que o responsável das plantas de Americana e Campinas informou a retirada de mesmo volume de resíduo para as duas plantas (150 m³/mês/central), porém a planta de Campinas produziu aproximadamente 5,5 vezes mais. O transporte de resíduo era realizado por empresa terceirizada, cujo contrato contemplava o transporte de um reservatório de 150 m³ de capacidade por mês, mesmo se não totalmente

cheio. Portanto, é possível que os valores da planta de Americana estejam majorados. O valor mediano do indicador de consumo de material calculado é de 2.473 kg/m³.

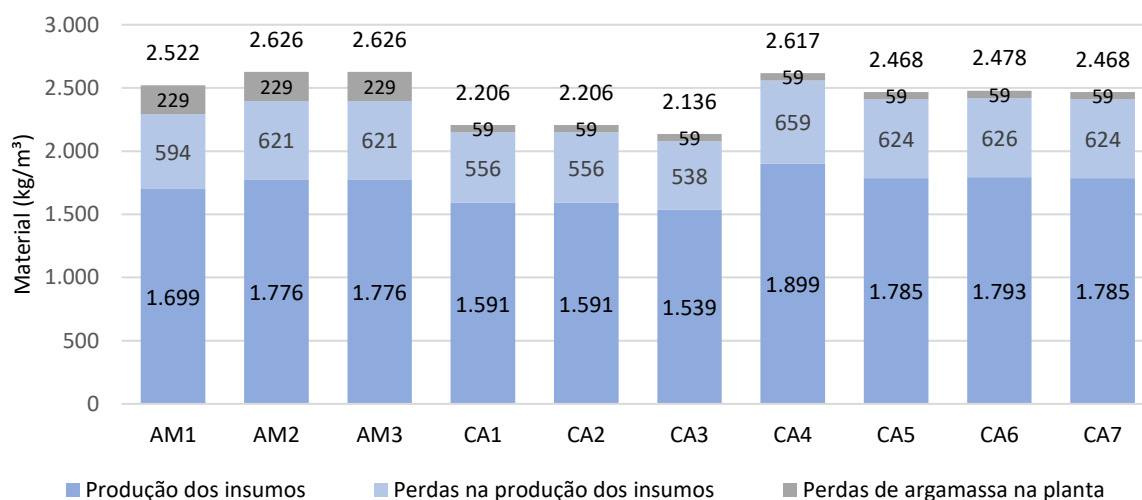


Figura 15: Consumo de **material** e **perdas** para diferentes traços de argamassa estabilizada conforme dados de inventário. Fronteira do **berço-ao-portão**. Dados por m³ de argamassa produzida.

O valor mediano do indicador de consumo de energia calculado é de 1.262 MJ/m³. A Figura 16 mostra maior consumo de energia na etapa A1, porém o consumo referente ao transporte dos insumos é representativo. Enquanto nas plantas de Americana e Campinas esse valor varia de 232 a 283 MJ/m³, a média da planta de Itaquaquecetuba é de 677 MJ/m³ (Apêndice B), aproximadamente três vezes maior, explicado pela maior distância de transporte da areia de quartzo (conforme Tabela 10), que gera maior consumo de diesel (conforme Tabela 14). Isso mostra a importância da coleta de dados localmente e análise regional do impacto ambiental. Vale ressaltar que a areia é considerado um recurso abundante no mundo e, por isso, não é considerado relevante em estudos de ACV tradicional para quantificar a depleção de recursos abióticos (ADP) (HABERT et al., 2010). Porém, sua escassez nos grandes centros urbanos, como na região metropolitana de São Paulo, já é uma realidade (UNEP; IRP, 2019), e a busca pelo insumo percorrendo maiores distância aumenta sua pegada energética e de CO₂, e consequentemente da produção da argamassa e da obra.

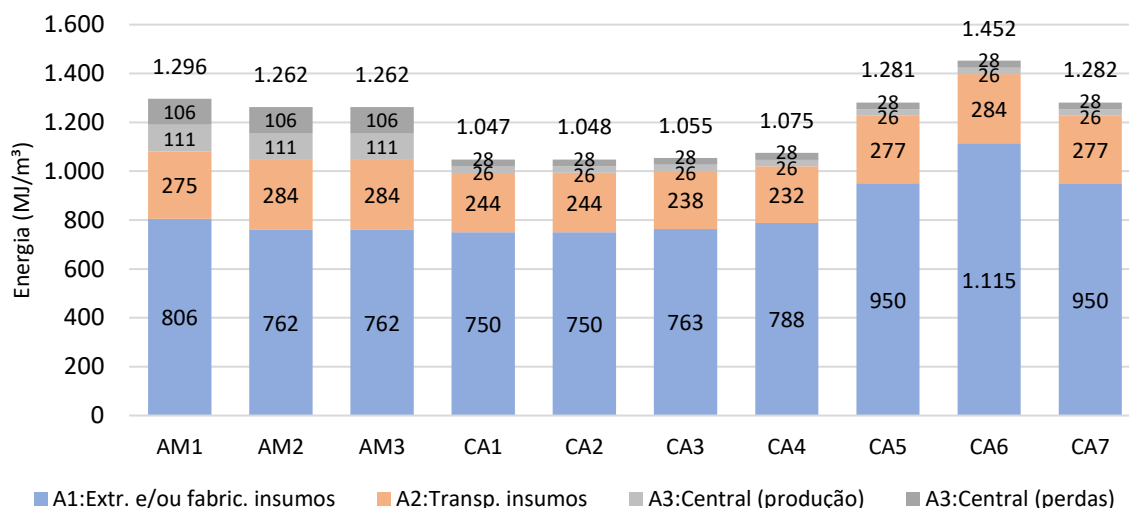


Figura 16: Consumo de **energia** para diferentes traços de argamassa estabilizada conforme dados de inventário. Fronteira do **berço-ao-portão**. Dados por m³ de argamassa produzida.

A Figura 17 mostra que as emissões de CO₂ variam conforme a resistência das argamassas, ou seja, o consumo de cimento. As argamassas AM1, AM2, AM3, CA1, CA2 e CA3 são todas básicas, de uso múltiplo, e mostram emissões muito próximas, de 208 kg CO₂/m³ a 221 kg CO₂/m³. Enquanto as argamassas CA5, CA6 de 7 MPa e a e CA7 de 14 MPa têm emissões de 260 kg CO₂/m³ e 313 kg CO₂/m³ respectivamente. O valor mediano do indicador de emissão de CO₂ calculado é de 215 kg CO₂/m³.

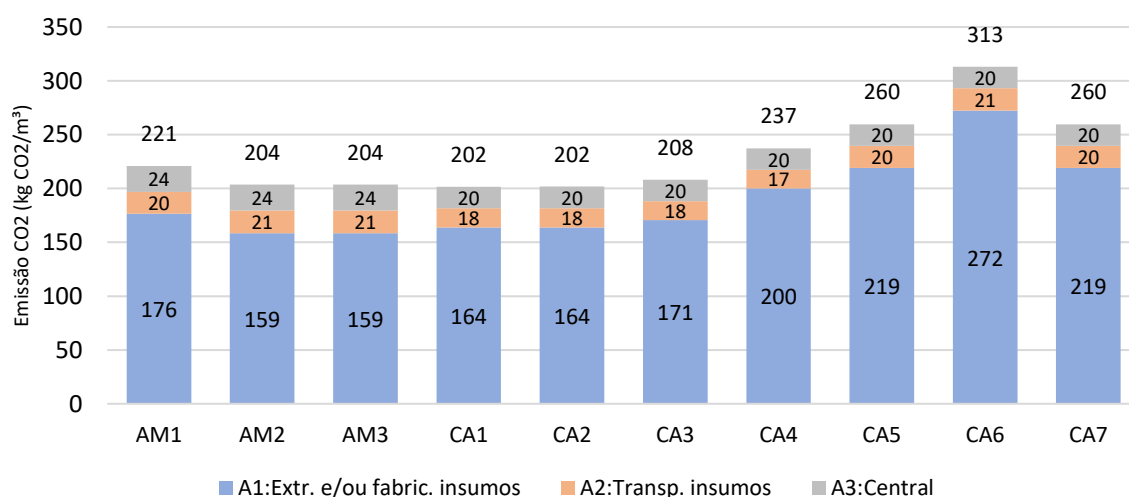


Figura 17: **Emissão de CO₂** para diferentes traços de argamassa estabilizada conforme dados de inventário. Fronteira do **berço-ao-portão**. Dados por m³ de argamassa produzida.

Os valores apresentados na Figura 18 mostram maior consumo de água durante a etapa de produção dos insumos. A água é utilizada no beneficiamento das areias e para resfriamento

do processo de fabricação do clínquer, insumo básico do cimento. O valor mediano do indicador de consumo de água calculado é de 766 kg/m³.

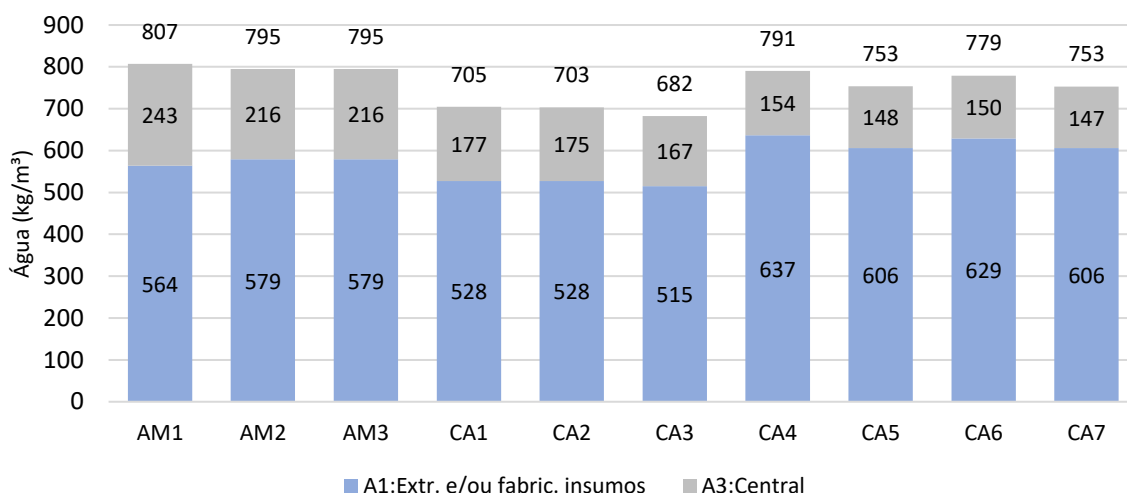


Figura 18: **Consumo de água** para diferentes traços de argamassa estabilizada conforme dados de inventário. Fronteira do **berço-ao-portão**. Dados por m³ de argamassa produzida.

A Figura 19 mostra o consumo d'água nas centrais. O volume de água adicionada entre 114 e 133 kg/m³ está compatível com o volume de água de formulação das argamassas de 190 a 210 kg/m³, já que a umidade das areias é descontada. Segundo dados da literatura, o consumo de água de lavagem de caminhão na produção do concreto varia entre 50 a 500 kg/m³ (CEMEX, 2017; ERMCO, 2006; MACK-VERGARA; JOHN, 2017; REIS; MACK-VERGARA; JOHN, 2019). Na produção da argamassa é comum o reaproveitamento do lastro do caminhão e a lavagem ocorre somente no caso de manutenção da frota. Portanto o consumo entre 19 kg/m³ e 50 kg/m³ para a lavagem de caminhões, suspensão de poeira e limpeza do pátio, está coerente com os dados da literatura.

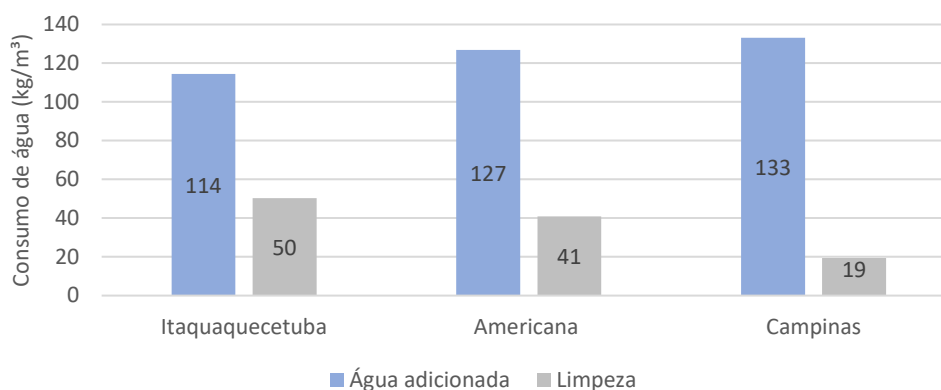


Figura 19: Quantidade de água adicionada e água de limpeza consumida durante na produção de argamassas estabilizadas nas plantas de Itaquaquetuba, Americana e Campinas.

Os gráficos da Figura 20 foram elaborados a partir dos valores medianos dos indicadores das argamassas estabilizadas e ilustram as etapas mais representativas da fronteira do berço-aopórtão. Pode ser observado que o cimento foi responsável por aproximadamente 78% das emissões de CO₂, 49% do consumo de energia e 18% do consumo de água. Esses percentuais mostram como a produção do clínquer influencia nos indicadores ambientais das argamassas, pois é caracterizado por alto consumo energético necessário para atingir elevadas temperaturas, alto consumo de água para o posterior resfriamento, e altas emissões de CO₂, não somente devido a queima dos energéticos, mas também devido a calcinação do calcário. Portanto, reduções do consumo de cimento nos traços das argamassas, desde que o desempenho técnico seja mantido, podem proporcionar ganhos ambientais significativos. O processo de beneficiamento das areias também é uma etapa que merece atenção do setor pois suas perdas representaram 23% de todo recurso sólido extraído, e 63% do recurso líquido utilizado. Já o transporte dos insumos foi responsável pelo consumo de 23% dos energéticos e 9% das emissões de CO₂, mostrando mais uma vez a importância das distâncias de transporte das matérias-primas na carga ambiental das argamassas.

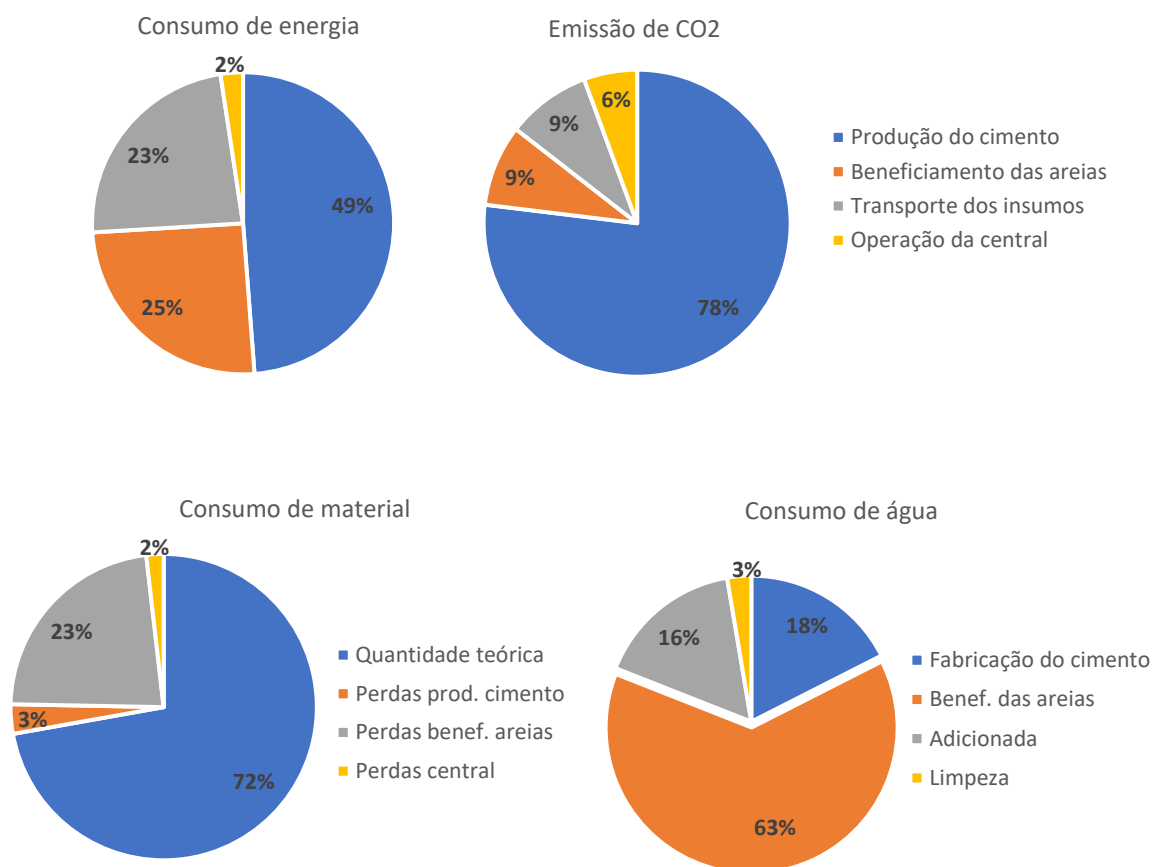


Figura 20: Percentual dos indicadores ambientais dado por cada etapa do processo. Fronteira **do berço-ao-portão**. Valores medianos dos diferentes traços das argamassas estabilizadas do estudo de caso.

A qualidade dos dados de inventário desempenha um papel fundamental na geração de estudos confiáveis. Portanto, é crucial que a coleta de dados seja realizada para cada tipo de argamassa, abrangendo todos os fluxos do processo, a fim de proporcionar análises mais abrangentes. No estudo de caso, os dados das centrais de Americana e Campinas permitiram análises mais efetivas em comparação com os dados obtidos da central de Itaquaquetuba. Esta última não forneceu informações específicas para cada tipo de argamassa, tampouco quantificou os resíduos gerado na planta, o que limitou as análises realizadas. A estratégia de coleta de dados de inventário deve ser minuciosamente estruturada junto ao fabricante no início de cada projeto. Como melhoria para o próximo estudo, sugere-se que o consumo de matérias-primas seja quantificado de duas maneiras, sendo (1) a massa dos insumos efetivamente pesados na balança e (2) o consumo de matérias-primas do estoque no período. Desta maneira, é possível estimar as perdas durante o processo dentro da central a partir do balanço de massas.

A Tabela 16 apresenta o consumo de diesel referente à mistura e transporte da argamassa da central à obra. Foi solicitado revisão dos dados da planta de Americana por apresentar consumo de energia aproximadamente seis vezes maior que a das outras plantas. O responsável confirmou os dados via e-mail. Esse resultado sugere que as obras atendidas por Americana são mais distantes que aquelas atendidas por plantas localizadas em grandes centros urbanos como de Itaquaquecetuba e Campinas. Lembrando que o transporte de argamassa da central à obra faz parte da etapa de construção. Portanto, os valores da Tabela 16 serão considerados somente no item 4.3 *Aplicação da argamassa estabilizada em obra*.

Tabela 16: Dados de inventário das plantas - indicadores ambientais referentes ao transporte da argamassa da central à obra. Dados considerados na etapa A4, etapa de construção.

| Central | Energia (MJ/m ³) | Emissão de CO ₂ (kg/m ³) |
|-----------------|------------------------------|---|
| Itaquaquecetuba | 104,5 | 7,7 |
| Americana | 655,0 | 48,4 |
| Campinas | 103,8 | 7,7 |

4.2.2.1 Simulação dos indicadores ambientais dos aditivos

Conforme destacado no item 3.2.1 *Consumo de material*, os aditivos foram ignorados neste estudo. No entanto, reconhecendo a possibilidade de potencial contribuição para os impactos ambientais, foi realizada uma simulação dos indicadores ambientais associados ao consumo de aditivos deste estudo.

A Tabela 17 apresenta os valores obtidos, onde pode ser observado que os cinco indicadores ambientais dos aditivos representam até 0,07% para a fronteira do berço-ao-portão. Esse resultado corrobora com a orientação dada por (JOHN et al., 2021). Entretanto, os aditivos tem considerável potencial de diminuição do impacto ambiental das argamassas e concretos, podendo diminuir 20% em massa o consumo de clínquer (CHEUNG; ROBERTS; LIU, 2018).

Tabela 17: Representatividade do berço-ao-portão dos indicadores dos aditivos utilizados na produção de argamassa estabilizada deste estudo.

| Indicador | Unidade | Aditivo* | Indicadores do aditivo para produção de 1 m ³ de argamassa | | Representatividade do berço-ao-portão | |
|------------------------------|--------------------------|----------|---|--------|---------------------------------------|--------|
| | | | Unid./kg | Mínimo | Máximo | Mínimo |
| Aditivo plastificante | | | | | | |
| Material | kg | --- | 0,003 | 0,004 | 0,0% | 0,0% |
| Energia primária | MJ | 32,91 | 0,09 | 0,13 | 0,0% | 0,0% |
| Emissão CO ₂ | kg CO ₂ equiv | 1,88 | 0,00 | 0,01 | 0,0% | 0,0% |
| Água | kg | 6,04 | 0,02 | 0,02 | 0,0% | 0,0% |
| Perdas | kg | 0,026 | 0,000 | 0,000 | 0,0% | 0,0% |
| Aditivo estabilizador | | | | | | |
| Material | Kg | --- | 0,247 | 0,295 | 0,0% | 0,0% |
| Energia primária | MJ | 30,37 | 7,49 | 8,96 | 0,7% | 0,6% |
| Emissão CO ₂ | kg CO ₂ equiv | 1,31 | 0,32 | 0,39 | 0,2% | 0,2% |
| Água | kg | 5,75 | 1,42 | 1,70 | 0,1% | 0,2% |
| Perdas | kg | 1,661 | 0,410 | 0,490 | 0,1% | 0,1% |

*Fonte: Dados de DAP europeia sendo aditivo plastificante (EFCA, 2015a) e aditivo estabilizador (EFCA, 2015b).

4.3 Aplicação da argamassa no canteiro

O estudo de caso foi conduzido em um edifício residencial de 20 pavimentos, situado na cidade de São Paulo. A argamassa estabilizada foi aplicada na execução da alvenaria estrutural, como pode ser ilustrado na Figura 21. Conforme especificação do projeto estrutural, foram utilizados blocos de concreto estrutural M-15 Classe A, fornecido pela Glasser, que segundo a norma ABNT ISO NBR 6136 tinha 14 cm de largura e 25 mm de espessura de parede de bloco (ABNT, 2007). A argamassa utilizada foi a estabilizada, aplicada com colher de pedreiro, com resistência à compressão variando de 14 a 20 MPa, e formulada com os aditivos incorporador de ar e retardador de pega. Foram executados 757 m² de parede por pavimento tipo. O inventário de dados foi realizado entre outubro e dezembro de 2020, durante a execução da alvenaria dos pavimentos tipo 2, 3, 5 e 7. Por se tratar de alvenaria estrutural, o assentamento de blocos era executado em área descoberta, sujeita às chuvas. Consequentemente, após as chuvas, não era possível coletar e pesar o resíduo, uma vez a água da chuva altera a densidade do material. Portanto, aproximadamente 30% do assentamento executado nos pavimentos 2, 3, 5 e 7 não puderam ser incluídos no inventário, conforme detalhado na Tabela 18.

Tabela 18: Dados de inventário da obra - área de parede inventariada por pavimento.

| Descrição | Unid. | Pav.2 | Pav.4 | Pav.5 | Pav.7 | Total |
|--|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Área total inventariada (A_w) | m ² | 697 | 498 | 245 | 639 | 2.079 |
| Fração de área de parede inventariada ($FA_{w,n}$) | % | 92,1 | 65,8 | 32,4 | 84,4 | 68,7 |



Figura 21: Assentamento de alvenaria estrutural executada com colher de pedreiro e argamassa estabilizada fornecida pela Supermix. Fotos tiradas pela autora durante coleta de dados no canteiro.

4.3.1 Inventário

Os dados primários coletados referentes aos pavimentos inventariados durante o processo de assentamento de blocos estão apresentados na Tabela 19. A resistência à compressão, a densidade e o consumo médio de cimento de 208 kg/m³ referentes à argamassa foram informados pelo produtor da argamassa. Foi utilizado o cimento CP II E 40 de 40 MPa, cuja Declaração Ambiental de Produto está disponível em (VOTORANTIM, 2016a).

Tabela 19: Dados de inventário da obra referente ao processo de assentamento de blocos em prédio residencial de alvenaria estrutural localizado na cidade de São Paulo, no período de outubro a dezembro de 2020. Resistência à compressão (fck) e densidade da argamassa fornecidos pelo produtor da argamassa.

| Descrição | Unidade | Pav.2 | Pav.4 | Pav.5 | Pav.7 | Total |
|--|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Argamassa entregue na obra (M _{del.n}) | m ³ | 12 | 12 | 12 | 12 | 48 |
| Reservatórios usados e lavados (C) | unid. | 12 | 8 | 4 | 11 | 35 |
| Viagens de guindaste realizada (T) | unid. | 28 | 20 | 10 | 26 | 84 |
| Horas trabalhadas do guindaste (Hc) | H | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,5 | 0,9 |
| Película d'água (W _l) | m ³ /reservatório | 0,033 | 0,033 | 0,033 | 0,033 | --- |
| Água de lavagem de reservatórios (W _c) | m ³ /reservatório | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | --- |
| Água de lavagem de ferramentas (W _r) | m ³ /100 m ² | 0,026 | 0,026 | 0,026 | 0,026 | --- |
| Resistência à compressão (fck) | MPa | 20 | 18 | 18 | 14 | --- |
| Densidade da argamassa estabilizada | kg/m ³ | 1.998 | 1.979 | 1.979 | 1.979 | --- |
| Resíduo sólido (S _w) | Kg | 1.334 | 1.465 | 1.837 | 4.406 | 9.042 |

A Tabela 20 apresenta os parâmetros usados para a modelagem do consumo de energia do guindaste utilizado no transporte vertical da argamassa. O consumo de energia elétrica do guindaste foi estimado considerando sua velocidade e a capacidade do reservatório, ambos medidos na obra. A potência do guindaste foi obtida a partir de especificação de catálogo do fabricante do equipamento (BAUSCHER, 2013).

Tabela 20: Dados de inventário da obra - parâmetros utilizados para modelar o consumo de energia do guindaste responsável pelo transporte vertical da argamassa.

| Descrição | Unit | Valor | Fonte |
|--|----------------|-------|------------------|
| Velocidade de içamento (S _c) | m/min | 19 | Medido na obra |
| Capacidade do reservatório | m ³ | 0.4 | Medido na obra |
| Capacidade do guindaste | T | 1.5 | Coletado na obra |
| Potência do motor (P _c) | kW | 9.8 | (BAUSCHER, 2013) |
| Distância piso a piso | m | 2.9 | Medido na obra |

A Tabela 21 apresenta as distâncias piso a piso medidos na obra dos pavimentos inventariados. A distância piso a piso é o pé direito mais a espessura da laje, cujas medidas de projeto são 2,6 m e 0,3 m, respectivamente.

Tabela 21: Dados de inventário da obra - distância piso a piso dos pavimentos inventariados na obra.

| | Distância piso a piso (m) | | | |
|----------|---------------------------|-------|-------|-------|
| | Pav.2 | Pav.4 | Pav.5 | Pav.7 |
| Medida 1 | 2,585 | 2,585 | 2,590 | 2,620 |
| Medida 2 | 2,585 | 2,600 | 2,590 | 2,600 |
| Medida 3 | 2,585 | 2,600 | 2,590 | 2,610 |

4.3.2 Resultados e discussões

A espessura horizontal de argamassa entre os blocos foi verificada com a distância piso a piso dos pavimentos inventariados, conforme dados da Tabela 21. Como a média e o desvio padrão (sd) obtido foi $2,60 \pm 0,01$ m, conclui-se que as espessuras horizontais de argamassa foram executadas dentro do especificado em projeto. O mesmo pode ser dito das espessuras verticais, pois as paredes executadas na obra se encontram alinhadas entre si e alinhadas com as lajes inferior e superior de cada pavimento. Como trata-se de alvenaria estrutural, os blocos são utilizados conforme medidas padrão de projeto e não há cortes em obra dessas peças. Portanto, conclui-se que não houve perdas incorporadas devido à sobre espessura de argamassa entre os blocos. Foi considerado que os blocos produzidos pela Glasser seguem padrões de medidas compatíveis com as normas vigentes.

