



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Escola Politécnica & Escola de Química

Programa de Engenharia Ambiental

LEANDRO SOUZA DA SILVA

**ANÁLISE TÉCNICA, AMBIENTAL E DE CUSTOS DO USO DE PÓ RESIDUAL
DA INDÚSTRIA DE AGREGADOS EM CONCRETOS ESTRUTURAIS, COMO
ALTERNATIVA PARA ESCASSEZ DA AREIA NATURAL**

Rio de Janeiro - RJ

2023



UFRJ

Leandro Souza da Silva

ANÁLISE TÉCNICA, AMBIENTAL E DE CUSTOS DO USO DE PÓ RESIDUAL DA
INDÚSTRIA DE AGREGADOS EM CONCRETOS ESTRUTURAIS, COMO
ALTERNATIVA PARA ESCASSEZ DA AREIA NATURAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Professora Mayara Amario, DSc.

Rio de Janeiro – RJ

2023

S729a Souza da Silva, Leandro
ANÁLISE TÉCNICA, AMBIENTAL E DE CUSTOS DO USO DE
PÓ RESIDUAL DA INDÚSTRIA DE AGREGADOS EM CONCRETOS
ESTRUTURAIS, COMO ALTERNATIVA PARA ESCASSEZ DA AREIA
NATURAL / Leandro Souza da Silva - Rio de Janeiro, 2023.

208 f

Orientadora: Mayara Amario
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Escola Politécnica, Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental, 2023.

1. Concreto estrutural. 2. Pó de Brita. 3. Areia Natural. 4. Viabilidade
Econômica. 5. Viabilidade Ambiental. I. Amario, Mayara, orient. II. Título



ANÁLISE TÉCNICA, AMBIENTAL E DE CUSTOS DO USO DE PÓ RESIDUAL DA
INDÚSTRIA DE AGREGADOS EM CONCRETOS ESTRUTURAIS, COMO
ALTERNATIVA PARA ESCASSEZ DA AREIA NATURAL

Leandro Souza da Silva

Orientadora: Professora Mayara Amario, DSc.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovado pela Banca:

Assinatura manuscrita de Assed Naked Haddad.

Prof. Assed Naked Haddad, D.Sc, UFRJ

Assinatura manuscrita de Carina M. Stolz.

Prof. Carina Mariane Stolz, D.Sc, UFRJ

Assinatura manuscrita de Carlos Alberto Pereira Soares.

Prof. Carlos Alberto Pereira Soares, D.Sc, UFF

Rio de Janeiro

2023

Obrigado aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Segundo São Tomás de Aquino, teólogo e filósofo italiano da Idade Média, um dos precursores do método ocidental de pensamento crítico e racional e aliado a fé cristã, a ética, a metafísica e a teoria política, a gratidão se apresenta em três níveis, o do reconhecimento, a do agradecimento em si e o nível do comprometimento com o objeto de estudo e com as pessoas. Diante disto, tem-se que a presente dissertação representa-se como sendo um reconhecimento pessoal e profissional, apinhado de agradecimentos e de comprometimento tanto com os familiares como com a sociedade. Logo frente a mais uma importante etapa concluída, algumas pessoas foram fundamentais para a realização desse trabalho.

Em primeiro lugar, agradeço a minha mãe (Natividade) e ao meu pai (Rubenilson) por todos os conselhos dados nos momentos necessários e pelo apoio aos meus estudos, apoio este fundamental para minha formação acadêmica, agradecimentos, também, por toda a orientação, dedicação e formação de caráter, uma vez que a integridade vem primeiro que o currículo, segundo Dee Ward Hock¹. Agradeço, também, a Luize, minha parceira, pela compreensão quanto ao desafio do projeto proposto.

Agradecimentos especiais: ao professor Assed Haddad pelos conhecimentos repassados das matérias lecionadas, em especial em Metodologia Científica e Estatística, nunca imaginei que essas matérias poderiam ter uma ótica completamente diferente do convencional, noções essenciais para a consecução do mestrado e dessa dissertação; a professora Carina Stolz pelo apoio e revisão técnica do conteúdo do artigo decorrente dessa dissertação e ao meu amigo, gerente, líder e chefe, Fabiano Batista, pelo suporte e incentivo à esta pós-graduação e gratidão pelas missões cumpridas.

E por fim, agradeço imensamente a professora e orientadora Mayara Amario pela confiança, orientação, suporte técnico e estímulo concedidos durante todo o mestrado e por ter sido fundamental para que esse trabalho acontecesse. Obrigado por propor novas ideias e pelos detalhes percebidos durante o desenvolvimento de toda a pesquisa, sempre visando ampliar o conhecimento sobre o assunto.

Agradeço ainda, a Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro pelo acolhimento dessa Dissertação.

¹ Norte-americano, estudioso político, empresário e fundador e ex-CEO da Visa Internacional, criador e estudioso da filosofia das organizações e sistemas caórdicos (caos+ordem), descrevendo que os sistemas e organizações da sociedade civil são caóticos e ordenados ao mesmo tempo. Autor das importantes obras *Birth of the Chaordic Age* (2000) e *One from Many: VISA and the Rise of Chaordic Organization* (2005)

*“Não vim até aqui pra desistir agora
Entendo você se você quiser ir embora
Não vai ser a primeira vez nas últimas 24 horas
Mas eu não vim até aqui pra desistir agora*

*Minhas raízes estão no ar
Minha casa é qualquer lugar
Se depender de mim, eu vou até o fim.”*

(Trecho da canção “Até o Fim” - Humberto Gessinger)

RESUMO

SILVA, Leandro Souza da. **Análise Técnica, Ambiental e de Custos do Uso de Pó Residual da Indústria de Agregados em Concretos Estruturais, como Alternativa para Escassez da Areia Natural**. Rio de Janeiro, 2023. Dissertação (Mestrado) — Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

A construção civil é uma indústria em constante expansão e uma das responsáveis pelo desenvolvimento econômico do país, sendo o setor que mais emprega segundo a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) e que a cada R\$ 1 milhão de investimento, em 2019, cria 7,64 empregos diretos e 11,4 indiretos. Porém essa indústria responde por vários impactos ambientais, juntamente com a indústria de agregados (mineração de brita e extração de areia natural), as quais geram desequilíbrios ambientais quando não controlados, e um dos rejeitos que se apresentam nessas indústrias são os resíduos de pó de pedra/brita. Diante disto, se justifica frente ao potencial de uso desse resíduo como possível alternativa na substituição da areia natural na confecção do concreto convencional estrutural tendo em vista a escassez da areia natural a qual estima-se que até 2100, a projeção é de que a areia usada atinja 25 bilhões/ton/ano. Além do mais este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica, ambiental e econômica do uso de pó de pedra/brita em substituição da areia natural em concretos. Teve como metodologia para a avaliação técnica uma revisão sistemática bibliométrica com o uso do *software VOSviewer*, para a avaliação ambiental foi adotado uma revisão de literatura sobre os principais indicadores ambientais da energia incorporada, emissão de dióxido de carbono, matriz de interação ambiental, por meio da Matriz de Leopold, e análise de ciclo de vida por meio da metodologia *Recipe 2016*. E quanto a avaliação econômica adotou como metodologia o uso das bases de dados do SINAPI e SICRO a fim de servir de custos de referência. Como principais resultados, tem-se que o teor ideal máximo admissível de substituição por pó de pedra é de até 50% sem afetar demasiadamente as propriedades e durabilidade do concreto, além disso o concreto com esse resíduo diminui os impactos ambientais em cerca de 34,52% e em expressões monetárias tem-se que o custo do m³ do pó de pedra é cerca de 17,41% menor que o da areia natural. Logo diante da pesquisa foi possível concluir que é viável a fabricação de concreto com a substituição parcial do agregado miúdo natural pelo pó de pedra/brita.

Palavras-chave: Concreto Estrutural. Pó de Brita. Areia Natural. Viabilidade Econômica. Viabilidade Ambiental.

ABSTRACT

SILVA, Leandro Souza da. **Análise Técnica, Ambiental e de Custos do Uso de Pó Residual da Indústria de Agregados em Concretos Estruturais, como Alternativa para Escassez da Areia Natural.** Rio de Janeiro, 2023. Dissertação (Mestrado) — Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Civil construction is a constantly expanding industry and one of those responsible for the country's economic development. According to the Brazilian Chamber of the Construction Industry (CBIC), it is the sector that employs the most people, and for every R\$1 million invested in 2019, it created 7.64 direct jobs and 11.4 indirect jobs. However, this industry is responsible for several environmental impacts, along with the aggregates industry (gravel mining and natural sand extraction), which generate environmental imbalances when left unchecked, and one of the waste products from these industries is stone dust. In view of this, there is justification for using this waste as a possible alternative for replacing natural sand in the manufacture of conventional structural concrete, given the scarcity of natural sand, which is estimated to reach 25 billion tons/year by 2100. Furthermore, the aim of this study was to assess the technical, environmental, and economic viability of using stone dust to replace natural sand in concrete. The methodology used for the technical assessment was a systematic bibliometric review using the VOSviewer software. For the environmental assessment, a literature review was adopted on the main environmental indicators of embodied energy, carbon dioxide emissions, the environmental interaction matrix, using the Leopold Matrix, and life cycle analysis using the Recipe 2016 methodology. As for the economic assessment, the methodology adopted was to use the SINAPI and SICRO databases to serve as reference costs. The main results are that the maximum admissible ideal content of stone dust substitution is up to 50% without affecting the properties and durability of the concrete too much, in addition, concrete with this waste reduces environmental impacts by around 34.52% and, in monetary terms, the cost per m³ of stone dust is around 17.41% less than natural sand. In view of the research, it was possible to conclude that it is feasible to manufacture concrete with the partial replacement of natural fine aggregate with stone dust.

Keywords: Structural Concrete. Stone Dust. Natural Sand. Economic Viability. Environmental Viability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fluxograma do Beneficiamento da Extração de Areia	14
Figura 2: Produção de Areia na série histórica de 2010 a 2020 no Brasil.....	16
Figura 3: Evolução do Preço das Matérias Primas	17
Figura 4: Fluxograma da Operação da Lavra de Pedreiras	21
Figura 5: Distribuição das usinas de britagem brasileiras quanto ao porte	24
Figura 6: Aqueduto <i>Pont du Gard</i> e ruínas da Basílica de Constantino.....	36
Figura 7: Fluxograma Principais Métodos de Avaliação de Impactos Ambientais	43
Figura 8: Extrato da matriz de Leopold.....	45
Figura 9: Fluxograma da Metodologia do Estudo	54
Figura 10: Mapa bibliométrico - Input keywords “concrete” and “stone dust”.....	57
Figura 11: Mapa bibliométrico - Input keywords “concrete” and “manufactured sand”.....	57
Figura 12: Artigos científicos publicados entre 2012 e 2022.....	60
Figura 13: Mapa de agrupamento dos resultados da pesquisa das palavras-chave "concrete" e "stone dust", "quarry dust", e "manufactured sand".....	61
Figura 14: Mapa de agrupamento dos resultados da pesquisa das palavras-chave "concrete" e "stone dust", "quarry dust", "manufactured sand" e "replacement sand natural".....	61
Figura 15: Extrato de parte das tabelas de valoração	67
Figura 16: Etapas da ABNT NBR ISO 14040.....	68
Figura 17: Escopo da Análise de Ciclo de Vida do Concreto	69
Figura 18: Resultados do <i>Slump</i> Test para diferentes teores de pó de pedra/brita.....	81
Figura 19: Resultados da Resistência à Compressão para diferentes teores de pó de pedra/brita.....	83
Figura 20: Resultados da Resistência à Flexão para diferentes teores de pó de pedra/brita. ...	84
Figura 21: Resultados da Resistência à Tração para diferentes teores de pó de pedra/brita. ...	85
Figura 22: Resultados da Resistência à Abrasão para diferentes teores de pó de pedra/brita. .	86
Figura 23: Relação entre a absorção de água e a substituição de areia natural por pó de pedra/brita.....	88
Figura 24: EI (%) para concretos de diferentes classes de resistência e teores de pó de pedra/brita.....	95
Figura 25: ECO ₂ (%) para concretos de diferentes classes de resistência e teores de pó de pedra/ brita.....	95
Figura 26: Contribuições por unidade produtiva - concreto reciclado	107

Figura 27: Diagrama Sankey Global Warming 500 anos - Concreto com pó de pedra	111
Figura 28: Mapa das regiões brasileiras com valores médios comparativos.....	115
Figura 29: Mapa Representativo por Estado (R\$/m ³ areia natural e artificial)	116
Figura 30: Custo-benefício em relação ao teor de pó de pedra e a classe de resistência do concreto	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de lavra de areia.....	13
Tabela 2: Classificação de níveis de solicitação de abrasão.....	31
Tabela 3: Classificação da Penetração dos Íons Cloreto	34
Tabela 4: Grupos de palavras-chave de entrada para a revisão atual.	56
Tabela 5: Sistemas de pesquisa adotados	58
Tabela 6: Elementos da Matriz de AIA (adaptada da Matriz de Leopold).....	64
Tabela 7: Ações da Matriz de AIA (adaptada da Matriz de Leopold)	65
Tabela 8: Valoração da Matriz de AIA (adaptada da Matriz de Leopold)	65
Tabela 9: Insumos Previstos	74
Tabela 10: Composição química do pó de pedra/brita (%).	78
Tabela 11: Propriedades físicas do pó de pedra/brita e da areia natural.....	79
Tabela 12: Resumo do teor médio por propriedade do concreto.....	94
Tabela 13: EI e ECO ₂ para misturas de concreto com diferentes teores de substituições.....	96
Tabela 14: Energia incorporada (MJ/kg) por matéria-prima.....	97
Tabela 15: Emissão de CO ₂ (kgCO ₂ /kg) por matéria-prima.	97
Tabela 16: Impactos Ambientais - Aspectos Quantitativas e Qualitativos	99
Tabela 17: Impactos Ambientais por Elemento Natural	99
Tabela 18: Resumo dos resultados da Metodologia Recipe 2016 por Elemento Natural	102
Tabela 19: Comparativo dos indicadores globais aplicando os quatro métodos.....	110
Tabela 20: Resumo dos resultados da Viabilidade Ambiental	112
Tabela 21: Composição de Preços SINAPI para Produção de Concreto Estrutural.....	112
Tabela 22: Levantamento dos Custos por Estado (2019/2023).....	113
Tabela 23: Preços médios da areia natural e pó de pedra/brita	114
Tabela 24: Memória de Cálculo do DMT da areia natural e do pó de pedra/brita.....	118
Tabela 25: Comparativo entre composições de custo unitário por classe de resistência	118
Tabela 26: Redução comparativa em R\$/m ³ por classe de resistência.....	119

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Vantagens e Desvantagens - Método das Matrizes de Interação	44
Quadro 2: Vantagens e Desvantagens - Matriz de Leopold	46
Quadro 3: Metodologia da Dissertação	52
Quadro 4: DQG - Matriz de qualidade de dados da EPA.....	72
Quadro 5: Classes de impactos do estudo	101
Quadro 6: Resultados dos Indicadores método ReCiPe	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A/C	Fator Água/cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AIA	Análise de Impactos Ambientais
AMB	Anuário Minerário Brasileiro
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades Produtoras de Agregados para Construção Civil
ANM	Agência Nacional de Mineração
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
COMMAM/Imperatriz	Conselho Municipal do Meio Ambiente de Imperatriz
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA/RS	Conselho Estadual do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul
CUB	Custo Unitário Básico
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
f_c	Resistência à Compressão do Concreto
f_{c28}	Resistência de Dosagem aos 28 dias
f_{ck}	Resistência Característica a Compressão
f_{ct}	Resistência à Tração Simples no Concreto (direta)
$f_{ct, f}$	Resistência à Tração na Flexão do Concreto
$f_{ct,m}$	Resistência Média do Concreto à Tração
$f_{ct,sp}$	Resistência à Tração Indireta
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IQA	Índice de Qualidade Ambiental
MF	Módulo de Finura
MME	Ministério das Minas e Energia
NBR	Norma Técnica Brasileira
NM	Norma Mercosul
PIB	Produto Interno Bruto

PNM	Plano Nacional de Mineração
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
1,4-DCB eq.	1,4-diclorobenzeno equivalente
Co-60 eq.	Cobalto-60 equivalente
CFC-11-Eq	Clorofluorcarbonetos equivalente
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ eq.	Dióxido de carbono equivalente
Cu eq.	Cobre equivalente
m ² a crop eq.	Metro quadrado de área cultivada equivalente
N eq.	Nitrogênio equivalente
NO _x eq.	Óxidos de nitrogênio equivalente
oil eq.	Óleo equivalente
P eq.	Fósforo equivalente
PM _{2,5} eq.	Material particulado equivalente.
SO ₂ eq.	Dióxido de enxofre equivalente
t.km	Tonelada-quilômetro
SiO ₂	Dióxido de silício
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
TiO ₂	Dióxido de titânio
CaO	Óxido de cálcio
MgO	Óxido de magnésio
Na ₂ O	Óxido de sódio
K ₂ O	Óxido de potássio
P ₂ O ₅	Fosfato
MnO	Óxido de manganês
CaSO ₄	Sulfato de cálcio
SO ₃	Óxido de enxofre

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE QUADROS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	1
1.2 JUSTIFICATIVAS	3
1.3 OBJETIVOS.....	4
1.3.1 Objetivo geral	4
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
2 ASPECTOS GERAIS DA MINERAÇÃO	7
2.1 HISTÓRICO DA MINERAÇÃO NO BRASIL.....	8
2.2 INDÚSTRIA DA EXTRAÇÃO DE AREIA E IMPACTOS AMBIENTAIS	12
2.2.1 Extração e beneficiamento da areia natural	12
2.2.2 Impactos do setor de extração da areia natural	15
2.2.3 Crise da Escassez da Areia Natural	17
2.2.4 Conceituação dos custos de construção	19
2.3 INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO DE ROCHA E IMPACTOS AMBIENTAIS	20
2.3.1 Extração e beneficiamento da brita	21
2.3.2 Impactos do setor de mineração da brita	24
2.4 PÓ DE PEDRA/BRITA	26
3 ASPECTOS DO CONCRETO E DA SUSTENTABILIDADE	28
3.1 PRINCIPAIS CONCEITOS E CLASSIFICAÇÕES	28
3.2 HISTÓRICO DO CONCRETO ESTRUTURAL	35

3.3 CONCRETO COM PÓ DE PEDRA COMO SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL.....	38
3.4 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS	42
3.5 ENERGIA INCORPORADA E EMISSÃO CO ₂	46
3.6 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA	48
3.7 FERRAMENTAS DE ACV E SOFTWARES UTILIZADOS	49
4 METODOLOGIA.....	52
4.1 PARÂMETROS DA REVISÃO SISTEMÁTICA.....	54
4.1.1 Entrada de palavras-chave e coleta de documentos	56
4.1.2 Publicações sobre pó de pedra/brita em concreto por ano.....	59
4.1.3 Concreto reciclado com pó de pedra - Mapa Bibliométrico	60
4.1.4 Extração de informações de pesquisas publicadas sobre pó de pedra/brita para concreto reciclado	63
4.2 PARÂMETROS DA AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS	63
4.2.1 Parâmetros da Matriz de Leopold	64
4.2.2 Parâmetros da EI e ECO₂.....	67
4.2.3 Parâmetros da ACV	68
4.3 PARÂMETROS DA ANÁLISE ECONÔMICA	74
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	78
5.1 COMPARAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS	78
5.2 INFLUÊNCIA DO PÓ DE PEDRA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	81
5.3 INFLUÊNCIA DO PÓ DE PEDRA/BRITA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	82
5.4 TEOR IDEAL DE PÓ DE PEDRA/BRITA EM MISTURAS DE CONCRETO	93
5.5 VIABILIDADE AMBIENTAL DO PÓ DE PEDRA/BRITA NA FABRICAÇÃO DE MISTURA DE CONCRETO	94
5.6 INDICADOR AMBIENTAL RESULTANTE PARA AS MISTURA DE CONCRETO CONTENDO PÓ DE PEDRA/BRITA	111

5.7 VIABILIDADE ECONÔMICA DO PÓ DE PEDRA/BRITA NA FABRICAÇÃO DE MISTURA DE CONCRETO	112
5.7.1 Transporte de agregados da construção.....	116
5.7.2 Simulação econômica das misturas de concreto pesquisadas.....	118
6 CONCLUSÕES.....	121
REFERÊNCIAS	124
APÊNDICE A - LINHA DO TEMPO DA MINERAÇÃO BRASILEIRA	154
APÊNDICE B - IMPACTOS AMBIENTAIS EXTRAÇÃO DE BRITA E AREIA	155
APÊNDICE C – CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS MÉTODOS DE ACV	157
APÊNDICE D – RESUMO DOS ESTUDOS PUBLICADOS SOBRE PÓ DE PEDRA/BRITA NO CONCRETO	160
APÊNDICE E – MATRIZ DE LEOPOLD ADAPTADA (SEM DESTINAÇÃO).....	165
APÊNDICE F – MATRIZ DE LEOPOLD ADAPTADA (COM DESTINAÇÃO).....	166
APÊNDICE G – QUANTIDADE, FONTES E INFORMAÇÕES DE QUALIDADE...	167
APÊNDICE H – COMPOSIÇÕES DE CUSTO AUXILIARES.....	169
APÊNDICE I – LEVANTAMENTO DE CUSTO DA AREIA MÉDIA LAVADA E PÓ DE PEDRA/BRITA (SINAPI E SICRO ANO 2019 A 2023).....	174
ANEXO A – CÁLCULOS DO OPENLCA (COM PÓ DE PEDRA/BRITA).....	189
ANEXO B – CÁLCULOS DO OPENLCA (SEM PÓ DE PEDRA/BRITA)	190

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

No Brasil, o setor da indústria da construção civil retorna, após crise mundial de saúde do COVID-19, a um crescimento econômico. Segundo levantamento no Portal Eletrônico do Sistema de Contas Nacionais Trimestrais (SCNT, 2023)², o Produto Interno Bruto (PIB) do setor da construção civil registrou um crescimento de 1,50% no 1º trimestre do ano de 2023, representando um acumulado anual de 5,30%, contra -1,80% no mesmo período em 2019.

Além disso a construção civil é o segmento que mais gera emprego, segundo o Boletim Informativo da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2022), em 2021 a Construção Civil gerou, em todo o Brasil, 244.755 novas vagas de emprego, assim, o número de trabalhadores com carteira assinada no setor cresceu 11,62%, passando de 2,107 milhões em 2020 para 2,351 milhões em 2021.

A indústria da construção civil, em escala mundial, é o setor da economia que consome aproximadamente 32% de recursos não renováveis e renováveis, sendo cerca de 25% da madeira e 40% de todas as matérias-primas, além de consumir 40% da produção total de energia, entre 12 e 16% de toda a água disponível e por emitir 35% do total de CO₂ da atmosfera (DARKO *et al.*, 2017).

Além disso, outro ponto que merece destaque, ainda sob o prisma da construção civil, é o grande consumo de concreto, sendo o material de construção mais utilizado no mundo, perdendo apenas para a água, sendo ainda um grande consumidor de recursos naturais como areia, cascalho e brita, utilizados como agregados (DIMITROU, 2018).

Considerando que estes materiais ocupam aproximadamente 65-80% do volume do concreto (FARAJ *et al.*, 2019; DIMITROU, 2018), sendo a areia, responsável por cerca de 1/3 da massa dos agregados, tem-se que cerca de 3,2 bilhões a 5,0 bilhões de toneladas de areias, principalmente areias naturais de rio, são consumidas não apenas para a fabricação de concreto, mas também para vidro, cerâmica, argamassa, estrada e assim por diante (SHEN *et al.*, 2022; TORRES *et al.*, 2017).

² Sob responsabilidade do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o SNCT é uma plataforma online que apresenta os valores correntes e os índices trimestralmente para o Produto Interno Bruto a preços de mercado, impostos sobre produtos, valores em volume acerca do consumo da sociedade e do governo, formação bruta de capital fixo, variação de estoques, exportações e importações de bens e serviços

Diante do crescente aumento da demanda deste material, as reservas naturais estão ficando cada vez mais insuficientes e essa escassez tem refletido no custo desses agregados e por consequência no custo do metro cúbico do concreto (JAEGER, 2006; ZHANG *et al.*, 2022).

Com isso, a areia tem sido chamada de “o novo ouro”, sendo que se utiliza cerca de 200 toneladas de areia para construção de uma casa, 30.000 toneladas para cada quilômetro de rodovia e impressionantes 12 milhões de toneladas de areia para uma usina nuclear, porém a extração indiscriminada desse novo ouro está destruindo ambientes físicos e biológicos em todo o mundo (BARTON e MINIG, 2013; LUDACER, 2018 *apud* RENTIER e CAMMERAAT, 2022).

Além disso, atualmente os órgãos ambientais estão restringindo cada vez mais a extração de substâncias minerais. Segundo Luan *et al.* (2022), essa restrição da utilização de areia natural e agregados tem levado a problemas como dificuldades de abastecimento, declínio de qualidade e aumento de preços para areia de rio e, por isso, a procura de alternativas torna-se uma questão urgente. Tais restrições, levam a impactos em cascata, incluindo operadores/mineradores que ignoram os limites de licenciamento ou se envolvem em mineração de areia sem permissão, reformulando os preços da areia e afetando as tipologias de infraestrutura, os mercados imobiliários, e prioridades de desenvolvimento (TEJPAL *et al.*, 2014; SINGH e KUMAR, 2018 *apud* MARSCHKE e ROUSSEAU, 2022).

Em contrapartida, há a indústria da mineração de agregados para construção civil que durante o beneficiamento das rochas naturais, estima-se que entre 25% e 30% da produção são transformados em pó, sendo que no Brasil, avalia-se que sejam geradas 240.000 toneladas/ ano de resíduos destas rochas (SANTOS *et al.*, 2012). Alguns estudos utilizam diferentes nomenclaturas para se referir ao pó de pedra/brita, como pó de pedreira, pó de granito, pó de mármore, resíduo/poeira de rocha britada e outros, que é resultado da cominuição de rochas como quartzitos, calcários, gnaisses, granitos, sienitos, basaltos e diabásios (SERNA e RESENDE, 2013; VENKATA, 2021; PALANISAMY *et al.*, 2022). Com isso, logo após o processo de britagem e classificação granulométrica, obtém-se um resíduo que passa completamente pela peneira de 4,75 mm, podendo se enquadrar na faixa granulométrica próxima à da areia natural (VENKATA, 2021; PATEL *et al.*, 2013; VIJAYALAKSHMI *et al.*, 2013; INGALKAR e HARLE, 2017; MUNDRA *et al.*, 2016).