A porosidade da argamassa antes da aplicação foi estimada em 27,2% e após a aplicação em 24,1%, representando uma taxa de perda volumétrica de ar incorporado de 3,1% (Tabela 22). Os valores obtidos neste estudo são consistentes com os do Brasil, cuja taxa de perda volumétrica de ar incorporado varia tipicamente entre 1,5% e 5% (SANTOS, 2003). Alguma perda de ar é inevitável e depende de muitos fatores, incluindo transporte, aplicação e viscosidade da argamassa. Uma opção seria compensar essa perda aumentando a dosagem do agente incorporador de ar que tem impacto ambiental insignificante, desde que garantida a resistência especificada da argamassa.

Apesar deste estudo tratar da argamassa de assentamento, vale observar que no caso de argamassa estabilizada utilizada em revestimento de parede, é esperado uma perda significativa de ar incorporado, principalmente se a argamassa for projetada utilizando equipamento apropriado.

Tabela 22: Densidade real, massa e volume de envelopamento da argamassa estabilizada obtidas a partir de amostras coletadas na obra e submetidas a ensaios em laboratório.

| Propriedade | Unid. | Não aplicada(a) | | Aplicada (b) | | Variação a(-)b |
|----------------------------|-------------------|-----------------|------|--------------|------|----------------|
| | | média | sd | média | sd | |
| Densidade real | g/cm ³ | 2,59 | 0,00 | 2,59 | 0,00 | --- |
| Massa | g | 11,25 | 1,60 | 6,31 | 0,41 | --- |
| Volume envelopamento | cm ³ | 5,97 | 0,84 | 3,21 | 0,21 | --- |
| Densidade de envelopamento | g/cm ³ | 1,88 | 0,01 | 1,96 | 0,01 | --- |
| Porosidade | % | 27,2 | --- | 24,1 | --- | 3,1 |

A Tabela 23 apresenta o consumo de argamassa e suas perdas, o consumo de energia, emissão de CO₂ e o consumo de água em canteiro. Valores dados por 100 m² de parede executada.

Tabela 23: Consumo de material e perdas, consumo de energia, emissão de CO₂ e consumo de água de argamassa estabilizada de alvenaria. Dados de canteiro. Unidade por 100 m² de parede executada.

| Descrição | Unid. | Unid / 100 m ² | Perc. |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------|
| Consumo de argamassa | m³ | 1,59 | 100% |
| Consumo teórico | m ³ | 0,64 | 40% |
| Perdas | m ³ | 0,95 | 60% |
| Resíduo sólido | m ³ | 0,22 | 14% |
| Perda de ar incorporado | m ³ | 0,04 | 3% |
| Perda incorporada | m ³ | 0,69 | 43% |
| Consumo de energia | MJ | 2,6 | -- |
| Emissão de CO₂ | kg CO₂ | 0,03 | -- |
| Consumo de água | kg | 116 | 100% |
| Película d'água | kg | 60 | 52% |
| Limpeza de reservatórios | kg | 30 | 26% |
| Limpeza de ferramentas | kg | 26 | 23% |

O consumo de energia na obra foi de 2,6 MJ/100 m², representa 0,2% do consumo de energia da argamassa para a fronteira do berço-ao-portão de 1.262 MJ/m³, conforme dados medianos do estudo de caso (Apêndice B). A emissão de CO₂ associada a esse consumo de energia é de 0,03 kg CO₂/100 m², representa 0,01% dos 215 kg CO₂/m³ liberados na fronteira do berço-ao-portão da argamassa, conforme dados do estudo de caso (Apêndice B). Portanto o consumo de energia na obra referente ao processo de aplicação tem apenas impacto marginal nas pegadas de energia e CO₂ da argamassa. A norma (EN 15804, 2015) que padroniza internacionalmente os estudos de ACV de edifícios exige apenas o escopo do berço-ao-portão, deixando as etapas dos canteiros de obras opcionais. Realmente o consumo de energia no canteiro se mostrou insignificante, porém das perdas na obra são significativas: 60% de todo material consumido e suas cargas ambientais são alocadas na etapa de construção, apontado

para a importância desta etapa nos estudos de desempenho ambiental dos materiais de construção.

O consumo de água no canteiro foi de $116 \text{ kg}/100 \text{ m}^2$, representa $0,02\%$ da fronteira do berço-à-aplicação, porém por estar localizado em área urbana, compete com a população pelo consumo da água potável da rede pública, que está se tornando mais escassa em muitas áreas metropolitanas. A construção das quatro torres deste projeto consumirá um total de água de 4.200 m^3 , o suficiente para abastecer 25.000 pessoas em um dia (“Sabesp”, 2021). Portanto, o inventário de água do canteiro de obras é relevante, e soluções como a reciclagem d’água ou o uso d’água da chuva podem reduzir o estresse das redes públicas (MACK-VERGARA; JOHN, 2017).

O diagrama de Sankey da Figura 22 ilustra o fluxo de água e o fluxo da argamassa no assentamento de blocos estruturais, conforme dados apresentados da Tabela 23. O consumo de argamassa é dado em volume para ilustrar a perda volumétrica do ar incorporado durante o manuseio do produto.

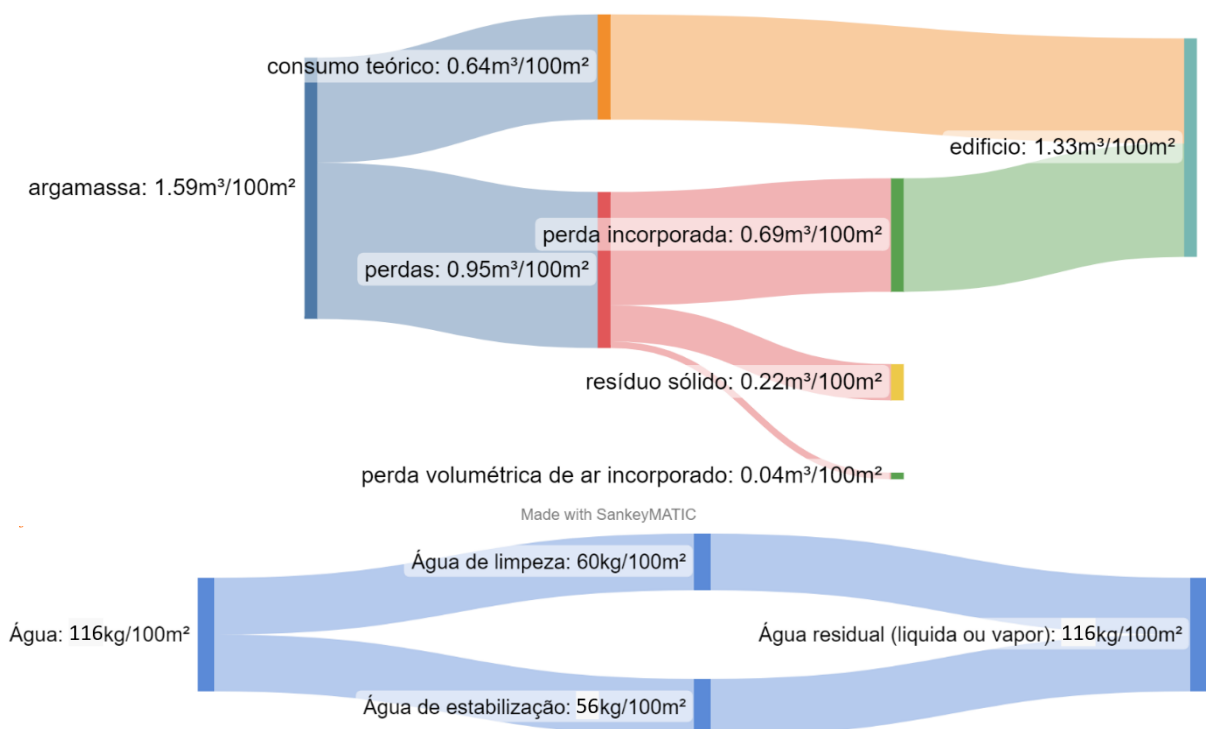


Figura 22: Fluxo de argamassa estabilizada e de água para assentamento de 100 m^2 de parede de blocos estruturais. Estudo de caso de edifício residencial localizado na cidade de São Paulo de outubro a dezembro de 2020. AS perdas representam 60% de todo material consumido.

Para o assentamento de 100 m² de alvenaria estrutural consome-se cerca de 1,59 m³ de argamassa estabilizada, dos quais 0,95 m³ referem-se aos resíduos e perdas gerados. Desses 0,95 m³/100 m², 0,69 m³/100 m² fica dentro da edificação como perda incorporada, 0,22 m³/100 m² representam o resíduo sólido e 0,04 m³/100 m² são perdas volumétrica de ar incorporado. Esses valores representam taxa de perdas de 148% durante a fase de construção. Como o desperdício de material carrega todos os impactos ambientais da argamassa (incluindo todo o ciclo de vida, desde a extração de recursos até o seu descarte final), ele aumenta diretamente todos os indicadores a ele associados na mesma ordem de grandeza, como o consumo de material, energia, água e emissão de CO₂.

Em outras palavras, as perdas incorporadas no edifício representam 43% de todo material extraído da natureza. Dado que a espessura média da argamassa medida em obra corresponde à especificada no projeto, podemos inferir que o resíduo incorporado consiste na argamassa penetrada nos furos dos blocos. Portanto a substituição das colheres de pedreiro utilizadas na aplicação da argamassa é fundamental para mitigar o desperdício. A utilização de bisnagas de argamassa para assentamento de blocos parece ser uma solução com potencial para reduzir as perdas. Existem vários vídeos no YouTube retratando esta tecnologia, no entanto, é necessário considerar possíveis alterações nas propriedades reológicas da argamassa e seu efeito na produtividade (COSTA; CARDOSO; JOHN, 2017), pelo que é necessário uma investigação mais aprofundada. A implementação de pré-moldados na construção de paredes, semelhante a outros métodos de industrialização, promete uma redução significativa nas perdas. No entanto, uma análise mais aprofundada do ciclo de vida se faz necessária, especialmente considerando que estamos lidando com produtos que possuem diferentes teores de cimento: blocos de concreto e argamassa, em comparação com placas cimentícias pré-fabricadas.

A 13ª edição do TCPO (PINI, 2010) apresenta uma faixa de perdas em canteiro de argamassa para alvenaria estrutural que varia de 0,5 a 3,7 m³ / 100 m². Este estudo de caso registrou perdas em canteiro de 0,95 m³ / 100 m², um valor que está dentro da faixa fornecida pelo TCPO. No entanto, na literatura, não foram encontrados outros trabalhos sobre perdas de argamassa de assentamento. O estudo de (PEREZ et al., 2013) considera apenas argamassa de revestimento, apresenta perdas de argamassa de 184%, sendo 118% de perda incorporada e 66% de geração de resíduo durante a aplicação. É esperado que haja maiores perdas na

aplicação de argamassa de revestimento em comparação à argamassa de assentamento, o que foi confirmado neste estudo, pois apresentou perdas de 145%. No artigo de (Li et al., 2013), as perdas de argamassa são calculadas por área construída, considerando as perdas referentes ao assentamento e revestimento em único valor de 3,4 kg / m². Para este estudo de caso, dado que o pavimento tipo é de 717 m², as perdas são de aproximadamente 20 kg / m², bem acima do valor indicado por (Li et al., 2013), apesar de se referir somente ao assentamento. Como pode ser observado, poucos estudos foram realizados sobre as perdas de argamassa durante o assentamento de alvenaria.

De acordo com o mencionado anteriormente no subitem *Resultados e discussões* do estudo de caso das plantas de produção de argamassa, a extração de areia utilizada na produção de argamassas é considerada um recurso abundante no mundo e, por isso, não é relevante em estudos de ACV para quantificar a depleção de recursos abióticos (ADP) (HABERT et al., 2010). No entanto, vários problemas ambientais e sociais no âmbito local são o associados à extração de areia (UNEP; IRP, 2019). Portanto, a redução das perdas torna os recursos mais eficientes e, conseqüentemente, reduz os impactos ambientais, uma vez que para um mesmo desempenho ambiental é consumido menor volume de material (HERTWICH et al., 2019). Isso é relevante porque o consumo de argamassa no Brasil foi em torno de 250 e 300 milhões de toneladas em 2015 (JOHN et al., 2020; REIS; MACK-VERGARA; JOHN, 2019) e possui uma das maiores taxas de perdas de todos os materiais de construção. Por exemplo, o segundo material de construção mais consumido, o concreto, apresenta uma taxa média de perdas de 9% (FORMOSO et al., 2002a).

A argamassa estabilizada é uma argamassa industrializada que chega na obra já misturada com água. Ela contém ar incorporado, o que reduz o consumo de material em comparação com a argamassa dosada em obra. Por ser armazenada em contêineres não há geração resíduo de embalagens. Além disso, vinda de uma operação industrial, diminui a probabilidade da areia consumida ter sido extraída por empresas informais, um problema comum no Brasil (MACEDO; DE ALMEIDA MELLO FREIRE; AKIMOTO, 2003) que resulta em evasão fiscal e aumento do impacto ambiental (RAMADON, 2016). Em alguns casos a formulação da argamassa estabilizada inclui a areia artificial, uma estratégia que mitiga a escassez local de areia em grandes áreas urbanas (TORRES et al., 2017) e, conseqüentemente, menor custo de

transporte e pegada de CO₂. Apesar de todas as vantagens, as argamassas dosadas in loco ainda representam 96% do mercado nacional (CETESB, 2017a).

4.4 Indicadores ambientais da argamassa do “berço-a-aplicação”

A Figura 23, a Figura 24, a Figura 25, a Figura 26 e a Figura 27 ilustram e comparam os indicadores ambientais das diferentes argamassas estabilizadas produzidas nas plantas de Americana e Campinas. Por não ter sido disponibilizado os dados das perdas, a planta de Itaquaquecetuba não foi considerada nessa análise. Detalhes estão apresentado no Apêndice B.

A Figura 23 apresenta os indicadores de material e perdas. As cargas ambientais devido a argamassa residual gerada durante a aplicação na obra são alocadas na etapa de construção, o que justifica maiores indicadores nessa etapa em comparação a etapa do berço-ao-portão. Portanto, melhorias técnicas no processo de aplicação de argamassas tem grande potencial de redução de custo e ganhos ambientais.

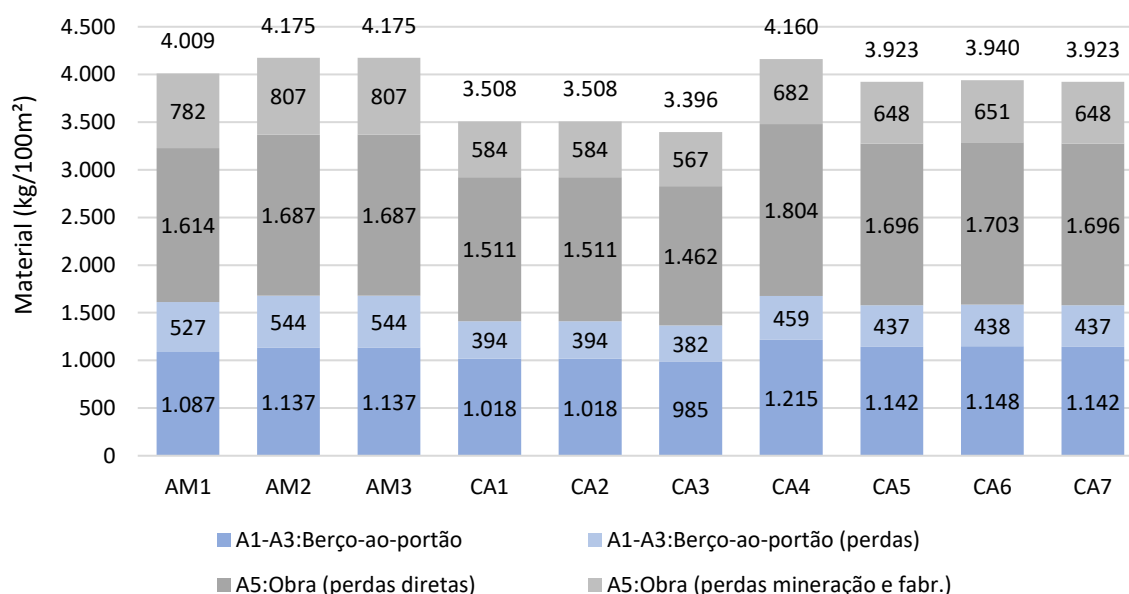


Figura 23: Consumo de **material** para diferentes traços de argamassa estabilizada conforme dados de inventário. Fronteira do **berço-a-aplicação**. Dados por 100 m² de argamassa assentada em blocos estruturais.

Não há na literatura nacional dados sobre as perdas durante a fase de construção de argamassas de assentamento em alvenaria estrutural. Porém, o artigo de (FORMOSO et al., 2002b) analisa dois estudos de caso nacionais de argamassas: o estudo de caso de (SOIBELMAN, 1993) que contém dados de perdas de argamassa industrializada utilizada em revestimento e assentamento de blocos cerâmicos não estruturais, e o estudo de (AGOPYAN et al., 1998) que apresenta as perdas de argamassa de assentamento também de blocos cerâmicos não estruturais. A Figura 24 mostra que o valor das perdas de argamassa de assentamento em alvenaria estrutural é compatível com os valores das perdas de argamassas de assentamento em alvenaria cerâmica não estrutural. No entanto, é importante ressaltar que esses valores não levam em consideração as perdas durante a produção das matérias-primas, portanto não abrangem as perdas do ciclo de vida do berço-ao-portão. Para este estudo de caso, enquanto as perdas da obra são na ordem de 148%, quanto considerada a fronteira do berço-ao-portão, esse valor pode chegar a 269% dependendo do tipo de argamassa.

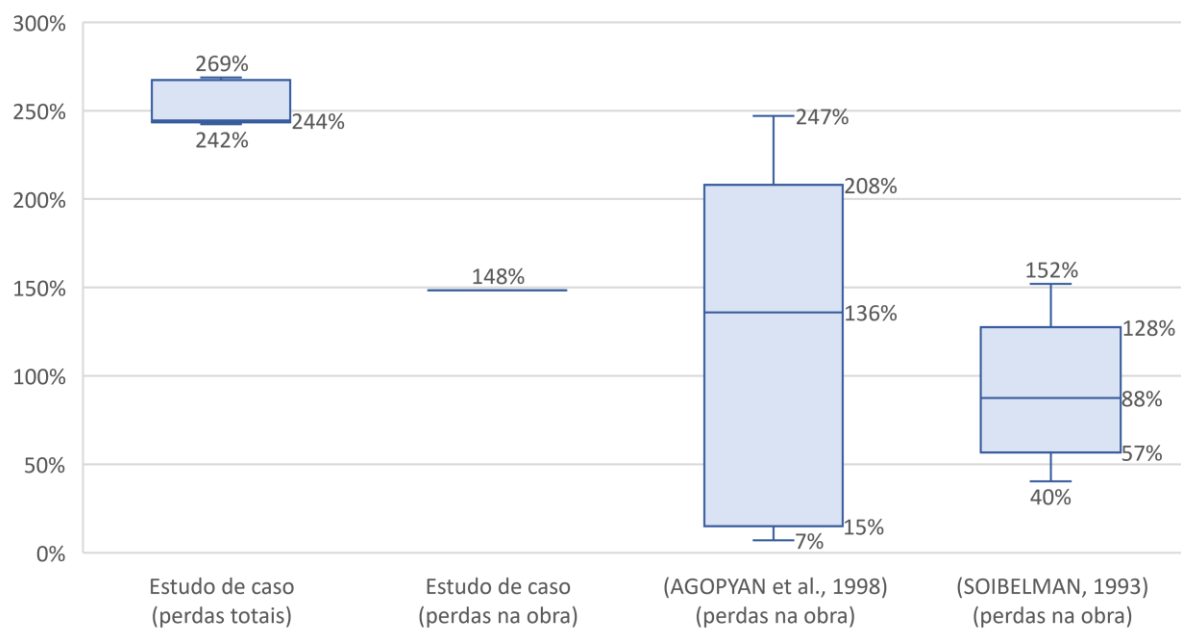


Figura 24: Perdas de argamassa na etapa de construção. Fontes: "Estudo de caso" refere-se a argamassa de assentamento de blocos estruturais de concreto (o autor), (AGOPYAN et al., 1998; SOIBELMAN, 1993) são estudos de caso da literatura nacional, sendo que (AGOPYAN et al., 1998) refere-se a argamassa de assentamento de blocos cerâmicos não estruturais, e (SOIBELMAN, 1993) refere-se a argamassa industrializada de revestimento e assentamento de blocos cerâmicos não estruturais. Valores dados em: mínimo, primeiro quartil, terceiro quartil, máximo e mediana.

Como esperado, o consumo de energia elétrica para aplicação da argamassa na obra é desprezível, na ordem de 0,1% para fronteira do berço-à-aplicação, conforme pode ser observado na Figura 25 (detalhe no Apêndice C). Porém, em consequência de perdas significativas de argamassa durante a aplicação, aliada ao alto consumo energético de produção dos insumos, em especial do cimento, o consumo energético da etapa de construção tornar-se maior que o consumo do berço-ao-portão.

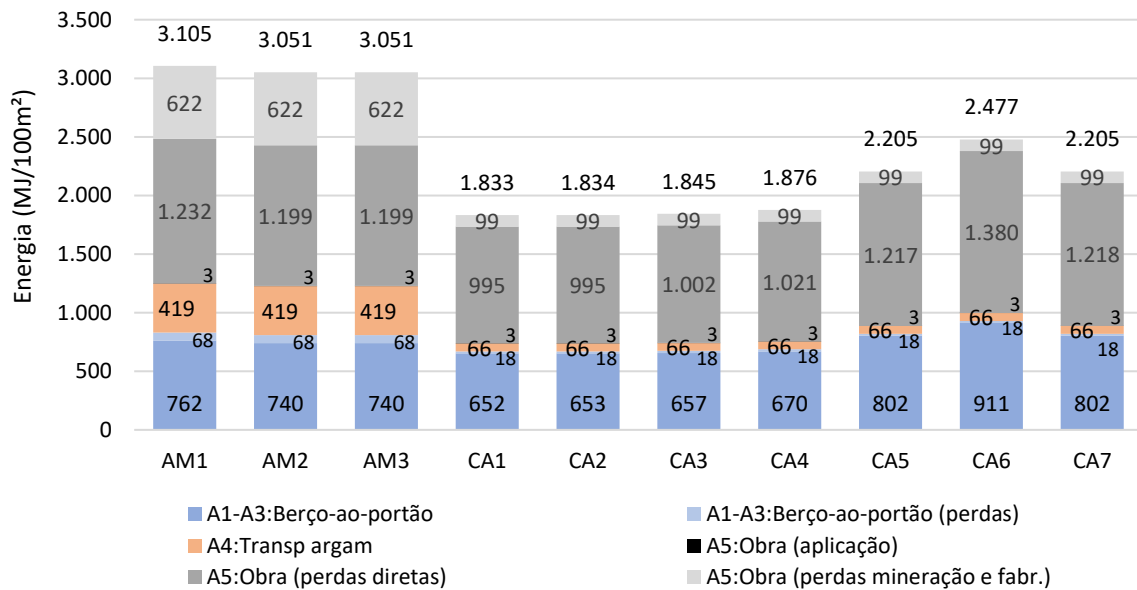


Figura 25: Consumo de **energia** para diferentes traços de argamassa estabilizada conforme dados de inventário. Fronteira do **berço-a-aplicação**. Dados por **100 m² de argamassa assentada** em blocos estruturais.

Pode ser observado na Figura 26 que as emissões de CO₂ durante o transporte dos insumos não é significativa na fronteira berço-à-aplicação devido às altas emissões durante a etapa de fabricação do cimento. Ainda assim, as emissões de CO₂ da fabricação de cimento no Brasil é referência mundial, e apesar de esforços do setor, melhorias são limitadas (SNIC, 2019). Porém, as perdas na etapa de construção são pouco discutidas, apesar do potencial significativo de redução dos impactos ambientais que representa.

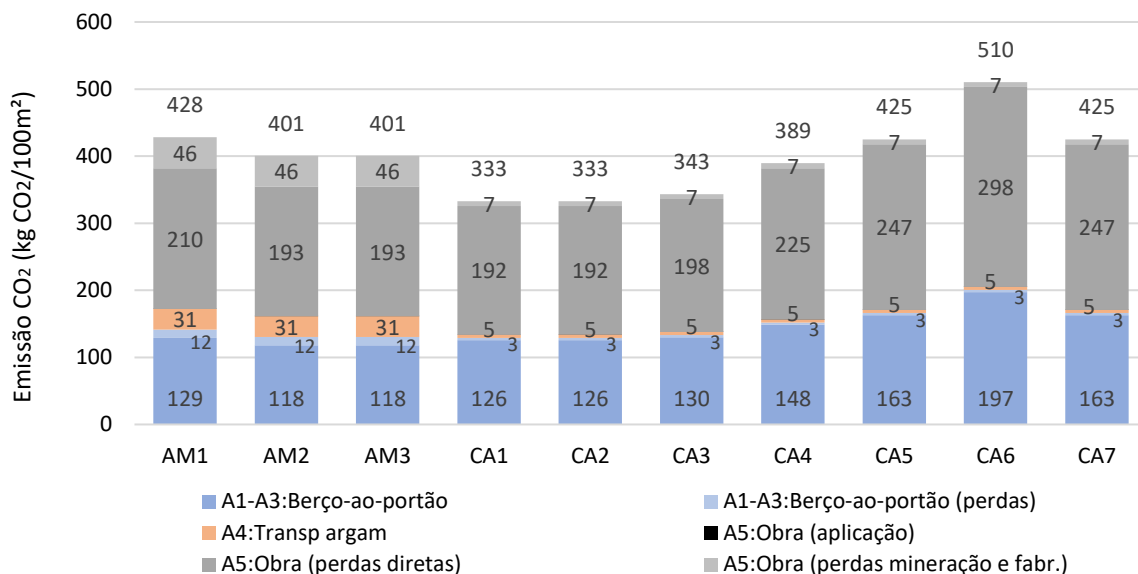


Figura 26: **Emissão de CO₂** para diferentes traços de argamassa estabilizada conforme dados de inventário. Fronteira do **berço-a-aplicação**. Dados por **100 m² de argamassa assentada** em blocos estruturais.

O consumo de água na etapa de construção não é significativo quando analisado na fronteira do berço-ao-portão, aproximadamente 3,5% do consumo total, conforme pode ser observado na Figura 27 (detalhe no APÊNDICE C). Porém, no ponto de vista local, pode ser relevante, visto que é comum as obras estarem localizadas em grandes centros urbanos e concorrendo com o consumo humano (LOBO; MULLINGS, 2003).

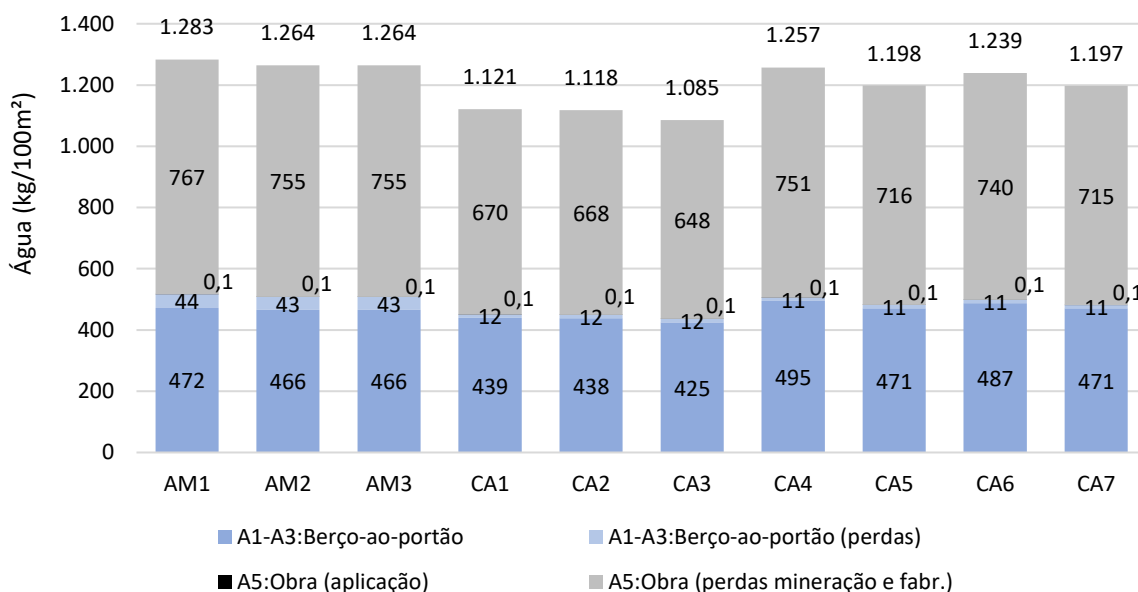


Figura 27: **Consumo de água** para diferentes traços de argamassa estabilizada conforme dados de inventário. Fronteira do **berço-a-aplicação**. Dados por **100 m² de argamassa de assentamento** em blocos estruturais.

A Figura 28 e a Figura 29 apresentam os indicadores ambientais das argamassas estabilizadas para a fronteira do berço-à-aplicação referente a 100 m² de parede executada, conforme dados dos estudos de caso (detalhe no APÊNDICE C). Na Figura 28 estão os indicadores de consumo de material e perdas, vemos que as perdas representam 71% de todo material extraído da natureza, mostrando o potencial de redução da carga ambiental reduzindo as perdas.

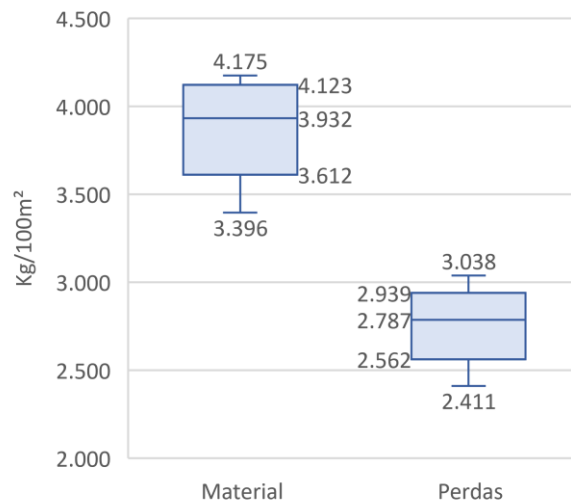


Figura 28: Consumo de **material** e **perdas** das argamassas estabilizadas para a fronteira do **berço-à-aplicação** referentes a 100 m² de parede executada. Valores dados em: mínimo, primeiro quartil, terceiro quartil, máximo e mediana.

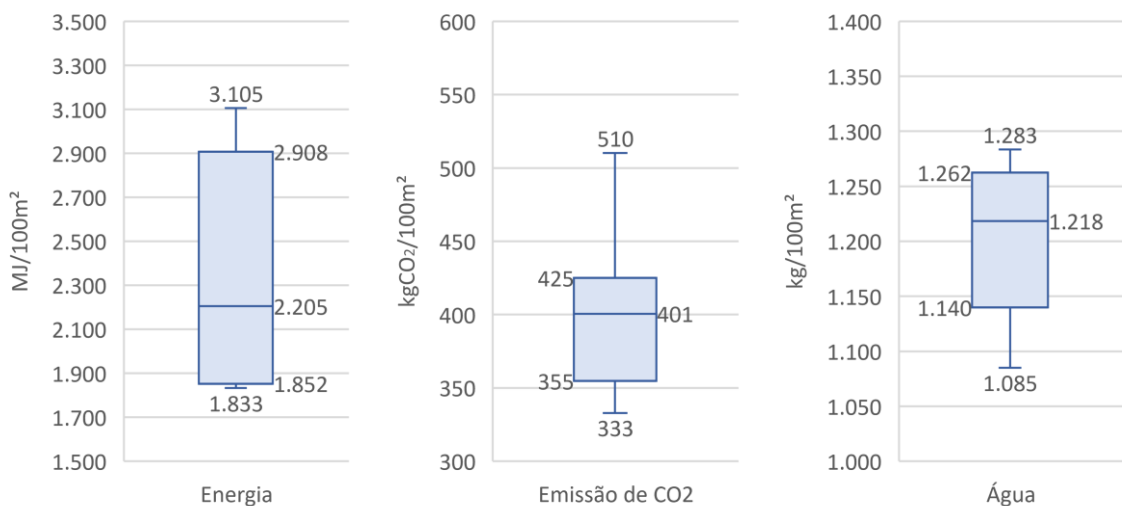


Figura 29: Consumo de **energia**, **emissão de CO₂** e consumo de **água** das argamassas estabilizadas para a fronteira do **berço-à-aplicação** referentes a 100 m² de parede executada. Valores dados em: mínimo, primeiro quartil, terceiro quartil, máximo e mediana.

O diagrama de Sankey da Figura 30 ilustra o fluxo de argamassa estabilizada do berço-à-aplicação. Os dados são em percentual, calculados a partir da mediana dos indicadores ambientais (Apêndice C). As perdas representam 71% de todo recurso extraído da natureza, sendo 28% perdidos durante a extração das matérias primas e 43% durante o processo de aplicação. Desses 43%, 33% ficam incorporado na edificação enquanto 10% são convertidos em resíduos sólidos que caem no chão e não são reaproveitados. Esses dados mostram a necessidade urgente do setor na busca por melhorias no processo construtivo, não somente pelo potencial expressivo de diminuição de custos, mas principalmente de mitigação dos impactos ambientais na busca por um setor mais sustentável. A industrialização da construção garante processos mais otimizados. Segundo relatório da UNEP (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2017) as emissões de CO₂ referentes à produção de concretos e argamassas podem ser reduzidas aumentando o *market share* desses produtos industrializados, pois essa prática permite a otimização de traços, redução de perdas e melhor controle de qualidade. A desmaterialização da construção também é um caminho interessante nessa busca e consiste em obter o mesmo desempenho construtivo com menor consumo possível de matérias primas, ou seja, otimização de recursos.

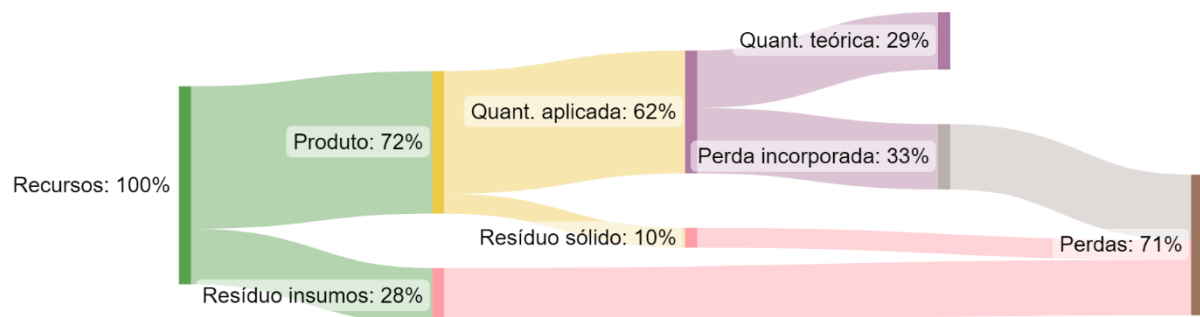


Figura 30: Fluxo de materiais para assentamento de blocos estruturais com argamassa estabilizada em edifício residencial. A fronteira do sistema é do **berço-à-aplicação**. As perdas e resíduos gerados representam em média 71% de todo recurso extraído na natureza.

Segundo (REIS; MACK-VERGARA; JOHN, 2019) a eficiência do uso de recursos é dado pela razão entre a quantidade de produto efetivamente útil pelo fluxo de recursos consumidos. Segundo dados do autor, a eficiência do uso de recursos sólidos da argamassa industrializada é de 42%, considerando argamassa de uso geral e fronteira do berço-à-aplicação. A eficiência

da argamassa estabilizada aplicada em assentamento do estudo de caso estimada foi de 29%. Apesar dos valores apresentarem mesma ordem de grandeza é observado uma variação considerável no uso dos recursos. Como ambos os estudos consideram o mesmo indicador de perdas na mineração e fabricação de cimento, a divergência deve-se as perdas na aplicação, enquanto o estudo de caso trata-se de argamassa de assentamento de blocos, com as perdas quantificadas, o estudo de (REIS; MACK-VERGARA; JOHN, 2019) considera a argamassa de uso geral. Esses dados mostram a importância da rota de aplicação em estudos de impacto ambiental, principalmente na utilização de dados secundários.

A coleta de dados primários nacionais é fundamental para elaboração de estudos de ACV confiáveis, capazes de embasar tecnicamente profissionais que buscam ações estratégicas rumo à sustentabilidade na construção. Porém, a elaboração da ACV convencional exige imenso volume de dados, impraticável diante a urgência que o assunto demanda e a realidade do mercado brasileiro. Este estudo mostrou que a metodologia utilizada, apesar de simplificada, aborda indicadores relevantes para o setor, utiliza recursos humanos existentes para coleta de dados, e fornece análises úteis para que tomadores de decisão direcionem seus esforços rumo a processos que realmente podem fazer a diferença. É imprescindível que o setor construtivo continue investindo para que o banco de dados nacionais se torne robusto e eficiente.

5 COMPARATIVO DA ARGAMASSA DOSADA EM OBRA E ESTABILIZADA

Os dados das argamassas dosadas *in loco* utilizados são da literatura nacional conforme detalhado abaixo. O comparativo das argamassas considerou a fronteira do berço-à-aplicação.

5.1 Levantamento dos indicadores da argamassa dosada *in loco*

As argamassas selecionadas para o estudo comparativo foram aquelas comumente utilizadas em assentamento de alvenaria. Portanto foi considerado as argamassas estabilizadas básicas e estruturais até 5 MPa, e as dosadas em obra traços 1:2:8, 1:2:9, 1:1:6 e 1:6. Foram considerados os dados do Sidac (MME; CBCS, 2022) por se tratar de dados nacionais, confiáveis e atuais. Os dados do Sidac não contemplam perdas de insumo no canteiro. Os dados estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24: Consumo de material das argamassas dosadas em obra para assentamento. Fonte: (MME; CBCS, 2022).

| Argamassa dosada em obra | Consumo de materiais (kg/m ³) | | | | | | | |
|--------------------------|---|------|------|------|-------|-------|------|------|
| | Cimento | | Cal | | Areia | | Água | |
| | Min. | Máx. | Min. | Máx. | Min. | Máx. | Min. | Máx. |
| Traço 1:2:8 | 161 | 171 | 180 | 192 | 1.439 | 1.533 | 274 | 357 |
| Traço 1:2:9 | 153 | 162 | 171 | 181 | 1.542 | 1.631 | 247 | 320 |
| Traço 1:1:6 | 233 | 246 | 131 | 138 | 1.568 | 1.653 | 231 | 297 |
| Traço 1:6 | 267 | 279 | -- | -- | 1.797 | 1.878 | 192 | 246 |

5.2 Comparativo: argamassas misturadas em obra x estabilizadas

O comparativo dos indicadores ambientais das argamassas dosadas in loco e as estabilizadas estão apresentados em gráficos da

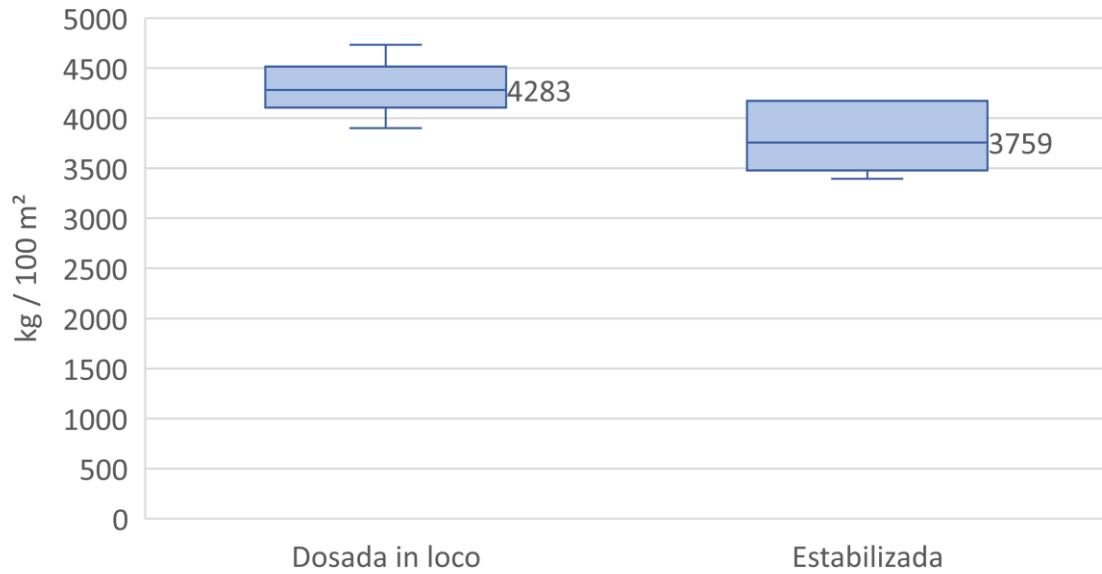


Figura 31 à Figura 34. Foi considerado que as perdas na aplicação independem do tipo de argamassa utilizada.

Os valores de indicador de material apresentados na

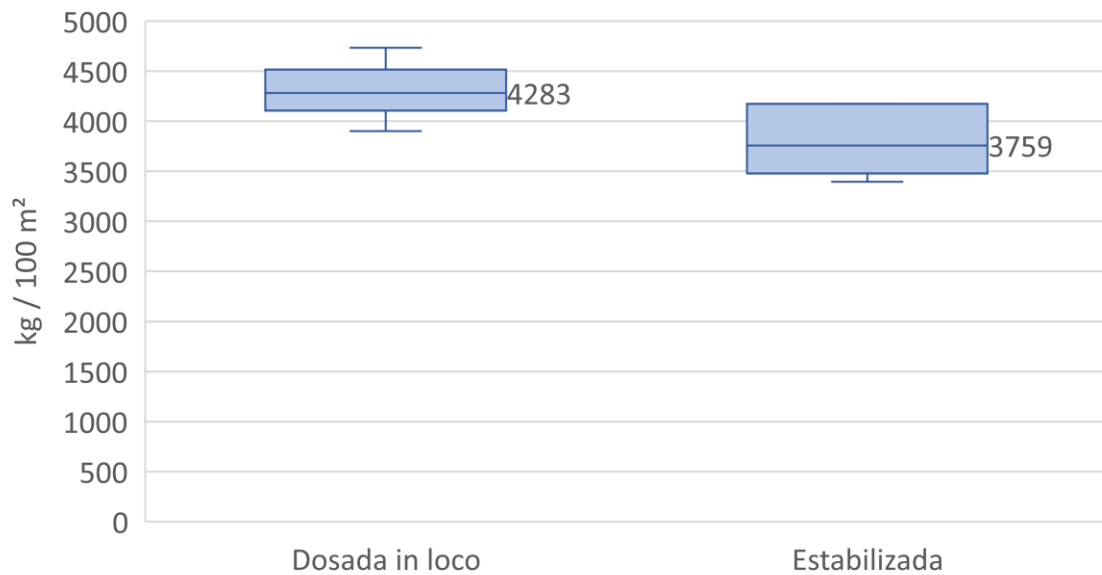


Figura 31 mostram redução de 524 kg ou 12% de consumo de material das argamassas estabilizadas. Essa redução é devido à utilização do aditivo incorporador de ar e aos traços mais otimizados do processo industrializado. A tendência desse número seria aumentar se fosse contabilizado as perdas. A argamassa dosada em obra representa 96% do mercado de

argamassas no Brasil (CETESB, 2017a), comum em construções informais ou autoconstruções, onde são esperadas maiores perdas de canteiro, mas que não estão contabilizadas nesse comparativo. A coleta de dados nesses tipos de obras é desafiadora devido ao consumo pulverizado. Estudo realizado por (REIS; MACK-VERGARA; JOHN, 2019; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2017) que utilizam a abordagem dos fluxos de materiais, balanço de massas, e considera as perdas, apresenta reduções de 20% a 30% para argamassas industrializadas.

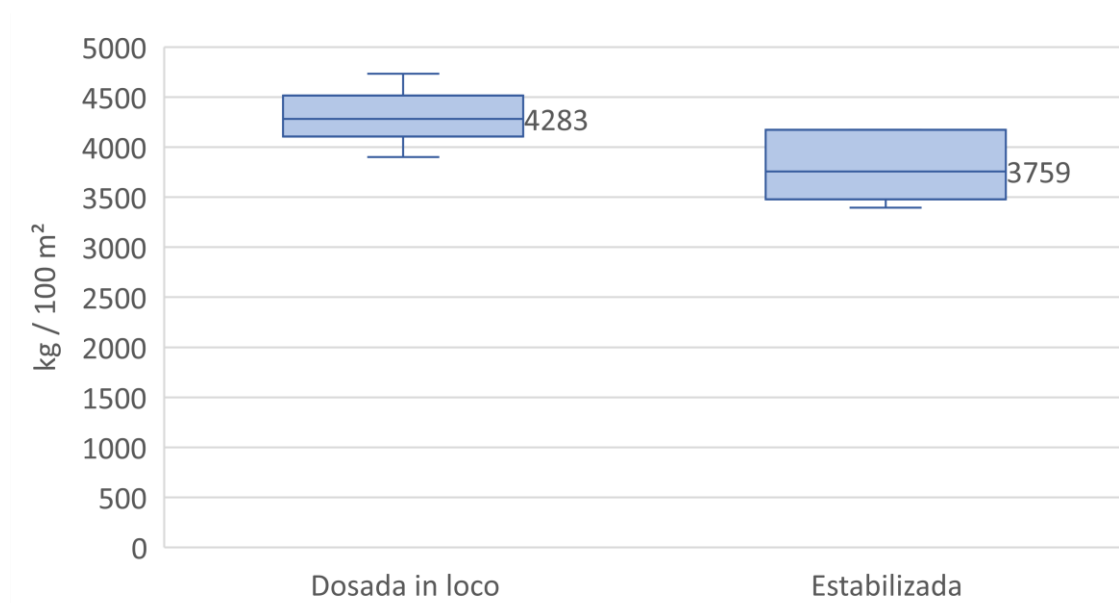


Figura 31: Comparativo do consumo de **materiais** das argamassas dosadas in loco e argamassas estabilizadas. Valores dados em: mínimo, primeiro quartil, terceiro quartil, máximo e mediana.

A Figura 32 apresenta o comparativo dos indicadores de energia. A energia necessária para produção das argamassas de obra é de 3468 MJ / 100 m², enquanto das argamassas estabilizadas é de 2447 MJ / 100 m², redução de 1021 MJ / 100 m². Essa redução pode ser atribuída a três motivos: (1) menor consumo de cimento, (2) menor consumo energético para produção do cimento e (3) o fator de conversão do diesel. Detalhando cada um temos:

- (1) O consumo de cimento da argamassa estabilizada é aproximadamente 40% menor que o consumo da dosada em obra;
- (2) As composições do Sidac são genéricas e consideram um mix dos cimentos CP II E, CP II F, CP II Z, CP III e CP IV, com indicadores de energia de 1,83 a 5,751 MJ/kg. O mesmo acontece com as cales, onde são consideradas as CH-I, CH-II e CH-III, com indicadores de energia de 3,989 a 5,065 MJ/m³. Já as argamassas estabilizadas são produzidas com o cimento CP II-E 40 cujo consumo de energia é 2,52 MJ/kg (VOTORANTIM, 2016b). Se considerasse o

consumo do cimento CP II-E 40 na composição da argamassa dosada em obra, obtinha-se redução de aproximadamente 120 MJ/m³ no consumo de energia para produção do cimento;

(3) Por fim foi observada uma diferença significativa dos fatores de conversão do diesel. O Sidac considera o poder calorífico do diesel de 35,1, MJ/kg (EPE, 2021) para a argamassa dosada em obra. Entretanto, o estudo de caso considera a DAP S-P-00895 (VOTORANTIM, 2016b) para a argamassa estabilizada, elaborada com o banco de dados do (“ecoinvent v3.9 is released”, 2022), cuja demanda cumulativa de energia (CED) do processo de refino do petróleo é de 8,1 MJ/kg, provavelmente por considerar o coque de petróleo como sendo um subproduto. Para a versão recente do (“ecoinvent v3.9 is released”, 2022) o CED do diesel é 40,2 MJ/kg, valor mais próximo ao adotado pelo Sidac. Entretanto não foi publicada DAPs do cimento CP-II E da Votorantim com essa atualização. Importante lembrar que o fator de conversão do diesel dado pela DAP somente está sendo considerado para o transporte dos insumos utilizados na produção do cimento. Não foi possível quantificar a redução do consumo energético devido ao fator de conversão do diesel pois os valores da DAP não são detalhados o suficiente.

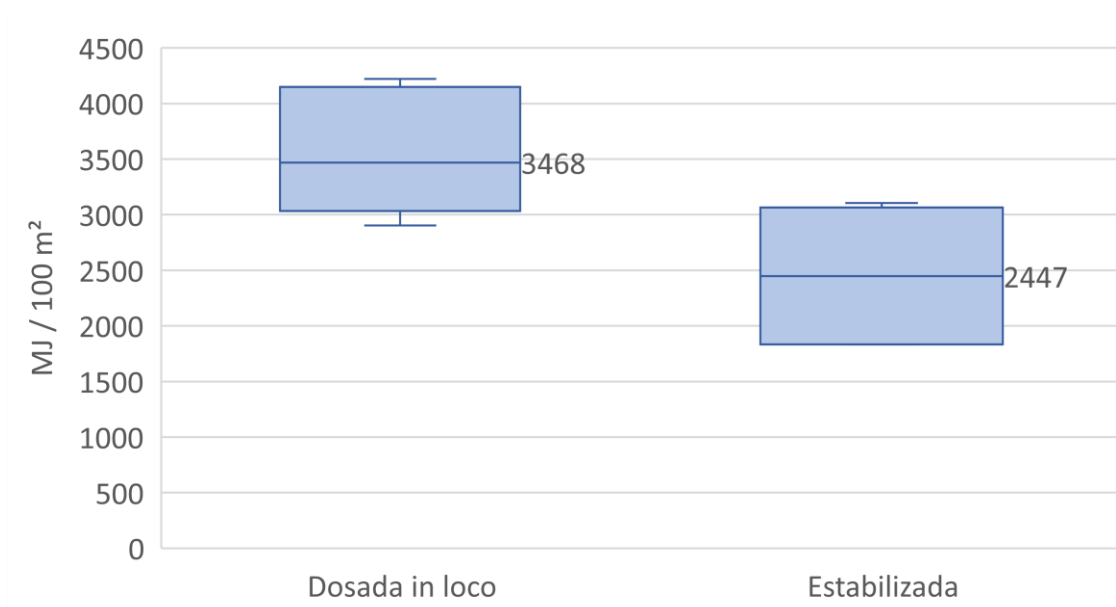


Figura 32: Comparativo do consumo de **energia** das argamassas dosadas in loco e estabilizadas. Valores dados em: mínimo, primeiro quartil, terceiro quartil, máximo e mediana.

A Figura 34 apresenta o comparativo dos indicadores de emissão de CO₂. Pode ser observado uma redução de aproximadamente 22% das emissões de CO₂ da argamassa estabilizada em

relação a dosada in loco, o que era esperado devido a redução em massa do consumo de cimento.

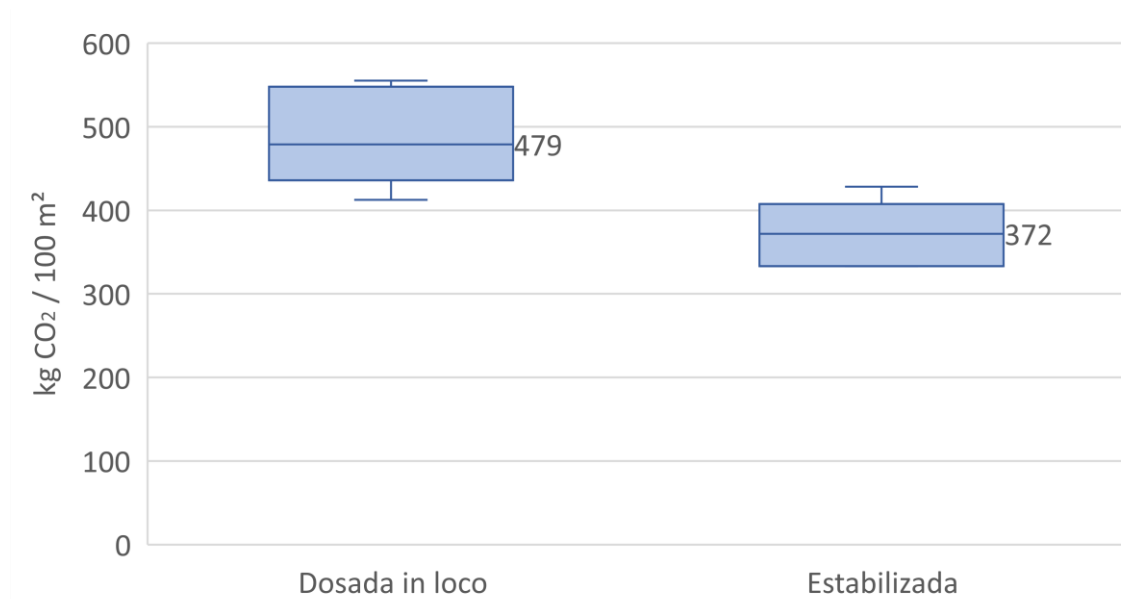


Figura 33: Comparativo da **emissão de CO₂** das argamassas dosadas in loco e argamassas estabilizadas. Valores dados em: mínimo, primeiro quartil, terceiro quartil, máximo e mediana.

A Figura 34 apresenta os indicadores de água. Pode-se observar menor consumo de água nas argamassas estabilizadas. Isso se deve ao fato de que essas argamassas levam em sua composição o aditivo incorporador de ar, que aumenta a trabalhabilidade do produto, resultando na necessidade de menores volumes de água. Além disso, as argamassas que incluem cal e cimento em sua composição possuem maior massa de secos, o que, por sua vez, resulta maior consumo de água em comparação com as argamassas que não contêm cal.