Pelo fato da escassez de areia natural já ser uma preocupação ambiental, chamando atenção, não só dos ambientalistas, mas como também, das indústrias concreteiras que com receio de perder uma das principais matérias primas (a areia natural) para a confecção do

concreto estão buscando uma melhor qualidade associada à produtividade. Surge nesse cenário a utilização do material residual do pó de pedra/brita em substituição ao agregado natural, mostrando-se uma escolha promissora e podendo gerar vantagens com benefícios para as pedreiras, usinas de concreto, ambientalistas e para o consumidor final, provendo vantagens tais como: aproveitamento total das pedreiras, aumentando a vida útil delas; destino adequado ao pó de pedra/brita; menor consumo de cimento na preparação do concreto; menor degradação do meio ambiente e custo final reduzido do concreto (GUPTA *et al.*, 2021; GUPTA *et al.*, 2019; KANKAM *et al.*, 2017; RAY *et al.*, 2022; TAIWO *et al.*, 2022).

Diante desse cenário, há uma necessidade crescente de pesquisas quanto a utilização de pó de pedra/brita como substituto da areia natural na fabricação do concreto, sem reduzir o seu desempenho mecânico e sua durabilidade (GUPTA *et al.*, 2021; MUNDRA *et al.*, 2016; RAY *et al.*, 2022), contribuindo na conservação dos recursos naturais e oferecendo uma solução mais sustentável para as preocupações com o descarte de resíduos (BAMIGBOYE *et al.*, 2022).

1.2 JUSTIFICATIVAS

Portanto, a substituição da areia natural de rio por materiais alternativos tem se tornado uma realidade promissora e o agregado miúdo, utilizado na fabricação do concreto convencional, substituído por pó de pedra/brita mostra ser uma alternativa significativa. O pó de pedra/brita, também conhecido como areia artificial³, pode ser usado como resíduo sólido prontamente disponível como uma alternativa à areia natural em concreto e pode reduzir o custo do material e do custo de construção e pode ajudar a corrigir os problemas ambientais (RAY *et al.*, 2022).

Em geral, os estudos científicos existentes sobre as diferentes proporções de substituição de areia natural por pó de pedra/brita indicam uma área de estudo altamente competitiva e abrangente. E, embora vários estudos publicados explorem a viabilidade de substituir areia por pó de pedra/brita, o número de revisões abrangentes e recentes abordando as propriedades de durabilidade do concreto enquanto avalia os resultados de sustentabilidade permanece limitado. A maioria das publicações tem se concentrado em apresentar várias misturas de concreto com diferentes proporções apenas empiricamente e muitas das vezes repetindo o que outros autores já fizeram, e avaliam certas propriedades mecânicas do concreto

³ A NBR 9935 (ABNT, 2011) define areia artificial como o material pétreo, proveniente de processos de cominuição mecânica de rochas já britadas, com granulometria entre 4,75mm e 150µm. A areia pode ser submetida, ou não, a processos de classificação para a retirada das partículas de dimensões inferiores a 75µm.

sem profundidade, restando tecer considerações técnicas, econômicas e ambientais mais abrangentes.

Além disso, os estudos se concentram principalmente em proporções previamente investigadas por outros autores para validar aspectos locais de mineradoras em regiões específicas, sem considerar uma avaliação mais extensa por meio de uma revisão robusta da literatura sobre a proporção ótima e as características morfológicas de cada material. Por isso, a principal contribuição desta dissertação é, primeiramente, avaliar criticamente o que já foi feito para identificar as lacunas científicas do uso do resíduo de britagem de rochas.

E na sequência fazer uma ampla revisão bibliográfica sistemática das principais tendências de utilização do pó de pedra/brita como agregado reciclado nos últimos dez anos, entre 2012 e 2022, e sua influência nas propriedades do concreto (fresco e endurecido), apresentando uma avaliação dos custo-benefício da mitigação dos impactos ambientais através do seu uso, emissão de CO₂, energia incorporada, Avaliação de Ciclo de Vida e custos de produção. Com base nisso, a fim de verificar os potenciais de substituição da areia natural por pó de pedra/brita e com base na justificativa acima mencionada desenvolve-se abaixo os objetivos desta dissertação.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são os apresentados a seguir.

1.3.1 Objetivo geral

Esta dissertação tem como objetivo realizar uma ampla revisão da literatura com o intuito de analisar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da substituição da areia natural por pó de pedra/brita na mistura do concreto estrutural, abordando as questões críticas de pesquisa:

- a) Quais são as diferenças nas propriedades físicas e químicas dos agregados de pó de pedra/brita em comparação com as da areia natural?
- b) Como o pó de pedra/brita influencia a trabalhabilidade, as propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade do concreto reciclado?
- c) Qual o teor ideal de substituição do agregado miúdo natural por pó de pedra/brita?
- d) A substituição da areia natural pelo pó de pedra/brita pode reduzir os impactos ambientais em termos de energia e emissões?

e) A substituição da areia natural por pó de pedra/brita pode gerar concretos com custo-benefício mais atrativo para o mercado da construção civil?

1.3.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos deste estudo, tem-se:

a) Por se tratar da utilização de um material heterogêneo quanto a sua produção na mineradora, tem-se como primeiro objetivo específico, além de mostrar a viabilidade do uso do pó de pedra/brita em dosagem de concreto convencional, verificar a influência nas propriedades físicas e mecânicas do concreto, e de avaliar as propriedades químicas e físicas em comparação com a areia natural;

b) Tendo em vista o fator compensatório, diminuir o consumo de recurso natural e reutilizar um resíduo industrial, o segundo objetivo específico gira em torno de verificar a redução do impacto ambiental com o uso do pó de pedra/brita;

c) Como terceiro objetivo, verificar a redução do impacto ambiental com o uso do pó de pedra/brita através da Avaliação da Matriz de Impacto Ambiental, Análise de Ciclo de Vida e por meio de indicadores de Energia Incorporada e Emissão de Dióxido de Carbono; e

d) Tendo em vista que a presente dissertação se presta em atender uma demanda do mercado da construção civil, propondo o uso de um concreto alternativo, apresenta-se como quarto objetivo específico o levantamento dos custos dos insumos (areia e pó de pedra/brita) por estado, realização do tratamento dos dados por região geográfica e apresentação comparativa do custo-benefício por meio de composições de custo unitário por m³ da confecção de concreto com no mínimo 20 MPa.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Os elementos textuais citados a seguir compõem parte da estrutura desse trabalho e foram organizados no intuito de oferecer uma perfeita compreensão e entendimento do mesmo, justificando a metodologia aplicada. O trabalho está organizado para ser apresentado em seis partes, assim sintetizado:

Capítulo 1 – Introdução. Apresenta uma síntese do trabalho, o tema, seus objetivos (principais e específicos), justificativa e a estrutura do trabalho aqui apresentada.

Capítulo 2 – Aspectos Gerais da Mineração. Apresenta uma visão geral sobre a mineração no Brasil, breve levantamento histórico da atividade de mineração em solo nacional, a relação da mineração com o desenvolvimento socioeconômico do país e os impactos

ambientais do setor da indústria de agregados para construção. Levantamento e revisão bibliográfica da escassez da areia natural e custos da extração. Levantamento e avaliação do pó residual da brita.

Capítulo 3 – Aspectos do Concreto e da Sustentabilidade. Principais conceitos, classificações e propriedades do concreto. Breve histórico do concreto estrutural. Definição dos concretos sustentáveis, com destaque para o com uso parcial de pó de pedra/brita. Levantamento e classificação dos Impactos Ambientais da Indústria da Mineração de Brita e da Extração de Areia Revisão e levantamentos de ferramentas e indicadores ambientais para avaliar os impactos antes e depois do uso do resíduo na produção do concreto.

Capítulo 4 – Metodologia Científica adotada para a dissertação. Organizado em parâmetros da revisão sistemática, usada para responder as perguntas de cunho técnico desta dissertação, e parâmetros ambientais e econômicos, usada para responder as perguntas de cunho ambiental e de custos, respectivamente. Consta neste capítulo, ainda: realização de uma revisão sistemática da literatura por meio de uma avaliação bibliométrica para responder às perguntas da pesquisa; definição de métodos de avaliação ambiental (matriz de análise de impacto ambiental, emissão de CO₂, energia incorporada e análise de ciclo de vida) e conceituação de custos, insumos, mão de obra e composição de custo unitário, assim como abordagens acerca dos bancos de dados oficiais do Governo para elaboração de orçamentos de obras (SINAPI e SICRO).

Capítulo 5 – Análise dos Resultados. Trata a respeito da análise crítica dos resultados obtidos nos artigos científicos levantados analisando-as de acordo com a bibliografia estudada, avaliando a durabilidade do concreto produzido por meio da relação água/cimento, do teor de absorção de água, das resistências mecânicas, da penetração por íons cloreto, da frente de carbonatação e resistência a ataque ácido. Também se avalia um programa Econômico-Financeiro contendo uma proposta de composição de custos para confecção de concreto estrutural virado com proporção areia natural e pó de pedra/brita. Levantamento, organização e tratamento, por região geopolítica do país, das médias de custos dos estados brasileiros de aquisição de areia natural e pó de pedra/brita. E por fim análise do Programa de Avaliação de Impactos Ambientais. Avaliação dos resultados obtidos com o uso e incorporação do resíduo de britagem na confecção de concreto, levantando a viabilidade ambiental da destinação do pó de pedra/brita.

Capítulo 6 – Conclusão. São apresentadas as principais conclusões acerca do estudo realizado com o objetivo de contribuir para a ampliação do presente estudo.

2 ASPECTOS GERAIS DA MINERAÇÃO

A atividade mineradora é uma atividade importante para o desenvolvimento social, econômico e tecnológico de uma nação, visto que é uma atividade de base da formação da cadeia produtiva de um Estado. Ela propicia a transformação de minérios através o beneficiamento e da transformação em produtos industrializados e sofre aumentos de demanda à medida que as cidades crescem, seja em termos de infraestrutura seja em termos de serviços. Diante disto, percebe-se que a mineração é reconhecida internacionalmente como atividade propulsora do desenvolvimento, tendo grande participação no desenvolvimento econômico de muitas das principais nações do mundo (PINTO, 2006; PINTO, 2012; DIMITRIOU *et al.*, 2018).

A Produção Mineral Brasileira, segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2021), no 4º trimestre de 2021, foi de aproximadamente R\$ 81,5 bilhões com uma média trimestral de R\$ 84,72 bilhões naquele ano contra R\$ 52,22 bilhões em 2020, um crescimento em torno de 60%.

Além da produção interna, o Brasil também responde, segundo o Relatório de Atividades do IBRAM (2021), por cerca de US\$ 36,5 bilhões de dólares no faturamento em exportação mineral em 2020 e por US\$ 58 bilhões em 2021, representando na balança comercial externa brasileira um aumento de 21,5%.

Os minérios das pedras naturais e revestimentos, respondem por 2,30% de participação da matriz de exportação, tendo como principais destinos os Estados Unidos 41,4%; China 29,7%; Itália 7,1%; México 3,8%; Reino Unido 2,7%; Taiwan (Formosa) 2,4%; Colômbia 1,2%; Espanha 1,0%; Alemanha 0,9%; Argentina 0,8% (IBRAM, 2021).

Segundo o Plano Nacional de Mineração⁴ (PNM, 2011) em termos prospectivos, os investimentos, até 2030, para novos empreendimentos e aumento da capacidade produtiva na mineração foram estimados em US\$ 90,3 bilhões, subdivididos nos seguintes segmentos:

- a) Minérios ferrosos – US\$ 37,8 bilhões (41,8 %);
- b) Minérios não-ferrosos – US\$ 30,6 bilhões (33,9 %)
- c) Minerais não-metálicos – US\$ 21,9 bilhões (24,3 %); e

⁴ O Plano Nacional de Mineração é elaborado pelo Ministério das Minas e Energia (MME) do Poder Executivo e tem o objetivo de nortear as políticas de médio e longo prazos que possam contribuir para que o setor mineral e servir de alicerce para o desenvolvimento sustentável do País nos próximos 20 anos.

d) Gemas & diamantes e energéticos – US\$ 0,70 bilhão (0,8 %)

Segundo levantamento de 2021 realizado pela Agência Nacional de Mineração (ANM, 2021) e pelo IBRAM (2021), os principais Estados Mineradores são o Pará e Minas Gerais, contribuindo para a geração de 14.869 vagas entre janeiro a novembro de 2021, sendo ao todo 200 mil empregos diretos no setor da mineração.

Porém, mesmo com os avanços tecnológicos que já ocorrem na indústria da mineração, assim como a grande geração de renda e empregos que tal setor gera para o Estado Brasileiro, há de se mencionar que a importância da mineração na economia brasileira possui intrínseca relação com a própria história do Brasil. Por meio da linha do tempo do APÊNDICE A - LINHA DO TEMPO DA MINERAÇÃO BRASILEIRA nota-se que a atividade mineradora marca a trajetória geo e sociopolítica do país transitando desde os anos de 1500 e passando pelos regimes da Colônia, Império, República, Ditadura Militar e chegando aos tempos atuais.

2.1 HISTÓRICO DA MINERAÇÃO NO BRASIL

Por volta do século XVIII se deu uma das primeiras prospecções e exploração de minério que se tem registro, a qual viria a ser o ouro, diamantes e esmeraldas em solo brasileiro sendo que, até aquele momento, apenas havia a atividade comercial do extrativismo de recursos florestais, como o pau-brasil, e o extrativismo agrícola (como o cultivo de cana-de-açúcar) (FERNANDES e ARAÚJO, 2016; VILLAS-BÔAS, 1995), atraindo, além de outros aspectos geopolíticos, a chegada da Corte de Portugal em terras tupiniquins, em 1807/1808 com a expectativa daqueles colonizadores na busca, precipuamente, de metais preciosos (FERNANDES e ARAÚJO, 2016; FIGUEIRÔA, 1994; VILLAS-BÔAS, 1995).

E por mais que o ciclo dos metais preciosos, no período colonial (1500 a 1822), tenha durado apenas cerca de setenta anos (entre 1700 e 1770) e produziu aproximadamente 50% do total da produção mundial (cerca de 1.000 toneladas de ouro e 3 milhões de quilates de pedras preciosas), tem-se que a mineração começou a se demonstrar capaz de transformar o meio, visto que a possibilidade da exploração do ouro gerou uma grande mobilização interna entre as regiões do Brasil e gerou uma corrida de Portugal na exploração de tal metal (FERNANDES e ARAÚJO, 2016; FIGUEIRÔA, 1994).

Como consequência, estradas e ofertas de serviços nos entornos começaram a se desenvolver e a ter os primeiros conglomerados urbanos, mesmo que de maneira precária e, com isso, tem-se o primeiro crescimento urbano ocasionado pela mineração, passando a população colonial dos 300 mil habitantes aos 3,3 milhões de habitantes (FERNANDES e

ARAÚJO, 2016). Entretanto os maquinários e as ferramentas existentes na época Colonial não gozavam de eficiência técnico-produtiva, inexistindo uma linha de produção condizente com as condições ambientais e de segurança do trabalho (FIGUEIRÔA, 1994).

Já no regime do Império que perdurou entre os anos de 1822 e 1888, a economia interna era suprida essencialmente pelo mercado externo, uma vez que a economia interna era basicamente agrícola e tais produtos serviam de troca entre os comércios externos, a qual se trocavam produtos primários por produtos manufaturados (FIGUEIRÔA, 1994; LANG, 2007).

Com isso as minas no período Imperial foram essencialmente patrocinadas por capital privado estrangeiro, a qual proporcionou uma nova onda de exploração mineral com a reativação das minas abandonadas do período colonial sendo que os minerais mais explorados nessa época foram o ferro e o ouro (FERNANDES e ARAÚJO, 2016).

A mineração, então começou a ter um caráter mais profissionalizante, especialmente através da adequada capacitação de profissionais, após a criação das escolas mineralógicas e metalúrgicas e de cursos de engenharia de minas, diminuindo a importação de capital intelectual (FIGUEIRÔA, 1994) e com o melhoramento da tecnologia, como perfuratrizes mais profundas, dinamite, pilões para moer minério, máquina a vapor, esteiras separadoras mecanizadas de separação do ouro, proporcionando uma aceleração da mineração de metais e permitindo a instalação de mineradoras estrangeiras (FERNANDES e ARAÚJO, 2016).

Já na primeira fase da República (1889-1929), houve um crescimento econômico com o aumento na importação de produtos siderúrgicos, entretanto desequilibrando a balança comercial brasileira, com mais importação que exportação, logo, segundo, Fernandes e Araújo (2016), o governo brasileiro à época se sentiu pressionado a buscar outras fontes de minérios, chegando a ser identificado, o que seria futuramente chamado de Quadrilátero Ferrífero⁵. Todavia com a chegada da segunda fase da República (1930-1945) e com o fim da Segunda Guerra Mundial houve uma aceleração do processo de industrialização de muitas nações devido a corrida expansionista dos territórios, e surgimento de novas tecnologias em várias áreas do conhecimento.

⁵ Extensão territorial de aproximadamente 7 mil quilômetros quadrados, no centro sul do Estado de Minas Gerais, o Quadrilátero Ferrífero é uma área vizinha a Belo Horizonte formada pelas cidades de Sabará, Rio Piracicaba, Congonhas, Casa Branca, Itaúna, Itabira, Nova Lima, Santa Bárbara, Mariana, Ouro Preto, a qual serviu de grande área de exploração mineral de metais preciosos e não preciosos nos séculos XVII. Sendo que no centro-sul do estado de Minas Gerais descobriu-se reservas de ferro e manganês onde muitas companhias se instalaram, e foi construída a primeira estrada de ferro da região, a Estrada de Ferro Vitória-Minas, que foi muito utilizada para escoar a produção.

E nesse contexto, de amadurecimento das nações, a sociedade e o governo brasileiro se sentiram pressionados a fundar uma indústria de base em solo nacional, com o intuito de substituir os produtos importados, fortalecendo a economia interna e os laços empresariais, inclusive no setor metalúrgico, siderúrgico e mineral (VILLAS-BÔAS, 1995 e FERNANDES e ARAÚJO, 2016).

Com isso na terceira fase da República (1946-1964), com a saída de Getúlio Vargas e entrada de Juscelino Kubitschek (1956-1961), há uma revolução na infraestrutura do país a qual houve um grande desenvolvimento nacional frente a economia mundial e com isso o Brasil se consolida frente a grandes obras de infraestrutura e de indústrias, grandes hidrelétricas, construção de Brasília, indústria automobilística e uma grande rede de estradas (FERNANDES e ARAÚJO; 2016).

Logo a mineração de agregados para construção civil, durante a República, ganhou status na sociedade, e caracterizou-se como sendo de médio porte e predominantemente voltada para atender ao mercado interno (com a valorização do nacionalismo e moeda interna), havendo uma linha de produção voltada para a exploração mineral de uso imediato e local, como a extração de areia, brita e argila, indispensáveis para a atividade de construção civil e uma outra linha de produção voltada para a os minerais tipos rochas, caulim, talco e magnesita, usados na indústria de transformação. (VILLAS-BÔAS, 1995).

Porém, no período de 1964 a 1985 (Brasil Ditadura), a qual houve a destituição da democracia, prisões, exílios e vários assassinatos (VILLAS-BÔAS, 1995), tem-se que foi registrado muitos indícios de corrupção no governo militar ficando o capital distribuído apenas nos cofres dos militares e compatriotas sendo que o capital estrangeiro respondia por 44% de todos os minerais metálicos extraídos no Brasil, inclusive o norte americano que patrocinava a ditadura no Brasil.

Nesse período, não houve tanto investimento na indústria mineradora dos agregados para construção civil, havendo um certo desinteresse no crescimento do setor por parte do governo militar (LUZ e LINS, 2010; MACHADO e FIGUEIRÔA, 2020), diferentemente do Período da República. Entretanto devido a parte do capital estrangeiro, houve investimentos na área energética e de minerais metálicos, principalmente, com a construção das hidrelétricas de Itaipu e Tucuruí nos anos de 1970, e investimento na energia nuclear, com a construção do complexo de Usinas de Angra dos Reis, na cidade do Rio de Janeiro/RJ, consolidação mundial da Companhia Vale do Rio Doce, investimentos na região Amazônica, com a abertura de grandes empreendimentos de mineração, como a extração de minério de ferro de Carajás/PA,

da bauxita do Vale do Trombeta/PA, da cassiterita de Pitinga/AM, e o manganês da Serra do Navio/AP. (VILLAS-BÔAS, 1995 e FERNANDES e ARAÚJO, 2016).

Com a evolução do conhecimento e com a queda do regime ditatorial, surgiu o Brasil República Nova (1985 a 2023). E considerando os anos entre 1990 e 1997, tem-se que os investimentos no setor de mineração no Mundo cresceram 90%, sendo que só na América Latina o incremento foi de 400% (BEBBINGTON, 2007 *apud* SCOTTO, 2013). Assim foram ampliados os territórios minerados, impulsionados pela dinâmica do processo de globalização, que impôs a necessidade de se obter crescentemente materiais e minerais, rompendo-se o equilíbrio ambiental, modificando-se as relações socioeconômicas e alterando-se, profundamente, o entorno (FERNANDES e ARAUJO, 2016).

No Brasil, esse cenário conflituoso provocado pela atividade mineradora envolveu entre outros: populações tradicionais como índios e quilombolas, para quem a extração mineral, e a de recursos da floresta, se dá pela invasão de seus territórios; populações ribeirinhas; população urbana e rural que habita territórios na área de influência da mineração (FERNANDES e ARAUJO, 2016). E em uma tentativa de fazer face a esses riscos, várias empresas começaram a realizar programas denominados de responsabilidade social (MACHADO e FIGUEIRÔA, 2020; FERNANDES e ARAUJO, 2016), assim como em 1970 surge os movimentos ambientalistas com exigências mais rígidas para abertura de novas minas, adotando-se, então, o Estudo de Impacto Ambiental- EIA e o Relatório de Impacto Ambiental- RIMA também para a mineração (LUZ e LINS, 2010).

Logo o século XXI testemunhou um novo desenvolvimento mineral, depois de mais de vinte anos de baixa demanda, baixa valorização dos bens minerais e desinteresse pela mineração como atividade profissional nos anos 80 (LUZ e LINS, 2010; MACHADO e FIGUEIRÔA, 2020), atribuindo-se a China, principalmente, e a Índia, que apresentavam 40% da população do planeta na época, a principal causa pela grande demanda de matérias primas minerais (LUZ e LINS, 2010).

A área de engenharia mineral brasileira também ressurgiu com maior dinamismo nos últimos anos dos séculos XXI, em que empresas de grande porte, como a Vale do Rio do Doce (atualmente conhecida somente como VALE), iniciaram programas de incentivo à promoção e ao fomento de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) em parcerias com as instituições de C&T (Ciência e Tecnologia) nacionais e FAPs estaduais (Fundações Estaduais de Amparo à Pesquisa) (LUZ e LINS, 2010; MACHADO e FIGUEIRÔA, 2020).

Com isso já nos anos 1990 e 2000, o Brasil já era um dos cinco maiores produtores e exportadores de metais, materiais e minérios do mundo, com 85% de tudo que produz sendo exportado (FERNANDES e ARAUJO, 2016). E nesse cenário, as rochas e os minerais industriais passaram a serem considerados os principais recursos desse novo milênio e com isso, houve o desenvolvimento, nos anos 2000, de processos mais modernos para modificação físico-química dos minerais, visando melhorar a sua funcionalidade e ampliar suas aplicações práticas (LUZ e LINS, 2010).

Em 2017, por meio da descentralização administrativa o Estado Brasileiro criou-se a primeira agência reguladora de mineração, passando a ser um relevante e independente instrumento de atuação do Estado na regulação do mercado (MACHADO, 2020). E por meio da regulação da economia de mineração, como forma de evitar abusos econômicos tanto por parte do particular como por parte do poder público, cria-se a Agência Nacional de Mineração (ANM) que veio a substituir o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) por meio da Lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017.

2.2 INDÚSTRIA DA EXTRAÇÃO DE AREIA E IMPACTOS AMBIENTAIS

Segundo Da e Le Billon (2022), Rentier e Cammeraat (2022) e Bueno (2010), os principais ambientes geológicos onde a areia natural é extraída para a construção civil são:

- a) Leitos de rios;
- b) Planícies costeiras e marinhas;
- c) Planícies e terraços aluviais de fundos de vale;
- d) Coberturas de morros constituídas por formações sedimentares arenosas mais antigas;
- e) Coberturas de morros com mantos de alteração de rochas quartzosas;
- f) Depósitos ribeirinhos e dunas de areias;
- g) Leitos de lagos secos;
- h) Leitos de material vulcânico; e
- i) Terraços de várzeas de sedimentos fluviais.

2.2.1 Extração e beneficiamento da areia natural

No Brasil, a extração ocorre principalmente por dragagem em leitos de rio, correspondendo a 70% do mercado e os outros 30% por meio de outros métodos tais como em cavas secas e cavas imersas de planícies costeiras e fundo de vales, terraços aluviais dentre

outros (RATHORE *et al.*, 2020; QUARESMA, 2009; BUENO (2010) *apud* LUIZ e ALMEIDA, 2012).

No estado de São Paulo, maior produtor de areia do País, essa relação é diferente, pois 45% da areia produzida vem de várzeas, 35% de leitos de rios e o restante de outras fontes. Estima-se que 42 a 55 bilhões de toneladas de areia são extraídas todos os anos em todo o mundo, de pedreiras, dunas de areia, leitos de rios e costas costeiras (PNUMA, 2019).

A areia usada em concreto e em outros materiais de construção vem principalmente de rochas intemperizadas pela água, pois esse processo mantém as arestas nos grãos de areia necessários para a integridade estrutural, enquanto a areia intemperizada pelo vento, por exemplo a do deserto, possui arestas muito lisas comprometendo a solidez da integridade estrutural (BEISER, 2018 *apud* Da e Le Billon, 2022).