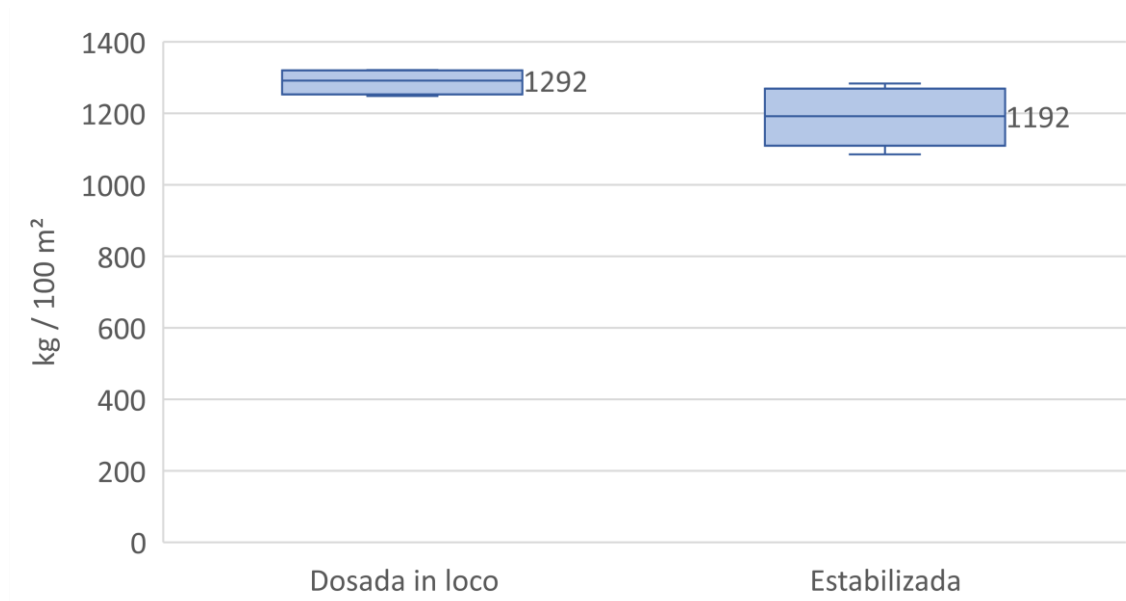


Figura 34: Comparativo do consumo de **água** das argamassas dosadas in loco e argamassas estabilizadas. Valores dados em: mínimo, primeiro quartil, terceiro quartil, máximo e mediana.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho trata do desempenho ambiental de argamassas. Optou-se por escopo reduzido, baseado nas diretrizes dada por (JOHN et al., 2020) e considerando cinco indicadores: emissão de CO₂, consumo energético, consumo de material, geração de perdas e consumo de água. A fronteira definida foi do berço-ao-portão, ou seja, etapas A1 à A5 do ciclo de vida. Os inventários foram realizados em centrais dosadoras (etapas A1 a A3), em obra durante o assentamento de blocos em alvenaria estrutural (etapa A5) e inclui o transporte da argamassa (etapa A4).

Para a fronteira do berço-ao-portão (etapas A1 a A3), os indicadores medianos das argamassas estabilizadas obtidos foram: 215 kg CO₂/m³ de emissão de CO₂, 1.262 MJ/m³ de consumo energético, 2.473 kg/m³ de material, incluída as perdas de 680 kg/m³, e 766 kg/m³ de consumo de água. Aproximadamente 78% das emissões de CO₂ e 49% do consumo energético provêm unicamente da produção do cimento, mostrando que reduções no consumo de cimento nas argamassas, desde que seja mantido o desempenho técnico, podem proporcionar ganhos ambientais significativos. O processo de beneficiamento das areias merece atenção pois suas perdas representaram aproximadamente 23% dos recursos sólidos extraídos, e foram responsáveis por 63% do consumo de água. Reduções nas distâncias de transporte dos insumos podem proporcionar ganhos ambientais, uma vez que representaram 23% do consumo energético e 9% das emissões de CO₂.

No estudo de caso as perdas de argamassa durante o assentamento (etapa A5) totalizaram 0,95 m³/100 m² de parede executada, aproximadamente o dobro do fator de consumo praticado no Brasil nas estimativas de quantitativos e custos. Em outras palavras, as perdas aumentam em 60% o consumo de argamassa, sendo que 0,69 m³/100 m² desse material são incorporados na edificação sem função estrutural, 0,22 m³/100 m² se tornam resíduo sólido e 0,04 m³/100 m² referem-se à perda volumétrica de ar incorporado durante o manuseio da argamassa. A literatura define perdas no canteiro como sendo o resíduo sólido gerado durante a construção. Segundo essa definição, as perdas do estudo de caso foram de 148%, dentro dos valores esperados da literatura nacional de 40% a 152%. Porém, do ponto de vista do ciclo de vida, que inclui as perdas incorporadas na edificação, as perdas durante mineração e produção das matérias-primas, esse percentual passa a ser da ordem de 244%. Segundo a

literatura, que considera somente os resíduos de obra, a eficiência do uso de recursos das argamassas industrializadas de uso geral é 42%, enquanto para o estudo de caso, com perdas do berço-à-aplicação, esse valor é de 29%.

Os indicadores medianos do berço-à-aplicação do estudo de caso foram: 401 kg CO₂/100 m² de emissão de CO₂, 2.205 MJ/100 m² de consumo energético, 3.932 kg/100 m² de material, incluída as perdas de 2.795 kg/100 m², e 1.218 kg/m³ de consumo de água. Portanto, 71% dos recursos sólidos extraídos da natureza são perdidos durante o processo, sendo que 33% ficam incorporadas na edificação, 10% viram resíduo sólido na obra e 28% é perdido durante a extração e produção das matérias-primas.

Neste estudo, as argamassas estabilizadas apresentaram melhor desempenho ambiental que as argamassas dosadas em obra, devido principalmente a redução de 42% no consumo de cimento. Por se tratar de um processo industrializado, com matérias-primas controladas e realização de ensaios, as argamassas estabilizadas conferem traços mais otimizados. Essa redução conferiu às argamassas estabilizadas redução de 73 kg CO₂/m³ da emissão de CO₂ e 912 MJ/m³ do consumo de energia, ou seja, redução de 44% do consumo energético e 27% da emissão de CO₂.

6.1 Sugestões de trabalhos futuros

Na etapa de produção de insumos é interessante que seja realizado levantamento de dados primários em mineradoras. Também é importante o engajamento de outros produtores de cimento para levantamento de dados em fábricas no Brasil.

É importante ampliar a representatividade das centrais dosadoras com participação de maior número de empresas e plantas, inclusive abrangendo outros estados brasileiros. No inventário, fazer o balanço de massas de todos os insumos, pois dessa forma será possível o levantamento real das perdas na planta.

Na etapa de construção, coleta de dados de argamassas utilizadas de outras aplicações, como revestimentos interno e externo, assentamento cerâmico etc., é fundamental pois a eficiência do uso de recursos será diferente para cada rota de aplicação. A elaboração de inventários em obras unifamiliares e pequenos comércios é desafiador, porém podem trazer dados

interessantes para o setor. Esses tipos de construções são pulverizadas e detêm 96% do mercado de argamassas no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **ABNT NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos.** [s.l.] ABNT, 2007.
- ABNT. **ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura.** [s.l.] ABNT, 2014a.
- ABNT. **ABNT NBR ISO 14044: Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - requisitos e orientações.** Rio de Janeiro (RJ): ABNT, 2014b.
- AGOPYAN, V. et al. 10. Alternativas para redução do desperdício de materiais nos canteiros de obra. Em: **Coletânea Habitare - Inovação, Gestão da Qualidade & Produtividade e Disseminação do Conhecimento na Construção Habitacional.** Brasil: [s.n.]. v. 2.
- ANEPAC. **História da Areia e Brita.** Site de associação. Disponível em: <www.anepac.org.br/agregados/areia-e-brita>. Acesso em: 12 abr. 2019.
- BAUSCHER, M. & E. **Catálogo de guas.** Bauscher Brasil, , 2013. Disponível em: <www.bauscher.com.br>
- BEIJING MUNICIPAL COMMISSION. **Notice on the Use of Bulk Ready-mixed Mortar in the Construction Projects of Beijing (JJF [2014] No. 15) issued by the Beijing Municipal Commission of Housing and Urban-Rural Development.** The Beijing Municipal Commission, , 2015. Disponível em: <<http://zjw.beijing.gov.cn/bjjs/ywz/news/390524/index.shtml>>. Acesso em: 20 jan. 2021
- BELIZARIO-SILVA, F. et al. Primary data priorities for the life cycle inventory of construction products: focus on foreground processes. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 6, p. 980–997, jun. 2020.
- BELIZARIO-SILVA, F. **Proposal of life cycle-based environmental performance indicators for decision-making in construction.** tese—São Paulo: Polytechnic School of the University of São Paulo, 2022.
- BELIZARIO-SILVA, F. et al. **Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção - Metodologia.** , 29 abr. 2022. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/360260685>>. Acesso em: 4 maio. 2022
- BELIZARIO-SILVA, F. et al. The Sidac system: Streamlining the assessment of the embodied energy and CO2 of Brazilian construction products. **Journal of Cleaner Production**, v. 421, p. 138461, out. 2023.
- BELIZARIO-SILVA, F.; OLIVEIRA, L. A.; ARDUIN, R. H. **The importance of primary data for Life Cycle Assessment of construction products in Brazil.** jun. 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/317601006_The_importance_of_primary_data>

_for_Life_Cycle_Assessment_of_construction_products_in_Brazil/citations>. Acesso em: 30 jul. 2021

BELIZARIO-SILVA, F.; OLIVEIRA, L.; JOHN, V. M. **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: cimento**. São Paulo: Sidac, 2022.

BENNTER. **Manual de aplicação e uso das Argamassas Estabilizadas**. Site de empresa. Disponível em: <<http://www.bennter.com.br/aplicacao-e-uso-argamassas-estabilizadas-prontas-express/>>. Acesso em: 8 abr. 2019.

BOCCIA, D. **Demanda de água cimentos Votorantim**. , 23 maio 2023.

BRASKEN. **Avaliação do Ciclo de Vida**. Disponível em: <<https://www.braskem.com.br/acv-estudos>>. Acesso em: 31 ago. 2021.

CAC. **EPD 5357-943 General use (GU) and Portland-limestone (GUL) Cements**. [s.l.] Cement Association of Canada, 31 mar. 2016. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.heidelbergmaterials.us/docs/default-source/epds/canada-cac-5357_9431_epdreport_20160321_20210320.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2023.

Calcule o número de dias úteis. Disponível em: <<https://www.dias-uteis.com/#>>. Acesso em: 25 ago. 2022.

CALDAS, L. R.; CARVALHO, M. T. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação de estratégias para a mitigação dos impactos ambientais de revestimentos argamassados no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 3, p. 343–362, jul. 2020.

CEMBUREAU. **EPD Portland Cement (CEM I) produced in Europe**. Germany: CEMBUREAU, The European Cement Association, fev. 2020. Disponível em: <<chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://cembureau.eu/media/3lpreko/epd-for-cement-cem-i.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2023.

CEMEX. **EPD ready-mix concrete CEMEX**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.nrmca.org/sustainability/EPDProgram/Downloads/NRMCAEPD10014PanamaCEMEX.pdf>>. Acesso em: 16 maio. 2019.

CETESB. **Estudo de Baixo Carbono para a Indústria de Cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030**. [s.l.] CETESB (São Paulo), 2017a. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>.

CETESB. **Emissões veiculares no estado de São Paulo**. [s.l.: s.n.].

CHEUNG, J.; ROBERTS, L.; LIU, J. Admixtures and sustainability. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 79–89, dez. 2018.

CONCRESERV. **Argamassa Estabilizada**. Site de empresa. Disponível em: <<https://www.concreserv.com.br/argamassa-estabilizada/>>.

COSTA, E. B. C.; CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M. Influence of high contents of limestone fines on rheological behaviour and bond strength of cement-based mortars. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 1114–1126, dez. 2017.

CURRAN, M. A. (ED.). **Life cycle assessment handbook: a guide for environmentally sustainable products**. Hoboken, N.J: Wiley/Scrivener, 2012.

CURRAN, M. A.; YOUNG, S. Report from the EPA conference on streamlining LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 1, n. 1, p. 57–60, mar. 1996.

ECOINVENT. **ecoinvent database**. Disponível em: <<https://ecoquery.ecoinvent.org/>>.

ecoinvent v3.9 is released. , 13 out. 2022. Disponível em: <<https://ecoinvent.org/ecoinvent-v3-9-is-released/>>. Acesso em: 19 set. 2023

EFCA. **EPD Concrete admixtures – Plasticisers and Superplasticisers**. [s.l.] European Federation of Concrete Admixtures Associations Ltd. (EFCA), 14 set. 2015a. Disponível em: <<http://www.efca.info/efca-publications/environmental/>>. Acesso em: 10 maio. 2019.

EFCA. **EPD Concrete admixtures – Retarders**. [s.l.] European Federation of Concrete Admixtures Associations Ltd. (EFCA), 14 set. 2015b. Disponível em: <<http://www.efca.info/efca-publications/environmental/>>. Acesso em: 10 maio. 2019.

EPE. **Balanco Energético Nacional do Ministério de Minas e Energia do Brasil**. Brasil: EPE (Empresa de Pesquisa Energética), 2021.

ERMCO. **Guidance on Concrete Wash Water in the European Ready Mixed Concrete Industry**. , out. 2006. Disponível em: <http://ermco.eu/new/wp-content/uploads/2018/05/ermco_wash_water_guidance_oct_2006.pdf>. Acesso em: 3 out. 2019

EUROPEAN, C. **ILCD Handbook: Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment**. Institute for Environment and Sustainability, , 2010.

EUROPEAN COMMISSION. **BS EN 15804: Sustainability of constructionworks — Environmental product declarations — Corerules for the product category of construction products**. BSI Standars Publication, , 2012a.

EUROPEAN COMMISSION. **DIN EN 15978: Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method**. , out. 2012b.

EUROPEAN COMMISSION; JRC-IES. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook general guide for life cycle assessment: detailed guidance**. Luxembourg, First edition.: Publications Office, 2010.

FILHO, O. C.; JUNIOR, N. L. S.; LUEDEMANN, G. **A Avaliação de ciclo de vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil**. Brasília: IPEA-Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2016. Disponível em:

<http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6685/1/td_2205.pdf>. Acesso em: 24 maio. 2021.

FORMOSO, C. et al. Material Waste in Building Industry: Main Causes and Prevention. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 128, n. 4, p. 316–325, 1 ago. 2002a.

FORMOSO, C. T. et al. Material Waste in Building Industry: Main Causes and Prevention. p. 316–325, ago. 2002b.

FORMOSO, C. T.; ISATTO, E. L.; HIROTA, E. H. Method for waste control in the building industry. p. 325–334, 26 jul. 1999.

GATES, R.; NELSON, R.; PISTILLI, M. The Development of Ready Mixed Mortar in the United States. Em: MATTHYS, J. (Ed.). **Masonry: Components to Assemblages**. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 1990. p. 123-123–20.

GOLDEN, J. S. et al. **An Overview of Ecolabels and Sustainability Certifications in the Global Marketplace**. , out. 2010. Disponível em:

<<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=332b0a08728279c0661769b8f08fc1ba9e3031d4>>. Acesso em: 2 jun. 2023

GRAEDEL, T. E.; ALLENBY, B. R. **Industrial ecology**. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2003.

GUERREIRO, L. R.; CACHOLA, C. S.; PACCA, S. A. **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: energia e transporte**. São Paulo: Sidac, 2022.

GUINÉE, J. B. et al. Quantitative life cycle assessment of products no.2. v. 1, 1993.

HABERT, G. et al. Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 5, p. 478–485, mar. 2010.

HAUSCHILD, M. Z.; OLSEN, S. I.; ROSENBAUM, R. K. (EDS.). **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. 1st ed. 2018 ed. Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer, 2018.

HERTWICH, E. G. et al. Material efficiency strategies to reducing greenhouse gas emissions associated with buildings, vehicles, and electronics—a review. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 4, p. 043004, 16 abr. 2019.

HOLCIM. **EPD S-P-00527 Grey Cements Holcim Romania**. Romania: [s.n.].

HOLCIM. **EPD 179 Portland Cement**. Chicago: Holcim (US), Inc., 26 fev. 2021.

IBICT. **Atualização 3.6 do banco de dados da ecoinvent**. Disponível em: <<https://acv.ibict.br/comunicacao/noticias/5960-atualizacao-3-6-do-banco-de-dados-da-ecoinvent/>>. Acesso em: 31 ago. 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 21930: Sustainability in buildings and civil engineering works — Core rules for environmental product declarations of construction products and services**. , 2017.

IOANNIDOU, D. et al. Is gravel becoming scarce? Evaluating the local criticality of construction aggregates. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 126, p. 25–33, nov. 2017.

ITAMBÉ. **Argamassa Estabilizada**. Site de empresa. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/produtos-obra/argamassa-estabilizada/>>. Acesso em: 8 abr. 2019.

IW8. **Catálogo de produto: maseira plástica de 1000 litros, IW8 Equipamentos**. , 2019. Disponível em: <<https://maseiraplastica.com.br/produtos-maseira/caixa-maseira-1000/>>. Acesso em: 24 nov. 2019

JENSEN, A. A.; POSTLETHWAITE, D. SETAC Europe LCA Steering Committee — The early years. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 1, p. 1–6, jan. 2008.

JIANG, M. et al. Comparative Life Cycle Assessment of Conventional, Glass Powder, and Alkali-Activated Slag Concrete and Mortar. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 20, n. 4, p. 04014020, dez. 2014.

JOHN, V. et al. **Metodologia do sistema de informação do desempenho ambiental da construção**. , 2021.

JOHN, V. M. et al. **Strategies to escalate the use of LCA based decision making in the world-wide industry**. [s.l.] CBCS Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, 24 out. 2013.

JOHN, V. M. Materiais de Construção e o Meio Ambiente. Em: **Materiais de Construção e o Meio Ambiente**. [s.l.] G Isaias, 2017.

JOHN, V. M. et al. Proposta de método prático para avaliar o desempenho ambiental no ciclo de vida da construção. **CONCRETO & Construções**, v. ,XLVIII, n. 100, p. 48–56, 2020.

JOHN, V.; PUNHAGUI, K.; CINCOTTO, M. A. **Produção de Cal**. Brasil: EBC Núcleo de Estudos de Economias de Baixo Carbono, 2014.

JOLLIET, O. et al. **Environmental life cycle assessment**. Boca Raton, Fla London New York NY: CRC Press, an imprint of the Taylor & Francis Group, 2016.

KULAY, L. A.; SEO, E. S. M. Orientação conceituais para elaboração de inventários de ciclo de vida. v. V.5, abr. 2010.

LAFARGE. **UltraSeries™ Stabilized Mortar**. Egypt: Lafarge Egypt, 2021a. Disponível em: <https://www.lafarge.com.eg/sites/egypt/files/documents/UltraSeries_-_Stabilized_Mortar.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2021.

LAFARGE. **Lafarge - City Bag Concrete Made Easy**. Canada: Lafarge Canada Inc., 2021b.

LI, J. et al. A model for estimating construction waste generation index for building project in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 74, p. 20–26, maio 2013.

Life Cycle Initiative. Disponível em: <<https://www.lifecycleinitiative.org/>>. Acesso em: 2 set. 2021.

LOBO, C.; MULLINGS, G. M. Recycled Water feature in Ready Mixed Concrete Operations. 2003.

MACEDO, A. B.; DE ALMEIDA MELLO FREIRE, D. J.; AKIMOTO, H. Environmental management in the Brazilian non-metallic small-scale mining sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 11, n. 2, p. 197–206, mar. 2003.

MACK-VERGARA, Y. L.; JOHN, V. M. Life cycle water inventory in concrete production—A review. 2017.

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

MCTI. **Inventário corporativo 2020 - arquivos dos fatores medios de emissão de CO2**. , 2020. Disponível em: <http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html>. Acesso em: 22 jul. 2020

MEDEIROS, L. M.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A. Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 365–385, abr. 2018.

MME; CBCS. **Sidac - Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção**. , 2022. Disponível em: <<https://sidac.org.br>>

MONTEIRO, P. J. M.; MILLER, S. A.; HORVATH, A. Towards sustainable concrete. **Nature Materials**, v. 16, p. 698–699, 27 jun. 2017.

MOROPOULOU, A. et al. Life Cycle Analysis of Mortars and its Environmental Impact. v. 895, p. 6, 2006.

MPA MORTAR. **A guide to BS EN 998 -1 and BS EN 998 - 2**. London: Mineral Products Association Ltd, jul. 2015.

MPA MORTAR. **DIN EN 998-1: Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar**. [s.l.] Mineral Products Association, 2016a.

MPA MORTAR. **DIN EN 998-2: Specification for mortar for masonry - Part 2: Masonry mortar**. [s.l.] Mineral Products Association, 2016b.

NATURA. **ACV Organizacional: saiba mais sobre essa nova metodologia de gestão ambiental**. Disponível em:

<<http://www.naturacampus.com.br/cs/naturacampus/post/2016-05/acv-organizacional-nova-metodologia-gestao-ambiental>>. Acesso em: 31 ago. 2021.

NESHER. **EPD S-P-00524 Portland Cement**. Israel: Nesher Israel Cement Enterprises, 2012.

OLIVEIRA, L. S.; PACCA, S. A.; JOHN, V. M. Variability in the life cycle of concrete block CO₂ emissions and cumulative energy demand in the Brazilian Market. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 588–594, jul. 2016.

OLIVEIRA, V. C. H. C. et al. Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos. v. 14, n. 4, p. 167–181, dez. 2014.

PASSUELLO, A. C. et al. Valorização de resíduos de ágata em argamassas e concretos: avaliação do ciclo de vida. v. V.24 N.02, 2019.

PCA. **EPD 195 Portland Cement**. USA: Portland Cement Association, 3 dez. 2021. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.cement.org/docs/default-source/epds/pca_epd_portland_athena_final_revised_04082021.pdf?sfvrsn=3e4affbf_2>. Acesso em: 12 abr. 2023.

PEREZ, C. T. et al. **Avaliação dos impactos decorrentes do uso de argamassa projetada em canteiros de obras - estudo de casos**. . Em: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. Fortaleza, BR: maio 2013.

PINI. **TCPO Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos, 13a. ed.** [s.l.] Editora Pini, 2010.

RAMADON, L. F. **A extração ilegal de areia no Brasil**. Rio de Janeiro (RJ): Accamtas, nov. 2016. Disponível em: <<https://apublica.org/wp-content/uploads/2020/05/a-extracao-ilegal-de-areia-no-brasil.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2023.

READYMIX INDUSTRIES. **EPD S-P-06620 - Base layer mortar - Israel**. Israel: Readymix Industries (Israel) Ltd., 26 dez. 2022.

REIS, D. C. et al. Potential CO₂ reduction and uptake due to industrialization and efficient cement use in Brazil by 2050. **Journal of Industrial Ecology**, p. jiec.13130, 5 abr. 2021.

REIS, D. C.; MACK-VERGARA, Y.; JOHN, V. M. Material flow analysis and material use efficiency of Brazil's mortar and concrete supply chain. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 6, p. 1396–1409, dez. 2019.

REIS, D.; MACK-VERGARA, Y.; JOHN, V. M. Materials flow analysis and material use efficiency. 8 abr. 2019.

SABESP. **Relatório de Sustentabilidade 2021**. [s.l.] Sabesp, 2021.

Sabesp. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=140>>. Acesso em: 28 out. 2021.

SANTOS, C. C. N. **Critérios de projetabilidade para as argamassas industrializadas de revestimento utilizando bomba de argamassa com eixo helicoidal**. Brasília: Universidade de Brasília, 2003.

SCHMALFUSS, L. M.; TIMM, J.; PASSUELLO, A. C. **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: minerais**. São Paulo: Sidac, 2022.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement based materials industry**. [s.l.] UN Environment, 2017.

SNIC. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. [s.l.] SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento), ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), mar. 2019. Disponível em: <http://www.lme.pcc.usp.br/wp-content/uploads/sites/275/2019/04/Roadmap-Tecnol%C3%B3gico-do-Cimento_Brasil.pdf>.

SOIBELMAN, L. **As perdas de materiais na construção de edificações: sua incidência e seu controle**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1993.

SONVEZZO, C. S.; JOHN, V. M. **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: argamassas**. São Paulo: Sidac, 2022.

STEFFEN, W. et al. The Anthropocene: From Global Change to Planetary Stewardship. **AMBIO**, v. 40, n. 7, p. 739–761, nov. 2011.

SUPERMIX. **Argamassa Estabilizada**. Site de empresa. Disponível em: <<http://www.supermix.com.br/argamassas/>>. Acesso em: 8 abr. 2019.

TORRES, A. et al. A looming tragedy of the sand commons. **Science**, v. 357, n. 6355, p. 970–971, 8 set. 2017.

TURK, J. et al. Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. **Waste Management**, v. 45, p. 194–205, nov. 2015.

UNEP et al. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, dez. 2018.

UNEP; IRP. **Global resources outlook. Natural resources for the future we want**. [s.l.] United Nations Environment Programme. International Resource Panel, 2019.

UNEP; SETAP; LIFE CICLE INICIATIVE. **Global guidance for life cycle impact assessment indicators**. [s.l.: s.n.]. v. 1

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector**. , 2020. Disponível em: <https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2023

VOTORANTIM. **EPD S-P-00895 - Cimento CP II E40, CP III 40, RS and CPV-ARI by Votorantim**. [s.l.] Votorantim Cimentos, 20 jun. 2016a.

VOTORANTIM. **EPD S-P-00896 - fck 30 MPa BR.1 Abat 10+-2 by Votorantim Cimentos**. [s.l.] Votorantim Cimentos, 20 jun. 2016b.

VOTORANTIM. **Argamassa Estabilizada**. Site de empresa. Disponível em: <<https://www.votorantimcimentos.com.br/produtos/argamassas-engemix/argamassa-estabilizada/>>. Acesso em: 8 abr. 2019a.

VOTORANTIM. **EPD S-P-01123 - Cimento todas as obras estruturais by Votorantim**. [s.l.] Votorantim Cimentos, 2019b.

VOTORANTIM. **EPD S-P-01122 - 2202 Matrix revestimento fechada, 2203 Matrix projeção, 4201 Matrix contrapiso e 5201 Múltiplo uso by Votorantim Cimentos - Cajamar Unit**. [s.l.] Votorantim Cimentos, 2 dez. 2019c.

VOTORANTIM. **EPD S-P-01121 - 2202 Matrix revestimento fechada, 2203 Matrix projeção, 4201 Matrix contrapiso e 5201 Múltiplo uso by Votorantim Cimentos - Camaçari Unit**. Brasil: Votorantim Cimentos, 2 dez. 2019d.

WBCSD. **The Business Case for the Use of Life Cycle Metrics in Construction and Real State**. [s.l.] WBCSD (World Business Council for Sustainable Development), 2016. Disponível em: <<https://www.wbcd.org/contentwbc/download/1930/24581>>. Acesso em: 18 abr. 2020.

Webinar: A norma NBR 13281 e o impacto para argamassa estabilizada. , 20 jun. 2023. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Nm9Ym-4Ex7s>>. Acesso em: 18 jul. 2023

WICHE, P.; VALDIVIA, S. **Life Cycle Thinking in Latin America - 12 case studies of LCA and LCM approaches of companies in the region**. , 2014. Disponível em: <<https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2015/01/LCA-LCM-company-case-studies-in-Latin-America.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2020

WOLF, M.-A. et al. **The International reference Life Cycle Data system (ILCD) handbook: towards more sustainable production and consumption for a resource-efficient Europe**. Luxembourg: Publications Office, 2012.

WORRELL, E. et al. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. 2001.