Por se tratar de um recurso natural que se encontra depositado no meio ambiente de diferentes formas, existem diversas técnicas para a extração desse mineral. O método mais utilizado é por meio da lavra⁶ que pode ser de 03 (três) formas distintas conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Tipos de lavra de areia

TIPO DE LAVRA	DESCRIÇÃO
Dragagem	Realizada em leitos de rio ou em cavas inundadas a qual a areia em lavra encontra-se abaixo do nível freático. Processo: utilizando-se de dragas, a areia é extraída por sucção e bombeada para fora do leito do rio e armazenada em silos
Desmorte Hidráulico	Realizada em cavas secas e em mantos de alteração de maciços rochosos. Processo: por meio de escavadeiras, carregadeiras e caminhões, remove-se a vegetação e a camada superficial do solo e a extração do material arenoso é realizado até o nível freático onde a partir daqui as dragas passam a aprofundar e alargam a cava e depois ocorre o bombeamento da areia para a usina de beneficiamento.
Método de lavra por tiras	Realizado em depósitos homogêneos e de maior extensão horizontal. Processo: parecido com o desmorte hidráulico, a diferença reside no fato do material estéril (cobertura superficial inicial) não ser transportado para ser depositado em pilhas, mas sim lançado diretamente em áreas adjacentes já lavradas

Fonte: RATHORE *et al.*, 2020; QUARESMA, 2009 - Elaborado pelo Autor (2023)

De maneira geral a areia é comercializada tal qual extraída, porém na maioria das vezes, esta passa por um beneficiamento simples por meio de grelhas fixas, as quais são separadas as frações mais grossas (cascalhos) e alguma sujeiras (folhas, troncos e materiais orgânicos em geral) que são descartadas por não servir para a construção civil (ANEPAC, 2020; ALEGRE, 2020). É realizado, também, uma separação da fração de argila que porventura venha

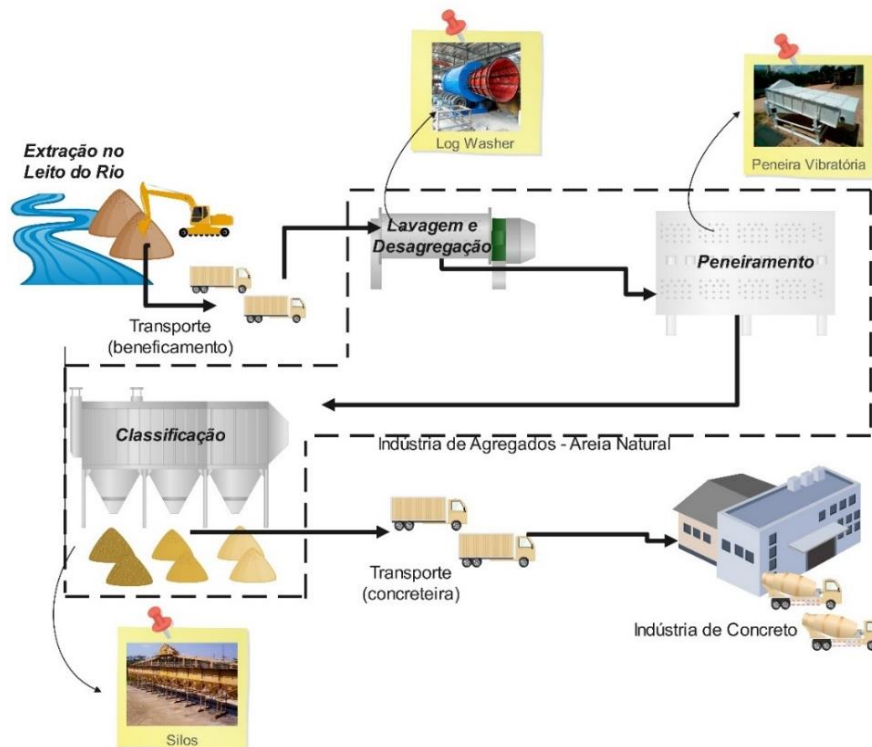
⁶ De acordo com o Código de Mineração, promulgada pelo Decreto-Lei Nº 227, de 28 de fevereiro de 1967, entende-se por “Lavra” o conjunto de operações coordenadas objetivando o aproveitamento industrial da jazida, desde a extração das substâncias minerais úteis que contiver, até o beneficiamento das mesmas (art. 36)

a impregnar os grãos de areia, essa separação é realizada por meio de lavagem e sedimentação a qual é retirado as partículas em suspensão.

Para uso na construção civil a areia deve seguir alguns parâmetros da NBR 7211 (ABNT, 2022) tais como a distribuição granulométrica adequada (podendo ser areia grossa, média, fina e muito fina); a forma dos grãos a qual quanto mais lamelares maior a probabilidade de não adesão a massa cimentícia e a composição mineralógica adequada que, na maioria das vezes a cor da areia reflete a sua composição.

Após a extração há a necessidade do beneficiamento da areia extraída, a fim de conferir-lhe propriedades granulométricas e a fim de manter a pureza da areia extraída e permitir a desagregação de particulados indesejáveis a pega da argamassa/concreto, segundo Chaves e Whitaker (2012), o beneficiamento da areia ocorre em 4 (quatro) etapas, conforme Figura 1.

Figura 1: Fluxograma do Beneficiamento da Extração de Areia



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

A etapa de lavagem e desagregação consiste, por meio de grelhas fixas, separar o material das frações mais grossas, a fim de eliminar cascalhos e material orgânico (folhas, troncos, insetos etc.). Um exemplo de equipamento, muito utilizado nessa etapa é o *long washer* que se trata de um tanque onde giram dois eixos munidos de palhetas que batem a polpa de areia e a agitam intensamente, permitindo haver atrito entre as partículas na superfície do tanque e paletas, permitindo assim a desagregação e removendo a argila em forma de lama (CHAVES

e WHITAKER, 2012). Em algumas fábricas ainda há o processo de deslamagem que ocorre quando os processos de Desagregação e Lavagem não são suficientes para retirar todo o resíduo de lama que fica impregnada no material arenoso.

Enquanto a lavagem ocorre por meio de equipamentos chamados lavadores, o material extraído é colocado nesses tanques juntamente com água que é injetada sob pressão pela parte inferior do tanque, o movimento ascendente da água juntamente com o atrito ocasionado pelas hélices faz com que os materiais mais finos sejam removidos e descarregados e os grãos lavados sejam arrastados pela hélice.

Já a segunda fase é denominada de peneiramento, consiste em uma fase a qual há a aplicação de um conjunto de peneiras vibratórias com o objetivo de separar os grãos por faixas granulométricas. Ressalta-se que a relação entre a frequência e a amplitude do movimento vibratório e a malha de peneiramento, ou seja, conforme diminui o tamanho da malha, aumenta a frequência e diminui a amplitude.

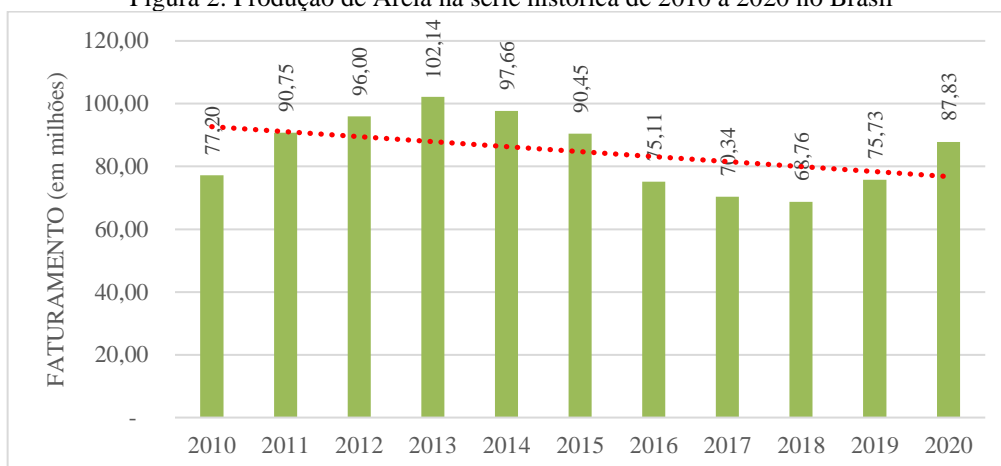
Segundo Chaves e Whitaker (2012), para peneiramentos tão finos como os necessários para a produção de areia, a frequência é muito elevada, exigindo equipamentos de projeto especial e quando a alimentação do peneiramento tem quantidade elevada de finos, é necessário lavá-la sobre a peneira, ou seja, fazer o peneiramento por via úmida. Já a terceira é denominada de classificação, consiste em uma fase a qual ocorre a classificação comercial da areia em fina, média ou grossa por meio de silos e classificadores. Seguido da quarta fase, o armazenamento que é a guarda do material beneficiado a qual fica aguardando para o transporte.

2.2.2 Impactos do setor de extração da areia natural

Segundo Calaes *et al.* (2007) *apud* Silveira (2010), a exploração de agregados é uma das atividades extrativas mais importantes do setor mineral brasileiro devido ao volume produzido de 155 milhões de m³/ano de areia e 107 milhões de m³/ano de brita, pelos empregos gerados e pelo enorme efeito multiplicador que produz na economia.

A produção de areia no Brasil no ano de 2020, segundo dados do Anuário Minerário Brasileiro (AMB 2020) foi de aproximadamente de 88 mil toneladas de areia, sendo uma média anual, desde 2010, girando em torno de 17 mil toneladas, conforme Figura 2.

Figura 2: Produção de Areia na série histórica de 2010 a 2020 no Brasil



Fonte: Anuário Minerário Brasileiro (2020) - Elaborado pelo Autor (2023)

Segundo Alegre (2020), a quantidade de outorgas de Licenciamento e Concessão de Lavra é um dos indicadores da existência de areia em determinada região. Com base nisso e conforme dados do Anuário Mineral Brasileiro da Agência Nacional de Mineração (ANM) em 2020, houve a contabilização de 10.298 processos minerários outorgados, sendo 2.283 de Concessões de Lavra e 8.015 de Requerimentos de Licenciamento. Ainda segundo Alegre (2020) em 2018 houve uma produção de areia por volta de 76.757.270 toneladas, sendo a região Sudeste a maior produtora com 37.686.764 toneladas, seguido das regiões Sul (24.260.356 ton.), Centro-Oeste (7.025.643 ton.), Nordeste (6.289.392 ton.) e Norte (1.495.114 ton.) com um faturamento total de 1,6 bilhões de reais.

Porém, mesmo com esse grande potencial econômico proporcionado pela extração da areia, há de se pontuar os impactos ambientais que tal atividade provoca, tanto os impactos positivos e quanto os negativos da extração em leito de rios, considerando as fases de instalação, operação e desativação.

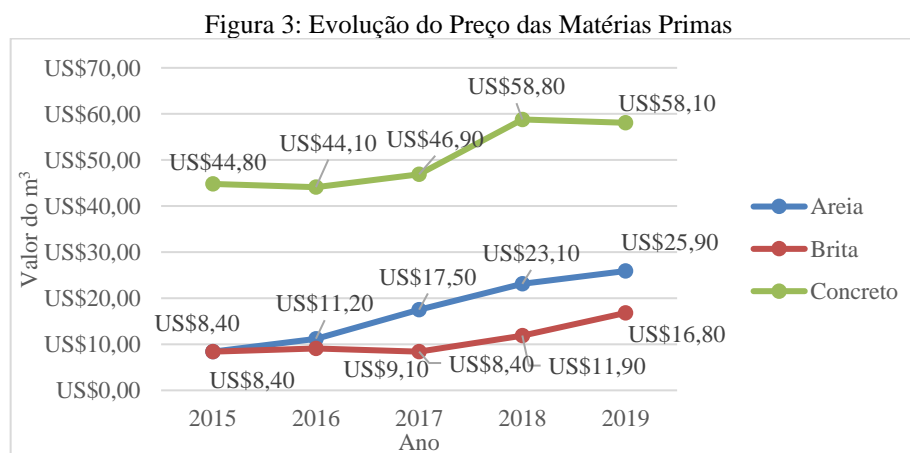
Diante desta constatação, e segundo Asabonga *et al.*, (2016), Da e Le Billon (2022), Rentier e Cammeraat (2022) e Torres *et al.*, (2017), lista-se no APÊNDICE B – IMPACTOS AMBIENTAIS DA EXTRAÇÃO DA BRITA E DA AREIA, alguns desses impactos. Entre eles, tem-se que o impacto da erosão do solo, ocasionada devido a operacionalização do maquinário de extração (dragas, peneiras e esteiras), interfere na velocidade e direção dos cursos d'água dos corpos hídricos e diminui o uso múltiplos dos corpos hídricos e as possibilidades de lazer por parte de turistas e ribeirinhos. Somado a isso há ainda o impacto da diminuição do suporte e resistência do solo, taludes e aterros das regiões ribeirinhas proporcionando a depreciação do patrimônio público e ecológico.

2.2.3 Crise da Escassez da Areia Natural

Segundo Bendixen *et al* (2019), em uma publicação na *Nature Sustainability*, o alto consumo de areia poderá resultar na escassez do agregado e a demanda global por areia pode aumentar em 45% até 2060 e ainda de acordo com os pesquisadores, o crescimento provavelmente será mais significativo em regiões de baixa renda, como a África Ocidental e Oriental, onde mais de 500% da demanda atual de areia para construção é esperada até 2060, seguida pela África Austral (419%), Índia (294%) e áreas do sul da Ásia (269%).

Não obstante a escassez, há de se mencionar ainda quanto a restrição governamental para abertura de novas minas e extrações, o que explicita Jaeger (2006), quanto ao aumento do custo do produto final em especial devido ao aumento das distâncias percorridas de transporte, como cita o pesquisador, em terras no Willamette Valley, no Oregon, Estado Unidos, aumentaria os custos de transporte à medida que os produtores de agregados mudassem para minas mais distantes, somado com a grande demanda e o alto peso dos produtos agregados fariam com que o efeito cumulativo dessa política ficasse ainda mais caro e tal proibição acabaria custando US\$ 10 a 15 milhões por ano para os mineradores de areia e brita, aumentando o valor da entrega incremental de caminhão por milha adicional em 54,28% (de US\$ 0,175 para US\$ 0,27) para a brita e 82,85% (US\$ 0,175 para US\$ 0,32) para a areia.

Segundo Zhang *et al* (2022) devido à escassez de areia já enfrentada no mercado ocorre um efeito cascata nos preços das matérias-primas do concreto, como areia de rio, britas e o próprio concreto, sendo na China havendo um aumento do preço do m³ do concreto de US\$ 44,80 (2015), US\$ 44,10 (2016), US\$ 46,90 (2017), US\$ 58,80 (2018) e US\$ 58,10 (2019) resultando em um percentual médio de aumento de 7,24%, sendo a média de aumento para a brita 20,87%, conforme Figura 3: Evolução do Preço das Matérias Primas.



Fonte: Zhang *et al*. (2022) – Adaptado pelo Autor (2023)

Quanto a extração da areia natural em leitos de rios, tem-se que estas atividades extrativistas degradam qualquer que seja as espécies de vegetação localizadas próximas às margens dos cursos d'água, áreas essas conhecidas como áreas de preservação permanentes. Conforme menciona, o Código Florestal Brasileiro (2012), por meio da Lei 12.651/12⁷, que considera como áreas de preservação permanentes as florestas e demais formas de vegetações naturais situadas ao longo dos rios ou cursos d'água.

A exemplo dessas restrições governamentais, nacionalmente, tem-se o caso do estado de São Paulo, que segundo Luz e Almeida (2012), extraía-se por muito tempo, a areia do leito do rio Paraíba do Sul, até que veio a proibição dos órgãos ambientais e parte significativa da produção de areia para a construção civil se transferiu para locais mais distantes dos centros urbanos.

Semelhante caso restritivo ocorreu no Estado do Rio Grande do Sul, por meio da Resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA/RS, 2021) n° 442/2021 que atualiza as definições e os critérios técnicos ambientais para os procedimentos de licenciamento ambiental referente às atividades de lavra de areia e/ou cascalho no Estado do Rio Grande do Sul e traz em seu art. 18 e parágrafo único, respectivamente, que a profundidade de extração mineral fica limitada à cota altimétrica relativa ao nível médio da água e fica proibida a extração mineral em barra de sedimentos quando essa se encontrar submersa.

Outras ações governamentais são restritivas, a exemplo da Prefeitura da Cidade de Imperatriz, no estado do Maranhão, que por meio da Resolução do Conselho Municipal do Meio Ambiente (COMMAM/Imperatriz, 2011) n° 01/2011 que regulamenta a extração, armazenamento e transporte de areia e seixo do Rio Tocantins traz em seu art. 2° que a extração de areia e seixo do Rio Tocantins, se dará tão somente no leito do Rio, obedecendo a distância mínima de 100 (cem) metros, de pontes, praias e ilhas, além disso regulamenta que as águas residuárias provenientes dos silos classificatórios ou caixas de areia, deverão sofrer decantação prévia através de filtros e com retorno ao rio através de tubulação suficiente, minimizando os efeitos em seu percurso.

Segundo Alegre (2020) a areia, para manter o seu preço médio atrativo, esta deve ser extraída o mais próximo de seu local de consumo uma vez que passar de 50 km (cinquenta quilômetros) já encarece o produto e essa medida é o limite de transporte por caminhões em diversos países. Segundo Valverde (2014) em São Paulo, se transporta a mais de 100

⁷ Esta Lei estabelece normas gerais sobre a proteção da vegetação, áreas de Preservação Permanente e as áreas de Reserva Legal; a exploração florestal, o suprimento de matéria-prima florestal, o controle da origem dos produtos florestais e o controle e prevenção dos incêndios florestais.

quilômetros do seu ponto de extração. A areia passa de R\$ 15,00 a R\$ 20,00 para mais de R\$ 60,00 e R\$ 70,00 a tonelada, só por causa do transporte. Segundo Vieira e Rezende (2015) por fatores mercadológicos, em que o valor do transporte corresponde a cerca de 1/3 a 2/3 do preço final do produto, e por isso se torna um fator mercadológico que a produção de areia ocorra próximo aos centros consumidores, caracterizando-se como uma atividade típica das regiões urbanas.

2.2.4 Conceituação dos custos de construção

O custo da areia pode gerar um efeito cascata nos preços da construção civil, uma vez que se trata de um insumo, conforme já mencionado, muito demandado para a produção do concreto. Diante disto, tem-se que os recursos financeiros de uma construção é um requisito fundamental para que qualquer projeto de construção seja concluído dentro do prazo e do orçamento estimado e outros recursos fundamentais da construção incluem-se os materiais, a mão de obra e os maquinários, exercendo efeito significativo no custo de construção (MEMON *et al.*, 2013).

O orçamento de obras também é uma realidade dos setores públicos tendo em vista que os orçamentos de projetos de construção pública geralmente representam uma alta proporção dos orçamentos anuais em muitos países e o orçamento-base de uma licitação tem como objetivo servir de paradigma para a Administração fixar os critérios de aceitabilidade de preços – total e unitários – no edital, sendo a principal referência para a análise das propostas das empresas participantes na fase externa do certame licitatório. (LAI *et al.*, 2008; TCU, 2014).

Logo, nota-se por uma organização programática orçamentária, a qual os departamentos governamentais administram o setor público por meio de ordens de pagamento e política que direcionam a atividade alocada no orçamento anual as outras entidades públicas (estatais ou municipais) as quais incorporam essa ordem política no desenvolvimento da sociedade em infraestrutura, edifícios ou outros serviços necessários (SPARREVIK *et al.*, 2018 e TCU, 2014). Mundialmente, tem-se na União Europeia há a “*Directive 2004/18/EC of the European Parliament and of the Council*”⁸ (FALAGARIO *et al.*, 2012), na Noruega há os *Whites Papers* que são relatórios do governo norueguês que descrevem as ambições políticas em um campo específico ou política futura (SPARREVIK *et al.*, 2018), em Portugal há o Decreto-Lei n.º 18/2008- Código dos Contratos Públicos (DL-Português, 2008) de 29 de janeiro

⁸ DIRECTIVA 2004/18/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 31 de março de 2004 relativa à coordenação dos processos de adjudicação dos contratos de empreitada de obras públicas, dos contratos públicos de fornecimento e dos contratos públicos de serviços.

de 2008 que traz o conceito de preço base⁹ obrigatório aos órgãos públicos (CAMBUNDO, 2018), na Angola há a Lei nº 9/16 de 16 de junho de 2016 que traz o conceito de valor estimado¹⁰ para serviços públicos de contratação de obras e serviços (CAMBUNDO, 2018), na Polônia há instituído além do conceito de valor estimado (semelhante na legislação Angolana) há também o conceito de Termo de Referência que trata de um documento base que é elaborado com os descritivos dos serviços a serem executados assim com as métricas de medição semelhante a um Caderno de Encargos (*ACT of 29 January 2004 Public Procurement Law*¹¹).

No Brasil, no setor público, o custo global de referência¹² de obras e serviços de engenharia da construção civil é regido pelo Decreto nº 7.983 de 8 de abril de 2013 e será obtido a partir das composições dos custos unitários previstas no projeto que integra o edital de licitação, menores ou iguais à mediana de seus correspondentes nos custos unitários de referência do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – SINAPI¹³, sendo que para serviços que englobam itens de infraestrutura de transportes será obtido a partir das composições dos custos unitários previstas no Sistema de Custos Referenciais de Obras – SICRO¹⁴ (BRASIL, 2013).

2.3 INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO DE ROCHA E IMPACTOS AMBIENTAIS

Outro material muito utilizado na construção civil é a brita, e em consonância, tem-se que, desde a Idade Média, o homem tem utilizado muito das rochas mesmo que de forma rudimentar, e com o passar do tempo e com o avanço da tecnologia, cada vez mais passou-se a

⁹ Conforme art. 35 e 47 da DL-Português de 2008, preço base é o montante máximo que a entidade pública adjudicante portuguesa se dispõe a pagar pela execução de todas as prestações que constituem o objeto do contrato e deve ser fundamentada com base em critérios objetivos.

¹⁰ Conforme art. 28, da Lei Angolana, valor estimado da prestação dos serviços é o preço base o qual corresponde aos valores máximos que a entidade pública contratante dispõe a pagar como contrapartida da execução do contratado celebrado com base em pesquisa prévia de mercado.

¹¹ Lei da Polônia que especifica as regras e procedimentos de adjudicação de contratos públicos e medidas de proteção jurídica.

¹² Segundo inciso IV, do art. 2º do Decreto nº 7.983 de 8 de abril de 2013, significa valor resultante do somatório dos custos totais de referência de todos os serviços necessários à plena execução da obra ou serviço de engenharia.

¹³ SINAPI - SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL. Banco de dados composto de séries mensais de custos e índices para o setor da construção, constando séries mensais de salários de mão de obra e preços de materiais, máquinas e equipamentos e serviços da construção. O SINAPI consta no Decreto nº 7.983/2013 como repositório de informações referenciais para obras de infraestrutura de transportes.

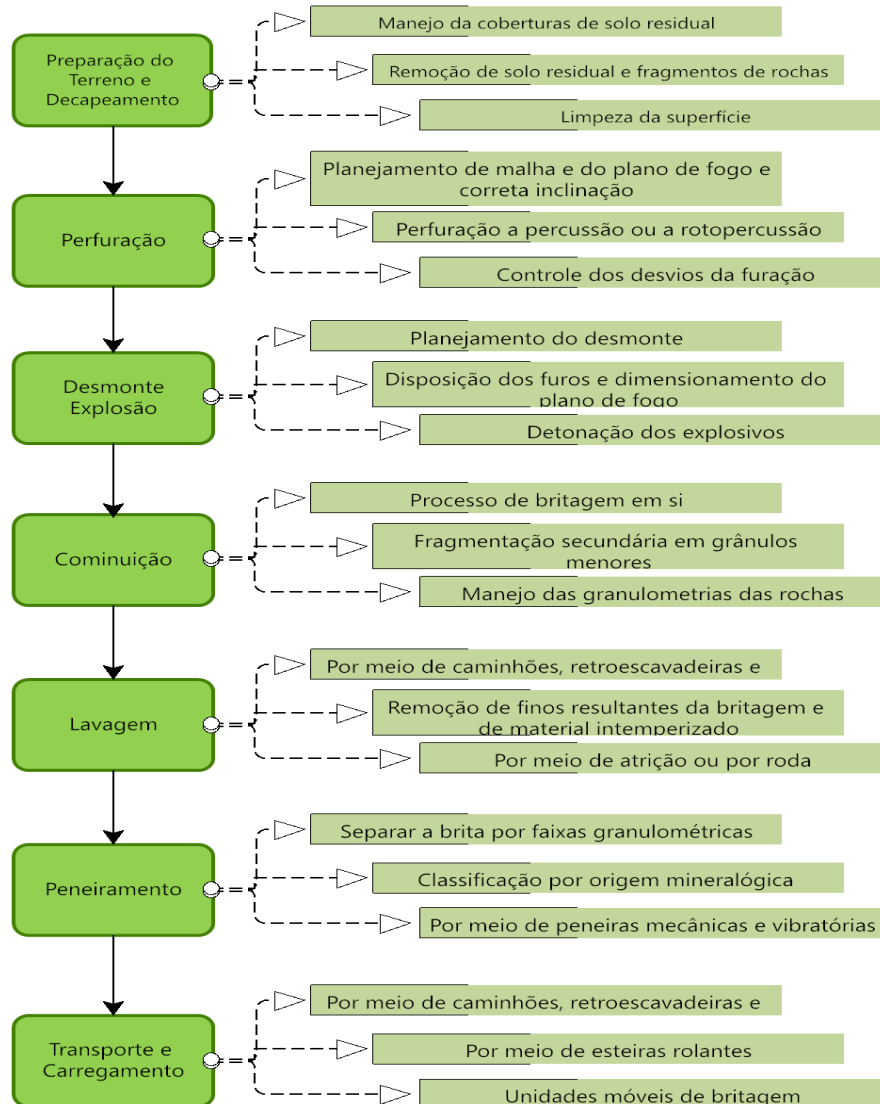
¹⁴ O Sistema de Custos Referenciais de Obras – SICRO aglutina dados técnicos necessários à elaboração de orçamentos de obras e serviços no âmbito do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, disponibilizando custos de referência de serviços e insumos envolvidas na confecção de orçamentos para obras de infraestrutura, tais como para os modais rodoviário, aquaviário e ferroviário, o SICRO consta no Decreto nº 7.983/2013 como repositório de informações referenciais para obras de infraestrutura de transportes.

utilizá-las na construção civil, seja apenas como peça ornamental seja como item estrutural das edificações. Segundo Gupta *et al.* (2019), a indústria da pedra tem sido parte integrante dos vários progressos realizados pela civilização humana e rochas de diferentes tipos têm sido utilizadas como infraestrutura/materiais de construção.

2.3.1 Extração e beneficiamento da brita

Uma unidade industrial para beneficiamento de rocha tem por função principal a produção de um material natural modificado e fragmentado em diferentes tamanhos granulométricos, visando seu uso como agregado na construção civil. Segundo Luiz e Sampaio (2012) e Koppe e Costa (2012), a operação de lavra e conseqüentemente o processo de beneficiamento das rochas é constituído basicamente de 7 (sete) etapas conforme ilustradas no fluxograma da Figura 4.

Figura 4: Fluxograma da Operação da Lavra de Pedreiras



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

A primeira fase é referente a Preparação e Decapeamento do solo sendo a fase em que há a preparação do terreno e remoção de rochas, além de ser a fase em que ocorre a delimitação da área a ser explorada e o desenvolvimento dos horizontes do solo a depender das condições climáticas e de relevo.

Posteriormente, tem-se a fase da Perfuração, nessa fase há o preparo das furações no maciço rochoso para a inserção dos explosivos e pode ser realizada por meio de dois métodos: a percussão e a rotopercussão, sendo que a percussão¹⁵ é o mais utilizado no Brasil (KOPPE e COSTA, 2012).

Durante a perfuração podem ocorrer a não retlineidade da furação devido a não conformidade da calibração do equipamento ou por condições geológicas com isso, tem-se que avaliar os riscos de desvios de furação, visto que nessa fase, segundo, Segura-Salazar e Tavares (2021), que ocorre a maior contribuição para o consumo de diesel, mais de 50% do diesel é demandado por equipamentos como perfuratrizes pneumáticas e carregadeiras de rodas, sendo a fase responsável por mais de um quarto do total de emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Em ato contínuo, a terceira fase é a do Desmonte com Explosivos, nessa fase ocorre o desmonte dos maciços rochosos com o uso de explosivos. Nessa fase ocorre o planejamento do desmonte em acordo com a disposição dos furos, o dimensionamento do plano de fogo a qual é especificado e descrito o tipo de explosivo a ser utilizado (ANFO ou Emulsões e Blendados), e além disso nessa fase também é previsto a segurança das instalações tanto da pedreira como do entorno, principalmente se se tratar de áreas urbanas, visto que a razão de carga explosiva pode variar entre 0,15 a 0,70 kg/m³ e chegar a uma velocidade de propagação no interior da rocha na ordem de 7.200 a 25.200 km/h, dependendo do tipo de rocha e do explosivo utilizado (LUIZ e SAMPAIO, 2012; KOPPE e COSTA, 2012).

Em relação a fase de detonação, registra-se ainda, que as técnicas de detonação têm menor impacto no aquecimento global (cerca de 28% menos) e geram menos emissão de gases gerados por queima de combustível fóssil (cerca de 75% menos) do que as atividades de extrações mecânicas, tendo em vista que nestas atividades demandarem maior tempo de uso de maquinário movido a combustível fóssil (ex. diesel), no entanto, as emissões de Particulados Menor que 2,5 e 10 micrometros (PM_{2,5} e PM₁₀) e total de particulados em suspensão (TPS)

¹⁵ Segundo Koppe e Costa (2012) são divididos basicamente em 03 métodos, a saber: percussão *down-the-hole* (DTH) (perfuração de fundo de furo), percussão *tophammer* (perfuração com martelo de superfície) e perfuração pelo sistema COPROD (combinação de hastes de impacto com tubos de perfuração).

são 2 a 3 vezes maiores se comparados com todas as fases da mineração (BASCOMPTA *et al.*, 2022).

Seguindo, a quarta fase, é a etapa de Cominuição em que ocorre a britagem e a fragmentação secundária em grânulos menores, sendo que as dimensões da rocha explotada na frente de lavra gira em torno de 0,8 x 1,1 m e blocos de rocha acima desta granulometria são submetidos a um fogacho ou rompedor hidráulico para adequar suas granulometrias ao britador primário. Cabe registrar que a fragmentação primária é aquela que ocorre na lavra da rocha, quando do desmonte com explosivos a qual são gerados blocos rochosos que alimentam o sistema de britagem inicial, ocorrendo então a fragmentação secundária (LUIZ e SAMPAIO, 2012).

A quinta fase é chamada de Lavagem, nessa etapa ocorre a lavagem do material extraído, por meio de atrição ou lavagem em tromel ou por roda desaguadora (*wheel dewater*), há a remoção de finos resultantes da britagem e de material intemperizado que porventura esteja impregnado quando da fase de lavra de decapeamento da pedreira, podendo esse material ser aproveitado para obtenção de agregado miúdo (areia) e posterior classificação.

Na sequência, a sexta fase, a do Peneiramento, consiste em separar a brita por faixas granulométricas e a depender da pedreira, há também a classificação por origem mineralógica (se de origem do granito, basalto, dolomito, calcário etc.). Essa separação ocorre por meio de peneiras mecânicas e vibratórias por onde percorre todo o material britado a qual ao final, e por meio de esteiras rolantes ou por meio de caminhões, o material é selecionado e estocado forma (SHEN *et al.*, 2022; MONTEIRO e DA SILVA, 2018; SEGURA-SALAZAR e TAVARES, 2021; LUIZ e SAMPAIO, 2012).

E finalmente, a sétima fase, é o Carregamento e Transporte, do material desmontado, que pode ocorrer por meio de caminhões, retroescavadeiras e pás carregadeiras. Nessa fase há o emprego de grandes depósitos onde ocorre o armazenamento e estocagem do material de agregado de brita que pode ocorrer em silos elevados, de forma a permitir o carregamento dos caminhões ou dos vagões de trem por gravidade ou por transportador de correia ou estocado em pilhas no próprio pátio e proceder ao carregamento dos caminhões com o auxílio de carregadeiras frontais.

Adiciona-se, que além do transporte interno na pedreira do material beneficiado, também haverá o transporte até o consumidor final se realiza, geralmente, por meio de caminhões. Em construções mais industriais, no Brasil, em algumas situações, há também a utilização da ferrovia como meio de transporte de escoamento da produção do material britado.

Registra-se que a fase do transporte é a que mais contribui para a oscilação do preço final do produto tipo agregado tendo em vista a distribuição não uniforme das fontes naturais de agregados no Brasil favorece a elevação dos custos envolvidos em seu transporte podendo, a pedra britada, se tornar não rentável para explorar em algumas reservas (por exemplo, de áreas remotas e/ou em pequena escala) (SEGURA-SALAZAR e TAVARES, 2021; BAUER, 2019).

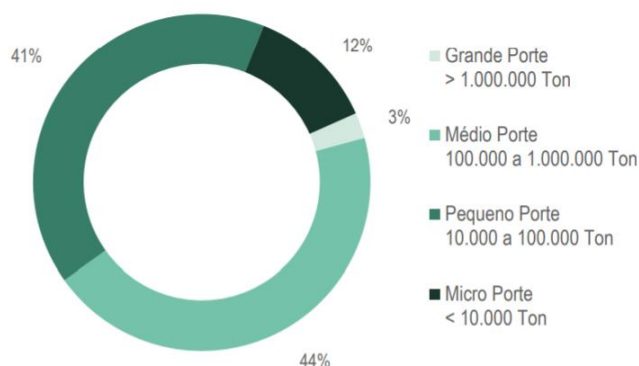
2.3.2 Impactos do setor de mineração da brita

O setor de rochas registra globalmente volumes consideráveis de material extraído (cerca de 35 milhões de toneladas por ano), sendo a posição de liderança atualmente ocupada pela China, seguida pela Itália, Turquia, Índia, Brasil, Espanha e Grécia (GUSSONI, 2017).

De acordo com BRASIL (2018) o Cadastro Nacional de Produtores de Brita, no ano de 2015, contava com um total de 996 usinas de britagem instaladas no país, com concentração nas regiões Sul e Sudeste acompanhando o crescimento dos centros urbanos e vias de escoamento.

Ainda segundo aquela mesma publicação, registra-se, a título de produção bruta, a cifra de 212.749.004 toneladas no ano de 2015, sendo que 76,52% desse total estavam concentradas em apenas seis Unidades da Federação, quais sejam, São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Percebe-se, com base no Cadastro de Produtores de Brita, que a rocha britada corresponde ao segundo item mais expressivo da produção mineral brasileira, só perdendo em quantidade para o minério de ferro, que atingiu a marca de 430.836.327 toneladas no ano de 2015. Quanto ao porte das mineradoras, e de acordo com o AMB, elas são classificadas, conforme Figura 5.

Figura 5: Distribuição das usinas de britagem brasileiras quanto ao porte



Fonte: Cadastro Nacional de Produtores de Brita (2015).

Para fins de categorização, considera o DNPM (2015) o seguinte agrupamento de rochas britadas, de acordo com sua origem petrográfica:

- a) Rochas plutônicas (granito, gnaiss, migmatito, granodiorito, granulito, sienito, migmatito, gabro, tonalito, diorito);
- b) Rochas vulcânicas (Basalto, riolito, diabásio);
- c) Rochas calcárias (calcário calcítico, calcário dolomítico, dolomito) e
- d) Outras rochas (arenito, quartzito, cascalho, serpentinito, fonolito, xisto e micaxisto).

Segundo Farias (2002) e Pamplona *et al.* (2019), a mineração é um dos setores básicos da economia do país, contribuindo de forma decisiva para o bem-estar e a melhoria da qualidade de vida dos presentes e futuras gerações, sendo fundamental para o desenvolvimento de uma sociedade equânime, desde que seja operada com responsabilidade social, estando sempre presentes os preceitos do desenvolvimento sustentável, além do setor mineral brasileiro ter significativa relevância econômica e estratégica para vários outros setores, a exemplo da construção civil, e para o desenvolvimento de novas tecnologias (UN COMTRADADE, 2014).

Logo a atividade mineral necessita da adoção de técnicas e medidas mitigadoras dos impactos ambientais que essa atividade causa ao meio ambiente, e em especial a saúde humana, tendo em vista os particulados finos produzidos por tais indústrias já que, segundo Sounis (1991) a poluição do ar por partículas devido às atividades de mineração provoca alterações do sistema respiratório, que podem ser permanentes ou temporárias, dependendo de fatores determinantes como natureza e tamanho das partículas, quantidade inalada e tempo de exposição, porém não só a poluição do ar caracteriza-se como impactos da atividade de mineração. Além disso, o meio ambiente é poluído por águas residuais, ruídos e resíduos de mineração (ou seja, pó de pedra/brita, peças e panos fragilizados e trituradas, e rejeitos em geral) produzidos pelas pedreiras durante a etapa de beneficiamento (BAI *et al.*, 2015).

Segundo Galetakis e Soultana, (2016) os resíduos produzidos pelas pedreiras podem ser classificados em dois tipos diferentes: resíduos sólidos e lamas de pedra, sendo que os resíduos sólidos são resultantes de rejeitos nas pedreiras ou nas unidades de beneficiamento e a lama é uma substância semilíquida composta por água (utilizada para resfriar e lubrificar as máquinas) e partículas provenientes dos processos de serragem, polimento (processos mais comuns nas indústrias de pedras ornamentais) e peneiramento.

Ainda, segundo Vijayalakshmi *et al.* (2013), durante o processo industrial de mineração e beneficiamento a partícula fina de rocha e a água misturam-se e tornam-se um resíduo coloidal e formando uma lama de pedra, e quando essa lama é descartada em aterros, seu teor de água é drasticamente reduzido e o resíduo torna-se uma lama seca composta por pó

fino que pode ser facilmente inalado por seres humanos e animais além de ser um resíduo não biodegradável que causa poluição e danos ambientais.

Diante destas constatações, e segundo Bascompta *et al.* (2022); Galetakis e Soutana (2016); Santhosh *et al.* (2021) e Shen *et al.* (2022), lista-se no APÊNDICE B – IMPACTOS AMBIENTAIS DA EXTRAÇÃO DA BRITA E DA AREIA, os impactos positivos e negativos da mineração de brita, considerando as fases de instalação, operação e desativação, e dentre alguns desses impactos tem-se que o impacto da diminuição da topofilia e topografia contribuindo para a mudança do habitat dos seres vivos e mudança dos cursos d'água, somado a isso há ainda o impacto visual e sonoro devido as partículas em suspensão, depósitos dos produtos gerados e das explosões das extrações junto aos maciços de rochas.

2.4 PÓ DE PEDRA/BRITA

Dentre todos os resíduos produzidos pela mineração e beneficiamento da pedra britada, tem-se o pó de pedra/brita que tem em sua composição particulados finos e de grande dispersão e que causam problemas tanto na saúde humana como no habitat e ecossistema local, se tornando, então, um material particulado de grande importância de estudo visto tratar-se de uma fonte de emissão de finos no meio ambiente, tanto do tipo emissões de processamento¹⁶ como de emissões fugitivas¹⁷ (BRAILE, 1988).

Diante dos resíduos gerados, iniciativas políticas recentes estão promovendo a adoção de práticas mais limpas e circulares no setor de construção e materiais de construção em regiões desenvolvidas, como o Plano de Ação de Economia Circular da Comissão Europeia (COMISSÃO EUROPEIA, 2020; SEGURA-SALAZAR e TAVARES, 2021).

No Brasil, mesmo que de maneira embrionária quanto a ótica de uma análise mais sistêmica, há a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) que apoia a gestão integrada de resíduos como instrumento de implantação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto.

E em consonância com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), dentre os materiais residuais de origem mineral, cita-se as rochas e seus subprodutos, mais especificamente as pedras britadas e os finos, muitas vezes, o pó de pedra/brita, podendo ser classificados na faixa granulométrica de até 4,8mm (SERNA e RESENDE, 2013).

¹⁶ Têm início com o descarregamento da matéria-prima dos caminhões basculantes no alimentador do britador primário, sequenciando-se nas operações de britagem, transferência (em geral através de correias sem coberturas) e peneiramento (BRAILE, 1988).

¹⁷ Provenientes das operações não fixas, são de mais difícil solução, pela natureza das operações geradoras, e representam uma contribuição muito grande em termos de poeira total gerada numa pedreira (BRAILE, 1988).

Percebe-se uma certa compatibilidade granulométrica entre a areia artificial, em torno de 0,075 a 4,8mm, e a areia natural, em torno de 0,150 a 4,75mm (AKHTAR *et al.*, 2021; GUPTA *et al.*, 2019; SELVAN e VIJAYA, 2015; SIMÃO *et al.*, 2021; SINGH *et al.*, 2017; VARDHAN *et al.*, 2019), demonstrando-se materiais componíveis na confecção de concreto, caracterizando-se, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2022), como sendo agregados miúdo vez que os grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficando grande parte retidos na peneira com abertura de malha de 150 μ m. Restando verificar a heterogeneidade que o rejeito de pó de pedra/brita carrega consigo. Necessitando, então, de um fundamental e extensivo programa de ensaios, análises física, químicas e petrográficas a fim de convalidar essa utilização.

3 ASPECTOS DO CONCRETO E DA SUSTENTABILIDADE

Mais de 10 bilhões de toneladas de concreto são produzidas todos os anos e a produção anual representa aproximadamente 1,5 tonelada para cada pessoa no planeta, sendo o segundo material mais consumido depois da água (KANOJIA e JAIN, 2017). É um material largamente utilizado na construção civil obtido a partir da mistura entre aglomerante (geralmente cimento Portland), água, agregado miúdo (geralmente areia natural), agregado graúdo (geralmente brita granítica) podendo conter ou não aditivos químicos.

Segundo Luz e Almeida (2012), para a confecção de concreto, o agregado miúdo comumente utilizado é a areia natural e, segundo Bertolino *et al* (2012), como agregado graúdo é utilizado uma grande diversidade de rochas, devido às características geológicas do território brasileiro, sendo que a maior disponibilidade é a rocha do tipo granito e gnaisse que são utilizadas na maioria dos estados brasileiros, seguido das rochas do tipo basalto (Regiões Sul e Sudeste - Bacia do Paraná), calcários e dolomitos (Minas Gerais, Goiás, Bahia e norte fluminense) e lateritas (Região Amazônica e Minas Gerais).

3.1 PRINCIPAIS CONCEITOS E CLASSIFICAÇÕES

Registra-se que a produção do concreto é composta por uma série de etapas executadas de maneira planejada e controlada no intuito de obter-se, a partir dos materiais componentes e de uma dosagem adequada, um material, que depois de endurecido possa resistir aos esforços derivados das mais diversas condições de carregamento a que possa ser submetido (BAUER, 2019; MEHTA e MONTEIRO, 2014). Sendo que as principais operações para a produção de um concreto são listadas a seguir:

- a) Quantificação dos materiais (ou dosagem);
- b) Mistura dos materiais (manual ou mecanicamente);
- c) Transporte do concreto;
- d) Lançamento do concreto (manual ou mecanicamente);
- e) Adensamento, que possui o objetivo de eliminar os vazios deixando assim a massa de concreto a mais densa possível;
- f) Cura, esse procedimento tem como objetivo evitar a perda d'água pelo concreto nos primeiros dias de idade a fim de conferir maior durabilidade.

As etapas acima, influenciarão nas propriedades do concreto produzido, sendo que estas ocorrem em dois estados: no estado fresco, que é o momento compreendido desde o contato do cimento com a água até o início da pega do aglomerante, e no estado endurecido que é a fase compreendida após o fim da pega do aglomerante (BAUER, 2019; NEVILLE, 2016).

Dentre as propriedades do concreto fresco, as principais são: Consistência, Trabalhabilidade, Plasticidade e Homogeneidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A consistência pelo *American Concrete Institute (ACI)*, é definida como sendo a relativa mobilidade ou facilidade de o concreto ou argamassa escoar, correspondendo a maior ou menor capacidade que o concreto fresco tem de se deformar. E os fatores que afetam a consistência são: granulometria e forma do grão do agregado (quando há uma redução na superfície específica do agregado, o concreto tornar-se-á mais plástico); Aditivos; Tempo e temperatura sendo que o concreto recém-preparado enrijece com o tempo devido a absorção de parte da água pelo agregado, da evaporação de outra parte e da perda de parte da água utilizada nas reações químicas de hidratação iniciais (BAUER, 2019; NEVILLE, 2016). E o ensaio de abatimento ou *Slump Test*, por ser fácil e simples de ser executado na obra, é o mais usado no Brasil para se analisar a consistência do concreto fresco (BAUER, 2019).

A trabalhabilidade de um concreto, assim como sua consistência, depende da granulometria dos materiais sólidos, da incorporação de aditivos e, principalmente, do fator água/cimento (CARVALHO e FILHO, 2013). A trabalhabilidade do concreto determina a facilidade com a qual a mistura pode ser manipulada sem segregação nociva, e está ligado basicamente à maneira de efetuar seu adensamento, sendo que quando se verifica a trabalhabilidade deve-se analisar 2 (duas) outras propriedades do concreto no estado fresco: a segregação e a exsudação (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Outra propriedade no estado fresco do concreto, é a plasticidade que é propriedade em que o concreto fresco possui pela facilidade com que este pode ser moldado sem se romper e depende essencialmente da consistência e do grau de coesão entre os componentes do concreto (NEVILLE, 2016). E os agregados miúdos exercem uma grande influência sobre a plasticidade do concreto, uma vez que possuem elevada área específica. Logo, qualquer que seja a alteração do seu teor na mistura do concreto provocará significativas modificações no consumo de água e, conseqüentemente, no de cimento e como o cimento é um material de custo elevado na mistura, qualquer alteração no seu consumo acarretará, aumento de custo. (MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

E por último, a homogeneidade, que é a propriedade que está relacionada à distribuição dos agregados, logo, quanto mais homogêneo o concreto, melhor será a qualidade da estrutura resultante. Sendo que os agregados graúdos possuem grande interferência na qualidade do concreto, uma vez que quanto mais uniformes, ou regulares, e quanto mais envolvidos pela argamassa, sem apresentar desagregação, melhor será a qualidade do concreto, principalmente quanto à permeabilidade e à proteção proporcionada à armadura, além de resultar em um melhor acabamento, sem a necessidade de reparos posteriores (CARVALHO e FILHO, 2013; (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Após a fase fresca do concreto, e a partir da pega, o concreto inicia a fase endurecida, e dentre as propriedades do concreto endurecido, as principais são: Resistência Mecânica, Resistência à Abrasão, Permeabilidade, Porosidade e Durabilidade. (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A resistência mecânica está relacionada a capacidade de resistir às diversas classes de carregamento a que possa estar submetida, dentre os diferentes tipos de resistências mecânicas a qual o concreto possui, destaca-se a resistência à compressão, à tração, à flexão e ao cisalhamento (BAUER, 2019; ARAÚJO *et al.*, 2000). Sendo que alguns fatores que influenciam na resistência mecânica do concreto são a influência da idade que está diretamente associada à resistência da pasta, que por sua vez é determinada pelo tipo de cimento usado; as condições de cura do concreto e a forma e a textura dos agregados também são fatores que influenciam na resistência mecânica do concreto devido a área específica dos agregados, impactando diretamente na ligação entre a pasta e o agregado (ANDOLFATO, 2002; HELENE, 2011).

A resistência característica à compressão do concreto é representada por f_{ck} e o fator água/cimento (A/C) exerce maior influência tendo em vista que quanto maior o fator A/C menor será a resistência, porém água de menos não é um bom sinal, uma vez que há a necessidade de uma quantidade de água mínima para reagir com o aglomerante e assim o concreto ser provido de uma satisfatória hidratação do cimento a qual influenciará na trabalhabilidade (NEVILLE, 2016; BAUER, 2019). A resistência à tração de um material é medida quando ocorre a quebra da ligação das moléculas quando é aplicado uma força normal no sentido de alongamento das fibras (NEVILLE, 2016), podendo ser classificadas, conforme NBR 6118 (ABNT, 2014) em tração indireta ($f_{ct,sp}$), tração na flexão ($f_{ct,f}$) e tração direta (f_{ct}).

Outra propriedade no estado endurecido do concreto, é a resistência à abrasão que está relacionada com o acabamento superficial de uma peça de concreto tendo em vista que um bom

acabamento superficial, o uso de uma pasta de cimento bem homogênea e o uso de agregados mais duros e de maior granulometria contribuem para a diminuição do desgaste da superfície, uma vez que a destruição da estrutura de concreto se dá por rompimentos dos grãos do agregado, ou pelo seu arrancamento. De modo geral, a resistência à abrasão do concreto endurecido é proporcional à resistência à compressão e é igual a uma faixa compreendida entre 20 e 40 MPa (BAUER, 2019).

Além disso a baixa resistência a abrasão também está relacionada a altos fatores água-cimento, a qual quanto maior o a/c menor a resistência ao desgaste (COURI, 2021) e está relacionado a compacidade do concreto quanto mais compacto melhor a resistência à abrasão (NEVILLE, 2016) também está correlacionado com a cura bem realizada, sendo desejável um período de cura com o dobro da duração normal, a fim de obter uma boa resistência à abrasão (NEVILLE, 2016; SENA *et al.*, 2020). Já em relação aos agregados, Neville (2016) comenta que o acréscimo de uma determinada quantidade de areia de britagem (pó de pedra/brita) é interessante a fim de prover melhor resistência à abrasão, tendo em vista que determinado teor colmataria alguns espaços de vazios na matriz do concreto.

Para a avaliação do grau de abrasividade, Neville (2016) cita alguns ensaios, sendo na maioria descritos na ASTM C794¹⁸, sendo que os mais utilizados compreendem o atrito com um disco metálico em movimento, o jateamento com areia ou impactos com esferas de aço. No Brasil um único ensaio normatizado para avaliar o desgaste por abrasão de materiais inorgânicos é descrito pela ABNT NBR 12042:2012 (Materiais Inorgânicos-Determinação do desgaste por abrasão). E a ABNT NBR 11.801:2012 (Argamassa de alta resistência mecânica para pisos) que especifica o desgaste para três níveis de solicitação, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Classificação de níveis de solicitação de abrasão

Nível de Solicitação	Desgaste (D), em mm	Tipo de Solicitação/Indicação
Grupo A	$D \leq 0,80$	Arraste e rolar de cargas pesadas Tráfego de veículos de rodas rígidas Impacto de grande intensidade
Grupo B	$0,8 < D \leq 1,6$	Arraste e rolar de cargas médias Tráfego de veículos de rodas rígidas Tráfego intenso de pedestre Impacto de pequena intensidade
Grupo C	$1,6 < D \leq 2,4$	Arraste e rolar de pequenas cargas leves Tráfegos de veículos de rodas macias Pequeno trânsito de pedestres

Fonte: ABNT NBR 11.801 (2012) - Adaptado pelo Autor (2023)

Em ato contínuo, tem-se que a permeabilidade é a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior de um sólido poroso, devido ao número de vazios existentes

¹⁸ ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C779: standard test method for abrasion resistance of horizontal concrete surfaces. West Conshohocken/Pennsylvania/USA, 1976.

no concreto (NEVILLE, 2016). Importante ressaltar que o concreto é naturalmente permeável aos líquidos e gases devido aos vazios interligados que existem na estrutura interna do concreto, ocasionados devido a incorporação de ar arrastado durante a operação de mistura, fissuras de origens térmicas, a granulometria dos agregados e a água de emassamento (BAUER, 2019; MEHTA e MONTEIRO, 2014), além disso vale salientar que a permeabilidade, também cresce com a proporção dos finos presentes na mistura, cuidados na cura e com eventual emprego de certos aditivos e da porosidade do concreto endurecido, em relação a sua forma, distribuição, dimensões, tortuosidade e continuidade dos poros (NEVILLE, 2016 e BAUER, 2019).

Acrescenta-se que a permeabilidade é uma característica fundamental quanto a durabilidade do concreto, apesar de ser modificada com o tempo por processos de lixiviação, há grande contribuição como um mecanismo de transporte de água, pura ou contaminada, para o interior do concreto e por isso os íons cloretos podem penetrar no concreto por permeabilidade, na presença de um gradiente de pressão hidráulica ou mesmo por absorção capilar de líquidos ou em último caso pelo ar atmosférico a qual os íons cloretos em suspensão se depositam nos poros do concreto (CRAUSS, 2010), com isso existe uma faixa de dimensões dos poros que facilitam a permeabilidade, entre 0,1 μm e 1000 μm (HELENE, 1993).

Outra propriedade que merece destaque, quando no estado endurecido do concreto, é a porosidade que diferentemente da permeabilidade que é a capacidade do concreto de transmitir fluido, dependendo principalmente da quantidade, dimensão, geometria e a interconectividade dos poros, a porosidade em uma peça de concreto é representada pela existência de espaços vazios no seu interior que dependem da forma, adensamento, tamanho dos agregados e grau de compactação da matriz cimentícia (NEVILLE, 2016; HELENE, 1993). Logo a resistência do concreto é influenciada pelo volume de todos os vazios: ar aprisionado, poros capilares, poros de gel e, se utilizado, ar incorporado. Além disso, há influência, ainda, do volume, forma e dimensão dos poros, além da forma das partículas sólidas e de seu módulo de elasticidade na distribuição de tensões e, portanto, na concentração de tensões no interior do concreto (NEVILLE, 2016; BAUER, 2019).

Por último, destaca-se, dentre as propriedades no estado endurecido, a durabilidade do concreto que é determinada pela ação de agentes exteriores e agressivos à sua estrutura e o comportamento da matriz de concreto frente a porosidade da pasta, retração hidráulica, agressão química, carbonatação, íons cloreto e abrasão (BAUER, 2019; NEVILLE, 2016; HELENE, 2011; ARAÚJO *et al.*, 2000). Com isso a durabilidade está diretamente ligada com a impermeabilidade que está relacionado com a porosidade da pasta. Quanto menos porosa, mais

impermeável será a pasta e, conseqüentemente, o concreto e com isso maior será a durabilidade da estrutura. A porosidade depende de dois fatores principais: da relação água/cimento e do grau de hidratação da pasta (BAUER, 2019). A retração hidráulica que é resultante da retração da pasta de cimento também influencia na durabilidade, tendo em vista que ao sofrer modificações de volume devidas à movimentação da água, exerce tensões sobre o agregado, provocando fissuração no concreto, abrindo dessa forma caminho a agressão de agentes exteriores.