XING, S.; XU, Z.; JUN, G. Inventory analysis of LCA on steel- and concrete-construction office buildings. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 7, p. 1188–1193, jan. 2008.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Formulação das argamassas estabilizadas produzidas na planta de Americana e Campinas conforme informado pelo fabricante.

| Argamassa estabilizada | Insumo (kg) | | | |
|----------------------------|-------------|---------------|------------------|------|
| | CPII E 40 | Areia quartzo | Areia artificial | Água |
| Planta de Americana | | | | |
| AM1 Básica 36h | 205 | 1.494 | - | 210 |
| AM2 Estrutural 4Mpa 36h | 180 | 1.596 | - | 190 |
| AM3 Estrutural 5Mpa 36h | 180 | 1.596 | - | 190 |
| Planta de Campinas | | | | |
| CA1 Básica 12h | 190 | 1.401 | - | 210 |
| CA2 Básica 36h | 190 | 1.401 | - | 210 |
| CA3 Básica 72h | 200 | 1.339 | - | 200 |
| CA4 Não fluída 12h | 250 | - | 1.649 | 200 |
| CA5 Estrutural 7Mpa 36h | 260 | 1.525 | - | 190 |
| CA6 Estrutural 14Mpa 36h | 330 | 1.463 | - | 190 |
| CA7 Estrutural 7Mpa 72h | 260 | 1.525 | - | 190 |

APÊNDICE B

*Indicadores ambientais do **berço-ao-portão** das argamassas estabilizadas produzidas nas plantas de Itaquaquetuba, Americana e Campinas. Dados detalhados por tipo de insumo. Unidade de referência **m³ de argamassa produzida**.*

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/m ³) | | | | Perdas de argamassa | | Consumo de água (kg/m ³) | | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|----------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|--------------------------------------|------------|------------|
| | Produção insumos | | Central perdas | Total | (m ³ /m ³) | (kg/m ³) | Produção insumos | Central | Total |
| | Teórico | Perdas | | | | | | | |
| Indicadores (exceto Itaquaquetuba) | min. | | | | 0,03 | 44 | | | 682 |
| | mediano | 1.776 | 621 | 59 | | | | | 766 |
| | max. | | | | 0,10 | 170 | | | 807 |
| Itaquaquetuba | 1.612 | 563 | | 2.175 | não informado | | 539 | 165 | 704 |
| Extração/fabric. insumos | 1.612 | 563 | | 2.175 | | | 539 | | 539 |
| Cimento | 208 | 72 | | 280 | | | 123 | | 123 |
| Areia de quartzo | 1.337 | 468 | | 1.805 | | | 396 | | 396 |
| Areia artificial | 67 | 23 | | 91 | | | 20 | | 20 |
| Transporte dos insumos | | | | | | | | | |
| Cimento | | | | | | | | | |
| Areia de Quartzo | | | | | | | | | |
| Areia artificial | | | | | | | | | |
| Aditivos | | | | | | | | | |
| Água | | | | | | | | | |
| Produção da argamassa | | | | | | | 165 | | 165 |
| Eletricidade | | | | | | | | | |
| Óleo diesel | | | | | | | | | |
| Água adicionada | | | | | | | 114 | | 114 |
| Água de limpeza | | | | | | | 50 | | 50 |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/m³) | | | | | Emissão de CO2 (kg/m³) | | | | |
|---------------------------------------|----------------------------|------------|----------|----------|--------------|------------------------|-----------|------------|----------|------------|
| | Produção insumos | Transp. | Central | | Total | Produção insumos | Transp. | Central | | Total |
| | | | Produção | Perdas | | | | Produção | Perdas | |
| Indicadores (exceto Itaquaquetuba) | min. | | | | 1.047 | | | | | 202 |
| | mediano | | | | 1.262 | | | | | 215 |
| | máx. | | | | 1.452 | | | | | 313 |
| Itaquaquetuba | 789 | 677 | 9 | 0 | 1.475 | 177 | 50 | 0,4 | 0 | 227 |
| Extração/fabric. insumos | 789 | | | | 789 | 177 | | | | 177 |
| Cimento | 524 | | | | 524 | 160 | | | | 160 |
| Areia de quartzo | 259 | | | | 259 | 17 | | | | 17 |
| Areia artificial | 6 | | | | 6 | 0,3 | | | | 0 |
| Transporte dos insumos | | 677 | | | 677 | | 50 | | | 50 |
| Cimento | | 58 | | | 58 | | 4 | | | 4 |
| Areia de Quartzo | | 609 | | | 609 | | 45 | | | 45 |
| Areia artificial | | 10 | | | 10 | | 1 | | | 1 |
| Aditivos | | 0,5 | | | 0,5 | | 0,03 | | | 0,03 |
| Água | | 0,6 | | | 0,6 | | 0,01 | | | 0,01 |
| Produção da argamassa | | | 9 | | 9 | | | 0,4 | | 0,4 |
| Eletricidade | | | 5 | | 5 | | | 0,1 | | 0,1 |
| Óleo diesel | | | 5 | | 5 | | | 0,4 | | 0,4 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Água de limpeza | | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/m³) | | | | Perdas de argamassa | | Consumo de água (kg/m³) | | |
|--|--------------------------|------------|----------------|--------------|---------------------|------------|-------------------------|------------|------------|
| | Produção insumos | | Central perdas | Total | (m³/m³) (kg/m³) | | Produção insumos | Central | Total |
| | Teórico | Perdas | | | | | | | |
| AM1 Básica 36h | 1.699 | 594 | 229 | 2.522 | 0,10 | 170 | 564 | 243 | 807 |
| Extração/fabric. insumos | 1.699 | 594 | | 2.293 | | | 564 | | 564 |
| Cimento | 205 | 71 | | 276 | | | 122 | | 122 |
| Areia de quartzo | 1.494 | 523 | | 2.017 | | | 442 | | 442 |
| Areia artificial | 0 | 0 | | 0 | | | 0 | | 0 |
| Transporte dos insumos | | | | | | | | | |
| Cimento | | | | | | | | | |
| Areia de Quartzo | | | | | | | | | |
| Areia artificial | | | | | | | | | |
| Aditivos | | | | | | | | | |
| Água | | | | | | | | | |
| Central | | | 229 | 229 | 0,10 | 170 | | 243 | 243 |
| Produção da argamassa | | | | | 0,10 | 170 | | 174 | 174 |
| Eletricidade | | | | | | | | | |
| Óleo diesel | | | | | | | | | |
| Água adicionada | | | | | | | | 133 | 133 |
| Água de limpeza | | | | | | | | 41 | 41 |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | 0,10 | 170 | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | | | | | | | |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | 229 | 229 | | | | 69 | 69 |
| Produção do cimento | | | 26 | 26 | | | | 12 | 12 |
| Extração da areia quartzo | | | 202 | 202 | | | | 44 | 44 |
| Extração da areia artificial | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | | 13 | 13 |
| Transp. cimento | | | | | | | | | |
| Transp. areia quartzo | | | | | | | | | |
| Transp. areia artificial | | | | | | | | | |
| Transp. aditivos | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/m³) | | | | | Emissão de CO2 (kg/m³) | | | | |
|--|----------------------------|------------|------------|------------|--------------|------------------------|-----------|----------|-----------|---------------|
| | Produção insumos | Transp. | Central | | Total | Produção insumos | Transp. | Central | | Total |
| | | | Produção | Perdas | | | | Produção | Perdas | |
| AM1 Básica 36h | 806 | 275 | 111 | 106 | 1.296 | 176 | 20 | 5 | 19 | 221 |
| Extração/fabric. insumos | 806 | | | | 806 | 176 | | | | 176 |
| Cimento | 517 | | | | 517 | 158 | | | | 158 |
| Areia de quartzo | 289 | | | | 289 | 19 | | | | 19 |
| Areia artificial | 0 | | | | 0 | 0 | | | | 0 |
| Transporte dos insumos | | 275 | | | 275 | | 20 | | | 20 |
| Cimento | | 50 | | | 50 | | 4 | | | 4 |
| Areia de Quartzo | | 224 | | | 224 | | 17 | | | 17 |
| Areia artificial | | 0,0 | | | 0 | | 0 | | | 0 |
| Aditivos | | 0,5 | | | 0 | | 0,04 | | | 0 |
| Água | | 0,6 | | | 1 | | 0,01 | | | 0 |
| Central | | | 111 | 106 | 216 | | | 5 | 19 | 24 |
| Produção da argamassa | | | 111 | | 111 | | | 5 | | 5 |
| Eletricidade | | | 50 | | 50 | | | 0,7 | | 1 |
| Óleo diesel | | | 58 | | 58 | | | 4 | | 4 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Água de limpeza | | | | | | | | | | |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | | | | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | 3 | | 3 | | | 0,2 | | 0,2 |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | | 106 | 106 | | | | 19 | 19 |
| Produção do cimento | | | | 49 | 49 | | | | 15 | 15 |
| Extração da areia quartzo | | | | 29 | 29 | | | | 2 | 2 |
| Extração da areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Transp. cimento | | | | 5 | 5 | | | | 0,4 | 0,4 |
| Transp. areia quartzo | | | | 22 | 22 | | | | 2 | 2 |
| Transp. areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Transp. aditivos | | | | 0,005 | 0,005 | | | | 0,0004 | 0,0004 |

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/m³) | | | | Perdas de argamassa | | Consumo de água (kg/m³) | | |
|--|--------------------------|------------|----------------|--------------|---------------------|------------|-------------------------|------------|------------|
| | Produção insumos | | Central perdas | Total | (m³/m³) | (kg/m³) | Produção insumos | Central | Total |
| | Teórico | Perdas | | | | | | | |
| AM2 Estrutural 4MPa 36h | 1.776 | 621 | 229 | 2.626 | 0,10 | 170 | 579 | 216 | 795 |
| Extração/fabric. insumos | 1.776 | 621 | | 2.397 | | | 579 | | 579 |
| Cimento | 180 | 62 | | 242 | | | 107 | | 107 |
| Areia de quartzo | 1.596 | 559 | | 2.155 | | | 472 | | 472 |
| Areia artificial | 0 | 0 | | 0 | | | 0 | | 0 |
| Transporte dos insumos | | | | | | | | | |
| Cimento | | | | | | | | | |
| Areia de Quartzo | | | | | | | | | |
| Areia artificial | | | | | | | | | |
| Aditivos | | | | | | | | | |
| Água | | | | | | | | | |
| Central | | | 229 | 229 | 0,10 | 170 | | 216 | 216 |
| Produção da argamassa | | | | | 0,10 | 170 | | 149 | 149 |
| Eletricidade | | | | | | | | | |
| Óleo diesel | | | | | | | | | |
| Água adicionada | | | | | | | 108 | | 108 |
| Água de limpeza | | | | | | | 41 | | 41 |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | 0,10 | 170 | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | | | | | | | |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | 229 | 229 | | | | 67 | 67 |
| Produção do cimento | | | 26 | 26 | | | | 12 | 12 |
| Extração da areia quartzo | | | 202 | 202 | | | | 44 | 44 |
| Extração da areia artificial | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | 11 | | 11 |
| Transp. cimento | | | | | | | | | |
| Transp. areia quartzo | | | | | | | | | |
| Transp. areia artificial | | | | | | | | | |
| Transp. aditivos | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/m³) | | | | | Emissão de CO2 (kg/m³) | | | | |
|--|----------------------------|------------|------------|------------|--------------|------------------------|-----------|----------|-----------|---------------|
| | Produção insumos | Transp. | Central | | Total | Produção insumos | Transp. | Central | | Total |
| | | | Produção | Perdas | | | | Produção | Perdas | |
| AM2 Estrutural 4MPa 36h | 762 | 284 | 111 | 106 | 1.262 | 159 | 21 | 5 | 19 | 204 |
| Extração/fabric. insumos | 762 | | | | 762 | 159 | | | | 159 |
| Cimento | 454 | | | | 454 | 139 | | | | 139 |
| Areia de quartzo | 309 | | | | 309 | 20 | | | | 20 |
| Areia artificial | 0 | | | | 0 | 0 | | | | 0 |
| Transporte dos insumos | | 284 | | | 284 | | 21 | | | 21 |
| Cimento | | 43 | | | 43 | | 3,2 | | | 3 |
| Areia de Quartzo | | 239 | | | 239 | | 17,7 | | | 18 |
| Areia artificial | | 0 | | | 0 | | 0 | | | 0 |
| Aditivos | | 0,5 | | | 0,5 | | 0,03 | | | 0 |
| Água | | 0,5 | | | 0,5 | | 0,01 | | | 0 |
| Central | | | 111 | 106 | 216 | | | 5 | 19 | 24 |
| Produção da argamassa | | | 111 | | 111 | | | 5 | | 5 |
| Eletricidade | | | 50 | | 50 | | | 0,7 | | 1 |
| Óleo diesel | | | 58 | | 58 | | | 4 | | 4 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Água de limpeza | | | | | | | | | | |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | | | | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | 3 | | 3 | | | 0,2 | | 0,2 |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | | 106 | 106 | | | | 19 | 19 |
| Produção do cimento | | | | 49 | 49 | | | | 15 | 15 |
| Extração da areia quartzo | | | | 29 | 29 | | | | 2 | 2 |
| Extração da areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Transp. cimento | | | | 5 | 5 | | | | 0,4 | 0,4 |
| Transp. areia quartzo | | | | 22 | 22 | | | | 2 | 2 |
| Transp. areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Transp. aditivos | | | | 0,005 | 0,005 | | | | 0,0004 | 0,0004 |

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/m ³) | | | | Perdas de argamassa | | Consumo de água (kg/m ³) | | |
|--|---------------------------------------|------------|----------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|--------------------------------------|------------|------------|
| | Produção insumos | | Central perdas | Total | (m ³ /m ³) | (kg/m ³) | Produção insumos | Central | Total |
| | Teórico | Perdas | | | | | | | |
| AM3 Estrutural 5MPa 36h | 1.776 | 621 | 229 | 2.626 | 0,10 | 170 | 579 | 216 | 795 |
| Extração/fabric. insumos | 1.776 | 621 | | 2.397 | | | 579 | | 579 |
| Cimento | 180 | 62 | | 242 | | | 107 | | 107 |
| Areia de quartzo | 1.596 | 559 | | 2.155 | | | 472 | | 472 |
| Areia artificial | 0 | 0 | | 0 | | | 0 | | 0 |
| Transporte dos insumos | | | | | | | | | |
| Cimento | | | | | | | | | |
| Areia de Quartzo | | | | | | | | | |
| Areia artificial | | | | | | | | | |
| Aditivos | | | | | | | | | |
| Água | | | | | | | | | |
| Central | | | 229 | 229 | 0,10 | 170 | | 216 | 216 |
| Produção da argamassa | | | | | 0,10 | 170 | | 149 | 149 |
| Eletricidade | | | | | | | | | |
| Óleo diesel | | | | | | | | | |
| Água adicionada | | | | | | | 108 | | 108 |
| Água de limpeza | | | | | | | 41 | | 41 |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | 0,10 | 170 | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | | | | | | | |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | 229 | 229 | | | | 67 | 67 |
| Produção do cimento | | | 26 | 26 | | | | 12 | 12 |
| Extração da areia quartzo | | | 202 | 202 | | | | 44 | 44 |
| Extração da areia artificial | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | 11 | | 11 |
| Transp. cimento | | | | | | | | | |
| Transp. areia quartzo | | | | | | | | | |
| Transp. areia artificial | | | | | | | | | |
| Transp. aditivos | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/m³) | | | | | Emissão de CO2 (kg/m³) | | | | |
|--|----------------------------|------------|------------|------------|--------------|------------------------|-----------|----------|-----------|---------------|
| | Produção insumos | Transp. | Central | | Total | Produção insumos | Transp. | Central | | Total |
| | | | Produção | Perdas | | | | Produção | Perdas | |
| AM3 Estrutural 5MPa 36h | 762 | 284 | 111 | 106 | 1.262 | 159 | 21 | 5 | 19 | 204 |
| Extração/fabric. insumos | 762 | | | | 762 | 159 | | | | 159 |
| Cimento | 454 | | | | 454 | 139 | | | | 139 |
| Areia de quartzo | 309 | | | | 309 | 20 | | | | 20 |
| Areia artificial | 0 | | | | 0 | 0 | | | | 0 |
| Transporte dos insumos | | 284 | | | 284 | | 21 | | | 21 |
| Cimento | | 43 | | | 43 | | 3,2 | | | 3 |
| Areia de Quartzo | | 239 | | | 239 | | 17,7 | | | 18 |
| Areia artificial | | 0,0 | | | 0 | | 0 | | | 0 |
| Aditivos | | 0,5 | | | 0,5 | | 0,03 | | | 0 |
| Água | | 0,5 | | | 1 | | 0,01 | | | 0 |
| Central | | | 111 | 106 | 216 | | | 5 | 19 | 24 |
| Produção da argamassa | | | 111 | | 111 | | | 5 | | 5 |
| Eletricidade | | | 50 | | 50 | | | 0,7 | | 1 |
| Óleo diesel | | | 58 | | 58 | | | 4 | | 4 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Água de limpeza | | | | | | | | | | |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | | | | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | 3 | | 3 | | | 0,2 | | 0,2 |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | | 106 | 106 | | | | 19 | 19 |
| Produção do cimento | | | | 49 | 49 | | | | 15 | 15 |
| Extração da areia quartzo | | | | 29 | 29 | | | | 2 | 2 |
| Extração da areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Transp. cimento | | | | 5 | 5 | | | | 0,4 | 0,4 |
| Transp. areia quartzo | | | | 22 | 22 | | | | 2 | 2 |
| Transp. areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Transp. aditivos | | | | 0,005 | 0,005 | | | | 0,0004 | 0,0004 |

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/m³) | | | | Perdas de argamassa | | Consumo de água (kg/m³) | | |
|--|--------------------------|------------|----------------|--------------|---------------------|-----------|-------------------------|------------|------------|
| | Produção insumos | | Central perdas | Total | (m³/m³) | (kg/m³) | Produção insumos | Central | Total |
| | Teórico | Perdas | | | | | | | |
| CA1 Básica 12h | 1.591 | 556 | 59 | 2.206 | 0,03 | 44 | 528 | 177 | 705 |
| Extração/fabric. insumos | 1.591 | 556 | | 2.147 | | | 528 | | 528 |
| Cimento | 190 | 66 | | 256 | | | 113 | | 113 |
| Areia de quartzo | 1.401 | 490 | | 1.891 | | | 415 | | 415 |
| Areia artificial | 0 | 0 | | 0 | | | 0 | | 0 |
| Transporte dos insumos | | | | | | | | | |
| Cimento | | | | | | | | | |
| Areia de Quartzo | | | | | | | | | |
| Areia artificial | | | | | | | | | |
| Aditivos | | | | | | | | | |
| Água | | | | | | | | | |
| Central | | | 59 | 59 | 0,03 | 44 | | 177 | 177 |
| Produção da argamassa | | | | | 0,03 | 44 | | 159 | 159 |
| Eletricidade | | | | | | | | | |
| Óleo diesel | | | | | | | | | |
| Água adicionada | | | | | | | 139 | | 139 |
| Água de limpeza | | | | | | | 19 | | 19 |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | 0,03 | 44 | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | | | | | | | |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | 59 | 59 | | | | 18 | 18 |
| Produção do cimento | | | 7 | 7 | | | | 3 | 3 |
| Extração da areia quartzo | | | 51 | 51 | | | | 11 | 11 |
| Extração da areia artificial | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | 4 | | 4 |
| Transp. cimento | | | | | | | | | |
| Transp. areia quartzo | | | | | | | | | |
| Transp. areia artificial | | | | | | | | | |
| Transp. aditivos | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/m ³) | | | | | Emissão de CO2 (kg/m ³) | | | | |
|--|---|------------|-----------|-----------|--------------|-------------------------------------|-----------|-----------|----------|------------|
| | Produção insumos | Transp. | Central | | Total | Produção insumos | Transp. | Central | | Total |
| | | | Produção | Perdas | | | | Produção | Perdas | |
| CA1 Básica 12h | 750 | 244 | 26 | 28 | 1.047 | 164 | 18 | 15 | 5 | 202 |
| Extração/fabric. insumos | 750 | | | | 750 | 164 | | | | 164 |
| Cimento | 479 | | | | 479 | 146 | | | | 146 |
| Areia de quartzo | 271 | | | | 271 | 18 | | | | 18 |
| Areia artificial | 0 | | | | 0 | 0 | | | | 0 |
| Transporte dos insumos | | 244 | | | 244 | | 18 | | | 18 |
| Cimento | | 41 | | | 41 | | 3,0 | | | 3 |
| Areia de Quartzo | | 202 | | | 202 | | 14,9 | | | 15 |
| Areia artificial | | 0,0 | | | 0 | | 0 | | | 0 |
| Aditivos | | 0,2 | | | 0,2 | | 0,01 | | | 0 |
| Água | | 0,6 | | | 1 | | 0,01 | | | 0 |
| Central | | | 26 | 28 | 54 | | | 15 | 5 | 20 |
| Produção da argamassa | | | 26 | | 26 | | | 15 | | 15 |
| Eletricidade | | | 8 | | 8 | | | 0,1 | | 0 |
| Óleo diesel | | | 17 | | 17 | | | 15 | | 15 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Água de limpeza | | | | | | | | | | |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | | | | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | 1 | | 1 | | | 0,1 | | 0,1 |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | | 28 | 28 | | | | 5 | 5,3 |
| Produção do cimento | | | | 14 | 14 | | | | 4 | 4,3 |
| Extração da areia quartzo | | | | 7 | 7 | | | | 0 | 0,5 |
| Extração da areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Transp. cimento | | | | 1 | 1 | | | | 0,1 | 0,1 |
| Transp. areia quartzo | | | | 5 | 5 | | | | 0 | 0,4 |
| Transp. areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Transp. aditivos | | | | 0,016 | 0,016 | | | | 0,0012 | 0,001 |

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/m³) | | | | Perdas de argamassa | | Consumo de água (kg/m³) | | |
|--|--------------------------|------------|----------------|--------------|---------------------|-----------|-------------------------|------------|------------|
| | Produção insumos | | Central perdas | Total | (m³/m³) | (kg/m³) | Produção insumos | Central | Total |
| | Teórico | Perdas | | | | | | | |
| CA2 Básica 36h | 1.591 | 556 | 59 | 2.206 | 0,03 | 44 | 528 | 175 | 703 |
| Extração/fabric. insumos | 1.591 | 556 | | 2.147 | | | 528 | | 528 |
| Cimento | 190 | 66 | | 256 | | | 113 | | 113 |
| Areia de quartzo | 1.401 | 490 | | 1.891 | | | 415 | | 415 |
| Areia artificial | 0 | 0 | | 0 | | | 0 | | 0 |
| Transporte dos insumos | | | | | | | | | |
| Cimento | | | | | | | | | |
| Areia de Quartzo | | | | | | | | | |
| Areia artificial | | | | | | | | | |
| Aditivos | | | | | | | | | |
| Água | | | | | | | | | |
| Central | | | 59 | 59 | 0,03 | 44 | | 175 | 175 |
| Produção da argamassa | | | | | 0,03 | 44 | | 157 | 157 |
| Eletricidade | | | | | | | | | |
| Óleo diesel | | | | | | | | | |
| Água adicionada | | | | | | | 138 | | 138 |
| Água de limpeza | | | | | | | 19 | | 19 |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | 0,03 | 44 | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | | | | | | | |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | 59 | 59 | | | | 18 | 18 |
| Produção do cimento | | | 7 | 7 | | | | 3 | 3 |
| Extração da areia quartzo | | | 51 | 51 | | | | 11 | 11 |
| Extração da areia artificial | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | 4 | | 4 |
| Transp. cimento | | | | | | | | | |
| Transp. areia quartzo | | | | | | | | | |
| Transp. areia artificial | | | | | | | | | |
| Transp. aditivos | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/m ³) | | | | | Emissão de CO2 (kg/m ³) | | | | |
|--|---|------------|-----------|-----------|--------------|-------------------------------------|-----------|-----------|----------|--------------|
| | Produção insumos | Transp. | Central | | Total | Produção insumos | Transp. | Central | | Total |
| | | | Produção | Perdas | | | | Produção | Perdas | |
| CA2 Básica 36h | 750 | 244 | 26 | 28 | 1.048 | 164 | 18 | 15 | 5 | 202 |
| Extração/fabric. insumos | 750 | | | | 750 | 164 | | | | 164 |
| Cimento | 479 | | | | 479 | 146 | | | | 146 |
| Areia de quartzo | 271 | | | | 271 | 18 | | | | 18 |
| Areia artificial | 0 | | | | 0 | 0 | | | | 0 |
| Transporte dos insumos | | 244 | | | 244 | | 18 | | | 18 |
| Cimento | | 41 | | | 41 | | 3,0 | | | 3 |
| Areia de Quartzo | | 202 | | | 202 | | 14,9 | | | 15 |
| Areia artificial | | 0,0 | | | 0 | | 0,0 | | | 0 |
| Aditivos | | 0,8 | | | 0,8 | | 0,1 | | | 0 |
| Água | | 0,6 | | | 1 | | 0,01 | | | 0 |
| Central | | | 26 | 28 | 54 | | | 15 | 5 | 20 |
| Produção da argamassa | | | 26 | | 26 | | | 15 | | 15 |
| Eletricidade | | | 8 | | 8 | | | 0,1 | | 0 |
| Óleo diesel | | | 17 | | 17 | | | 15 | | 15 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Água de limpeza | | | | | | | | | | |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | | | | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | 1 | | 1 | | | 0,1 | | 0,1 |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | | 28 | 28 | | | | 5 | 5,3 |
| Produção do cimento | | | | 14 | 14 | | | | 4 | 4,3 |
| Extração da areia quartzo | | | | 7 | 7 | | | | 0 | 0,5 |
| Extração da areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Transp. cimento | | | | 1 | 1 | | | | 0,1 | 0,1 |
| Transp. areia quartzo | | | | 5 | 5 | | | | 0 | 0,4 |
| Transp. areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Transp. aditivos | | | | 0,016 | 0,016 | | | | 0,0012 | 0,001 |

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/m³) | | | | Perdas de argamassa | | Consumo de água (kg/m³) | | |
|--|--------------------------|------------|----------------|--------------|---------------------|-----------|-------------------------|------------|------------|
| | Produção insumos | | Central perdas | Total | (m³/m³) | (kg/m³) | Produção insumos | Central | Total |
| | Teórico | Perdas | | | | | | | |
| CA3 Básica 72h | 1.539 | 538 | 59 | 2.136 | 0,03 | 44 | 515 | 167 | 682 |
| Extração/fabric. insumos | 1.539 | 538 | | 2.077 | | | 515 | | 515 |
| Cimento | 200 | 69 | | 269 | | | 119 | | 119 |
| Areia de quartzo | 1.339 | 469 | | 1.808 | | | 396 | | 396 |
| Areia artificial | 0 | 0 | | 0 | | | 0 | | 0 |
| Transporte dos insumos | | | | | | | | | |
| Cimento | | | | | | | | | |
| Areia de Quartzo | | | | | | | | | |
| Areia artificial | | | | | | | | | |
| Aditivos | | | | | | | | | |
| Água | | | | | | | | | |
| Central | | | 59 | 59 | 0,03 | 44 | | 167 | 167 |
| Produção da argamassa | | | | | 0,03 | 44 | | 149 | 149 |
| Eletricidade | | | | | | | | | |
| Óleo diesel | | | | | | | | | |
| Água adicionada | | | | | | | 130 | | 130 |
| Água de limpeza | | | | | | | 19 | | 19 |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | 0,03 | 44 | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | | | | | | | |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | 59 | 59 | | | | 18 | 18 |
| Produção do cimento | | | 7 | 7 | | | | 3 | 3 |
| Extração da areia quartzo | | | 51 | 51 | | | | 11 | 11 |
| Extração da areia artificial | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | 4 | | 4 |
| Transp. cimento | | | | | | | | | |
| Transp. areia quartzo | | | | | | | | | |
| Transp. areia artificial | | | | | | | | | |
| Transp. aditivos | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/m ³) | | | | | Emissão de CO2 (kg/m ³) | | | | |
|--|---|------------|-----------|-----------|--------------|-------------------------------------|-----------|-----------|----------|--------------|
| | Produção insumos | Transp. | Central | | Total | Produção insumos | Transp. | Central | | Total |
| | | | Produção | Perdas | | | | Produção | Perdas | |
| CA3 Básica 72h | 763 | 238 | 26 | 28 | 1.055 | 171 | 18 | 15 | 5 | 208 |
| Extração/fabric. insumos | 763 | | | | 763 | 171 | | | | 171 |
| Cimento | 504 | | | | 504 | 154 | | | | 154 |
| Areia de quartzo | 259 | | | | 259 | 17 | | | | 17 |
| Areia artificial | 0 | | | | 0 | 0 | | | | 0 |
| Transporte dos insumos | | 238 | | | 238 | | 18 | | | 18 |
| Cimento | | 43 | | | 43 | | 3,2 | | | 3 |
| Areia de Quartzo | | 193 | | | 193 | | 14,2 | | | 14 |
| Areia artificial | | 0,0 | | | 0 | | 0,0 | | | 0 |
| Aditivos | | 1,2 | | | 1,2 | | 0,1 | | | 0 |
| Água | | 0,5 | | | 1 | | 0,01 | | | 0 |
| Central | | | 26 | 28 | 54 | | | 15 | 5 | 20 |
| Produção da argamassa | | | 26 | | 26 | | | 15 | | 15 |
| Eletricidade | | | 8 | | 8 | | | 0,1 | | 0 |
| Óleo diesel | | | 17 | | 17 | | | 15 | | 15 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Água de limpeza | | | | | | | | | | |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | | | | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | 1 | | 1 | | | 0,1 | | 0,1 |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | | 28 | 28 | | | | 5 | 5,3 |
| Produção do cimento | | | | 14 | 14 | | | | 4 | 4,3 |
| Extração da areia quartzo | | | | 7 | 7 | | | | 0 | 0,5 |
| Extração da areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Transp. cimento | | | | 1 | 1 | | | | 0,1 | 0,1 |
| Transp. areia quartzo | | | | 5 | 5 | | | | 0 | 0,4 |
| Transp. areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Transp. aditivos | | | | 0,016 | 0,016 | | | | 0,0012 | 0,001 |