Já em a relação da agressão química, da carbonatação, dos íons cloreto e da abrasão na durabilidade, tem-se que em geral o concreto possui boa resistência a ataques químicos, desde que a mistura esteja adequada e adequadamente adensada, entretanto, quando ocorre o ataque químico é por meio da decomposição dos produtos de hidratação e da formação de novos compostos, e caso sejam solúveis, podem ser lixiviados e caso não sejam solúveis, podem causar desagregação com escamação (NEVILLE, 2016).

Em relação a carbonatação, tem-se que este fenômeno em si não causa a deterioração do concreto (COURI, 2021; NEVILLE, 2016). Tendo em vista que a carbonatação pode ter algumas conseqüências positivas uma vez que como o carbonato de cálcio (CaCO_3) ocupa um volume maior do que o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 que o substitui, a porosidade do concreto carbonatado é diminuída e a água é liberada pelo Ca(OH)_2 na carbonatação podendo contribuir para a hidratação do cimento ainda não hidratado e essas alterações são benéficas e resultam em aumento da dureza e da resistência superficial e em redução da permeabilidade superficiais (NEVILLE, 2016)

Porém ao se aprofundar na peça de concreto, contribuindo para a perda de desempenho da vida útil (BU *et al.*, 2022; CARNEIRO *et al.*, 2021), e isso é progressivo, atinge a armadura, despassivando-a, iniciando a corrosão, reduzindo a seção dos elementos estruturais por meio de rachaduras ou descamação do concreto, perdendo sua capacidade de resistência (BUTLER *et al.*, 2001) e gerando a destruição da peça (COURI, 2021). E em relação a durabilidade, a importância da carbonatação está no fato de ela reduzir o pH da água que se encontra nos poros da pasta de cimento endurecida, de 12,6 e 13,5 para um valor próximo de 9 que é quando todo o Ca(OH)_2 é carbonatada, e o valor do pH é reduzido para 8,3 (NEVILLE, 2016).

Ainda na esteira da corrosão, cita-se ainda o ataque de íons cloreto, que tem muita influência na durabilidade do concreto, uma vez que a presença da concentração de íons cloreto em contato com a superfície da armadura exposta, provoca a despassivação do aço e a corrosão localizada a qual tal concentração terá influência direta de fatores como a quantidade de íons

cloreto no ambiente, a permeabilidade do concreto, o pH, teor de aluminato tricálcio no cimento e umidade ambiente (COURI, 2021; NEVILLE, 2016).

O ataque por íons de cloreto ocorrem quando os edifícios são submetidos a ambientes marinhos hostis, nos quais, por difusão do ar, penetram nos poros do concreto e resultam em dois efeitos principais nas partes estruturais: (1) o ataque físico dos íons de cloreto causa rachaduras e descamação das superfícies (BU *et al.*, 2022), que é intensificado pelo endurecimento da superfície devido à frente de carbonatação (LEE *et al.*, 2014); e (2) corroem o reforço dentro da estrutura, pois removem a camada de proteção da superfície do concreto (BU *et al.*, 2022).

Ainda sobre íons cloreto, cabe ressaltar o que diz a NBR 7211 (ABNT, 2022) quanto ao percentual de íons cloreto aceito em agregados miúdos e graúdos, ou seja, os teores máximos de cloretos em agregados miúdos e graúdos para concreto simples deve ser menor que 0,2%, concreto armado menor que 0,1% e concreto protendido menor que 0,01%, sendo que se os agregados que possuam teores de cloretos maiores do que os estabelecidos podem ser utilizados em concreto, desde que o teor total (cloretos provenientes de todos os componentes) não seja maior do 0,06%, exceto para concreto protendido, conforme NBR 12655 (ABNT, 2022). E conforme ASTM C1202 (ASTM C1202, 2012) o fluxo elétrico passante nas fatias de concreto ensaiadas resulta nas indicações qualitativas da penetrabilidade do cloreto, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Classificação da Penetração dos Íons Cloreto

Fluxo Elétrico (Coulombs)	Penetração dos Íons Cloreto
> 4.000	Alto
2.000 – 4.000	Moderado
1.000 – 2.000	Baixo
100 – 1.000	Muito Baixo
< 100	Pouco Significativo

Fonte: ASTM C1202 (2012) – Adaptado pelo Autor (2023).

Ainda sob os aspectos da durabilidade, cita-se que a abrasão provoca, inicialmente, o desgaste progressivo da camada superficial de revestimento e quando supera 5mm de espessura, começa a permitir a percepção dos agregados graúdos (abrasão leve), a continuidade da abrasão ($\geq 15\text{mm}$) leva a perda de argamassa entre os agregados graúdos superficiais (abrasão média) e quando o desgaste chega a superar 25mm, começa a ocorrer a desagregação do concreto (abrasão severa) com desprendimento de agregados e aumento na velocidade de perda de massa iniciando-se a partir daí, uma exposição das armaduras, em caso de concreto armado (COURI, 2021).

Importante ainda ressaltar que o concreto pode ser classificado quanto à resistência, em três grupos, segundo Mehta e Monteiro (2014):

- a) Concreto de baixa resistência: é quando a resistência à compressão é menor que 20 MPa;
- b) Concreto de resistência moderada: é quando a resistência à compressão fica compreendida entre 20 e 40 MPa;
- c) Concreto de alta resistência: é quando a resistência à compressão é superior a 40 MPa.

Ainda com base na NBR 8953 (ABNT, 2015) que classifica o concreto para fins estruturais quanto a massa específica, por grupos de resistência e consistência, tem-se, ainda, que o concreto pode ser classificado quanto a classe de resistência em não estrutural (concretos com classes de resistência abaixo de 20 MPa) e estrutural (concretos com classes de resistência acima de 20 MPa).

3.2 HISTÓRICO DO CONCRETO ESTRUTURAL

Segundo Neville (2016), o primeiro concreto da história foi aquele utilizado pelos gregos e romanos a qual utilizavam de calcário calcinado e, mais tarde, aprenderam a adicionar areia e pedra fragmentada ou fragmentos de tijolos ou telhas ao calcário e à água.

O concreto de cimento Portland apareceu como o material de construção predominante para todos os tipos de infraestrutura do século XXI devido à sua longevidade, durabilidade, fácil preparação e fabricação a partir de constituintes prontamente disponíveis (RAY *et al.*, 2022). Até cerca do século XIX, as técnicas construtivas mais utilizadas eram as estruturas em madeira e em alvenaria.

Sendo que as alvenarias de pedras, e posteriormente as de tijolos cerâmicos, passaram a necessitar de um material que unisse esses tijolos e essas pedras, de forma a criar a alvenaria semelhante à da atualidade. Inicialmente, os assírios e os babilônicos utilizaram a argila como material ligante, posteriormente outros povos desenvolveram materiais mais bem elaborados e resistentes, surge então, a argamassa de cal (GUIMARÃES, 1997; CARVALHO, 2008).

É nesse cenário, de aglomerantes para argamassas de alvenarias, que se inicia, juntamente com a cal, a história do cimento e do concreto. Guimarães (1997) ressalta “múltiplos indícios de que o homem utilizou a cal em meados do período Paleolítico”. Malinowski (1991) *apud* Guimarães (1997) refere-se a “misturas de cal e pozolanas encontradas em sítios arqueológicos neolíticos (8 mil a 10 mil anos a.C.)”.

Os romanos desde 600 a.C já utilizavam a cal, porém a construção civil romana passou por uma revolução quando foi descoberto um novo material de construção conhecido como *Opus Caementiciu*, cuja produção era feita por uma mistura de cinza pozzolânica e argamassa de cal, essa mistura produzia um material semelhante ao cimento existente em dias atuais. Com

esse novo material foram construídas várias edificações, como exemplo tem-se: o aqueduto *Pont du Gard*¹⁹ e a Basílica de Constantino²⁰, ilustrado na Figura 6 (CARVALHO, 2008).

Figura 6: Aqueduto *Pont du Gard* e ruínas da Basílica de Constantino



Fonte: Carvalho (2008).

Ainda no Império Romano, em 312 d.C, foi iniciada a construção de uma estrada que viria a revolucionar a construção civil, e que ficou conhecida como Via Ápia, com uma extensão de aproximadamente 660 km. Ela foi executada com uma camada a base de pedras compactadas, seguida de uma camada de cascalho misturados com cal hidratada e logo em seguida finalizada com uma última camada, a camada de rolamento. Nessas várias camadas e em vários trechos dessa via foi utilizado o *caementum* romano, a qual as pedras ligadas por esse *caementum*, os romanos chamaram de *concretus* ou *concretum*, surgindo, então, o concreto romano (MALINWSKI e GARFINKEL, 1991).

Porém, muito desses conhecimentos romanos se perderam durante o período da Idade Média e só foram resgatados no século XVIII (MALINWSKI e GARFINKEL, 1991). E em 1791, com base nos estudos dos romanos, o engenheiro inglês James Parker descobriu um cimento, patenteado, mais tarde, em 1796 com o nome de Cimento Romano, que teve uma grande aceitação por suas excelentes qualidades (DORFMAN, 2003; QUIETMEYER, 1927). Em 1818, o francês Vicat, por meio da calcinação de calcários moles e argilosos e posteriormente com a mistura desses entre si, foi considerado o inventor do cimento artificial (DORFMAN, 2003).

Em 1824, Joseph Aspdin solicitou a Patente de Vicat no intuito de aperfeiçoá-la quanto ao método de produzir a pedra artificial. Aquele construtor inglês queimou pedras calcárias com argila produzindo um pó fino. Aspdin nomeou de Cimento Portland devido a sua semelhança com uma famosa pedra calcária branco-prateada que era extraída de algumas pedreiras existentes na península de Portland, no Condado de Dorset, Inglaterra. E então juntamente

¹⁹ Aqueduto romano situado no sul da França, perto de Remoulins, Uzès e Nîmes.

²⁰ Conhecido como Basílica de Maxêncio, localizada no Monte Vélia, em Roma

com William Beverly, em 1828, Aspadin montou uma fábrica para a produção em grande escala do Cimento Portland, assim surgindo o cimento que é conhecido hoje (BAUER, 2019).

Em 1843, Grisell e Peto, empreiteiros ingleses, fizeram as primeiras análises comparativas entre o cimento Portland e o Romano e ficou demonstrada a superioridade do primeiro. Em 1850, oito fábricas o produziam na Inglaterra, porém a variação na qualidade do produto trouxe dúvidas quanto à sua eficácia. Nesse mesmo ano de 1850, Vicat fundou uma fábrica em Grenoble, França, que foi a primeira a usar tecnologia por via seca em fornos cíclicos verticais e em 1855, foi montada a primeira na Alemanha. Assim o cimento Portland começou a se popularizar e expandir-se pelos países europeus e com uma melhor qualidade (TORAYA, *apud* CARVALHO, 2008).

No Brasil, a fabricação do cimento Portland teve início em 1888, quando o comendador Antônio Proost Rodovalho instalou uma usina em Sorocaba-SP que operou até 1918. Porém, apenas em 1924, quando a Companhia Brasileira de Cimento Portland instalou uma fábrica em Peru-SP, surgiu no Brasil o que depois seria um marco da implantação da indústria brasileira de cimento e que posteriormente surgiria a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (CARVALHO, 2008).

Posteriormente, após a descoberta do cimento, muitos estudos de misturas e de desenvolvimento de pesquisas sobre o emprego do concreto começaram a se desenvolver. Em 1907, Fuller e Thompson, propuseram curvas elípticas e parabólicas, posteriormente, para a composição granulométrica dos agregados, ficando conhecida como Lei da Granulometria Contínua. (HELENE e TUTIKIAN, 2011). Em 1918, Abrams, fórmula a equação de resistência do concreto em função da água e do cimento, que ficou conhecida como Lei de Abrams e introduz também o conceito de consistência, medida pelo cone de Abrams (BAUER, 2019).

Com a chegada das grandes empresas no Brasil, houve um avanço com construções de grande porte tal como em 1961 com a construção do Edifício Copan, localizado em São Paulo e considerada a maior estrutura de concreto armado erguida no Brasil; em 1943 com a construção da Igreja de São Francisco de Assis, fica localizada em Belo Horizonte, com formas geométricas em sua fachada todas esculpidas através do concreto.

Sem contar as obras de infraestrutura, tais como em 1974 com a Ponte Rio-Niterói considerada a maior ponte de concreto protendido no Hemisfério Sul e a sexta maior do mundo com 13,29km de comprimento total e 72 metros de altura no maior pilar e em 1984 com a construção da Usina de Itaipu sendo a segunda maior hidrelétrica do mundo, com consumo médio ao final da obra, de 12.570.000 m³ de concreto, perdendo só para a hidrelétrica de Três

Gargantas, na China, que foi inaugurada em 2012. Logo tem-se que nos últimos 100 anos, o concreto revolucionou o ambiente construído global, sendo fundamentais para fornecer habitação, permitindo o transporte terrestre, marítimo e apoiando a produção de energia, respondendo, em 2020, por uma produção de 14,0 bilhões de toneladas em todo o mundo, com 4,2 bilhões de toneladas de produção de cimento e US\$ 440 bilhões de valor de mercado global de produtos de cimento e concreto (GCCA Association, 2023).

Sendo que neste consumo são utilizadas 9 bilhões de toneladas de agregado e 2,2 bilhões de toneladas de água doce e havendo grande consumo de combustíveis fósseis e intenso uso de energia e causando efeitos nocivos significativos ao meio ambiente (DOBISZEWSKA *et al.*, 2023). Com isso nos últimos anos, técnicas de engenharia ecológica têm sido aplicadas à construção civil, incorporando o desenvolvimento sustentável a indústria da construção e explorando tecnologias e práticas inovadoras para melhorar a sustentabilidade e o desempenho e a eficiência das estruturas (FAIZ *et al.*, 2022). Portanto, para reduzir os impactos ambientais negativos dos concretos utilizados nas obras, os pesquisadores têm realizado uma série de estudos e desenvolvidos medidas, como a utilização de matérias-primas alternativas (CHEN *et al.*, 2023), tais como pó de granito, brita, resíduos cerâmicos, agregado de vidro reciclado, agregados de tijolo reciclado, agregados de plástico reciclado, agregado de borracha reciclada.

Estima-se, conforme a *Fossil Free Sweden*, que o Mercado da Construção Sueca tem como principais metas a redução em 50% no impacto climático do concreto até 2023, em comparação com os níveis de 1990, a introdução do concreto sustentável no mercado até 2030, a neutralidade climática na indústria do concreto até 2045 e uma redução de 50% nas emissões de gases com efeito de estufa até 2030 (FOSSIL FREE SWEDEN, 2018). A importância da sustentabilidade na construção de concreto é enfatizada, também, por acordos internacionais como o Acordo de Paris e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, que apelam a ações urgentes para mitigar as alterações climáticas e promover o desenvolvimento sustentável (NILIMAA, 2023).

3.3 CONCRETO COM PÓ DE PEDRA COMO SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL

Estima-se que cerca de 32 bilhões a 50 bilhões de toneladas de areia são usadas globalmente a cada ano principalmente para confecção de concreto, vidro e eletrônicos, sendo 80% desse consumo utilizado para produção de concreto (KOEHNKEN e RINTOUL, 2018).

A substituição da areia natural de rio por materiais alternativos tem se tornado uma realidade promissora, somado com o aumento da urbanização e da industrialização que leva ao

esgotamento dos recursos naturais (BEHERA *et al.*, 2014) isso leva à exploração de materiais alternativos adequados, que sejam sustentáveis e ecologicamente corretos (KIRTHIKA *et al.*, 2020). Um material notável nesse sentido é o concreto reciclado, que incorpora materiais reciclados como substitutos de agregados, cimento e aditivos na produção de concreto (OMAR *et al.*, 2012). Nas últimas décadas, o uso de resíduos de construção e demolição como agregados grossos e finos surgiu como uma solução sustentável comprovada (BEHERA *et al.*, 2014; GALETAKIS e SOULTANA, 2016; MUNDRA *et al.*, 2016). Vários estudos foram realizados para avaliar a viabilidade da reciclagem de resíduos para produzir concreto sustentável, como resíduos de granito e mármore (ABD ELMOATY, 2013; BACARJI *et al.*, 2013; KARTINI *et al.*, 2014), pó de pedra - pó de pedra/brita (GUPTA *et al.*, 2021, 2019; KANKAM *et al.*, 2017; KRISHNAMOORTHY e KUMAR, 2013; LOHANI *et al.*, 2013; RAY *et al.*, 2022; TAIWO *et al.*, 2022; UKPATA; EPHRAIM e AKEKE, 2012), cinzas volantes (KRISHNAMOORTHY e KUMAR, 2013; TEMIZ e KANTARCI, 2014), pó de calcário e quartzo (GEHLOT *et al.*, 2021; KANELLOPOULOS *et al.*, 2014; TEMIZ e KANTARCI, 2014), fibra de juta (RAY *et al.*, 2021), resíduos de cerâmica (GUPTA *et al.*, 2021), cinzas de casca de arroz (TAIWO *et al.*, 2022), resíduos plásticos de máscaras faciais (ALI *et al.*, 2022; IDREES *et al.*, 2022), microplásticos (AHN *et al.*, 2023; PRASITTISOPIN *et al.*, 2023), EPS (HILAL *et al.*, 2021; KAYA e KAR, 2016), e outros (AHMAD *et al.*, 2021; KAISH *et al.*, 2021; UMAR *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2021).

E dentre tantas alternativas o pó de pedra (pó de pedra/brita) parece ser o mais adequado por estar disponível em grandes quantidades na maior parte do mundo para compor uma mistura de concreto (KANKAM *et al.*, 2017), sendo produzidos em grandes quantidades a partir de pedreiras constituindo-se um grave problema ambiental (GALETAKIS e SOULTANA, 2016). Adiciona-se que, durante o beneficiamento das rochas naturais, 25% a 30% são transformados em pó, sendo que no Brasil, estima-se que sejam geradas 240.000 toneladas/ ano de resíduos destas rochas (SANTOS *et al.*, 2012), sendo que a construção civil consome cerca de 35% daquele volume, a exemplo, no estado de Goiânia (LA SERNA e REZENDE, 2009).

Entretanto mesmo o pó de pedra/brita se mostrando como material alternativo à areia natural na fabricação de concreto, deve-se notar que estes possuem morfologias diferentes (GUPTA *et al.*, 2019) e tratamentos diferenciados. Uma vez que se trata de uma tecnologia emergente, o método de fabricação artificial é uma escolha viável para produzir agregados finos

e graúdos, que podem satisfazer os requisitos de reciclagem de resíduos e produção em grande quantidade (JEON *et al.*, 2020; XU *et al.*, 2021).

Estudos desenvolveram dosagens de concreto com diferentes proporções de utilização de pó de pedra/brita no concreto, havendo uma certa falta de consenso entre os estudos. Tal como a incorporação de 30% de pó de pedra/brita melhorou as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto (GUPTA *et al.*, 2019).

Em outro estudo é mencionado o uso de pó de pedra/brita para substituir a areia em percentuais de 0%, 25% e 100% do peso produzindo misturas para atingir as classes de resistência à compressão C25, C30, C35, C40 e C45 para cada um dos três níveis de substituição (KANKAM *et al.*, 2017). Em análises seguintes, tem-se que a substituição de 25% da areia por pó de pedra/brita proporcionou um aumento na resistência de 7,10% em média e um desempenho geral de 16,19% (PALANISAMY *et al.*, 2022; SHEN *et al.*, 2022). Em outros estudos, observou-se o uso de uma série gradual de substituições, nas quais as misturas de concreto foram preparadas com 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de agregado fino/natural substituído por resíduos a qual a resistência média à compressão diminuía à medida que a percentagem de pó de pedra/brita aumentava, entretanto em comparação com o concreto de referência (sem pó de pedra/brita) havia um aumento da resistência (TAIWO *et al.*, 2022; VIJAYALAKSHMI *et al.*, 2013).

Ainda na linha dos levantamentos científicos, observa-se uma melhoria significativa na resistência à compressão, à flexão e ao impacto; no entanto, a substituição parcial de até 30% leva a uma diminuição no valor do slump (CELIK e MARAR, 1996). Isso se dá devido ao fato que o pó de pedra/brita contém mais partículas angulares com texturas de superfície áspera e face mais plana do que a areia natural, que são mais arredondados devido ao intemperismo (INGALKAR e HARLE, 2017), embora reduzam a capacidade de trabalho, podem oferecer maior aderência à pasta de cimento (SINGH *et al.*, 2016a). Também foi notada uma redução significativa no custo do concreto sem afetar a propriedade de resistência (INGALKAR e HARLE, 2017; MUNDRA *et al.*, 2016). O concreto fabricado com pó de pedra/brita obteve resistência à compressão, resistência à tração e módulo de ruptura comparáveis aos do concreto de controle convencional fabricado com areia natural (SAHU *et al.*, 2003). A resistência à compressão, a resistência à tração e as propriedades de durabilidade do concreto feito de pó de pedra/brita são quase 14% superiores às do concreto convencional com areia natural (HAMEED e SEKAR, 2009).

Logo, o fato da indústria da construção ter a necessidade de consumir agregado miúdo para a confecção de concreto, sendo a areia o principal produto, porém em escassez, somado com a alta produção de rejeito de pó de pedra/brita das indústrias mineradoras e ainda somado com as restrições ambientais na extração de areia natural de rio e a imposição, por outro lado, para as indústrias mineradoras quanto ao descarte ambientalmente correto dos rejeitos de pó de pedra/brita, gera uma efeito cascata no mercado de fabricação concreto na aquisição/produção de um produto com boas características técnicas, porém com custos acessíveis e com certificação ambiental.

E apesar dos vários estudos publicados explorarem a capacidade de substituição da areia por pó de pedra/brita, presentindo diferentes dosagens de concreto com diferentes porcentagens de substituição e avaliando algumas propriedades mecânicas do concreto produzido. No entanto, a porcentagem de estudos publicados que realizam uma revisão sistemática e recente sobre a durabilidade das propriedades do concreto, bem como a avaliação dos benefícios de custo dos impactos ambientais mitigados pelo material alternativo, pó de pedra/brita, é baixa. Não havendo destaque das principais tendências na reciclagem de resíduos do setor de mineração como agregados reciclados para concreto, e não levando em conta as propriedades físicas dos agregados na matriz do concreto produzido, assim com seus custos envolvidos, a emissão de CO₂ e a energia incorporado.

Tendo em vista que a durabilidade do concreto é crucial, pois determina sua capacidade de resistir a intempéries, ataques químicos, abrasão e outras formas de deterioração e ainda por ser um fator essencial para avaliar o desempenho e a qualidade do concreto a longo prazo em vários ambientes de serviço (QU *et al.*, 2021). Ela pode ser avaliada por meio de testes que determinam a absorção de água, a porosidade, a densidade, a permeabilidade a íons cloreto, a resistência à carbonatação, bem como a resistência à compressão, à flexão e à tração (BINICI e AKSOGAN, 2018a; DANISH *et al.*, 2021a; DIMITRIOU *et al.*, 2018; QU *et al.*, 2021).

Além do potencial técnico das resistências mecânicas e da durabilidade do concreto com pó de pedra/brita, tem-se que avaliar também o potencial da sustentabilidade do material estudado. E para tanto tem-se que para avaliar e certificar ambientalmente um produto, tem-se que atualmente, existem diferentes métodos empregados nas Avaliações de Impactos Ambientais (AIA) que oferecem suporte aos profissionais da área na identificação dos impactos e suas respectivas causas, porém não há nenhum método que tenha aplicabilidade em todos os casos, tendo em vista que cada empreendimento e seu entorno possuem suas

singularidades e complexidades distintas condicionando a escolha da metodologia a inúmeros fatores, tais como: a disponibilidade de dados, as exigências legais referentes aos termos de referência, recursos técnicos e financeiros, prazos e peculiaridades dos empreendimentos (MARTINS e CARMO JUNIOR, 2018; MORAES e D'AQUINO, 2016).

3.4 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

A necessidade de certificação ambiental de produtos surge com a evolução da tecnologia e os avanços construtivos, aliados ao desenvolvimento do país, a eficiência dos tradicionais instrumentos de controle ambiental utilizados no licenciamento ambiental de atividades e empreendimentos já se mostravam deficientes e incompletos, surgindo então, entre as décadas de 1950 a 1960, uma crescente e necessária repaginação na sensibilidade ambiental dos estudiosos e do poder público, desenvolvendo-se então o conceito de impactos sobre o ambiente (SÁNCHEZ, 2020).

O termo “Avaliação de Impacto Ambiental (AIA)” foi utilizado pela primeira vez pelos Estados Unidos baseando em estudos publicados na *National Environmental Policy Act – NEPA* (Lei da Política Nacional do Meio Ambiente) dos anos 70, e com isso, desde à década de 1970, após a conferência de Estocolmo em que foram expostos os riscos do esgotamento dos recursos naturais do planeta, discute-se formas de se utilizá-los sem que haja a exaustão e a partir, da década de 80, o termo desenvolvimento sustentável surge como a maneira de garantir a sobrevivência de todos no planeta (JESUS *et al.*, 2021; RUPPENTHAL, 2014; MILARÉ, 2011).

Segundo Braga *et al.* (2005), o detalhamento desse conceito demonstrou que a avaliação podia ser feita com razoável margem de objetividade, de modo que ela pudesse ter aceitação e representatividade social e transformar-se em instrumento do processo de tomada de decisões no licenciamento ambiental a qual deveria ter características técnicas mínimas regulamentadas pelo poder público.

Porém apesar das complexidades dos impactos e dos fenômenos naturais, as AIA possuem características comuns entre si, sendo que segundo Munn (1975) *apud* Braga *et al* (2005), Moraes e D'Aquino (2016) e Jesus *et al.* (2021) as características básicas de uma avaliação de impacto ambiental se resumem em:

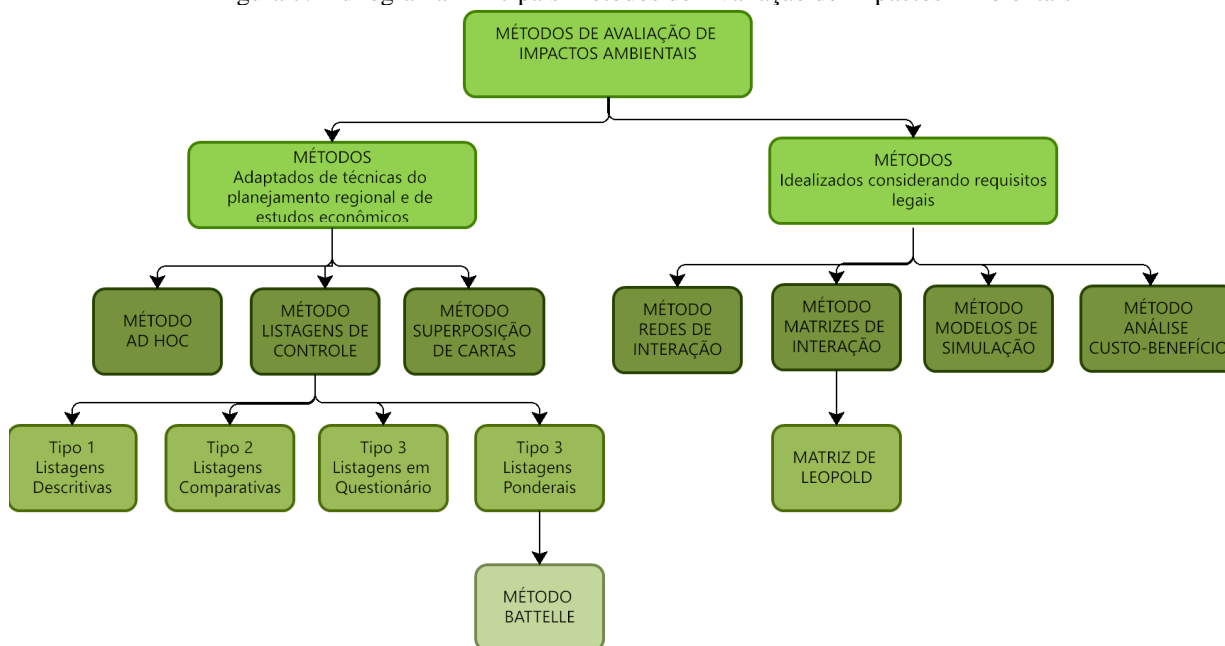
- a) Descrever a ação proposta e as alternativas também;
- b) Prever a natureza e a magnitude dos efeitos ambientais;
- c) Identificar as preocupações humanas relevantes;

- d) Listar os indicadores de impacto e definir sua magnitude;
- e) Dimensionar para o conjunto de impactos, os pesos de cada indicador obtidos do decisor ou das metas nacionais; e
- f) A partir dos valores de magnitude, determinar os valores de cada indicador de impacto e o impacto ambiental total.

Como mencionado, nos anos 1980, os métodos de avaliação de impactos ambientais receberam relevância nacional, quando em 1981, o Brasil definiu a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) por meio da Lei Federal nº 6.938 (BRASIL, 1981). Com essa lei foram criados os instrumentos da Avaliação de Impactos Ambientais (AIA) e do Licenciamento de Atividades Efetiva ou Potencialmente Poluidoras com o objetivo de alcançar a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida aliada ao desenvolvimento socioeconômico do país.

Porém existem vários métodos, sendo que a maioria é adaptação de algum método já existente, podendo se resumir os métodos, que são adaptações de técnicas do planejamento regional e de estudos econômicos (SÁNCHEZ, 2020), entre os de análise de potencialidade de utilização do solo e de usos múltiplos de recursos naturais; análises de custo e benefício; e modelos matemáticos; além de outros métodos que foram idealizados considerando os requisitos legais, como é o caso dos Métodos das Matrizes e das Redes de Interação.

Figura 7: Fluxograma Principais Métodos de Avaliação de Impactos Ambientais



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Com base nas pesquisas em Milaré (2011), Ruppenthal (2014), Moraes e D’Aquino (2016), Martins e Carmo Junior (2018) e Jesus *et al.* (2021) e com base na Literatura de Sánchez

(2020), tem-se, conforme mostrado na Figura 7, 2 (duas) grandes áreas de avaliação, aquela com base no planejamento regional e econômico e outra com base em quesitos legais, a qual a primeira é composta por 3 (três) tipos de métodos (Ad Hoc, Listagens de Controle e Superposição de Cartas) e a segunda composta por 4 (quatro) métodos (Redes de Interação, Matrizes de Interação, Modelos de Simulação e Método Análise Custo-Benefício).

Entretanto os métodos das matrizes de interação são as mais utilizadas pelos pesquisadores por se comportarem como uma evolução das listagens de controle e por serem listagens de controle bidimensionais (JESUS *et al.*, 2021).

As matrizes de interação, que se apresenta como vantagens e desvantagens conforme Quadro 1, são métodos que utilizam da metodologia de matrizes (colunas x linhas) para o levantamento das causas e dos impactos ambientais de determinado empreendimento, possibilitando uma interrelação entre os fatores ambientais e as ações decorrentes de um projeto e essas são agrupadas de acordo com as fases de construção/implantação e de operação/manutenção, sendo que nas colunas ficam dispostos os fatores ambientais e nas linhas, as ações decorrentes do projeto (SÁNCHEZ, 2020).

Quadro 1: Vantagens e Desvantagens - Método das Matrizes de Interação

Vantagens	Desvantagens
I. Possibilidade de relacionar os impactos de cada ação com o cruzamento das colunas (fatores) em as linhas (ações);	I. Segundo Braga <i>et al</i> (2005) as dificuldades de fixar critérios de relevância e de ponderação dos indicadores ambientais, para torná-los comensuráveis e passíveis de valorização globalizada, fazem as matrizes serem tão vulneráveis e sujeitas a riscos quanto os métodos anteriores.
II. Preservação de causa e efeito entres os impactos analisados;	
III. Possibilidade de classificar as ações por grau de potencialidade de maior número de impactos;	
IV. Interação com indicadores quantitativos e qualitativos e configuração do potencial de impacto de cada ação;	
V. Permite a prefixação de medidas mitigadoras dos impactos estudados e análise dos pontos de convergência entre as fases de implantação e operação do projeto estudado.	

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

E dentre as matrizes mais utilizada, é a Matriz de Leopold, uma das matrizes mais utilizadas foi concebida pelo US Geological Survey (Serviço Geológico dos Estados Unidos) em 1971 e é conhecida como Matriz de Leopold²¹ publicada em “*A Procedure for Evaluating Environmental Impact in Geological*” pela Secretária de Riscos Geológicos dos Estados Unidos.

²¹ Leopold e seus colaboradores aplicaram seu método, pela primeira vez, à análise dos impactos de uma mina de fosfato e para isso selecionaram 09 (nove) ações e 13 (treze) componentes ambientais e das 117 (cento e dezessete) interações possíveis, consideraram somente 40 (quarenta) que eram pertinentes ao projeto que analisaram.

Segundo Leopold *et al.* (1971), o método consiste em uma lista preestabelecida de 100 (cem) ações humanas que podem causar impactos ambientais, e outra lista de 88 (oitenta e oito) componentes ambientais que podem ser afetados por aquelas ações humanas, correlacionadas entre si conforme nota-se no extrato de parte da matriz representado na Figura 8, sendo então, 8.800 as interações possíveis e para cada empreendimento, os analistas selecionam as ações que se aplicam ao caso concreto, ou cria-se a própria lista de ações e aplica-se o mesmo procedimento para os componentes ambientais. Depois de selecionadas as ações e os componentes ambientais pertinentes, o analista deve identificar todas as interações possíveis, marcando a célula correspondente.

Figura 8: Extrato da matriz de Leopold

	Sítios industriais e edifícios II B.b.	Estradas e pontes II B.d.	Linhas de transmissão II B.h.	Detonação e perfuração II C.a.	Escavações de superfície II C.b.	Processamento de minério II D.f	Transporte por caminhões II G.c	Disposição de rejeitos II H.c.	Vazamentos II J.b.			
A.2.d. Qualidade da água					2	2	1	1	2	2	1	4
A.3.a. Qualidade da atmosfera						2	3					
A.4.b. Erosão	2	2			1	1			2	2		
A.4.c. Sedimentação	2	2			2	2			2	2		
B.1.b. Arbustos					1	1						
B.1.c. Gramíneas					1	1						
B.1.f. Plantas aquáticas					2	2			2	3	1	4
B.2.c. Peixes					2	2			2	2	1	4
C.2.e. <i>Camping</i> e caminhadas					2	4						
C.3.a. Vistas cênicas e paisagem	2	3	2	1	2	3	2	3	2	1	3	3
C.3.b. Qualidade do ambiente selvagem	4	4	4	2	2	1	3	3	2	5	2	5
C.3.h. Espécies raras e importantes	2	5			5	10	2	4	5	10	5	10
C.4.b. Saúde e segurança									3	3		

Fonte: Leopold *et al.* (1971)

Segundo Sánchez (2020), de acordo com a proposta original, a matriz de Leopold também se presta a outras finalidades além da identificação dos impactos, principalmente para a comunicação dos resultados que são expressos em uma escala numérica onde os números inseridos em cada célula correspondem a uma pontuação de magnitude e importância da interação, em uma escala arbitrária de 1 a 10 (se a magnitude for zero não há interação e a célula não é marcada), sendo que a magnitude é apontada no canto superior esquerdo da célula, ao passo que a importância é apontada no canto inferior direito.

Ainda segundo Sánchez tem-se que hoje em dia, inúmeras variações da matriz de Leopold, que, na verdade pouco têm a ver com a original, a não ser a forma de apresentação e de organização das linhas e colunas assim como a metodologia.

A matriz de Leopold, que se apresenta como vantagens e desvantagens conforme Quadro 2, foi concebida para avaliar os impactos ambientais da mineração no início da década

de 1970 (TESSLER e FARINACCIO, 2010). Além disso por ser do tipo matriz de interação, a matriz de Leopold, possui maior versatilidade capacidade de se adaptar às demandas do empreendimento estudado (MARTINS e CARMO JUNIOR, 2018).

E ainda por ser a metodologia de avaliação de impactos ambientais mais conhecida com o objetivo de avaliar os impactos relacionados a quase todos os tipos de implantação de projetos (SILVA *et al.*, 2021), a presente dissertação, no Capítulo 5.5 (Viabilidade Ambiental do pó de pedra/brita na fabricação de mistura de concreto) dimensionou uma Matriz de Interação do tipo Leopold adaptada ao presente caso de estudo que se trata dos impactos da Indústria de Agregados da Brita, mais especificamente os efeitos do reaproveitamento do pó de pedra/brita.

Quadro 2: Vantagens e Desvantagens - Matriz de Leopold

Vantagens	Desvantagens
I. Permite a interrelação entre as ações e os fatores ambientais	I. Aplicabilidade limitada a depender do caso estudado, devido a generalidade da abrangência buscada pela matriz, sendo usado como referência
II. Possibilita a criação de pontos de análise prévios e as convergências entre as fases de implantação e de operação do empreendimento/projeto;	II. As avaliações e dados resultantes são de difícil interpretação e visualização dos impactos, devido a elaboração de uma matriz frequentemente grande com inúmeros preenchimentos, mas sendo frequentemente utilizado para as ações que estão mais presentes no projeto em estudo, havendo a necessidade de novas seleções para eliminar os impactos menos significativos
III. Permite inúmeras possibilidades de interações entre os impactos ambientais prováveis, permitindo o preestabelecimento das medidas mitigadoras dos impactos.	

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

3.5 ENERGIA INCORPORADA E EMISSÃO CO₂

A Energia Incorporada é definida como a energia primária total consumida a partir de processos diretos e indiretos associados a um produto ou serviço e dentro dos limites *cradle-to-gate* (“berço ao portão”) do empreendimento. Isto inclui todas as atividades desde a extração do material (pedreira/mineração), fabricação, transporte até que o produto esteja pronto para sair pelo portão final da fábrica (HAMMOND e JONES, 2010).

A importância de calcular a energia incorporada (EI) reside no fato de tratar-se de um método holístico capaz medir o fator de sustentabilidade dos materiais de construção e que por definição, a energia incorporada é a soma de todos os tipos de energia consumidos durante a produção de um produto ou serviço específico (UDAWATTHA e HALWATURA, 2016). A escolha de um determinado material de construção pode ter vários efeitos na incorporação de energia aplicada, na emissão de dióxido de carbono e na compatibilidade ambiental, além de determinar o ciclo de custo de uma edificação.

E segundo Udawattha e Halwatura (2016) calcular a energia aplicada da construção é um passo para a conservação ambiental. Logo a introdução de materiais de construção de baixo

consumo de energia é muito importante para melhorar a sustentabilidade e análise de energia incorporada é uma ferramenta significativa e um método para avaliar a sustentabilidade ambiental de um material de construção específico (SAGHAFI e HOSSEINI, 2011; SHUKLA *et al.*, 2009).

Aliado a EI há também, associado aos materiais de construção, o fator de emissão de dióxido de carbono (ECO₂) que, segundo Mithun e Narasimhan (2016), é o dióxido de carbono (CO₂) liberado para a extração de matéria-prima, transporte, fabricação, montagem, instalação, desmontagem e desconstrução de qualquer sistema de material/produto ao longo da sua vida útil. Segundo Hammond e Jones (2010), o fator ECO₂ ou Carbono Incorporado é um índice que pode ser medido pela concepção *cradle-to-gate* (“berço ao portão”) ou pela concepção *gardle-to-grave* (“berço ao caixão”) e trata-se da soma das emissões de carbono relacionadas ao combustível e as emissões de carbono relacionadas ao processo, ou seja, é o somatório das emissões de CO₂ da energia incorporada queimada (não se confunde com a energia da matéria-prima que é retida dentro do material) com as emissões CO₂ não relacionadas a apenas ao combustível e também com outros processos durante a produção que podem surgir, por exemplo, as reações químicas das matérias-primas, sendo que os dados do Inventory of Carbon and Energy (ICE)²² são pela concepção *cradle-to-gate*.

Diante do exposto, a seleção de materiais e produtos de construção para um projeto de construção sustentável de alto desempenho é uma tarefa difícil e desafiadora tendo em vista o fato de considerar todos os aspectos ambientais dos materiais de construção e tecnologias de construção, tornando essa seleção e avaliação ambiental de materiais e edifícios muito complexa, devido, também, à subjetividade e às necessidades variadas de diferentes usuários (SAGHAFI e HOSSEINI, 2011). Somado isso tem-se, segundo Dixit *et al.* (2010) e Saghafi e Hosseini (2011), que as interpretações atuais da EI e ECO₂ variam bastante tendo em vista que os bancos de dados sofrem de problemas de variabilidade e incompatibilidade devido as variáveis de condições regionais e nacionais, processos de fabricação, conteúdo reciclado, fontes de energia e parâmetros de estudo, assim, segundo estes autores, por enquanto, é aceitável confiar em variados bancos de dados internacionais. Diante disto, e considerando que para avaliar a sustentabilidade ambiental de um material específico e comparar com outros materiais disponíveis, a pegada de CO₂ é geralmente o principal parâmetro e sendo a análise de energia incorporada um método eficaz e potente a ser empregado (ZANOLETTI *et al.*, 2017).

²² O Inventário de Carbono e Energia (*Inventory of Carbon and Energy* - ICE) criado pelo Dr. Graig Jones e Dr. Geoff Hammond e pela Universidade de Bath (Inglaterra) é um extenso banco de dados gratuito e online que consta informações sobre EI e ECO₂ para diversos materiais de construção.

3.6 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

Dada a importância do concreto nos setores de construção e transporte, as avaliações ambientais dos sistemas de produção de concreto são essenciais para avaliar os impactos ambientais e medir a eficácia das medidas de mitigação.

O método de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), do inglês *Life Cycle Assessment* (LCA), é um método cientificamente válido usado para estimar os impactos incorporados produzidos ao longo do ciclo de vida de um produto uma vez que os dados ambientais relativos aos elementos de construção, componentes, materiais, produtos e processos desempenham um papel crucial (PAGLIARO *et al.*, 2023).

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) traduz emissões e extrações de recursos em um número limitado de resultados de impacto ambiental por meio dos fatores de caracterização. Cada substância, recurso e extração pertencente ao processo de fabricação é classificado e contabilizado de acordo com seu grupo de recursos, compartimentos, ar e solo. Esses grupos são as emissões que contribuem para os níveis de toxicidade do processo de fabricação, os quais para cada substância do processo fabril é contabilizado as emissões com base nos fatores de caracterização e conforme o guia operacional ISO 14.044 do manual LCA (SÁNCHEZ *et al.*, 2021).

Estudos de ACV exploram uma gama mais ampla de impactos ambientais associados à produção de concreto destacando liberações significativas de material particulado (VAN DEN HEEDE e DE BELIE, 2012), bem como metais e dioxinas resultantes da combustão de combustível (PETEK GURSEL *et al.*, 2014; VAN DEN HEEDE e DE BELIE, 2012), que a produção de concreto representa 9% das retiradas de água industrial global (MILLER *et al.*, 2018). Diante disto a ACV de concreto tem se concentrado principalmente na melhoria do processo por meio do uso de combustíveis alternativos (GEORGIPOULOU e LYBERATOS, 2018; ZHANG e MABEE, 2016) e na substituição do cimento Portland (PETEK GURSEL *et al.*, 2014; VAN DEN HEEDE e DE BELIE, 2012) e dos agregados por materiais alternativos (HOTTLE *et al.*, 2022; VAN DEN HEEDE e DE BELIE, 2012)

Logo percebe-se que a ACV pode ser definida como sendo uma abordagem holística para a verificação das implicações ambientais dos produtos e processos, desde o seu ‘nascimento’ até a sua ‘morte’, sendo que essa ferramenta fornece às indústrias os meios necessários para a identificação e avaliação das oportunidades de minimizar os impactos ambientais adversos (BRAGA *et al.*, 2005).

A ACV pode apresentar variações quanto às suas fronteiras de estudo: quando considera todo o ciclo do produto é denominada “*cradle to grave*”- do berço à cova, quando o estudo é parcial e não considera o uso e disposição final chama-se “*cradle to gate*” – do berço ao portão (MUTHU, 2015).

Segundo a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), a ACV é composta por 4 fases fundamentais, sendo:

a) Definição de objetivo e escopo: deve estar coerente com a aplicação pretendida, o sistema do produto e suas fronteiras e quais tipos de impactos serão avaliados, qual interpretação será utilizada e as limitações da ferramenta;

b) Análise de inventário: refere-se ao conjunto de dados de entrada/saída associados ao sistema em estudo, envolvendo a coleta dos dados necessários para o alcance dos objetivos do estudo em questão;

c) Avaliação de Impactos do ciclo de vida (AICV): tem como objetivo prover a ACV de informações adicionais para ajudar na avaliação dos resultados de um sistema de produto, visando ao melhor entendimento de sua significância ambiental; e

d) Interpretação: fase a qual o inventário do ciclo de vida é sumarizado e discutido como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão de acordo com a definição de objetivo e escopo.

3.7 FERRAMENTAS DE ACV E SOFTWARES UTILIZADOS

Os métodos de avaliação são utilizados durante a terceira etapa da ACV, ou seja, após determinadas as categorias de impacto que serão avaliadas, as ferramentas de cálculo são empregadas para mensurá-las (STAFFORD *et al.*, 2016; STRADIOTO NETO, 2020) e podem ser classificados em ponto médio (*midpoint*) ou ponto final (*endpoint*) (PIEKARSKI, 2013).

Nos métodos *midpoint* todas as substâncias identificadas durante o inventário são conectadas apropriadamente às categorias de impacto, e quantificadas conforme suas características de efeitos no meio ambiente, desconsiderando, porém, as consequências finais na via ambiental das emissões (CAVALETT *et al.*, 2013; GOEDKOOP *et al.*, 2009).

Diferentemente da modelagem *endpoint* que consiste em caracterizar a gravidade, ou implicações, das categorias de impactos *midpoint*, nas áreas de proteção finais, que são a saúde humana, ambiente natural e recursos naturais (CAVALETT *et al.*, 2013; GOEDKOOP *et al.*, 2009). Logo enquanto o método *midpoint* é orientado ao problema, o *endpoint* é orientado aos danos (CAVALETT *et al.*, 2013).

Algumas das ferramentas utilizadas para a realização da ACV são Ecological Scarcity, EDIP, CML, ReCiPe, Eco-indicator 99, Impact 2002+, EPS 2000, USEtox e IMPACT World+ todos desenvolvidos na Europa; TRACI e LUCAS desenvolvidos na América do Norte e LIME desenvolvido no Japão. Percebe-se que há uma lacuna de métodos desenvolvidos na América do Sul, o que justifica a falta de procedimentos de caracterização para utilização nas ACV's no Brasil (STRADIOTO NETO, 2020). Diante disto tem-se as seguintes características dos métodos, conforme APÊNDICE C – CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS MÉTODOS DE ACV.

Logo ao lidar com a avaliação dos impactos ambientais de várias substâncias frente aos inúmeros métodos de ACV existentes surgem dois problemas: diferentes métodos ACV fornecem resultados muito diferentes e, conseqüentemente, as incertezas nesses resultados são altas (CAVALETT *et al.*, 2013). Diante disto é aconselhado o uso de múltiplas metodologias durante a realização da ACV com intuito de interpolar e avaliar as diferentes categorias de impacto ambiental, modelos de caracterização e indicadores (PIEKARSKI, 2013) e sendo necessário fazer aproximações possíveis entre as diferentes categorias de impacto disponíveis em cada ferramenta de software (MARTÍNEZ *et al.*, 2015).

Os métodos CML e Eco-indicator 99, são as ferramentas que apresentam maior robustez nos resultados (MARTÍNEZ *et al.*, 2015). Entretanto as metodologias mais aplicadas nos projetos de ACV no Brasil e na Europa são majoritariamente europeias, tais como: CMILIA, ILCD 2011 e EDIP 2003 em nível *midpoint*, Ecological Scarcity 2013 em nível *endpoint*, e ReCiPe, *midpoint* e *endpoint* (CHERUBINI e RIBEIRO, 2015). Quanto ao uso do software em si a tendência mundial nos estudos ACV está voltada para a utilização dos softwares SimaPro, GaBi Software, Umberto e OpenLCA, acrescenta Cherubini e Ribeiro (2015).

Os impactos ambientais podem ser divididos em vários níveis: global, regional e local. As questões em nível global dizem respeito, basicamente, à destruição do ozônio, ao efeito estufa e ao aquecimento global relacionado. A nível regional, os problemas mais importantes são a acidificação do ambiente e a eutrofização da água e a nível local o consumo de fontes locais de matérias-primas, especialmente recursos não renováveis e água, é a principal preocupação (FIALA, 2011 *apud* LAIBLOVÁ *et al.*, 2019).

Por não existirem métodos desenvolvidos especificamente para o contexto brasileiro, nem para a América do Sul, os métodos de ACV recomendados para aplicação no Brasil são

aqueles que apresentam uma abrangência classificada como global para o escopo de aplicação de suas categorias (MENDES, 2013).

No Brasil, a ferramenta ACV vem se desenvolvendo por meio do Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida (PBACV) que conta com o apoio do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), o Instituto Brasileiro de Informação, Ciência e Tecnologia (IBICT) e instituições representantes de setores da economia. (IBICT, 2023)

As normas ISO 14040 e 14044 fornecem um guia indispensável para a realização de uma ACV, mas deixam grandes brechas para que os aplicadores tomem decisões individuais. Neste contexto diversas metodologias mais detalhadas, baseadas nas normas ISO 14040 e 14044, foram criadas para guiar o processo de aplicação da ferramenta de ACV (SOMBRIO, 2015), entre elas o Manual do *International Reference Life Cycle Data System* (ILCD), uma iniciativa da Comissão Europeia de Produção e Consumo Sustentável e Plano de Ação Sustentável em Política Industrial.

O PBACV definiu a metodologia do ILCD como a metodologia padrão para a realização da ACV no Brasil, uma vez que o processo europeu demonstrou que a metodologia do ILCD é a mais harmonizada no sentido de atender a diferentes objetivos e a ISO 14000 (CALDEIRA PIRES *et al.*, 2013).

Capítulo 4

4 METODOLOGIA

A metodologia da presente dissertação, conforme Quadro 3, inicialmente, partiu de ampla revisão de literatura, seguido de um sistemático levantamento bibliométrico, que por consequência viabilizou a consecução das fases e análises acerca da Viabilidade Técnica, Ambiental e Econômica, onde foram avaliados tanto os aspectos das propriedades físicas e mecânicas do concreto reciclado com pó de pedra/brita quanto os impactos dessa substituição na área da sustentabilidade (avaliação dos impactos ambientais) e da economia (custo-benefício).