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/m³) | | | | Perdas de argamassa | | Consumo de água (kg/m³) | | |
|--|--------------------------|------------|----------------|--------------|---------------------|-----------|-------------------------|------------|------------|
| | Produção insumos | | Central perdas | Total | (m³/m³) | (kg/m³) | Produção insumos | Central | Total |
| | Teórico | Perdas | | | | | | | |
| CA4 Não fluida 12h | 1.899 | 659 | 59 | 2.617 | 0,03 | 44 | 637 | 154 | 791 |
| Extração/fabric. insumos | 1.899 | 659 | | 2.558 | | | 637 | | 637 |
| Cimento | 250 | 86 | | 336 | | | 149 | | 149 |
| Areia de quartzo | 0 | 0 | | 0 | | | 0 | | 0 |
| Areia artificial | 1.649 | 572 | | 2.221 | | | 488 | | 488 |
| Transporte dos insumos | | | | | | | | | |
| Cimento | | | | | | | | | |
| Areia de Quartzo | | | | | | | | | |
| Areia artificial | | | | | | | | | |
| Aditivos | | | | | | | | | |
| Água | | | | | | | | | |
| Central | | | 59 | 59 | 0,03 | 44 | | 154 | 154 |
| Produção da argamassa | | | | | 0,03 | 44 | | 136 | 136 |
| Eletricidade | | | | | | | | | |
| Óleo diesel | | | | | | | | | |
| Água adicionada | | | | | | | 117 | | 117 |
| Água de limpeza | | | | | | | 19 | | 19 |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | 0,03 | 44 | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | | | | | | | |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | 59 | 59 | | | | 18 | 18 |
| Produção do cimento | | | 7 | 7 | | | | 3 | 3 |
| Extração da areia quartzo | | | 51 | 51 | | | | 11 | 11 |
| Extração da areia artificial | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | 3 | | 3 |
| Transp. cimento | | | | | | | | | |
| Transp. areia quartzo | | | | | | | | | |
| Transp. areia artificial | | | | | | | | | |
| Transp. aditivos | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/m ³) | | | | | Emissão de CO2 (kg/m ³) | | | | |
|--|---|------------|-----------|-----------|--------------|-------------------------------------|-----------|-----------|----------|--------------|
| | Produção insumos | Transp. | Central | | Total | Produção insumos | Transp. | Central | | Total |
| | | | Produção | Perdas | | | | Produção | Perdas | |
| CA4 Não fluida 12h | 788 | 232 | 26 | 28 | 1.075 | 200 | 17 | 15 | 5 | 237 |
| Extração/fabric. insumos | 788 | | | | 788 | 200 | | | | 200 |
| Cimento | 630 | | | | 630 | 192 | | | | 192 |
| Areia de quartzo | 0 | | | | 0 | 0 | | | | 0 |
| Areia artificial | 159 | | | | 159 | 8 | | | | 8 |
| Transporte dos insumos | | 232 | | | 232 | | 17 | | | 17 |
| Cimento | | 54 | | | 54 | | 4,0 | | | 4 |
| Areia de Quartzo | | 0 | | | 0 | | 0,0 | | | 0 |
| Areia artificial | | 178 | | | 178 | | 13,1 | | | 13 |
| Aditivos | | 0,3 | | | 0,3 | | 0,02 | | | 0 |
| Água | | 0,5 | | | 0 | | 0,01 | | | 0 |
| Central | | | 26 | 28 | 54 | | | 15 | 5 | 20 |
| Produção da argamassa | | | 26 | | 26 | | | 15 | | 15 |
| Eletricidade | | | 8 | | 8 | | | 0,1 | | 0 |
| Óleo diesel | | | 17 | | 17 | | | 15 | | 15 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Água de limpeza | | | | | | | | | | |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | | | | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | 1 | | 1 | | | 0,1 | | 0,1 |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | | 28 | 28 | | | | 5,3 | 5,3 |
| Produção do cimento | | | | 14 | 14 | | | | 4,3 | 4,3 |
| Extração da areia quartzo | | | | 7 | 7 | | | | 0,5 | 0,5 |
| Extração da areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Transp. cimento | | | | 1 | 1 | | | | 0,1 | 0,1 |
| Transp. areia quartzo | | | | 5 | 5 | | | | 0,4 | 0,4 |
| Transp. areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Transp. aditivos | | | | 0,016 | 0,016 | | | | 0,001 | 0,001 |

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/m³) | | | | Perdas de argamassa | | Consumo de água (kg/m³) | | |
|--|--------------------------|------------|----------------|--------------|---------------------|-----------|-------------------------|------------|------------|
| | Produção insumos | | Central perdas | Total | (m³/m³) | (kg/m³) | Produção insumos | Central | Total |
| | Teórico | Perdas | | | | | | | |
| CA5 Estrutural 7MPa 36h | 1.785 | 624 | 59 | 2.468 | 0,03 | 44 | 606 | 148 | 753 |
| Extração/fabric. insumos | 1.785 | 624 | | 2.409 | | | 606 | | 606 |
| Cimento | 260 | 90 | | 350 | | | 154 | | 154 |
| Areia de quartzo | 1.525 | 534 | | 2.059 | | | 451 | | 451 |
| Areia artificial | 0 | 0 | | 0 | | | 0 | | 0 |
| Transporte dos insumos | | | | | | | | | |
| Cimento | | | | | | | | | |
| Areia de Quartzo | | | | | | | | | |
| Areia artificial | | | | | | | | | |
| Aditivos | | | | | | | | | |
| Água | | | | | | | | | |
| Central | | | 59 | 59 | 0,03 | 44 | | 148 | 148 |
| Produção da argamassa | 0 | | | | 0,03 | 44 | | 130 | 130 |
| Eletricidade | | | | | | | | | |
| Óleo diesel | | | | | | | | | |
| Água adicionada | | | | | | | 111 | | 111 |
| Água de limpeza | | | | | | | 19 | | 19 |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | 0,03 | 44 | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | | | | | | | |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | 59 | 59 | | | | 18 | 18 |
| Produção do cimento | | | 7 | 7 | | | | 3 | 3 |
| Extração da areia quartzo | | | 51 | 51 | | | | 11 | 11 |
| Extração da areia artificial | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | 3 | | 3 |
| Transp. cimento | | | | | | | | | |
| Transp. areia quartzo | | | | | | | | | |
| Transp. areia artificial | | | | | | | | | |
| Transp. aditivos | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/m ³) | | | | | Emissão de CO2 (kg/m ³) | | | | |
|--|---|------------|-----------|-----------|--------------|-------------------------------------|-----------|-----------|----------|------------|
| | Produção insumos | Transp. | Central | | Total | Produção insumos | Transp. | Central | | Total |
| | | | Produção | Perdas | | | | Produção | Perdas | |
| CA5 Estrutural 7MPa 36h | 950 | 277 | 26 | 28 | 1.281 | 219 | 20 | 15 | 5 | 260 |
| Extração/fabric. insumos | 950 | | | | 950 | 219 | | | | 219 |
| Cimento | 655 | | | | 655 | 200 | | | | 200 |
| Areia de quartzo | 295 | | | | 295 | 19 | | | | 19 |
| Areia artificial | 0 | | | | 0 | 0 | | | | 0 |
| Transporte dos insumos | | 277 | | | 277 | | 20 | | | 20 |
| Cimento | | 56 | | | 56 | | 4,1 | | | 4 |
| Areia de Quartzo | | 220 | | | 220 | | 16,2 | | | 16 |
| Areia artificial | | 0 | | | 0 | | 0,0 | | | 0 |
| Aditivos | | 1,1 | | | 1,1 | | 0,1 | | | 0 |
| Água | | 0,5 | | | 0 | | 0,01 | | | 0 |
| Central | | | 26 | 28 | 54 | | | 15 | 5 | 20 |
| Produção da argamassa | | | 26 | | 26 | | | 15 | | 15 |
| Eletricidade | | | 8 | | 8 | | | 0,1 | | 0 |
| Óleo diesel | | | 17 | | 17 | | | 15 | | 15 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Água de limpeza | | | | | | | | | | |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | | | | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | 1 | | 1 | | | 0,1 | | 0,1 |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | | 28 | 28 | | | | 5 | 5,3 |
| Produção do cimento | | | | 14 | 14 | | | | 4 | 4,3 |
| Extração da areia quartzo | | | | 7 | 7 | | | | 0 | 0,5 |
| Extração da areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Transp. cimento | | | | 1 | 1 | | | | 0,1 | 0,1 |
| Transp. areia quartzo | | | | 5 | 5 | | | | 0 | 0,4 |
| Transp. areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Transp. aditivos | | | | 0,016 | 0,016 | | | | 0,0012 | 0,001 |

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/m³) | | | | Perdas de argamassa | | Consumo de água (kg/m³) | | |
|--|--------------------------|------------|----------------|--------------|---------------------|-----------|-------------------------|------------|------------|
| | Produção insumos | | Central perdas | Total | (m³/m³) | (kg/m³) | Produção insumos | Central | Total |
| | Teórico | Perdas | | | | | | | |
| CA6 Estrutural 14MPa 36h | 1.793 | 626 | 59 | 2.478 | 0,03 | 44 | 629 | 150 | 779 |
| Extração/fabric. insumos | 1.793 | 626 | | 2.419 | | | 629 | | 629 |
| Cimento | 330 | 114 | | 444 | | | 196 | | 196 |
| Areia de quartzo | 1.463 | 512 | | 1.975 | | | 433 | | 433 |
| Areia artificial | 0 | 0 | | 0 | | | 0 | | 0 |
| Transporte dos insumos | | | | | | | | | |
| Cimento | | | | | | | | | |
| Areia de Quartzo | | | | | | | | | |
| Areia artificial | | | | | | | | | |
| Aditivos | | | | | | | | | |
| Água | | | | | | | | | |
| Central | | | 59 | 59 | 0,03 | 44 | | 150 | 150 |
| Produção da argamassa | 0 | | | | 0,03 | 44 | | 132 | 132 |
| Eletricidade | | | | | | | | | |
| Óleo diesel | | | | | | | | | |
| Água adicionada | | | | | | | 113 | | 113 |
| Água de limpeza | | | | | | | 19 | | 19 |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | 0,03 | 44 | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | | | | | | | |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | 59 | 59 | | | | 18 | 18 |
| Produção do cimento | | | 7 | 7 | | | | 3 | 3 |
| Extração da areia quartzo | | | 51 | 51 | | | | 11 | 11 |
| Extração da areia artificial | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | 3 | | 3 |
| Transp. cimento | | | | | | | | | |
| Transp. areia quartzo | | | | | | | | | |
| Transp. areia artificial | | | | | | | | | |
| Transp. aditivos | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/m ³) | | | | | Emissão de CO2 (kg/m ³) | | | | |
|--|---|------------|-----------|-----------|--------------|-------------------------------------|-----------|-----------|----------|--------------|
| | Produção insumos | Transp. | Central | | Total | Produção insumos | Transp. | Central | | Total |
| | | | Produção | Perdas | | | | Produção | Perdas | |
| CA6 Estrutural 14MPa 36h | 1.115 | 284 | 26 | 28 | 1.452 | 272 | 21 | 15 | 5 | 313 |
| Extração/fabric. insumos | 1.115 | | | | 1.115 | 272 | | | | 272 |
| Cimento | 832 | | | | 832 | 254 | | | | 254 |
| Areia de quartzo | 283 | | | | 283 | 18 | | | | 18 |
| Areia artificial | 0 | | | | 0 | 0 | | | | 0 |
| Transporte dos insumos | | 284 | | | 284 | | 21 | | | 21 |
| Cimento | | 71 | | | 71 | | 5,2 | | | 5 |
| Areia de Quartzo | | 211 | | | 211 | | 15,6 | | | 16 |
| Areia artificial | | 0 | | | 0 | | 0,0 | | | 0 |
| Aditivos | | 1,4 | | | 1,4 | | 0,1 | | | 0 |
| Água | | 0,5 | | | 0 | | 0,01 | | | 0 |
| Central | | | 26 | 28 | 54 | | | 15 | 5 | 20 |
| Produção da argamassa | | | 26 | | 26 | | | 15 | | 15 |
| Eletricidade | | | 8 | | 8 | | | 0,1 | | 0 |
| Óleo diesel | | | 17 | | 17 | | | 15 | | 15 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Água de limpeza | | | | | | | | | | |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | | | | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | 1 | | 1 | | | 0,1 | | 0,1 |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | | 28 | 28 | | | | 5 | 5,3 |
| Produção do cimento | | | | 14 | 14 | | | | 4 | 4,3 |
| Extração da areia quartzo | | | | 7 | 7 | | | | 0 | 0,5 |
| Extração da areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Transp. cimento | | | | 1 | 1 | | | | 0,1 | 0,1 |
| Transp. areia quartzo | | | | 5 | 5 | | | | 0 | 0,4 |
| Transp. areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Transp. aditivos | | | | 0,016 | 0,016 | | | | 0,0012 | 0,001 |

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/m³) | | | | Perdas de argamassa | | Consumo de água (kg/m³) | | |
|--|--------------------------|------------|----------------|--------------|---------------------|-----------|-------------------------|------------|------------|
| | Produção insumos | | Central perdas | Total | (m³/m³) | (kg/m³) | Produção insumos | Central | Total |
| | Teórico | Perdas | | | | | | | |
| CA7 Estrutural 7MPa 72h | 1.785 | 624 | 59 | 2.468 | 0,03 | 44 | 606 | 147 | 753 |
| Extração/fabric. insumos | 1.785 | 624 | | 2.409 | | | 606 | | 606 |
| Cimento | 260 | 90 | | 350 | | | 154 | | 154 |
| Areia de quartzo | 1.525 | 534 | | 2.059 | | | 451 | | 451 |
| Areia artificial | 0 | 0 | | 0 | | | 0 | | 0 |
| Transporte dos insumos | | | | | | | | | |
| Cimento | | | | | | | | | |
| Areia de Quartzo | | | | | | | | | |
| Areia artificial | | | | | | | | | |
| Aditivos | | | | | | | | | |
| Água | | | | | | | | | |
| Central | | | 59 | 59 | 0,03 | 44 | | 147 | 147 |
| Produção da argamassa | 0 | | | | 0,03 | 44 | | 129 | 129 |
| Eletricidade | | | | | | | | | |
| Óleo diesel | | | | | | | | | |
| Água adicionada | | | | | | | 110 | | 110 |
| Água de limpeza | | | | | | | 19 | | 19 |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | 0,03 | 44 | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | | | | | | | |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | 59 | 59 | | | | 18 | 18 |
| Produção do cimento | | | 7 | 7 | | | | 3 | 3 |
| Extração da areia quartzo | | | 51 | 51 | | | | 11 | 11 |
| Extração da areia artificial | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | 3 | | 3 |
| Transp. cimento | | | | | | | | | |
| Transp. areia quartzo | | | | | | | | | |
| Transp. areia artificial | | | | | | | | | |
| Transp. aditivos | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/m ³) | | | | | Emissão de CO2 (kg/m ³) | | | | |
|--|---|------------|-----------|-----------|--------------|-------------------------------------|-----------|-----------|----------|------------|
| | Produção insumos | Transp. | Central | | Total | Produção insumos | Transp. | Central | | Total |
| | | | Produção | Perdas | | | | Produção | Perdas | |
| CA7 Estrutural 7MPa 72h | 950 | 277 | 26 | 28 | 1.282 | 219 | 20 | 15 | 5 | 260 |
| Extração/fabric. insumos | 950 | | | | 950 | 219 | | | | 219 |
| Cimento | 655 | | | | 655 | 200 | | | | 200 |
| Areia de quartzo | 295 | | | | 295 | 19 | | | | 19 |
| Areia artificial | 0 | | | | 0 | 0 | | | | 0 |
| Transporte dos insumos | | 277 | | | 277 | | 20 | | | 20 |
| Cimento | | 56 | | | 56 | | 4,1 | | | 4 |
| Areia de Quartzo | | 220 | | | 220 | | 16,2 | | | 16 |
| Areia artificial | | 0 | | | 0 | | 0,0 | | | 0 |
| Aditivos | | 1,3 | | | 1,3 | | 0,1 | | | 0 |
| Água | | 0,5 | | | 0 | | 0,01 | | | 0 |
| Central | | | 26 | 28 | 54 | | | 15 | 5 | 20 |
| Produção da argamassa | | | 26 | | 26 | | | 15 | | 15 |
| Eletricidade | | | 8 | | 8 | | | 0,1 | | 0 |
| Óleo diesel | | | 17 | | 17 | | | 15 | | 15 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Água de limpeza | | | | | | | | | | |
| Resíduo óleo lubrificante | | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | | | | | | |
| Bota fora da argam. residual | | | 1 | | 1 | | | 0,1 | | 0,1 |
| Prod./transp. insumos da argam. residual | | | | 28 | 28 | | | | 5 | 5,3 |
| Produção do cimento | | | | 14 | 14 | | | | 4 | 4,3 |
| Extração da areia quartzo | | | | 7 | 7 | | | | 0 | 0,5 |
| Extração da areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Água adicionada | | | | | | | | | | |
| Transp. cimento | | | | 1 | 1 | | | | 0,1 | 0,1 |
| Transp. areia quartzo | | | | 5 | 5 | | | | 0 | 0,4 |
| Transp. areia artificial | | | | 0 | 0 | | | | 0 | 0 |
| Transp. aditivos | | | | 0,016 | 0,016 | | | | 0,0012 | 0,001 |

APÊNDICE C

Indicadores ambientais do berço-à-aplicação de argamassa estabilizada aplicada em assentamento de blocos estruturais em edifício residencial localizado na cidade de São Paulo durante 2020. Unidade de referência 100 m² de parede.

| Argamassa estabilizada | | Recursos sólidos (kg/100m ²) | | | | | Perdas de argamassa | | | Consumo de água (kg/100m ²) | | | | | |
|------------------------------|---------------------------------|--|----------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|---|-----------|----------------|---------------|------------|--------------|
| | | A1-A3 | | A5 | | Total | A3 | | A5 | A1-A3 | | A5 | | Total | |
| | | Teórico | Perdas fabric. | Argam. | Perdas fabr. | | m ³ /100m ² | kg/100m ² | | m ³ /100m ² | Teórico | Perdas fabric. | Perdas aplic. | | Perdas fabr. |
| Indicadores | min. | 985 | 382 | 1.462 | 567 | 3.396 | 0,02 | 28 | | 425 | 11 | 631 | 17 | 0,1 | 1.085 |
| (exceto | mediano | 1.137 | | | | 3.932 | | | 0,95 | | | | | | 1.218 |
| Itaquaquecetuba) | máx. | 1.215 | 544 | 1.804 | 808 | 4.175 | 0,06 | 109 | | 495 | 44 | 734 | 66 | 0,1 | 1.283 |
| AM1 Básica 36h | | 1.087 | 527 | 1.614 | 782 | 4.010 | 0,06 | 109 | 0,95 | 472 | 44 | 701 | 66 | 0,1 | 1.283 |
| Total A1-A3 | | 1.087 | 527 | | | 1.614 | 0,06 | 109 | | 472 | 44 | | | | 517 |
| A1 | Extração/fabric. insumos | 1.087 | 380 | | | 1.467 | | | | 361 | | | | | 361 |
| | Cimento | 131 | 45 | | | 177 | | | | 78 | | | | | 78 |
| | Areia de quartzo | 956 | 335 | | | 1.291 | | | | 283 | | | | | 283 |
| | Areia artificial | 0 | 0 | | | 0 | | | | 0 | | | | | 0 |
| A2 | Transporte dos insumos | | | | | | | | | | | | | | 0 |
| A3 | Central | | 146 | | | 146 | 0,1 | 109 | | 111 | 44 | | | | 156 |
| | Eletricidade | | | | | 0 | | | | | | | | | 0,0 |
| | Óleo diesel | | | | | 0 | | | | | | | | | 0,0 |
| | Água adicionada | | | | | 0 | | | | 85 | | | | | 85 |
| | Água de limpeza | | | | | 0 | | | | 26 | | | | | 26 |
| | Resíduo óleo lubrificante | | 0,03 | | | 0,03 | | | | | | | | | 0 |
| | Argamassa residual | | | | | 0 | 0,06 | 109 | | | | | | | 0 |
| | Bota fora da argam. residual | | | | | 0 | | | | | | | | | 0 |
| | Extr./fabr./transp. resíduo | | 146 | | | 146 | | | | | 44 | | | | 44 |
| | Produção do cimento | | 17 | | | 17 | | | | | 7 | | | | 7 |
| | Extração da areia quartzo | | 130 | | | 130 | | | | | 28 | | | | 28 |
| Extração da areia artificial | | 0 | | | 0 | | | | | 0 | | | | 0 | |
| Água adicionada | | | | | 0 | | | | | 8 | | | | 8 | |
| A4 | Transporte argamassa | | | | | | | | | | | | | | |
| A5 | Obra | | | 1.614 | 782 | 2.396 | | | 0,95 | | | 701 | 66 | 0,1 | 767 |
| | Aplicação | | | 1.614 | 782 | 2.396 | | | 0,95 | | | | | 0,1 | 0,1 |
| | Extr./fabr./argam. residual | | | | | | | | | | 701 | 66 | | | 767 |
| | Transp. argam. residual | | | | | | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | | Consumo de energia (MJ/100m ²) | | | | | | | | | Emissão de CO ₂ (kg/100m ²) | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|-------|--------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|-------|----------------|--------|
| | | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | Total | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | Total | | |
| | | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | | Aplic. | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | | Transp. insumo | Aplic. |
| Indicadores | min. | 496 | 18 | 149 | 66 | 835 | 27 | 220 | 3 | 1.832 | 105 | 3 | 11 | 5 | 177 | 5 | 16 | 0 | 333 |
| (exceto | mediano | 559 | 18 | 177 | 66 | 1.026 | 27 | 262 | 3 | 2.205 | 117 | 3 | 13 | 5 | 206 | 5 | 19 | 0 | 401 |
| Itaquaquecetuba) | máx. | 730 | 68 | 182 | 419 | 1.493 | 100 | 269 | 3 | 3.105 | 184 | 12 | 13 | 31 | 280 | 18 | 20 | 0 | 510 |
| AM1 Básica 36h | | 586 | 68 | 176 | 419 | 1.493 | 100 | 261 | 2,6 | 3.105 | 116 | 12 | 13 | 31 | 219 | 18 | 19 | 0,03 | 428 |
| Total A1-A3 | | 586 | 68 | 176 | | | | | | 830 | 116 | 12 | 13 | | | | | | 141 |
| A1 | Extração/fabric. insumos | 516 | | | | | | | | 516 | 113 | | | | | | | | 113 |
| | Cimento | 331 | | | | | | | | 331 | 101 | | | | | | | | 101 |
| | Areia de quartzo | 185 | | | | | | | | 185 | 12 | | | | | | | | 12 |
| | Areia artificial | 0 | | | | | | | | 0 | 0 | | | | | | | | 0 |
| A2 | Transporte dos insumos | | | 176 | | | | | | 176 | | | 13 | | | | | | 13 |
| | Cimento | | | 32 | | | | | | 32 | | | 2 | | | | | | 2 |
| | Areia de Quartzo | | | 143 | | | | | | 143 | | | 11 | | | | | | 11 |
| | Areia artificial | | | 0 | | | | | | 0,0 | | | 0 | | | | | | 0 |
| | Aditivos | | | 0,3 | | | | | | 0,3 | | | 0,02 | | | | | | 0,02 |
| | Água | | | 0,4 | | | | | | 0,4 | | | 0,01 | | | | | | 0,01 |
| A3 | Central | 71 | 68 | | | | | | | 139 | 3 | 12 | | | | | | | 15 |
| | Eletricidade | 32 | | | | | | | | 32 | 0,4 | | | | | | | | 0,4 |
| | Óleo diesel | 37 | | | | | | | | 37 | 3 | | | | | | | | 2,7 |
| | Bota fora da argam. residual | 2 | | | | | | | | 2 | 0,1 | | | | | | | | 0,1 |
| | Extr./fabr./transp. resíduo | | 68 | | | | | | | 68 | | 12 | | | | | | | 12 |
| | Produção do cimento | | 32 | | | | | | | 32 | | 10 | | | | | | | 10 |
| | Extração da areia quartzo | | 19 | | | | | | | 19 | | 1 | | | | | | | 1 |
| | Extração da areia artificial | | 0 | | | | | | | 0 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | Água adicionada | | 0 | | | | | | | 0 | | 0,0 | | | | | | | 0 |
| | Transp. cimento | | 3 | | | | | | | 3 | | 0,2 | | | | | | | 0 |
| | Transp. areia quartzo | | 14 | | | | | | | 14 | | 1 | | | | | | | 1 |
| | Transp. areia artificial | | 0 | | | | | | | 0 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | Transp. aditivos | | 0,003 | | | | | | | 0,003 | | 0,0002 | | | | | | | |
| A4 | Transporte argamassa | | | 419 | | | | | | 419 | | | 31 | | | | | | 31 |
| A5 | Obra | | | | 1.493 | 100 | 261 | 2,6 | | 1.857 | | | | | 219 | 18 | 19 | 0,03 | 256 |
| | Aplicação | | | | | | | 2,6 | | 2,6 | | | | | | | | 0,03 | 0,03 |
| | Extr./fabr./argam. residual | | | | 870 | 100 | 261 | | | 1.232 | | | | | 173 | 18 | 19 | | 210 |
| | Transp. argam. residual | | | | 622 | | | | | 622 | | | | | 46 | | | | 46 |