Quadro 3: Metodologia da Dissertação

Item	Fases	Descrição
1	Revisão da Literatura	<p>Teve-se na revisão de literatura a busca por autores renomados da área de Materiais de Construção e Concreto, além da área de Avaliação de Impactos das Indústrias de Agregados para Construção Civil.</p> <p>Autores como Helene, Neville, Falcão Bauer, Metha Monteiro, serviram de base pedagógica; seguido das Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e da <i>American Concrete Institute</i> (ACI) que possuem escopo referente a propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido; também, se buscou através de artigos nacionais e internacionais, dissertações de mestrado e teses de doutorado, acerca da aplicação do pó de pedra/brita na substituição da areia natural na confecção de concreto.</p>
2	Levantamento bibliométrico	<p>Consistiu no levantamento de artigos de pesquisa em bases de dados on-line disponíveis através do <i>Web of Science</i> e <i>Google Acadêmico</i> (sistemas de acesso aberto) para investigar as alternativas de substituição de material residual de britagem como sendo agregado miúdo para confecção de concreto, diminuindo o uso da areia natural.</p> <p>A coleta de uma quantidade expressiva e relevante de artigos da literatura teve como marco final o ano de 2022 e início o ano de 2012 com o objetivo de avaliar estatisticamente o desenvolvimento da pesquisa e as contribuições durante 10 anos.</p> <p>Na sequência, organizou-se os estudos publicados por ano, por porcentagem de substituição de agregados finos e classes de resistências atingidas gerando-se um mapa bibliométrico utilizando o <i>software VOSviewer</i> para visualizar a intercalação das palavras-chave mais relevantes na pesquisa.</p>
3	Viabilidade Técnica	<p>Após o levantamento dos artigos, se fez um tratamento estatístico dos resultados demonstrados nos artigos dos pesquisadores, elaborando-se tabelas e gráficos contendo os valores das propriedades físicas e químicas dos agregados, de consistência (<i>Slump Test</i>), resistência à compressão, flexão e tração, absorção e penetração de água, penetração de íons cloreto, frente de carbonatação com o objetivo de comparar com valores preconizados pelas respectivas normas técnicas.</p>

Continua

Item	Fases	Descrição
4	Viabilidade Ambiental	Posteriormente foram desenvolvidos indicadores de Impacto Ambiental (Energia Incorporado, Emissão de Dióxido de Carbono, Matriz de Leopold e Análise de Ciclo de Vida) a fim de demonstrar os benefícios que podem vir a trazer o uso do rejeito do pó de pedra/brita na confecção de concreto.
5	Viabilidade Econômica	Nessa etapa levantou-se os preços do m ³ da areia natural e do pó de pedra/brita, com base em uma série temporal, de 2019 a 2023, tentando correlacionar com os ciclos econômicos vivenciados pela construção civil nesse intervalo de tempo. E ao final buscar propor uma composição de custo unitário para o mercado da construção civil, como sugestão profissional do produto desenvolvido com pó de pedra/brita.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

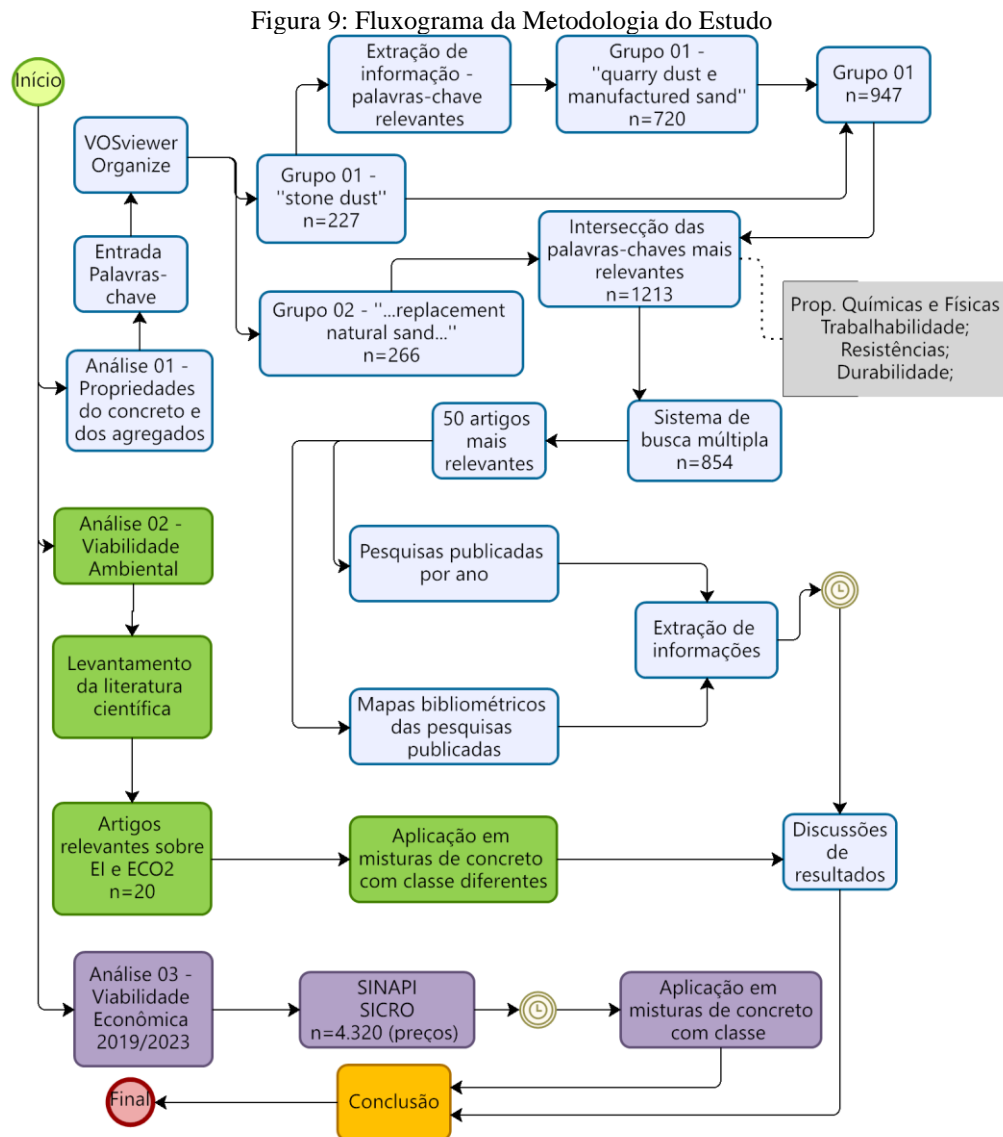
A metodologia aplicada neste trabalho concentrou-se na realização de uma ampla revisão da literatura e na definição de direções exploratórias futuras sobre a substituição de areia natural por pó de pedra/brita. A busca de revisão de literatura foi iniciada por meio de mineração de dados de artigos e agrupamento classificando os documentos encontrados em um recorte temporal dos últimos 10 anos, com posterior avaliação dos trabalhos e com o objetivo de responder às questões críticas de pesquisa:

- a) Quais são as diferenças nas propriedades químicas e físicas dos agregados de pó de pedra/brita em comparação com as da areia natural?
- b) Como o pó de pedra/brita influencia a trabalhabilidade, as propriedades mecânicas, as propriedades físicas e durabilidade do concreto reciclado?
- c) Qual o teor ideal de substituição do agregado miúdo natural por pó de pedra/brita?
- d) A substituição da areia natural pelo pó de pedra/brita pode reduzir os impactos ambientais em termos de energia e emissões?
- e) A substituição da areia natural por pó de pedra/brita pode gerar concretos com custo-benefício mais atrativo para o mercado da construção civil?

Sendo que as três primeiras perguntas foram respondidas com base na Revisão Sistemática com o uso do *software VOSviewer*, enquanto que a quarta e quinta perguntas foram respondidas com base em uma revisão de literatura, tendo em vista que trata-se de uma das lacunas da pesquisa de análise da substituição de areia natural por pó de pedra/brita, comprovando-se, já inicialmente, os trabalhos desenvolvidos não são amplos o suficiente para abarcar as questões econômicas e ambientais em um só trabalho, havendo a necessidade de particionar a pesquisa em revisão sistemática e em revisão de literatura.

Diante disto, inicialmente, tem-se que a realização de uma revisão sistemática da literatura por meio de uma avaliação bibliométrica é a maneira mais adequada de garantir uma melhor qualidade nas listas de referências, além de servir como uma ferramenta para avaliar

estatisticamente os resultados das pesquisas mais recentes de artigos publicados, capítulos de livros e anais de congressos relacionados ao assunto (BACHINILLA *et al.*, 2022; MORRISEY, 2013; SNYDER, 2019). Com isso, usando o *software Bizagi Modeler*, versão 4.0.0.065 (BIZAGI MODELER, 2023), a Figura 9 ilustra a sequência da metodologia do estudo.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

4.1 PARÂMETROS DA REVISÃO SISTEMÁTICA

A revisão sistemática de literatura proposta neste trabalho foi dividida em diferentes etapas. Primeiramente, foi realizada a seleção de palavras-chave, com foco na propriedade e aplicação do material. Essas palavras-chave foram cuidadosamente escolhidas para estabelecer uma base sólida para a busca subsequente na literatura. Em seguida, uma análise bibliométrica foi realizada utilizando o *software VOSviewer*, versão 1.6.11, desenvolvido na *Leiden University*, Leiden, Holanda. Essa análise permitiu avaliar a correlação entre as palavras-chave

selecionadas e outras palavras-chave potenciais, fornecendo *insights* valiosos sobre as últimas tendências e referências que devem ser incorporadas à revisão da literatura.

Em seguida, foi realizado a busca bibliográfica, utilizando-se bases de dados eletrônicas como *Web of Science* e *Google Scholar*. Além disso, aplicando filtros, definindo intervalos de datas, excluindo duplicatas e eliminando tipos de documentos específicos, obteve-se uma seleção refinada. Por último, no que se refere a esta base de dados refinada, os documentos mais relevantes foram selecionados para uma análise mais aprofundada. As informações extraídas desses documentos foram utilizadas para responder às questões críticas de pesquisa colocadas na seção de introdução e definir direções exploratórias futuras, considerando a conquista de uma indústria de concreto mais sustentável.

Diante disto, a revisão sistemática da literatura foi dividida em seis etapas:

- Etapa 1: Entrada de palavras-chave usando dois grupos (propriedade do material e aplicação do material);
- Etapa 2: Criação de um mapa bibliométrico, usando o *VOSviewer*, para avaliar a correlação das palavras-chave sugeridas com outras palavras-chave potenciais e visualizar as últimas tendências e referências a serem incorporadas à revisão da literatura;
- Etapa 3: Coleta de informações em bancos de dados eletrônicos de vários sistemas de pesquisa (banco de dados *Web of Science* e banco de dados *Google Scholar*). Essa pesquisa produziu inicialmente mais de 1.200 documentos, que, após a aplicação de filtros, definindo a data, excluindo duplicatas e tipos de documentos, como publicações comerciais, notas, notícias, capítulos de livros e erratas, adotando como área temática "engenharia e construção de materiais e similares", e após a triagem do banco de dados final, incluiu mais de 850 documentos sobre a aplicação de pó de pedra/brita no concreto;
- Etapa 4: Extração de informações da etapa 2, que organiza os objetivos da revisão, os métodos usados e os resultados que podem ser aplicáveis a estudos futuros, e seleção dos documentos mais relevantes da etapa 2 para servir como fontes para o levantamento das propriedades do concreto com pó de pedra/brita, ou seja, 50 artigos mais relevantes;
- Etapa 5: A revisão da literatura determina os estudos publicados por ano por resistência-alvo pesquisada para produzir concreto com substituição de areia natural por pó de pedra/brita;
- Etapa 6: Extração de informações da etapa 5 que organiza os objetivos da revisão, os métodos usados e os resultados que podem ser aplicáveis a estudos futuros;

4.1.1 Entrada de palavras-chave e coleta de documentos

Os requisitos de desempenho para a escolha dos sistemas de pesquisa devem permitir a realização de consultas, a aplicação de filtros ou o gerenciamento da pesquisa de citações, com altos padrões e acessibilidade dos recursos de dados (BACHINILLA *et al.*, 2022). Antes de iniciar a revisão sistemática, foi preciso inicialmente proceder com a coleta de documentos relevantes de várias fontes. A seleção de um sistema de busca apropriado é um fator fundamental para os resultados desta revisão. A Tabela 4 resume os dois grupos de palavras-chave de entrada para a presente revisão, ressalta-se que como os bancos de dados dos artigos encontra-se no idioma da língua inglesa, adotou-se tal idioma tendo em vista as bases de dados serem estrangeiras.

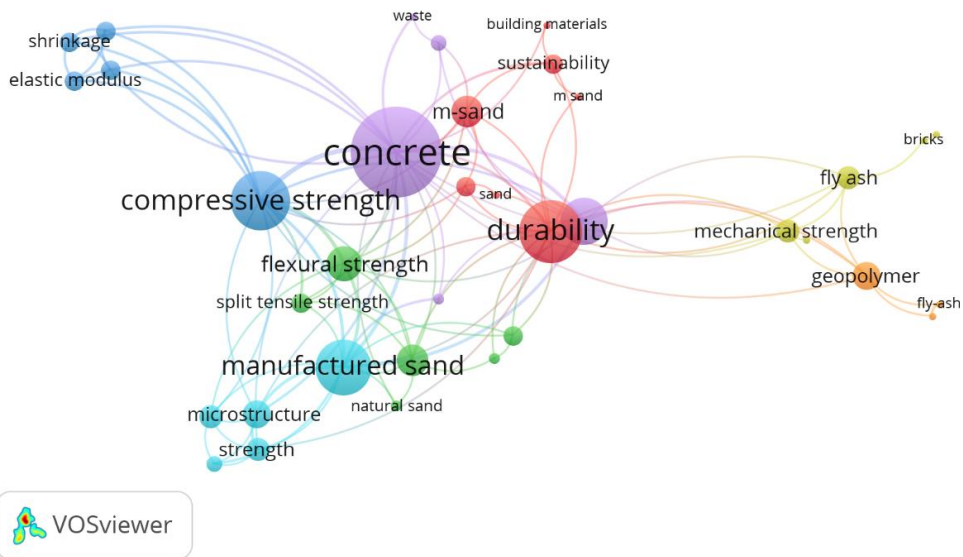
Tabela 4: Grupos de palavras-chave de entrada para a revisão atual.

Palavras-chave	
1º Grupo	2º Grupo
“concrete” and “stone dust”	“concrete” and “stone dust” and “replacement natural sand”
“concrete” and “quarry dust”	“concrete” and “quarry dust” and “replacement natural sand”
“concrete” and “manufactured sand”	“concrete” and “manufactured sand” and “replacement natural sand”

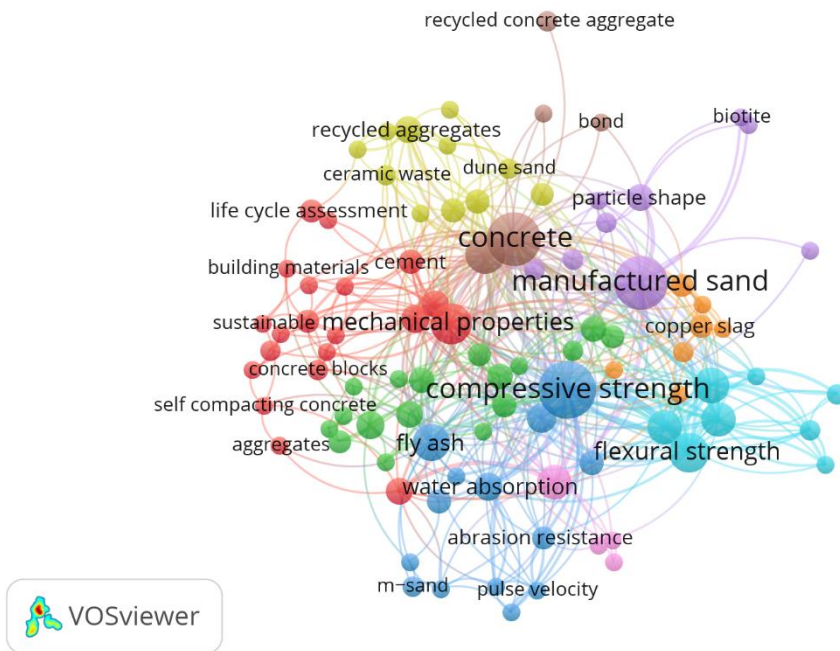
Fonte: Elaborador pelo Autor (2023)

Quando a busca foi realizada com as palavras-chave do 1º Grupo (*“concrete” and “stone dust”/“concrete” and “quarry dust”*), observou-se uma forte relevância de um terceiro grupo de palavras, *“concrete” and “manufactured sand”*, que foram adicionadas a esta pesquisa. Com os artigos obtidos por meio dessa busca por grupos de palavras-chave, foram elaborados mapas bibliométricos, por meio da correlação de palavras-chave, utilizando dois sistemas de busca apropriados e por meio do *VOSviewer*, conforme mostram as Figura 10 e Figura 11. Ao avaliar os dois mapas bibliométricos, observou-se a relevância de palavras como resistência à compressão, resistência à flexão, durabilidade, módulo de elasticidade, agregados reciclados e propriedades mecânicas nos três pares de palavras-chave do 1º Grupo, mostrando sua relevância nos estudos do período pesquisado.

Figura 10: Mapa bibliométrico - Input keywords “concrete” and “stone dust”.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)
 Figura 11: Mapa bibliométrico - Input keywords “concrete” and “manufactured sand”.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

A Tabela 5 resume os dois sistemas de busca adequados e utilizados nesta revisão: *Web of Science* e *Google Scholar*. O principal motivo para a escolha desses sistemas de pesquisa é o fato de serem mecanismos de pesquisa de acesso aberto. A busca por documentos relevantes começou em 2012, o ano da Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, conhecida como Rio+20, que ocorreu no Rio de Janeiro. Durante essa conferência, foi discutida a estratégia para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Tabela 5: Sistemas de pesquisa adotados

Nome Banco de Dados	Disciplina	Número de Documentos				
		Antes dos filtros		Depois dos filtros		Total
		1º Grupo	2º Grupo	1º Grupo	2º Grupo	
<i>Web of Science</i>	Multidisciplinar	213	98	178	67	245
<i>Google Scholar</i>	Multidisciplinar	734	168	495	114	609
Total	-	947	266	673	181	854

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

A busca principal foi quantificar pesquisas, como o uso de pó de pedra/brita em concreto reciclado, publicadas de 2012 a 2022. Incluindo a quantificação da pesquisa publicada nos últimos dez anos. Os critérios para a busca incluíram artigos de revisão, artigos de pesquisa e anais de conferências, publicados em inglês. Todos os artigos científicos eletrônicos coletados foram salvos no formato de arquivo RIS (*Research Information System*), permitindo que programas de citação, como o *VOSviewer*, correlacionassem dados de autores e citações. Por meio do *Software Mendeley Reference Manager* (MORRISEY, 2013), foram organizados todos os arquivos RIS coletados, eliminando duplicatas e facilitando as referências. O número total de arquivos RIS coletados para o 1º Grupo foi de 947; no entanto, após a organização usando o *Mendeley Reference Manager* e a remoção de duplicatas, o número de arquivos foi reduzido para 673. Da mesma forma, o segundo grupo que era inicialmente composto por 266 arquivos RIS no total, foi reduzido para 181.

Do total, 50 artigos foram selecionados para serem completamente analisados. Esse número foi obtido pelo Teorema do Limite Central²³, que questiona o tamanho da amostra "n" necessário para que a aproximação normal seja válida, e a resposta depende da distribuição da população dos dados da amostra (MONTGOMERY, 2020).

Entretanto, o tamanho do espaço amostral com $n < 10$ é considerado muito pequeno e com $n > 100$ muito grande, dependendo do caso de engenharia estudado (MONTGOMERY, 2020). Enquanto isso, o teorema do limite central deixa em aberto a questão de quão grande precisa ser o tamanho da amostra n para que a aproximação normal seja válida e, de fato, a resposta depende da distribuição da população dos dados da amostra (MONTGOMERY, 2020; ROSS, 2021). Uma regra geral é que se pode confiar na aproximação normal sempre que o tamanho da amostra n for pelo menos 30, ou seja, na prática, não importa o quanto a distribuição

²³ O Teorema do Limite Central diz que se x_1, x_2, \dots, x_n são variáveis aleatórias independentes com média e variância e se $y = x_1 + x_2 + \dots + x_n$, então a distribuição se aproxima da distribuição $N(0, 1)$ à medida que n se aproxima do infinito, o teorema do limite central implica que a soma de n variáveis aleatórias distribuídas independentemente é aproximadamente normal, independentemente das distribuições das variáveis individuais, de modo que a aproximação melhora à medida que n aumenta.

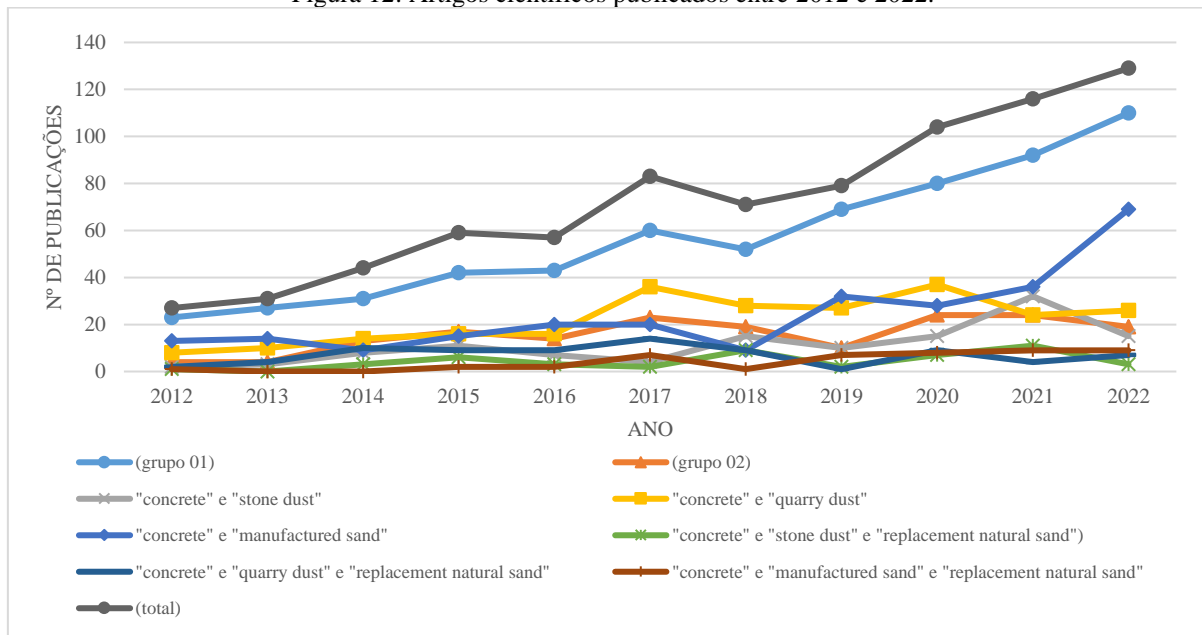
da população subjacente seja não normal, a média da amostra de uma amostra de tamanho pelo menos 30 será aproximadamente normal (ROSS, 2021).

Para definir os 50 artigos mais relevantes dentre os 181, foram definidos alguns critérios de exclusão e inclusão, com foco no uso de pó de pedra/brita. Foram incluídos os artigos publicados em periódicos dedicados à pesquisa e ao uso inovador de materiais na construção, tecnologia de materiais de construção civil ou em periódicos dedicados a questões de produção na construção civil mais sustentável. Por outro lado, foram excluídos os artigos apresentados em congressos, seminários e similares. Foram incluídos artigos cujo título apresentava as frases "*replacement*", "*granite*" ou "*marble*" ou "*limestone*", "*concrete*", "*concrete strength*" e "*quarry rock dust as a partial replacement*". Foram incluídos os artigos que substituíram a areia natural por agregado de pó de pedra/brita. O tipo de pó de pedra/brita usado também foi identificado, sendo incluídos apenas os de origem granítica, calcária ou de mármore.

4.1.2 Publicações sobre pó de pedra/brita em concreto por ano

A revisão bibliométrica resultou em gráficos para visualizar as tendências nos 854 documentos pesquisados da coleção 2012-2022 usando os bancos de dados *Web of Science* e *Google Scholar*. Na Figura 12, é possível observar que os documentos que contêm as palavras-chave de entrada para este estudo têm aumentado constantemente. Isso pode estar relacionado ao aumento da geração de pó de pedra/brita no processo de fabricação de agregados graúdo em pedreiras e à preocupação do setor com sua destinação final, e com a produção de um produto mais sustentável com reaproveitamento de resíduos e com melhor custo-benefício. Além disso, a crescente demanda por agregados miúdos para a produção de concreto, juntamente com a escassez de areia natural em algumas regiões, tem contribuído para a busca de agregados alternativos com baixo impacto ambiental.

Figura 12: Artigos científicos publicados entre 2012 e 2022.

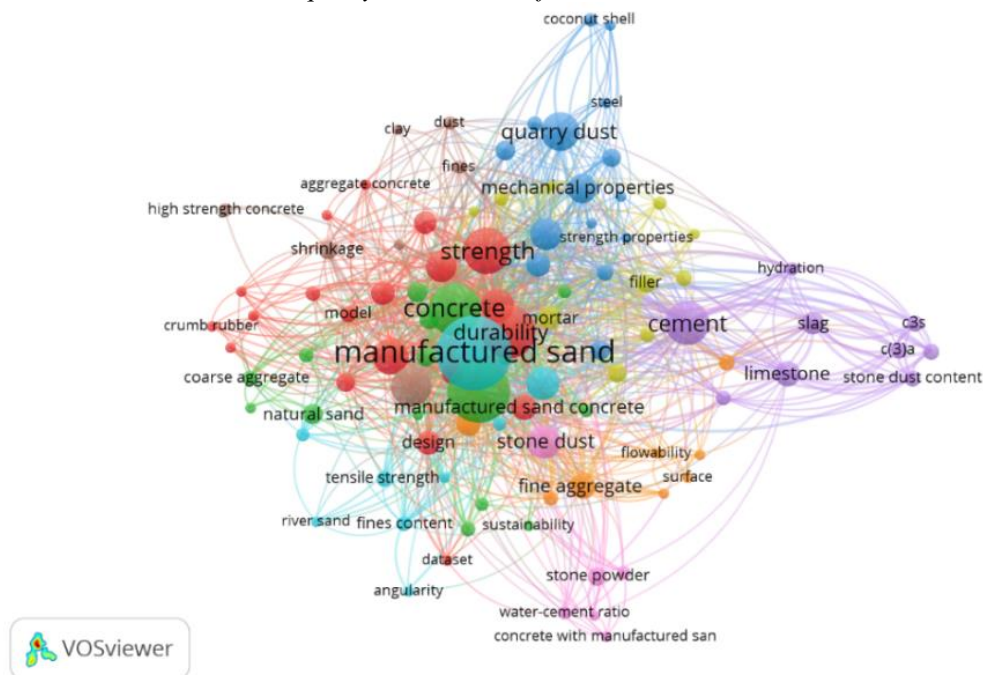


Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

4.1.3 Concreto reciclado com pó de pedra - Mapa Bibliométrico

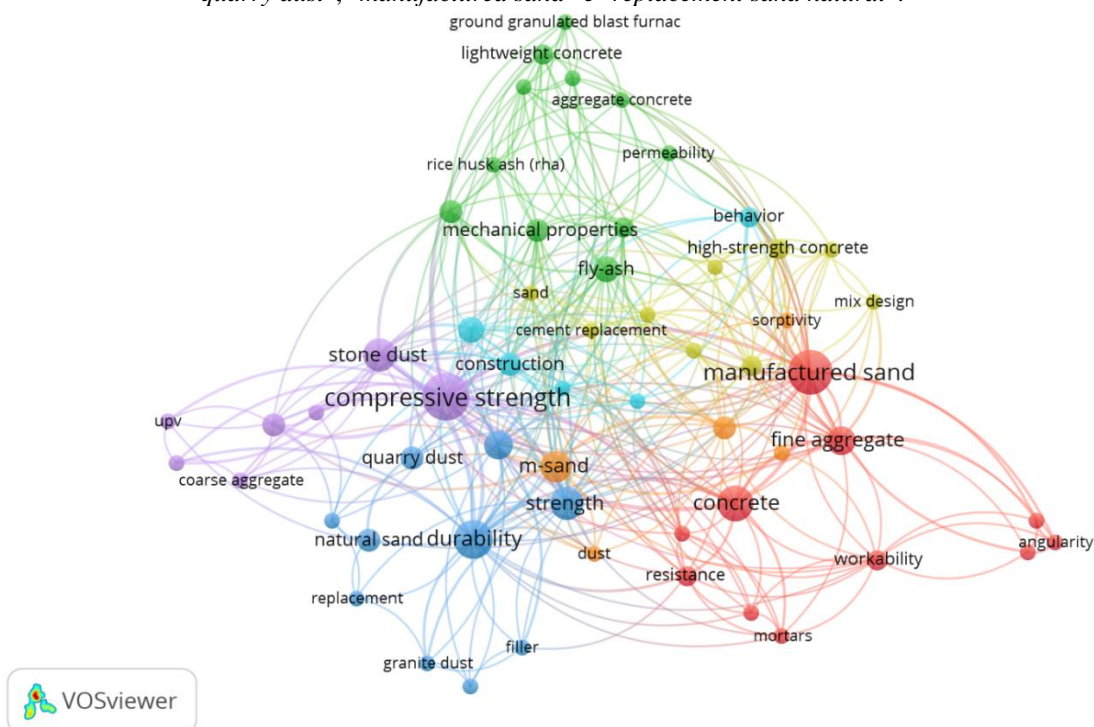
O estudo usou o *VOSviewer* para gerar mapas bibliométricos, representados nas Figura 13 e Figura 14, que mostram as últimas correlações encontradas em pesquisas baseadas nas 854 coleções listadas na Tabela 4. A análise aplicou um limite mínimo de ocorrência de 3 para o 1º Grupo e 2 para o 2º Grupo, visando a uma ocorrência mínima de cerca de 30. Como resultado, 100 e 58 palavras-chave atingiram o limite para o 1º e 2º grupos, respectivamente. Após a eliminação de palavras genéricas não relacionadas ao tópico, o mapa bibliométrico revelou 9 grupos com 1245 links para o 1º Grupo e 7 grupos com 368 links para o 2º Grupo, totalizando 2801 links.