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/100m ²) | | | | | Perdas de argamassa | | | Consumo de água (kg/100m ²) | | | | | |
|---------------------------------|--|----------------|--------|--------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|---|---------|----------------|---------------|-------|--------------|
| | A1-A3 | | A5 | | Total | A3 | | A5 | A1-A3 | | A5 | | Total | |
| | Teórico | Perdas fabric. | Argam. | Perdas fabr. | | m ³ /100m ² | kg/100m ² | | m ³ /100m ² | Teórico | Perdas fabric. | Perdas aplic. | | Perdas fabr. |
| AM2 Estrutural 4MPa 36h | 1.137 | 544 | 1.687 | 807 | 4.175 | 0,06 | 109 | 0,95 | 466 | 43 | 692 | 63 | 0,1 | 1.264 |
| Total A1-A3 | 1.137 | 544 | | | 1.680 | 0,06 | 109 | | 466 | 43 | | | | 509 |
| A1 | | | | | | | | | | | | | | |
| Extração/fabric. insumos | 1.137 | 397 | | | 1.534 | | | | 371 | | | | | 371 |
| Cimento | 115 | 40 | | | 155 | | | | 68 | | | | | 68 |
| Areia de quartzo | 1.021 | 358 | | | 1.379 | | | | 302 | | | | | 302 |
| Areia artificial | 0 | 0 | | | 0 | | | | 0 | | | | | 0 |
| A2 | | | | | | | | | | | | | | |
| Transporte dos insumos | | | | | | | | | | | | | | 0 |
| Central | | 146 | | | 146 | 0,1 | 109 | | 95 | 43 | | | | 138 |
| Eletricidade | | | | | 0 | | | | | | | | | 0,0 |
| Óleo diesel | | | | | 0 | | | | | | | | | 0,0 |
| Água adicionada | | | | | 0 | | | | 69 | | | | | 69 |
| Água de limpeza | | | | | 0 | | | | 26 | | | | | 26 |
| Resíduo óleo lubrificante | | 0,03 | | | 0,03 | | | | | | | | | 0 |
| A3 | | | | | | | | | | | | | | |
| Argamassa residual | | | | | 0 | 0,06 | 109 | | | | | | | 0 |
| Bota fora da argam. residual | | | | | 0 | | | | | | | | | 0 |
| Extr./fabr./transp. resíduo | | 146 | | | 146 | | | | | 43 | | | | 43 |
| Produção do cimento | | 17 | | | 17 | | | | | 7 | | | | 7 |
| Extração da areia quartzo | | 130 | | | 130 | | | | | 28 | | | | 28 |
| Extração da areia artificial | | 0 | | | 0 | | | | | 0 | | | | 0 |
| Água adicionada | | | | | 0 | | | | | 7 | | | | 7 |
| A4 | | | | | | | | | | | | | | |
| Transporte argamassa | | | | | | | | | | | | | | |
| A5 | | | | | | | | | | | | | | |
| Obra | | | 1.687 | 807 | 2.494 | | | 0,95 | | | 692 | 63 | 0,1 | 755 |
| Aplicação | | | 1.687 | 807 | 2.494 | | | 0,95 | | | | | 0,1 | 0,1 |
| Extr./fabr./argam. residual | | | | | | | | | | | 692 | 63 | | 755 |
| Transp. argam. residual | | | | | | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/100m ²) | | | | | | | | | Emissão de CO ₂ (kg/100m ²) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------|--------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------|--------------|------------|------------|------------|-----------|-----|----|------|-------------|------------|--|----|
| | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | | Total | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | | Total | | | | | | | | | | | |
| | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | Aplic. | | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | Aplic. | | | | | | | | | | | | |
| AM2 Estrutural 4MPa 36h | 559 | 68 | 182 | 419 | 1.452 | 100 | 269 | 2,6 | 3.051 | 105 | 12 | 13 | 31 | 201 | 18 | 20 | 0,03 | 401 | | | | | | | | | | | |
| Total A1-A3 | 559 | 68 | 182 | | | | | | 808 | 105 | 12 | 13 | | | | | | 130 | | | | | | | | | | | |
| A1 | Extração/fabric. insumos | | | | | | | | | 488 | 488 | | | | | | | | | 101 | 101 | | | | | | | | |
| | Cimento | | | | | | | | | 290 | 290 | | | | | | | | | 89 | 89 | | | | | | | | |
| | Areia de quartzo | | | | | | | | | 198 | 198 | | | | | | | | | 13 | 13 | | | | | | | | |
| | Areia artificial | | | | | | | | | 0 | 0 | | | | | | | | | 0 | 0 | | | | | | | | |
| A2 | Transporte dos insumos | | | | | | | | | 182 | 182 | | | | | | | | | 13 | 13 | | | | | | | | |
| | Cimento | | | | | | | | | 28 | 28 | | | | | | | | | 2 | 2 | | | | | | | | |
| | Areia de Quartzo | | | | | | | | | 153 | 153 | | | | | | | | | 11 | 11 | | | | | | | | |
| | Areia artificial | | | | | | | | | 0,0 | 0,0 | | | | | | | | | 0 | 0 | | | | | | | | |
| | Aditivos | | | | | | | | | 0,3 | 0,3 | | | | | | | | | 0,02 | 0,02 | | | | | | | | |
| | Água | | | | | | | | | 0,3 | 0,3 | | | | | | | | | 0,00 | 0,00 | | | | | | | | |
| A3 | Central | | | | | | | | | 71 | 68 | | | | | | | | 139 | 3 | 12 | 15 | | | | | | | |
| | Eletricidade | | | | | | | | | 32 | 32 | | | | | | | | | 0,4 | 0,4 | | | | | | | | |
| | Óleo diesel | | | | | | | | | 37 | 37 | | | | | | | | | 3 | 2,7 | | | | | | | | |
| | Bota fora da argam. residual | | | | | | | | | 2 | 2 | | | | | | | | | 0,1 | 0,1 | | | | | | | | |
| | Extr./fabr./transp. resíduo | | | | | | | | | | 68 | | | | | | | | 68 | 12 | 12 | | | | | | | | |
| | Produção do cimento | | | | | | | | | | 32 | | | | | | | | 32 | 10 | 10 | | | | | | | | |
| | Extração da areia quartzo | | | | | | | | | | 19 | | | | | | | | 19 | 1 | 1 | | | | | | | | |
| | Extração da areia artificial | | | | | | | | | | 0 | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | |
| | Água adicionada | | | | | | | | | | 0 | | | | | | | | 0 | 0,0 | 0 | | | | | | | | |
| | Transp. cimento | | | | | | | | | | 3 | | | | | | | | 3 | 0,2 | 0 | | | | | | | | |
| | Transp. areia quartzo | | | | | | | | | | 14 | | | | | | | | 14 | 1 | 1 | | | | | | | | |
| | Transp. areia artificial | | | | | | | | | | 0 | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | |
| | Transp. aditivos | | | | | | | | | | 0,003 | | | | | | | | 0,003 | 0,0002 | 0 | | | | | | | | |
| A4 | Transporte argamassa | | | | | | | | | | | | | 419 | | | | | 419 | | | | | 31 | 31 | | | | |
| A5 | Obra | | | | | | | | | | | | | 1.452 | 100 | 269 | 2,6 | 1.824 | | | | | 201 | 18 | 20 | 0,03 | 239 | | |
| | Aplicação | | | | | | | | | | | | | | | | 2,6 | 2,6 | | | | | | | 0,03 | 0,03 | | | |
| | Extr./fabr./argam. residual | | | | | | | | | | | | | 829 | 100 | 269 | | 1.199 | | | | | 155 | 18 | 20 | | 193 | | |
| | Transp. argam. residual | | | | | | | | | | | | | 622 | | | | | 622 | | | | | 46 | | | | | 46 |

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/100m ²) | | | | | Perdas de argamassa | | | Consumo de água (kg/100m ²) | | | | | |
|--------------------------------|--|----------------|--------|--------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|---|---------|----------------|---------------|-------|--------------|
| | A1-A3 | | A5 | | Total | A3 | | A5 | A1-A3 | | A5 | | Total | |
| | Teórico | Perdas fabric. | Argam. | Perdas fabr. | | m ³ /100m ² | kg/100m ² | | m ³ /100m ² | Teórico | Perdas fabric. | Perdas aplic. | | Perdas fabr. |
| AM3 Estrutural 5MPa 36h | 1.137 | 544 | 1.687 | 807 | 4.175 | 0,06 | 109 | 0,95 | 466 | 43 | 692 | 63 | 0,1 | 1.264 |
| Total A1-A3 | 1.137 | 544 | | | 1.680 | 0,06 | 109 | | 466 | 43 | | | | 509 |
| A1 | Extração/fabric. insumos | | | | | | | | 371 | | | | | |
| | Cimento | 115 | 40 | | 155 | | | | 68 | | | | | |
| | Areia de quartzo | 1.021 | 358 | | 1.379 | | | | 302 | | | | | |
| | Areia artificial | 0 | 0 | | 0 | | | | 0 | | | | | |
| A2 | Transporte dos insumos | | | | | | | | 0 | | | | | |
| | Central | 146 | | | 146 | 0,1 | 109 | | 95 | 43 | | | | 138 |
| | Eletricidade | | | | 0 | | | | 0,0 | | | | | |
| | Óleo diesel | | | | 0 | | | | 0,0 | | | | | |
| | Água adicionada | | | | 0 | | | | 69 | | | | | 69 |
| | Água de limpeza | | | | 0 | | | | 26 | | | | | 26 |
| | Resíduo óleo lubrificante | 0,03 | | | 0,03 | | | | 0 | | | | | |
| A3 | Argamassa residual | | | | 0 | 0,06 | 109 | | 0 | | | | | |
| | Bota fora da argam. residual | | | | 0 | | | | 0 | | | | | |
| | Extr./fabr./transp. resíduo | 146 | | | 146 | | | | 43 | | | | | 43 |
| | Produção do cimento | 17 | | | 17 | | | | 7 | | | | | 7 |
| | Extração da areia quartzo | 130 | | | 130 | | | | 28 | | | | | 28 |
| | Extração da areia artificial | 0 | | | 0 | | | | 0 | | | | | 0 |
| | Água adicionada | | | | 0 | | | | 7 | | | | | 7 |
| A4 | Transporte argamassa | | | | | | | | | | | | | |
| | Obra | 1.687 | | 807 | 2.494 | 0,95 | | | 692 | 63 | 0,1 | 755 | | |
| A5 | Aplicação | 1.687 | | 807 | 2.494 | 0,95 | | | | | 0,1 | 0,1 | | |
| | Extr./fabr./argam. residual | | | | | | | | 692 | 63 | 755 | | | |
| | Transp. argam. residual | | | | | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/100m ²) | | | | | | | | | Emissão de CO ₂ (kg/100m ²) | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------|--------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------|-------------|
| | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | | Total | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | | Total |
| | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | Aplic. | | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | Aplic. | |
| AM3 Estrutural 5MPa 36h | 559 | 68 | 182 | 419 | 1.452 | 100 | 269 | 2,6 | 3.051 | 105 | 12 | 13 | 31 | 201 | 18 | 20 | 0,03 | 401 |
| Total A1-A3 | 559 | 68 | 182 | | | | | | 808 | 105 | 12 | 13 | | | | | | 130 |
| A1 | Extração/fabric. insumos | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 488 | | | | | | | | 488 | 101 | | | | | | | | 101 |
| | Cimento | 290 | | | | | | | 290 | 89 | | | | | | | | 89 |
| | Areia de quartzo | 198 | | | | | | | 198 | 13 | | | | | | | | 13 |
| | Areia artificial | 0 | | | | | | | 0 | 0 | | | | | | | | 0 |
| A2 | Transporte dos insumos | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 182 | | | | | | 182 | | | 13 | | | | | | 13 |
| | Cimento | | 28 | | | | | | 28 | | | 2 | | | | | | 2 |
| | Areia de Quartzo | | 153 | | | | | | 153 | | | 11 | | | | | | 11 |
| | Areia artificial | | 0 | | | | | | 0,0 | | | 0 | | | | | | 0 |
| | Aditivos | | 0,3 | | | | | | 0,3 | | | 0,02 | | | | | | 0,02 |
| | Água | | 0,3 | | | | | | 0,3 | | | 0,00 | | | | | | 0,00 |
| A3 | Central | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 71 | 68 | | | | | | | 139 | 3 | 12 | | | | | | | 15 |
| | Eletricidade | 32 | | | | | | | 32 | 0,4 | | | | | | | | 0,4 |
| | Óleo diesel | 37 | | | | | | | 37 | 3 | | | | | | | | 2,7 |
| | Bota fora da argam. residual | 2 | | | | | | | 2 | 0,1 | | | | | | | | 0,1 |
| | Extr./fabr./transp. resíduo | | 68 | | | | | | 68 | | 12 | | | | | | | 12 |
| | Produção do cimento | | 32 | | | | | | 32 | | 10 | | | | | | | 10 |
| | Extração da areia quartzo | | 19 | | | | | | 19 | | 1 | | | | | | | 1 |
| | Extração da areia artificial | | 0 | | | | | | 0 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | Água adicionada | | 0 | | | | | | 0 | | 0,0 | | | | | | | 0 |
| | Transp. cimento | | 3 | | | | | | 3 | | 0,2 | | | | | | | 0 |
| | Transp. areia quartzo | | 14 | | | | | | 14 | | 1 | | | | | | | 1 |
| | Transp. areia artificial | | 0 | | | | | | 0 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | Transp. aditivos | | 0,003 | | | | | | 0,003 | | 0,0002 | | | | | | | 0 |
| A4 | Transporte argamassa | | | 419 | | | | | 419 | | | | 31 | | | | | 31 |
| A5 | Obra | | | | | | | | | | | | | 201 | 18 | 20 | 0,03 | 239 |
| | Aplicação | | | | 1.452 | 100 | 269 | 2,6 | 1.824 | | | | | | | | | 2,6 |
| | Extr./fabr./argam. residual | | | | 829 | 100 | 269 | | 1.199 | | | | | 155 | 18 | 20 | | 193 |
| | Transp. argam. residual | | | | 622 | | | | 622 | | | | | 46 | | | | 46 |

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/100m ²) | | | | | Perdas de argamassa | | | Consumo de água (kg/100m ²) | | | | | |
|------------------------|--|------------------------------|--------|--------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|---|---------|----------------|---------------|--------------|--------------|
| | A1-A3 | | A5 | | Total | A3 | | A5 | A1-A3 | | A5 | | | Total |
| | Teórico | Perdas fabric. | Argam. | Perdas fabr. | | m ³ /100m ² | kg/100m ² | | m ³ /100m ² | Teórico | Perdas fabric. | Perdas aplic. | Perdas fabr. | |
| CA1 Básica 12h | 1.018 | 394 | 1.511 | 584 | 3.508 | 0,02 | 28 | 0,95 | 439 | 12 | 652 | 17 | 0,1 | 1.121 |
| Total A1-A3 | 1.018 | 394 | | | 1.412 | 0,02 | 28 | | 439 | 12 | | | | 451 |
| A1 | Extração/fabric. insumos | | | | 1.374 | | | | 338 | | | | | 338 |
| | | Cimento | | | 164 | | | | 72 | | | | | 72 |
| | | Areia de quartzo | | | 1.210 | | | | 265 | | | | | 265 |
| | | Areia artificial | | | 0 | | | | 0 | | | | | 0 |
| A2 | Transporte dos insumos | | | | | | | | | | | | | 0 |
| | Central | | | | 38 | 0,0 | 28 | | 102 | 12 | | | | 113 |
| | | Eletricidade | | | 0 | | | | | | | | | 0,0 |
| | | Óleo diesel | | | 0 | | | | | | | | | 0,0 |
| | | Água adicionada | | | 0 | | | | 89 | | | | | 89 |
| | | Água de limpeza | | | 0 | | | | 12 | | | | | 12 |
| | | Resíduo óleo lubrificante | | 0,01 | 0,01 | | | | | | | | | 0 |
| A3 | | Argamassa residual | | | 0 | 0,02 | 28 | | | | | | | 0 |
| | | Bota fora da argam. residual | | | 0 | | | | | | | | | 0 |
| | | Extr./fabr./transp. resíduo | | 38 | 38 | | | | | 12 | | | | 12 |
| | | Produção do cimento | | 5 | 5 | | | | | 2 | | | | 2 |
| | | Extração da areia quartzo | | 33 | 33 | | | | | 7 | | | | 7 |
| | | Extração da areia artificial | | 0 | 0 | | | | | 0 | | | | 0 |
| | | Água adicionada | | | 0 | | | | | 2 | | | | 2 |
| A4 | Transporte argamassa | | | | | | | | | | | | | |
| | Obra | | | 1.511 | 584 | 2.096 | | 0,95 | | | 652 | 17 | 0,1 | 670 |
| A5 | Aplicação | | | 1.511 | 584 | 2.096 | | 0,95 | | | | | 0,1 | 0,1 |
| | Extr./fabr./argam. residual | | | | | | | | | | 652 | 17 | | 670 |
| | Transp. argam. residual | | | | | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/100m ²) | | | | | | | | | Emissão de CO ₂ (kg/100m ²) | | | | | | | | |
|------------------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------|--------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------|-------------|
| | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | | Total | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | | Total |
| | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | Aplic. | | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | Aplic. | |
| CA1 Básica 12h | 496 | 18 | 156 | 66 | 835 | 27 | 231 | 2,6 | 1.832 | 114 | 3 | 11 | 5 | 177 | 5 | 17 | 0,03 | 333 |
| Total A1-A3 | 496 | 18 | 156 | | | | | | 670 | 114 | 3 | 11 | | | | | | 129 |
| A1 | Extração/fabric. insumos | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 480 | | | | | | | | 480 | 105 | | | | | | | | 105 |
| | Cimento | 306 | | | | | | | 306 | 94 | | | | | | | | 94 |
| | Areia de quartzo | 173 | | | | | | | 173 | 11 | | | | | | | | 11 |
| | Areia artificial | 0 | | | | | | | 0 | 0 | | | | | | | | 0 |
| A2 | Transporte dos insumos | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 156 | | | | | | 156 | | 11 | | | | | | | 11 |
| | Cimento | | 26 | | | | | | 26 | | 2 | | | | | | | 2 |
| | Areia de Quartzo | | 129 | | | | | | 129 | | 10 | | | | | | | 10 |
| | Areia artificial | | 0 | | | | | | 0,0 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | Aditivos | | 0,1 | | | | | | 0,1 | | 0,01 | | | | | | | 0,01 |
| | Água | | 0,4 | | | | | | 0,4 | | 0,00 | | | | | | | 0,00 |
| A3 | Central | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 17 | 18 | | | | | | 35 | 9 | 3 | | | | | | | 13 |
| | Eletricidade | 5 | | | | | | | 5 | 0,1 | | | | | | | | 0,1 |
| | Óleo diesel | 11 | | | | | | | 11 | 9 | | | | | | | | 9,3 |
| | Bota fora da argam. residual | 1 | | | | | | | 1 | 0,0 | | | | | | | | 0,0 |
| | Extr./fabr./transp. resíduo | | 18 | | | | | | 18 | | 3 | | | | | | | 3 |
| | Produção do cimento | | 9 | | | | | | 9 | | 3 | | | | | | | 3 |
| | Extração da areia quartzo | | 5 | | | | | | 5 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | Extração da areia artificial | | 0 | | | | | | 0 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | Água adicionada | | 0 | | | | | | 0 | | 0,0 | | | | | | | 0 |
| | Transp. cimento | | 1 | | | | | | 1 | | 0,1 | | | | | | | 0 |
| | Transp. areia quartzo | | 4 | | | | | | 4 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | Transp. areia artificial | | 0 | | | | | | 0 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | Transp. aditivos | | 0,010 | | | | | | 0,010 | | 0,0007 | | | | | | | 0 |
| A4 | Transporte argamassa | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 66 | | | | | 66 | | 5 | | | | | | | 5 |
| A5 | Obra | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | 835 | 27 | 231 | 2,6 | 1.096 | | | | 177 | 5 | 17 | 0,03 | | 199 |
| | Aplicação | | | | | | | 2,6 | 2,6 | | | | | | | 0,03 | | 0,03 |
| | Extr./fabr./argam. residual | | | | 737 | 27 | 231 | | 994 | | | | 170 | 5 | 17 | | | 192 |
| | Transp. argam. residual | | | | 99 | | | | 99 | | | | 7 | | | | | 7 |

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/100m ²) | | | | | Perdas de argamassa | | | Consumo de água (kg/100m ²) | | | | | |
|------------------------|--|----------------|--------|--------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|---|---------|----------------|---------------|------------|--------------|
| | A1-A3 | | A5 | | Total | A3 | | A5 | A1-A3 | | A5 | | Total | |
| | Teórico | Perdas fabric. | Argam. | Perdas fabr. | | m ³ /100m ² | kg/100m ² | | m ³ /100m ² | Teórico | Perdas fabric. | Perdas aplic. | | Perdas fabr. |
| CA2 Básica 36h | 1.018 | 394 | 1.511 | 584 | 3.508 | 0,02 | 28 | 0,95 | 438 | 12 | 650 | 17 | 0,1 | 1.118 |
| Total A1-A3 | 1.018 | 394 | | | 1.412 | 0,02 | 28 | | 438 | 12 | | | | 450 |
| A1 | Extração/fabric. insumos | | | | 1.374 | | | | 338 | | | | | 338 |
| | Cimento | 122 | 42 | | 164 | | | | 72 | | | | | 72 |
| | Areia de quartzo | 897 | 314 | | 1.210 | | | | 265 | | | | | 265 |
| | Areia artificial | 0 | 0 | | 0 | | | | 0 | | | | | 0 |
| A2 | Transporte dos insumos | | | | | | | | | | | | | 0 |
| | Central | 38 | | | 38 | 0,0 | 28 | | 100 | 12 | | | | 112 |
| | Eletricidade | | | | 0 | | | | | | | | | 0,0 |
| | Óleo diesel | | | | 0 | | | | | | | | | 0,0 |
| | Água adicionada | | | | 0 | | | | 88 | | | | | 88 |
| | Água de limpeza | | | | 0 | | | | 12 | | | | | 12 |
| | Resíduo óleo lubrificante | 0,01 | | | 0,01 | | | | | | | | | 0 |
| A3 | Argamassa residual | | | | 0 | 0,02 | 28 | | | | | | | 0 |
| | Bota fora da argam. residual | | | | 0 | | | | | | | | | 0 |
| | Extr./fabr./transp. resíduo | 38 | | | 38 | | | | 12 | | | | | 12 |
| | Produção do cimento | 5 | | | 5 | | | | 2 | | | | | 2 |
| | Extração da areia quartzo | 33 | | | 33 | | | | 7 | | | | | 7 |
| | Extração da areia artificial | 0 | | | 0 | | | | 0 | | | | | 0 |
| | Água adicionada | | | | 0 | | | | 2 | | | | | 2 |
| A4 | Transporte argamassa | | | | | | | | | | | | | |
| | Obra | 1.511 | | 584 | 2.096 | 0,95 | | | 650 | | 17 | 0,1 | 668 | |
| A5 | Aplicação | 1.511 | | 584 | 2.096 | 0,95 | | | | | | 0,1 | 0,1 | |
| | Extr./fabr./argam. residual | | | | | | | | 650 | | 17 | | 668 | |
| | Transp. argam. residual | | | | | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/100m ²) | | | | | | | | | Emissão de CO ₂ (kg/100m ²) | | | | | | | | | | |
|------------------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------|--------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------|------------|--|------------|
| | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | | Total | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | | Total | | |
| | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | Aplic. | | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | Aplic. | | | |
| CA2 Básica 36h | 496 | 18 | 156 | 66 | 835 | 27 | 231 | 2,6 | 1.833 | 114 | 3 | 12 | 5 | 177 | 5 | 17 | 0,03 | 333 | | |
| Total A1-A3 | 496 | 18 | 156 | | | | | | 671 | 114 | 3 | 12 | | | | | | 129 | | |
| A1 | Extração/fabric. insumos | | | | | | | | | 480 | 105 | | | | | | | | | 105 |
| | Cimento | | | | | | | | | 306 | 94 | | | | | | | | | 94 |
| | Areia de quartzo | | | | | | | | | 173 | 11 | | | | | | | | | 11 |
| | Areia artificial | | | | | | | | | 0 | 0 | | | | | | | | | 0 |
| A2 | Transporte dos insumos | | | | | | | | | 156 | 12 | | | | | | | | | 12 |
| | Cimento | | | | | | | | | 26 | 2 | | | | | | | | | 2 |
| | Areia de Quartzo | | | | | | | | | 129 | 10 | | | | | | | | | 10 |
| | Areia artificial | | | | | | | | | 0,0 | 0 | | | | | | | | | 0 |
| | Aditivos | | | | | | | | | 0,5 | 0,04 | | | | | | | | | 0,04 |
| | Água | | | | | | | | | 0,4 | 0,00 | | | | | | | | | 0,00 |
| A3 | Central | | | | | | | | | 35 | 13 | | | | | | | | | 13 |
| | Eletricidade | | | | | | | | | 5 | 0,1 | | | | | | | | | 0,1 |
| | Óleo diesel | | | | | | | | | 11 | 9 | | | | | | | | | 9,3 |
| | Bota fora da argam. residual | | | | | | | | | 1 | 0,0 | | | | | | | | | 0,0 |
| | Extr./fabr./transp. resíduo | | | | | | | | | 18 | 3 | | | | | | | | | 3 |
| | Produção do cimento | | | | | | | | | 9 | 3 | | | | | | | | | 3 |
| | Extração da areia quartzo | | | | | | | | | 5 | 0 | | | | | | | | | 0 |
| | Extração da areia artificial | | | | | | | | | 0 | 0 | | | | | | | | | 0 |
| | Água adicionada | | | | | | | | | 0 | 0,0 | | | | | | | | | 0 |
| | Transp. cimento | | | | | | | | | 1 | 0,1 | | | | | | | | | 0 |
| | Transp. areia quartzo | | | | | | | | | 4 | 0 | | | | | | | | | 0 |
| | Transp. areia artificial | | | | | | | | | 0 | 0 | | | | | | | | | 0 |
| | Transp. aditivos | | | | | | | | | 0,010 | 0,0007 | | | | | | | | | 0 |
| A4 | Transporte argamassa | | | | | | | | | 66 | 5 | | | | | | | | | 5 |
| A5 | Obra | | | | | | | | | 835 | 177 | | | | | | | | | 199 |
| | Aplicação | | | | | | | | | 2,6 | 0,03 | | | | | | | | | 0,03 |
| | Extr./fabr./argam. residual | | | | | | | | | 737 | 170 | | | | | | | | | 192 |
| | Transp. argam. residual | | | | | | | | | 99 | 7 | | | | | | | | | 7 |

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/100m ²) | | | | | Perdas de argamassa | | | Consumo de água (kg/100m ²) | | | | | |
|------------------------|--|----------------|--------|--------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|---|---------|----------------|---------------|-------|--------------|
| | A1-A3 | | A5 | | Total | A3 | | A5 | A1-A3 | | A5 | | Total | |
| | Teórico | Perdas fabric. | Argam. | Perdas fabr. | | m ³ /100m ² | kg/100m ² | | m ³ /100m ² | Teórico | Perdas fabric. | Perdas aplic. | | Perdas fabr. |
| CA3 Básica 72h | 985 | 382 | 1.462 | 567 | 3.396 | 0,02 | 28 | 0,95 | 425 | 12 | 631 | 17 | 0,1 | 1.085 |
| Total A1-A3 | 985 | 382 | | | 1.367 | 0,02 | 28 | | 425 | 12 | | | | 437 |
| A1 | Extração/fabric. insumos | | | | 1.329 | | | | 330 | | | | | 330 |
| | Cimento | 128 | 44 | | 172 | | | | 76 | | | | | 76 |
| | Areia de quartzo | 857 | 300 | | 1.157 | | | | 254 | | | | | 254 |
| | Areia artificial | 0 | 0 | | 0 | | | | 0 | | | | | 0 |
| A2 | Transporte dos insumos | | | | | | | | | | | | | 0 |
| | Central | | 38 | | 38 | 0,0 | 28 | | 95 | 12 | | | | 107 |
| | Eletricidade | | | | 0 | | | | | | | | | 0,0 |
| | Óleo diesel | | | | 0 | | | | | | | | | 0,0 |
| | Água adicionada | | | | 0 | | | | 83 | | | | | 83 |
| | Água de limpeza | | | | 0 | | | | 12 | | | | | 12 |
| | Resíduo óleo lubrificante | | 0,01 | | 0,01 | | | | | | | | | 0 |
| A3 | Argamassa residual | | | | 0 | 0,02 | 28 | | | | | | | 0 |
| | Bota fora da argam. residual | | | | 0 | | | | | | | | | 0 |
| | Extr./fabr./transp. resíduo | | 38 | | 38 | | | | | 12 | | | | 12 |
| | Produção do cimento | | 5 | | 5 | | | | | 2 | | | | 2 |
| | Extração da areia quartzo | | 33 | | 33 | | | | | 7 | | | | 7 |
| | Extração da areia artificial | | 0 | | 0 | | | | | 0 | | | | 0 |
| | Água adicionada | | | | 0 | | | | | 2 | | | | 2 |
| A4 | Transporte argamassa | | | | | | | | | | | | | |
| | Obra | | 1.462 | 567 | 2.029 | | | | | 631 | 17 | 0,1 | | 648 |
| A5 | Aplicação | | 1.462 | 567 | 2.029 | | | | | | | 0,1 | | 0,1 |
| | Extr./fabr./argam. residual | | | | | | | | | 631 | 17 | | | 648 |
| | Transp. argam. residual | | | | | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/100m ²) | | | | | | | | | Emissão de CO ₂ (kg/100m ²) | | | | | | | | |
|------------------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------|--------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------|-------------|
| | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | | Total | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | | Total |
| | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | Aplic. | | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | Aplic. | |
| CA3 Básica 72h | 505 | 18 | 152 | 66 | 848 | 27 | 225 | 2,6 | 1.844 | 119 | 3 | 11 | 5 | 183 | 5 | 17 | 0,03 | 343 |
| Total A1-A3 | 505 | 18 | 152 | | | | | | 675 | 119 | 3 | 11 | | | | | | 133 |
| A1 | Extração/fabric. insumos | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 488 | | | | | | | | 488 | 109 | | | | | | | | 109 |
| | Cimento | 323 | | | | | | | 323 | 99 | | | | | | | | 99 |
| | Areia de quartzo | 166 | | | | | | | 166 | 11 | | | | | | | | 11 |
| | Areia artificial | 0 | | | | | | | 0 | 0 | | | | | | | | 0 |
| A2 | Transporte dos insumos | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 152 | | | | | | 152 | | 11 | | | | | | | 11 |
| | Cimento | | 28 | | | | | | 28 | | 2 | | | | | | | 2 |
| | Areia de Quartzo | | 123 | | | | | | 123 | | 9 | | | | | | | 9 |
| | Areia artificial | | 0 | | | | | | 0,0 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | Aditivos | | 0,7 | | | | | | 0,7 | | 0,06 | | | | | | | 0,06 |
| | Água | | 0,3 | | | | | | 0,3 | | 0,00 | | | | | | | 0,00 |
| A3 | Central | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 17 | 18 | | | | | | | 35 | 9 | 3 | | | | | | | 13 |
| | Eletricidade | 5 | | | | | | | 5 | 0,1 | | | | | | | | 0,1 |
| | Óleo diesel | 11 | | | | | | | 11 | 9 | | | | | | | | 9,3 |
| | Bota fora da argam. residual | 1 | | | | | | | 1 | 0,0 | | | | | | | | 0,0 |
| | Extr./fabr./transp. resíduo | | 18 | | | | | | 18 | | 3 | | | | | | | 3 |
| | Produção do cimento | | 9 | | | | | | 9 | | 3 | | | | | | | 3 |
| | Extração da areia quartzo | | 5 | | | | | | 5 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | Extração da areia artificial | | 0 | | | | | | 0 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | Água adicionada | | 0 | | | | | | 0 | | 0,0 | | | | | | | 0 |
| | Transp. cimento | | 1 | | | | | | 1 | | 0,1 | | | | | | | 0 |
| | Transp. areia quartzo | | 4 | | | | | | 4 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | Transp. areia artificial | | 0 | | | | | | 0 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | Transp. aditivos | | 0,010 | | | | | | 0,010 | | 0,0007 | | | | | | | 0 |
| A4 | Transporte argamassa | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 66 | | | | | 66 | | | | 5 | | | | | 5 |
| A5 | Obra | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | 848 | 27 | 225 | 2,6 | 1.103 | | | | | 183 | 5 | 17 | 0,03 | 205 |
| | Aplicação | | | | | | | 2,6 | 2,6 | | | | | | | | 0,03 | 0,03 |
| | Extr./fabr./argam. residual | | | | 749 | 27 | 225 | | 1.001 | | | | | 176 | 5 | 17 | | 198 |
| | Transp. argam. residual | | | | 99 | | | | 99 | | | | | 7 | | | | 7 |

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/100m ²) | | | | | Perdas de argamassa | | | Consumo de água (kg/100m ²) | | | | | |
|---------------------------|--|----------------|--------|--------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|---|---------|----------------|---------------|-------|--------------|
| | A1-A3 | | A5 | | Total | A3 | | A5 | A1-A3 | | A5 | | Total | |
| | Teórico | Perdas fabric. | Argam. | Perdas fabr. | | m ³ /100m ² | kg/100m ² | | m ³ /100m ² | Teórico | Perdas fabric. | Perdas aplic. | | Perdas fabr. |
| CA4 Não fluida 12h | 1.215 | 459 | 1.804 | 682 | 4.160 | 0,02 | 28 | 0,95 | 495 | 11 | 734 | 17 | 0,1 | 1.257 |
| Total A1-A3 | 1.215 | 459 | | | 1.675 | 0,02 | 28 | | 495 | 11 | | | | 506 |
| A1 | Extração/fabric. insumos | | | | 1.215 | | | | 407 | | | | | 407 |
| | Cimento | 160 | 55 | | 215 | | | | 95 | | | | | 95 |
| | Areia de quartzo | 0 | 0 | | 0 | | | | 0 | | | | | 0 |
| | Areia artificial | 1.055 | 366 | | 1.422 | | | | 312 | | | | | 312 |
| A2 | Transporte dos insumos | | | | | | | | | | | | | 0 |
| | Central | | 38 | | 38 | 0,0 | 28 | | 87 | 11 | | | | 99 |
| | Eletricidade | | | | 0 | | | | | | | | | 0,0 |
| | Óleo diesel | | | | 0 | | | | | | | | | 0,0 |
| | Água adicionada | | | | 0 | | | | 75 | | | | | 75 |
| | Água de limpeza | | | | 0 | | | | 12 | | | | | 12 |
| | Resíduo óleo lubrificante | | 0,01 | | 0,01 | | | | | | | | | 0 |
| A3 | Argamassa residual | | | | 0 | 0,02 | 28 | | | | | | | 0 |
| | Bota fora da argam. residual | | | | 0 | | | | | | | | | 0 |
| | Extr./fabr./transp. resíduo | | 38 | | 38 | | | | | 11 | | | | 11 |
| | Produção do cimento | | 5 | | 5 | | | | | 2 | | | | 2 |
| | Extração da areia quartzo | | 33 | | 33 | | | | | 7 | | | | 7 |
| | Extração da areia artificial | | 0 | | 0 | | | | | 0 | | | | 0 |
| | Água adicionada | | | | 0 | | | | | 2 | | | | 2 |
| A4 | Transporte argamassa | | | | | | | | | | | | | |
| | Obra | | 1.804 | 682 | 2.486 | | | 0,95 | | | 734 | 17 | 0,1 | 751 |
| A5 | Aplicação | | | | 1.804 | | | | | | | | 0,1 | 0,1 |
| | Extr./fabr./argam. residual | | 1.804 | 682 | 2.486 | | | 0,95 | | | 734 | 17 | | 751 |
| | Transp. argam. residual | | | | | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/100m ²) | | | | | | | | | Emissão de CO ₂ (kg/100m ²) | | | | | | | | |
|---------------------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------|--------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------|-------------|
| | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | | Total | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | | Total |
| | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | Aplic. | | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | Aplic. | |
| CA4 Não fluida 12h | 521 | 18 | 149 | 66 | 872 | 27 | 220 | 2,6 | 1.876 | 138 | 3 | 11 | 5 | 211 | 5 | 16 | 0,03 | 389 |
| Total A1-A3 | 521 | 18 | 149 | | | | | | 688 | 138 | 3 | 11 | | | | | | 152 |
| A1 | Extração/fabric. insumos | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 505 | | | | | | | | 505 | 128 | | | | | | | | 128 |
| | 403 | | | | | | | | 403 | 123 | | | | | | | | 123 |
| | 0 | | | | | | | | 0 | 0 | | | | | | | | 0 |
| | 101 | | | | | | | | 101 | 5 | | | | | | | | 5 |
| A2 | Transporte dos insumos | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 149 | | | | | | 149 | | | 11 | | | | | | 11 |
| | | | 34 | | | | | | 34 | | | 3 | | | | | | 3 |
| | | | 0 | | | | | | 0 | | | 0 | | | | | | 0 |
| | | | 114 | | | | | | 113,7 | | | 8 | | | | | | 8 |
| | | | 0,2 | | | | | | 0,2 | | | 0,01 | | | | | | 0,01 |
| | | | 0,3 | | | | | | 0,3 | | | 0,00 | | | | | | 0,00 |
| A3 | Central | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 17 | 18 | | | | | | | 35 | 9 | 3 | | | | | | | 13 |
| | 5 | | | | | | | | 5 | 0,1 | | | | | | | | 0,1 |
| | 11 | | | | | | | | 11 | 9 | | | | | | | | 9,3 |
| | 1 | | | | | | | | 1 | 0,0 | | | | | | | | 0,0 |
| | | 18 | | | | | | | 18 | | 3 | | | | | | | 3 |
| | | 9 | | | | | | | 9 | | 3 | | | | | | | 3 |
| | | 5 | | | | | | | 5 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | | 0 | | | | | | | 0 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | | 0 | | | | | | | 0 | | 0,0 | | | | | | | 0 |
| | | 1 | | | | | | | 1 | | 0,1 | | | | | | | 0 |
| | | 4 | | | | | | | 4 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | | 0 | | | | | | | 0 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | | 0,010 | | | | | | | 0,010 | | 0,0007 | | | | | | | 0 |
| A4 | Transporte argamassa | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 66 | | | | | 66 | | | | 5 | | | | | 5 |
| A5 | Obra | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | 872 | 27 | 220 | 2,6 | 1.122 | | | | | 211 | 5 | 16 | 0,03 | 233 |
| | | | | | | | | 2,6 | 2,6 | | | | | | | | 0,03 | 0,03 |
| | | | | | 774 | 27 | 220 | | 1.021 | | | | | 204 | 5 | 16 | | 225 |
| | | | | | 99 | | | | 99 | | | | | 7 | | | | 7 |

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/100m ²) | | | | | Perdas de argamassa | | | Consumo de água (kg/100m ²) | | | | | |
|--------------------------------|--|----------------|--------|--------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|---|---------|----------------|---------------|-------|--------------|
| | A1-A3 | | A5 | | Total | A3 | | A5 | A1-A3 | | A5 | | Total | |
| | Teórico | Perdas fabric. | Argam. | Perdas fabr. | | m ³ /100m ² | kg/100m ² | | m ³ /100m ² | Teórico | Perdas fabric. | Perdas aplic. | | Perdas fabr. |
| CA5 Estrutural 7MPa 36h | 1.142 | 437 | 1.696 | 648 | 3.923 | 0,02 | 28 | 0,95 | 471 | 11 | 699 | 17 | 0,1 | 1.198 |
| Total A1-A3 | 1.142 | 437 | | | 1.579 | 0,02 | 28 | | 471 | 11 | | | | 482 |
| A1 | Extração/fabric. insumos | | | | 1.542 | | | | 388 | | | | | 388 |
| | Cimento | 166 | 58 | | 224 | | | | 99 | | | | | 99 |
| | Areia de quartzo | 976 | 342 | | 1.318 | | | | 289 | | | | | 289 |
| | Areia artificial | 0 | 0 | | 0 | | | | 0 | | | | | 0 |
| A2 | Transporte dos insumos | | | | | | | | | | | | | 0 |
| | Central | | 38 | | 38 | 0,0 | 28 | | 83 | 11 | | | | 94 |
| | Eletricidade | | | | 0 | | | | | | | | | 0,0 |
| | Óleo diesel | | | | 0 | | | | | | | | | 0,0 |
| | Água adicionada | | | | 0 | | | | 71 | | | | | 71 |
| | Água de limpeza | | | | 0 | | | | 12 | | | | | 12 |
| | Resíduo óleo lubrificante | | 0,01 | | 0,01 | | | | | | | | | 0 |
| A3 | Argamassa residual | | | | 0 | 0,02 | 28 | | | | | | | 0 |
| | Bota fora da argam. residual | | | | 0 | | | | | | | | | 0 |
| | Extr./fabr./transp. resíduo | | 38 | | 38 | | | | | 11 | | | | 11 |
| | Produção do cimento | | 5 | | 5 | | | | | 2 | | | | 2 |
| | Extração da areia quartzo | | 33 | | 33 | | | | | 7 | | | | 7 |
| | Extração da areia artificial | | 0 | | 0 | | | | | 0 | | | | 0 |
| | Água adicionada | | | | 0 | | | | | 2 | | | | 2 |
| A4 | Transporte argamassa | | | | | | | | | | | | | |
| | Obra | | 1.696 | 648 | 2.344 | | | 0,95 | | | 699 | 17 | 0,1 | 716 |
| A5 | Aplicação | | 1.696 | 648 | 2.344 | | | 0,95 | | | | | 0,1 | 0,1 |
| | Extr./fabr./argam. residual | | | | | | | | | 699 | 17 | | | 716 |
| | Transp. argam. residual | | | | | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/100m ²) | | | | | | | | | Emissão de CO ₂ (kg/100m ²) | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------|--------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------|-------------|
| | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | | Total | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | | Total |
| | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | Aplic. | | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | Aplic. | |
| CA5 Estrutural 7MPa 36h | 625 | 18 | 177 | 66 | 1.026 | 27 | 263 | 2,6 | 2.205 | 150 | 3 | 13 | 5 | 230 | 5 | 19 | 0,03 | 425 |
| Total A1-A3 | 625 | 18 | 177 | | | | | | 820 | 150 | 3 | 13 | | | | | | 166 |
| A1 | Extração/fabric. insumos | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 608 | | | | | | | | 608 | 140 | | | | | | | | 140 |
| | 419 | | | | | | | | 419 | 128 | | | | | | | | 128 |
| | 189 | | | | | | | | 189 | 12 | | | | | | | | 12 |
| | 0 | | | | | | | | 0 | 0 | | | | | | | | 0 |
| A2 | Transporte dos insumos | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 177 | | | | | | 177 | | | 13 | | | | | | 13 |
| | | | 36 | | | | | | 36 | | | 3 | | | | | | 3 |
| | | | 141 | | | | | | 141 | | | 10 | | | | | | 10 |
| | | | 0 | | | | | | 0,0 | | | 0 | | | | | | 0 |
| | | | 0,7 | | | | | | 0,7 | | | 0,05 | | | | | | 0,05 |
| | | | 0,3 | | | | | | 0,3 | | | 0,00 | | | | | | 0,00 |
| A3 | Central | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 17 | 18 | | | | | | | 35 | 9 | 3 | | | | | | | 13 |
| | 5 | | | | | | | | 5 | 0,1 | | | | | | | | 0,1 |
| | 11 | | | | | | | | 11 | 9 | | | | | | | | 9,3 |
| | 1 | | | | | | | | 1 | 0,0 | | | | | | | | 0,0 |
| | | 18 | | | | | | | 18 | | 3 | | | | | | | 3 |
| | | 9 | | | | | | | 9 | | 3 | | | | | | | 3 |
| | | 5 | | | | | | | 5 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | | 0 | | | | | | | 0 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | | 0 | | | | | | | 0 | | 0,0 | | | | | | | 0 |
| | | 1 | | | | | | | 1 | | 0,1 | | | | | | | 0 |
| | | 4 | | | | | | | 4 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | | 0 | | | | | | | 0 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | | 0,010 | | | | | | | 0,010 | | 0,0007 | | | | | | | 0 |
| A4 | Transporte argamassa | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 66 | | | | | 66 | | | | 5 | | | | | 5 |
| A5 | Obra | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | 1.026 | 27 | 263 | 2,6 | 1.318 | | | | | 230 | 5 | 19 | 0,03 | 254 |
| | Aplicação | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 2,6 | 2,6 | | | | | | | | 0,03 | 0,03 |
| | | | | | 927 | 27 | 263 | | 1.217 | | | | | 222 | 5 | 19 | | 247 |
| | | | | | 99 | | | | 99 | | | | | 7 | | | | 7 |

| Argamassa estabilizada | Recursos sólidos (kg/100m ²) | | | | | Perdas de argamassa | | | Consumo de água (kg/100m ²) | | | | | |
|---------------------------------|--|----------------|--------|--------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|---|---------|----------------|---------------|------------|--------------|
| | A1-A3 | | A5 | | Total | A3 | | A5 | A1-A3 | | A5 | | Total | |
| | Teórico | Perdas fabric. | Argam. | Perdas fabr. | | m ³ /100m ² | kg/100m ² | | m ³ /100m ² | Teórico | Perdas fabric. | Perdas aplic. | | Perdas fabr. |
| CA6 Estrutural 14MPa 36h | 1.148 | 438 | 1.703 | 651 | 3.940 | 0,02 | 28 | 0,95 | 487 | 11 | 723 | 17 | 0,1 | 1.239 |
| Total A1-A3 | 1.148 | 438 | | | 1.586 | 0,02 | 28 | | 487 | 11 | | | | 499 |
| A1 | Extração/fabric. insumos | | | | 1.548 | | | | 403 | | | | | 403 |
| | Cimento | | | | 284 | | | | 125 | | | | | 125 |
| | Areia de quartzo | | | | 1.264 | | | | 277 | | | | | 277 |
| | Areia artificial | | | | 0 | | | | 0 | | | | | 0 |
| A2 | Transporte dos insumos | | | | | | | | | | | | | 0 |
| | Central | | | | 38 | 0,0 | 28 | | 85 | 11 | | | | 96 |
| | Eletricidade | | | | 0 | | | | | | | | 0,0 | |
| | Óleo diesel | | | | 0 | | | | | | | | 0,0 | |
| | Água adicionada | | | | 0 | | | | 72 | | | | | 72 |
| | Água de limpeza | | | | 0 | | | | 12 | | | | | 12 |
| | Resíduo óleo lubrificante | | | | 0,01 | | | | | | | | 0 | |
| A3 | Argamassa residual | | | | 0 | 0,02 | 28 | | | | | | 0 | |
| | Bota fora da argam. residual | | | | 0 | | | | | | | | 0 | |
| | Extr./fabr./transp. resíduo | | | | 38 | | | | 11 | | | | | 11 |
| | Produção do cimento | | | | 5 | | | | 2 | | | | | 2 |
| | Extração da areia quartzo | | | | 33 | | | | 7 | | | | | 7 |
| | Extração da areia artificial | | | | 0 | | | | 0 | | | | | 0 |
| | Água adicionada | | | | 0 | | | | 2 | | | | | 2 |
| A4 | Transporte argamassa | | | | | | | | | | | | | |
| | Obra | | 1.703 | 651 | 2.354 | | | 0,95 | 723 | | 17 | 0,1 | 740 | |
| A5 | Aplicação | | 1.703 | 651 | 2.354 | | | 0,95 | | | | 0,1 | 0,1 | |
| | Extr./fabr./argam. residual | | | | | | | | 723 | | 17 | | 740 | |
| | Transp. argam. residual | | | | | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/100m ²) | | | | | | | | | Emissão de CO ₂ (kg/100m ²) | | | | | | | | |
|---------------------------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------------|--------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------|-------------|
| | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | | Total | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | | Total |
| | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | Aplic. | | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | Aplic. | |
| CA6 Estrutural 14MPa 36h | 730 | 18 | 182 | 66 | 1.182 | 27 | 269 | 2,6 | 2.476 | 184 | 3 | 13 | 5 | 280 | 5 | 20 | 0,03 | 510 |
| Total A1-A3 | 730 | 18 | 182 | | | | | | 929 | 184 | 3 | 13 | | | | | | 200 |
| A1 | Extração/fabric. insumos | 713 | | | | | | | 713 | 174 | | | | | | | | 174 |
| | Cimento | 532 | | | | | | | 532 | 163 | | | | | | | | 163 |
| | Areia de quartzo | 181 | | | | | | | 181 | 12 | | | | | | | | 12 |
| | Areia artificial | 0 | | | | | | | 0 | 0 | | | | | | | | 0 |
| A2 | Transporte dos insumos | | | 182 | | | | | 182 | | | 13 | | | | | | 13 |
| | Cimento | | | 45 | | | | | 45 | | | 3 | | | | | | 3 |
| | Areia de Quartzo | | | 135 | | | | | 135 | | | 10 | | | | | | 10 |
| | Areia artificial | | | 0 | | | | | 0,0 | | | 0 | | | | | | 0 |
| | Aditivos | | | 0,9 | | | | | 0,9 | | | 0,07 | | | | | | 0,07 |
| | Água | | | 0,3 | | | | | 0,3 | | | 0,00 | | | | | | 0,00 |
| A3 | Central | 17 | 18 | | | | | | 35 | 9 | 3 | | | | | | | 13 |
| | Eletricidade | 5 | | | | | | | 5 | 0,1 | | | | | | | | 0,1 |
| | Óleo diesel | 11 | | | | | | | 11 | 9 | | | | | | | | 9,3 |
| | Bota fora da argam. residual | 1 | | | | | | | 1 | 0,0 | | | | | | | | 0,0 |
| | Extr./fabr./transp. residuo | | 18 | | | | | | 18 | | 3 | | | | | | | 3 |
| | Produção do cimento | | 9 | | | | | | 9 | | 3 | | | | | | | 3 |
| | Extração da areia quartzo | | 5 | | | | | | 5 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | Extração da areia artificial | | 0 | | | | | | 0 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | Água adicionada | | 0 | | | | | | 0 | | 0,0 | | | | | | | 0 |
| | Transp. cimento | | 1 | | | | | | 1 | | 0,1 | | | | | | | 0 |
| | Transp. areia quartzo | | 4 | | | | | | 4 | | 0 | | | | | | | 0 |
| Transp. areia artificial | | 0 | | | | | | 0 | | 0 | | | | | | | 0 | |
| Transp. aditivos | | 0,010 | | | | | | 0,010 | | 0,0007 | | | | | | | 0 | |
| A4 | Transporte argamassa | | | 66 | | | | | 66 | | | 5 | | | | | | 5 |
| A5 | Obra | | | | 1.182 | 27 | 269 | 2,6 | 1.480 | | | | 280 | 5 | 20 | 0,03 | | 305 |
| | Aplicação | | | | | | | | 2,6 | | | | | | | 0,03 | | 0,03 |
| | Extr./fabr./argam. residual | | | | 1.083 | 27 | 269 | | 1.379 | | | | 273 | 5 | 20 | | | 298 |
| | Transp. argam. residual | | | | 99 | | | | 99 | | | | 7 | | | | | 7 |

| Argamassa estabilizada | | Recursos sólidos (kg/100m²) | | | | Perdas de argamassa | | | Consumo de água (kg/100m²) | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------|--------|--------------|---------------------|----------|----------|----------------------------|---------|----------------|---------------|--------------|----------|--------------|
| | | A1-A3 | | A5 | | Total | A3 | | A5 | | A1-A3 | | A5 | | Total |
| | | Teórico | Perdas fabric. | Argam. | Perdas fabr. | | m³/100m² | kg/100m² | m³/100m² | Teórico | Perdas fabric. | Perdas aplic. | Perdas fabr. | Aplic. | |
| CA7 Estrutural 7MPa 72h | | 1.142 | 437 | 1.696 | 648 | 3.923 | 0,02 | 28 | 0,95 | 471 | 11 | 698 | 17 | 0,1 | 1.197 |
| Total A1-A3 | | 1.142 | 437 | | | 1.579 | 0,02 | 28 | | 471 | 11 | | | | 482 |
| A1 | Extração/fabric. insumos | 1.142 | 399 | | | 1.542 | | | | 388 | | | | | 388 |
| | Cimento | 166 | 58 | | | 224 | | | | 99 | | | | | 99 |
| | Areia de quartzo | 976 | 342 | | | 1.318 | | | | 289 | | | | | 289 |
| | Areia artificial | 0 | 0 | | | 0 | | | | 0 | | | | | 0 |
| A2 | Transporte dos insumos | | | | | | | | | | | | | | 0 |
| A3 | Central | | 38 | | | 38 | 0,0 | 28 | | 83 | 11 | | | | 94 |
| | Eletricidade | | | | | 0 | | | | | | | | | 0,0 |
| | Óleo diesel | | | | | 0 | | | | | | | | | 0,0 |
| | Água adicionada | | | | | 0 | | | | 70 | | | | | 70 |
| | Água de limpeza | | | | | 0 | | | | 12 | | | | | 12 |
| | Resíduo óleo lubrificante | | 0,01 | | | 0,01 | | | | | | | | | 0 |
| | Argamassa residual | | | | | 0 | 0,02 | 28 | | | | | | | 0 |
| | Bota fora da argam. residual | | | | | 0 | | | | | | | | | 0 |
| | Extr./fabr./transp. resíduo | | 38 | | | 38 | | | | | 11 | | | | 11 |
| | Produção do cimento | | 5 | | | 5 | | | | | 2 | | | | 2 |
| | Extração da areia quartzo | | 33 | | | 33 | | | | | 7 | | | | 7 |
| Extração da areia artificial | | 0 | | | 0 | | | | | 0 | | | | 0 | |
| Água adicionada | | | | | 0 | | | | | 2 | | | | 2 | |
| A4 | Transporte argamassa | | | | | | | | | | | | | | |
| A5 | Obra | | | 1.696 | 648 | 2.344 | | | 0,95 | | | 698 | 17 | 0,1 | 715 |
| | Aplicação | | | 1.696 | 648 | 2.344 | | | 0,95 | | | | | 0,1 | 0,1 |
| | Extr./fabr./argam. residual | | | | | | | | | | 698 | 17 | | | 715 |
| | Transp. argam. residual | | | | | | | | | | | | | | |

| Argamassa estabilizada | Consumo de energia (MJ/100m ²) | | | | | | | | | Emissão de CO ₂ (kg/100m ²) | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------|--------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|-------|-------------|
| | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | | Total | A1-A3 | | | A4 | A5 | | | Total | |
| | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | Aplic. | | Teórico | Perdas fabric. | Transp. insumo | Transp. argam. | Perdas aplic. | Perdas fabric. | Transp. insumo | | Aplic. |
| CA7 Estrutural 7MPa 72h | 625 | 18 | 178 | 66 | 1.026 | 27 | 263 | 2,6 | 2.205 | 150 | 3 | 13 | 5 | 230 | 5 | 19 | 0,03 | 425 |
| Total A1-A3 | 625 | 18 | 178 | | | | | | 820 | 150 | 3 | 13 | | | | | | 166 |
| A1 | Extração/fabric. insumos | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 608 | | | | | | | | 608 | 140 | | | | | | | | 140 |
| | 419 | | | | | | | | 419 | 128 | | | | | | | | 128 |
| | 189 | | | | | | | | 189 | 12 | | | | | | | | 12 |
| | 0 | | | | | | | | 0 | 0 | | | | | | | | 0 |
| A2 | Transporte dos insumos | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 178 | | | | | | 178 | | | 13 | | | | | | 13 |
| | | | 36 | | | | | | 36 | | | 3 | | | | | | 3 |
| | | | 141 | | | | | | 141 | | | 10 | | | | | | 10 |
| | | | 0 | | | | | | 0,0 | | | 0 | | | | | | 0 |
| | | | 0,9 | | | | | | 0,9 | | | 0,06 | | | | | | 0,06 |
| | | | 0,3 | | | | | | 0,3 | | | 0,00 | | | | | | 0,00 |
| A3 | Central | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 17 | 18 | | | | | | | 35 | 9 | 3 | | | | | | | 13 |
| | 5 | | | | | | | | 5 | 0,1 | | | | | | | | 0,1 |
| | 11 | | | | | | | | 11 | 9 | | | | | | | | 9,3 |
| | 1 | | | | | | | | 1 | 0,0 | | | | | | | | 0,0 |
| | | 18 | | | | | | | 18 | | 3 | | | | | | | 3 |
| | | 9 | | | | | | | 9 | | 3 | | | | | | | 3 |
| | | 5 | | | | | | | 5 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | | 0 | | | | | | | 0 | | 0 | | | | | | | 0 |
| | | 0 | | | | | | | 0 | | 0,0 | | | | | | | 0 |
| A4 | Transporte argamassa | | | 66 | | | | | 66 | | | | 5 | | | | | 5 |
| A5 | Obra | | | | 1.026 | 27 | 263 | 2,6 | 1.318 | | | | | 230 | 5 | 19 | 0,03 | 254 |
| | Aplicação | | | | | | | | 2,6 | 2,6 | | | | | | | 0,03 | 0,03 |
| | Extr./fabr./argam. residual | | | | 927 | 27 | 263 | | 1.217 | | | | | 222 | 5 | 19 | | 247 |
| | Transp. argam. residual | | | | 99 | | | | 99 | | | | | 7 | | | | 7 |