Figura 13: Mapa de agrupamento dos resultados da pesquisa das palavras-chave "concrete" e "stone dust", "quarry dust", e "manufactured sand".



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Figura 14: Mapa de agrupamento dos resultados da pesquisa das palavras-chave "concrete" e "stone dust", "quarry dust", "manufactured sand" e "replacement sand natural".



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Analisando o mapa de clusters da Figura 13, é possível verificar que o cluster "durability", na cor vermelha, é o maior de todos os clusters. Ele destaca as ligações de palavras-chave para "durability" (75 ligações). Esse cluster interliga a "strength", "behavior" e

"*mechanical properties*". Além disso, o cluster se vincula ao tópico de outros clusters, como "*cement*", "*quarry dust*" e "*compressive strength*". Na cor verde, o cluster "*concrete*" (58 ligações) representa as ligações entre os tipos de agregado fino e os objetos deste estudo, como "*stone dust*", "*quarry dust*" e "*natural sand*". Em azul escuro, ele destaca as ligações de palavras-chave para "*quarry dust*" (32 ligações), mostrando que é possível produzir um bom concreto com resistência e propriedades mecânicas satisfatórias; também mostra que outros tipos de resíduos industriais podem substituir o agregado fino areia natural, como "*rice husk ash*", "*steel ash*" e "*coconut shell*". Em azul claro, o cluster com a segunda maior ligação de palavra-chave, "*manufactured sand*" com 73 ligações. Entretanto, não há vínculos com "*quarry dust*", mas há um vínculo com "*stone dust*" e "*river sand*". Em roxo, o cluster com a terceira maior ligação de palavra-chave, "*cement*", com 60 ligações, mostra que os resíduos também são usados como substitutos parciais do cimento na composição do concreto e, além disso, esse cluster interliga todos os outros clusters.

O mapa de clusters apresentado na Figura 14 mostra em roxo o maior cluster "*compressive strength*" (40 ligações), nesse cluster, é possível ver que os resíduos de mineração também são usados como substitutos parciais do cimento na composição do concreto. Esse cluster interliga todos os outros clusters. Seguido do cluster em vermelho "*manufactured sand*" (31 ligações). Esses grupos se conectam entre si e com os outros ("*durability*", "*sand*", "*compressive strength*", "*construction*" e "*m-sand*"). São clusters que permitem verificar a interconexão mais ampla de todas as palavras-chave, permitindo que se entenda que muitas palavras-chave se repetem em comparação com o 1º Grupo. Isso mostra que há necessidade de estudar as principais características do concreto com substituição parcial da areia natural por pó de pedra/brita, tais como propriedades mecânicas e físicas do concreto reciclado e dos agregados.

Do cluster em azul escuro "*durability*" (30 ligações) é mostrado que é possível produzir um bom concreto com resistência e propriedades mecânicas satisfatórias, semelhante como é destacado pelos clusters do 1º Grupo. Assim como nos clusters 1 e 2 ("*compressive strength*" e "*manufactured sand*"), acima, há uma interconexão entre os dois grupos de palavras-chave, que se complementam e demonstram a capacidade de substituir o agregado fino natural por agregados alternativos.

Em amarelo, o cluster "*high-strength concrete*" (15 ligações), concentrou-se, basicamente, nas interconexões dos clusters "*fly-ash*", "*construction*" e "*compressive strength*". E confirma a proposição quanto ao uso de agregados finos alternativos para a

confeção do concreto, trazendo como alternativa o uso do pó de pedra, evidenciado pela ligação entre o cluster *construction* e *compressive strength*.

Os outros clusters se resumem ao cluster em verde “*fly-ash*” (23 ligações) e em laranja “*m-sand*” (15 ligações) este sendo uma abreviação de areia manufaturada, e as interconexões também são semelhantes aos clusters anteriores. Em azul claro “*construction*” (16 ligações). Sendo que o cluster “*construction*” evidencia interligações com os impactos ambientais (com a palavra-chave “*enviroment*”) e o desempenho do concreto produzido (com a representação da palavra-chave “*behavior*”), evidenciando para o estudo que o uso de pó de pedra e m-sand ou areia manufaturada promove a construção sustentável com desempenho técnico.

4.1.4 Extração de informações de pesquisas publicadas sobre pó de pedra/brita para concreto reciclado

As informações dos últimos estudos foram extraídas, resumindo os principais materiais usados em cada estudo (tipo de agregados, cimento, aditivos...), os níveis de substituição de areia natural por pó de pedra/brita e as propriedades avaliadas no concreto. Essas informações estão condensadas no APÊNDICE D - RESUMO DOS ESTUDOS PUBLICADOS SOBRE PÓ DE PEDRA/BRITA NO CONCRETO sendo SL - *Slump Test*; S - Resistência à compressão a 28d; F - Resistência à flexão a 28d; T - Resistência à tração a 28d; WA - Absorção de água; W - Penetração de água; C - Fluxo elétrico de coulomb; D - Profundidade de penetração de cloro; DW - Profundidade de desgaste; M - Módulo de elasticidade; U - Pulso ultrassônico; P - Propriedades físicas dos agregados; CH - Composições químicas; CD - Profundidade de carbonatação e AA - Ataque ácido. Quanto ao tipo de cimento utilizado na pesquisa, para se ter uma referência, seu equivalente foi colocado entre parênteses, de acordo com as diretrizes regulatórias europeias e americanas. Os artigos do APÊNDICE D servirão de base para responder as perguntas 1, 2 e 3 do presente Capítulo 4, a saber:

- a) Quais são as diferenças nas propriedades químicas e físicas dos agregados de pó de pedra/brita em comparação com as da areia natural?
- b) Como o pó de pedra/brita influencia a trabalhabilidade, as propriedades mecânicas, as propriedades físicas e durabilidade do concreto reciclado?
- c) Qual o teor ideal de substituição do agregado miúdo natural por pó de pedra/brita?

4.2 PARÂMETROS DA AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

Para avaliação dos impactos ambientais, foram adotadas três metodologias complementares entre si, quais são: metodologia de Avaliação de Impactos Ambientais da

Matriz de Leopold, metodologia da emissão de dióxido de carbono (ECO₂) e de produção de energia incorporada (EI), e metodologia da ACV.

4.2.1 Parâmetros da Matriz de Leopold

Com base na metodologia de Avaliação de Impactos Ambientais da Matriz de Leopold, elaborou-se uma Matriz de Interação, conforme APÊNDICE E – MATRIZ DE LEOPOLD ADAPTADA (SEM DESTINAÇÃO) e APÊNDICE F – MATRIZ DE LEOPOLD ADAPTADA (COM DESTINAÇÃO) considerando os impactos ambientais dispostos no APÊNDICE B - IMPACTOS AMBIENTAIS EXTRAÇÃO DE BRITA E AREIA deste trabalho conforme revisões bibliográficas de Bascompta *et al.* (2022); Galetakis e Soutana (2016); Santhosh *et al.* (2021) e Shen *et al.* (2022).

Diante disto, levantou-se por meio de revisão de literatura em dissertações de mestrados e artigos científicos (DA e LE BILLON, 2022; HOSSEINPOUR *et al.*, 2022) SANTOS *et al.*, 2022; FERNANDES, 2022; MELLER *et al.*, 2018; PINHEIRO, 2016; ROSSINI, 2015; ROSA, 2014; MARTINS, 2014; ROSSI, 2013; VIEIRA *et al.*, 2012; OLIVEIRA, 2006), as principais atividades importantes do setor de mineração assim como suas possíveis correlações com os elementos naturais e humanos divididos, no presente trabalho, em 03 (três) grandes áreas, a saber: do meio físico, do meio biótico e do meio antropogênico, sendo 14 fatores ambientais, 7 grupos ambientais e 9 atividades, conforme Tabela 6.

Tabela 6: Elementos da Matriz de AIA (adaptada da Matriz de Leopold)

ELEMENTOS NATURAIS E HUMANOS	GRUPOS AMBIENTAIS	FATORES AMBIENTAIS
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS	Solos	Erosões / Assoreamento Características Físicas
	Água	Superficial Qualidade
		Fluxo / Recarga
	Ar	Qualidade (gases, particulados)
CONDIÇÕES BIOLÓGICAS	Flora	Qualidade da Cobertura Vegetal Arborização
	Fauna	Perda da Biodiversidade Descaracterização do Habitat
		Peixes e Moluscos
ASPECTOS ANTROPOLÓGICOS	Saúde	Espaços abertos e selvagens
	Social	Geração de Emprego e Renda Vizinhança e Valorização Imobiliária

Fonte: DA e LE BILLON, 2022; HOSSEINPOUR *et al.*, 2022; SANTOS *et al.*, 2022; FERNANDES, 2022; MELLER *et al.*, 2018; PINHEIRO, 2016; ROSSINI, 2015; ROSA, 2014; MARTINS, 2014; ROSSI, 2013; VIEIRA *et al.*, 2012; OLIVEIRA, 2006 – Elaborado pelo Autor (2023)

Enquanto para as ações de projeto, considerou-se as seguintes: transformação do espaço e construção; processos e disposição e tratamento de resíduos, sendo 9 atividades divididas na forma da Tabela 7.

Tabela 7: Ações da Matriz de AIA (adaptada da Matriz de Leopold)

AÇÕES DE PROJETO	ATIVIDADES
TRANSFORMAÇÃO DO ESPAÇO E CONSTRUÇÃO	Modificação de Habitat
	Alteração da Cobertura do Solo (decapeamento / acessos)
	Detonações na Perfuração
	Escavações de Superfície (lavra em bancada)
PROCESSOS	Carregamento e Transporte
	Britagem (Ruído e Vibração)
	Serviços de Manutenção (oficinas / frotas de veículos / maquinário)
DISPOSIÇÃO E TRATAMENTO DE RESÍDUOS	Disposição dos Rejeitos
	Emissão de gases de efeito estufa

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Depois de identificar quantitativamente todos os aspectos e impactos ambientais, é preciso classificá-los de acordo com sua importância ou significância, e para isso deve-se utilizar de parâmetros qualitativos que são ponderações (muito usados no planejamento de sistemas de gestão ambiental) por meio de escalas numéricas, estas muitas vezes com base em conhecimentos de especialistas, recomendando-se para tanto uma pesquisa literária, e ao final combiná-los segundo a função matemática predeterminada do método (SÁNCHEZ, 2020), no caso do estudo em tela é a equação da Matriz de Leopold.

Com isso, e com base na revisão biográfica, levantou-se a melhor forma de parametrizar os impactos a qual desenvolveu-se a Tabela 8 com 5 (cinco) parâmetros qualitativos (numéricos) e suas respectivas métricas que promove como resultado o Indicador de Impacto Total (IT), dado pela Eq. 6 e cuja valoração se dá pelos valores absolutos daquela tabela e com base nisso, resultando, na Matriz de Impacto que consta no Apêndices E e F.

Tabela 8: Valoração da Matriz de AIA (adaptada da Matriz de Leopold)

PARÂMETRO	MÉTRICAS	
	Valor	Descrição
Caráter (Ca)	Positivo (1)	Aquele indicador que é benéfico para o desenvolvimento humano ou para a qualidade de vida das pessoas ou do ambiente;
	Neutro (0)	Aquele indicador que não possui interferência nem positiva nem negativa no sistema;
	Negativo (-1)	Aquele indicador que é adverso para o desenvolvimento humano ou para a qualidade de vida das pessoas ou do ambiente;
Relevância (Rel.)	Alta (3)	Aquele indicador que apresenta alto grau de limitação na produção e que interfere na conservação dos recursos naturais e humanos ou que afeta diretamente à qualidade de vida das pessoas, além de gerar impactos negativo ao ecossistema;
	Média (2)	Aquele indicador que apresentava baixo grau de limitação na produção ou na qualidade de vida das pessoas, porém são caracterizados como muito importantes para o equilíbrio do ecossistema;
	Baixa (1)	Aquele indicador que faz parte do processo de produção, mas não gera limitações ao processo e não afeta a qualidade de vida das pessoas ou do ambiente;

Continua

PARÂMETRO	MÉTRICAS	
	Valor	Descrição
Cobertura (Co)	Regional (3)	Quando o impacto, ou seus efeitos, se manifestam em áreas que extrapolam as Áreas de Influência definidas para a mineradora, gerando reflexos em cascata em outras regiões além do entorno da mineradora;
	Local (2)	Quando o impacto, ou seus efeitos, ocorrem ou se manifestam na Área de Influência Indireta (AII) ²⁴ definida para a mineradora;
	Pontual (1)	Quando o impacto, ou seus efeitos, ocorrem ou se manifestam na Área Diretamente Afetada pela mineradora (ADA) ²⁵ ou na Área de Influência Direta (AID) ²⁶ definida para a mineradora, gerando reflexos apenas na área espacial pertencente a mineradora;
Duração (D)	Longa (3)	Tempo grande ou permanente, de permanência do impacto, após a ação;
	Média (2)	Tempo médio de permanência do impacto, após a ação;
	Curta (1)	De duração breve, com possibilidade de reversão às condições ambientais anteriores à ação;
Reversibilidade (Rev.)	Irreversível (3)	Quando mesmo com a suspensão da atividade geradora do impacto não é possível reverter a sua tendência; e
	Parcial (2)	Quando é possível reverter parcialmente a tendência do impacto ou os efeitos decorrentes das atividades do empreendimento; e
	Reversível (1)	Quando é possível reverter a tendência do impacto ou os efeitos decorrentes das atividades do empreendimento, levando-se em conta a aplicação de medidas para sua reparação (no caso de impacto negativo) ou com a suspensão da atividade geradora do impacto.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Seguindo a avaliação tem-se que o preenchimento da Matriz de AIA levou em conta apenas a fase de operação tendo em vista que a proposta da análise de viabilidade ambiental é focada na melhoria de processos da indústria de mineração já considerando que o projeto de implantação foi considerado todos os parâmetros necessários para a instalação e, também, a fim de visualizar os efeitos do reuso do material resíduo da britagem (pó de pedra/brita).

Após o preenchimento da matriz e contabilização numérica das ações, conforme extrato exemplo na Figura 15 a qual representa parte da tabela de valoração que esse repete para todos os outros Elementos Naturais, utiliza-se a expressão (Eq. 1) para apuração do Impacto Total (IT) daquele Elemento Natural/Humano relacionado a uma determinada Ação de Projeto:

$$IT = Ca \times (Rel + Co + D + Rev) \quad \text{Eq. 1}$$

²⁴ Conforme Resolução CONAMA Nº 1 de 23/01/1986 e INSTRUÇÃO NORMATIVA IBAMA Nº 125, de 18/10/06, Área de influência indireta é a área real ou potencialmente ameaçada pelos impactos indiretos da atividade, onde os impactos se fazem sentir de maneira secundária, abrangendo os ecossistemas e os meios físico e socioeconômico que podem ser impactados por alterações ocorridas na área de influência direta, assim como áreas susceptíveis de serem impactadas por possíveis acidentes na atividade.

²⁵ Conforme Resolução CONAMA Nº 1 de 23/01/1986 e INSTRUÇÃO NORMATIVA IBAMA Nº 125, de 18/10/06, Área Diretamente Afetada é a área que sofre diretamente as intervenções de implantação e operação da atividade, considerando alterações físicas, biológicas, socioeconômicas e das particularidades da atividade.

²⁶ Conforme Resolução CONAMA Nº 1 de 23/01/1986 e INSTRUÇÃO NORMATIVA IBAMA Nº 125, de 18/10/06, Área de influência direta é a área sujeita aos impactos diretos da atividade sendo que a delimitação desta área é função das características físicas, biológicas e socioeconômicas dos ecossistemas do campo e das características da atividade. Área onde as relações sociais, econômicas, culturais e os aspectos físico-biológicos sofrem os impactos de maneira primária, tendo suas características alteradas, ou seja, há uma relação direta de causa e efeito.

Figura 15: Extrato de parte das tabelas de valoração

AÇÕES IMPACTANTES		Elementos Naturais e Humanos												
		Meio Físico						Meio Biótico				Meio Antrópico		
		Solos		Água		Ar		Flora		Fauna		Saúde	Social	
		Erosões / Assoreamento	Características Físicas	Superficial	Qualidade	Fluxo / Recarga	Qualidade (gases, particulados)	Qualidade da Cobertura Vegetal	Arborização	Perda da Biodiversidade	Descaracterização do Habitat	Peixes e Moluscos	Saúde Ocupacional	Gerção de Emprego e Renda
Modificação de Habitat	Caráter (Ca)	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1
	Relevância (Rel)	3	2	2	2	1	3	2	2	1	3	2	3	1
	Cobertura (Co)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Duração (D)	3	3	2	3	2	3	3	3	2	2	2	3	2
	Reversibilidade (Rev)	3	3	1	3	3	3	3	3	2	3	3	2	2
	Total	-11	-10	-7	-10	-8	-11	-10	-10	-7	-10	-9	-10	7

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Porém, por mais que seja considerado apenas a fase de operação, optou-se em subdividir a análise em 02 (duas) vertentes: levantamento quantitativo de impactos e o levantamento qualitativo de valores com base nos graus considerados para cada ação e elemento ambiental. Com isso foi confeccionado 02 (duas) matrizes: Matriz de Impacto Ambiental antes do Reaproveitamento do pó de pedra/brita (APÊNDICE E); e Matriz de Impacto Ambiental após o Reaproveitamento do pó de pedra/brita (APÊNDICE F).

4.2.2 Parâmetros da EI e ECO₂

Além do Indicador da Matriz Ambiental que avalia de maneira mais global os impactos do uso do pó de pedra/brita, surgiu a necessidade de avaliar de forma mais direcionada sob alguns traços coletados pela revisão sistemática bibliométrica, com isso, tem-se, os indicadores de Energia Incorporada (EI) e Indicador de emissão de dióxido de carbono ECO₂ que permitiu avaliar os impactos e custos-benefícios da influência do pó de pedra/brita na produção de traços de concreto mais sustentável. Para isso a extração de informações teve como subsídio a coleta de 20 artigos, que proporcionou um espaço amostral suficiente de até 30 dados, conforme Montgomery (2020) e Ross (2021), para cada atributo (ECO₂ e EI) e após foi organizado por tipo de material componente do concreto.

A importância do cálculo da energia incorporada (EI) decorre de sua capacidade de fornecer uma abordagem abrangente para avaliar a sustentabilidade dos materiais de construção. Essencialmente, a energia incorporada representa a quantidade total de energia utilizada em todo o processo de produção de um determinado produto ou serviço. Ao considerar todas as formas de energia consumida, esse método holístico permite uma avaliação mais precisa do impacto ambiental e dos fatores de sustentabilidade associados aos materiais envolvidos (UDAWATTHA e HALWATURA, 2016).

A seleção de um material de construção específico pode ter várias implicações para fatores como consumo de energia, emissões de dióxido de carbono, compatibilidade ambiental

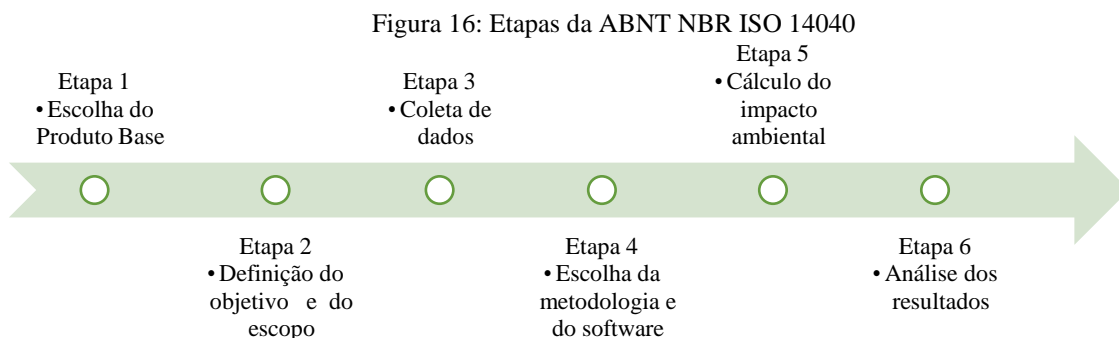
e o ciclo geral de custos de um edifício. Portanto, a introdução de materiais de construção com baixo consumo de energia é muito importante para melhorar a sustentabilidade, e a análise de energia corporal é uma ferramenta e um método significativos para avaliar a sustentabilidade ambiental de um material de construção específico (SAGHAFI e HOSSEINI, 2011; SHUKLA *et al.*, 2009).

Aliada à EI, há também, associada aos materiais de construção, a emissão de dióxido de carbono (ECO₂), que é o dióxido de carbono (CO₂) liberado para a extração da matéria-prima, transporte, fabricação, montagem, instalação, desmontagem e desconstrução de qualquer sistema de material/produto durante sua vida útil (MITHUN e NARASIMHAN, 2016).

Além disso, há uma disparidade considerável na interpretação de EI e ECO₂ devido a problemas inerentes aos bancos de dados. Esses bancos de dados apresentam desafios relacionados à variabilidade e à incompatibilidade decorrentes de condições regionais e nacionais, processos de fabricação, conteúdo reciclado, fontes de energia e parâmetros de estudo. Para tratar dessa preocupação, os autores sugerem que, por enquanto, é razoável contar com uma série de bancos de dados internacionais (DIXIT *et al.*, 2010; SAGHAFI e HOSSEINI, 2011). Considerando a avaliação da sustentabilidade ambiental de um material específico e sua comparação com outros materiais disponíveis, a pegada de dióxido de carbono (CO₂) é normalmente o principal parâmetro considerado. A realização de uma análise de energia incorporada surge como uma abordagem eficaz e influente (ZANOLETTI *et al.*, 2017).

4.2.3 Parâmetros da ACV

Ainda sobre o contexto da avaliação dos impactos, tem-se que a ACV é outro método cientificamente válido usado para estimar os impactos incorporados produzidos ao longo do ciclo de vida de um produto. A ACV da presente dissertação será executada, seguindo as etapas da ABNT NBR ISO 14040 e conforme Figura 16.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

a) Etapa 1 - Escolha do Produto Base

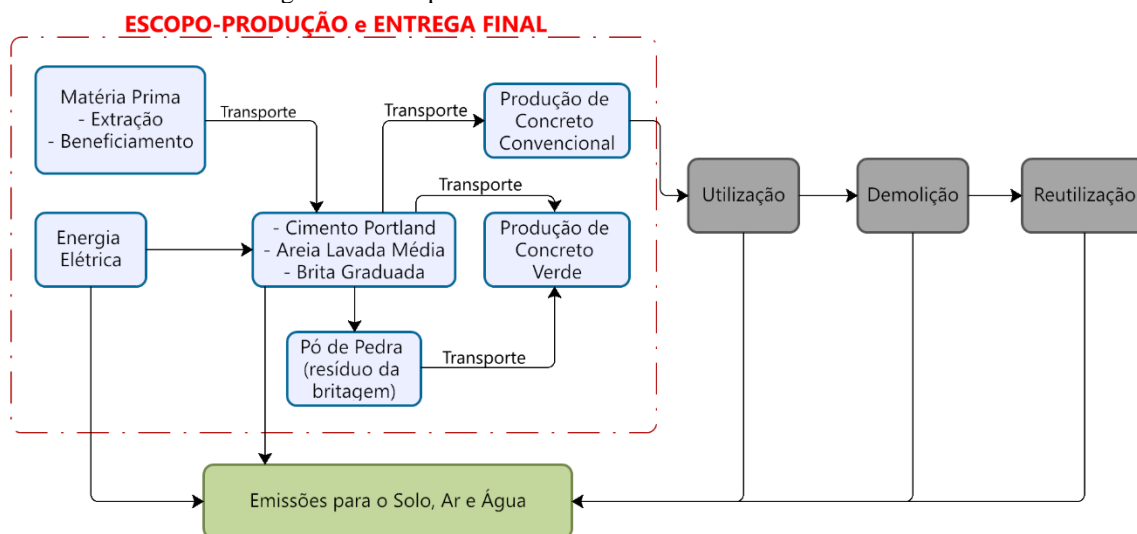
Os produto-bases escolhidos para esta pesquisa foram o concreto de densidade normal produzido com pó de pedra/brita como substituto da areia natural e sem pó de pedra/brita, conforme as composições e traços de concreto dispostos no item 5.5 “Viabilidade Ambiental do Pó de Pedra/Brita na Fabricação de Mistura de Concreto”, resultantes da revisão sistemática bibliométrica desta Dissertação.

b) Etapa 2 - Definição do Objetivo e do Escopo

A Análise de Ciclo de Vida desta dissertação seguiu os princípios e definições da ABNT NBR ISO 14040 e tem como objetivo determinar os impactos ambientais do processo produtivo de um concreto reciclado (substituição parcial da areia natural por pó de pedra/brita) e de um concreto convencional sem substituição da areia e posterior confronto dos dados obtidos, entre os métodos *Recipe 2016 e IPCC*, com os existentes na literatura, no intuito de verificar a confiabilidade das análises e mensurar as diferenças entre os dois tipos de produtos.

Já quanto ao escopo classifica-se como sendo do tipo “*cradle to gate*” (do berço ao portão), pois abrange o início do processo através do fluxo de matérias primas utilizadas na produção do concreto, energias dispendidas na produção, transportes envolvidos, impactos e resíduos gerados, e termina com a entrega do concreto pronto para a obra, diante disto os limites do sistema estão apresentados na Figura 17.

Figura 17: Escopo da Análise de Ciclo de Vida do Concreto



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Alguns processos (dados de fundo), tais como os impactos ambientais do transporte do concreto da usina, os impactos do uso de energia durante a concretagem e o impacto

resultante da fase de utilização não foram analisados em detalhes para o cenário brasileiro. Essa escolha se deu devido as variações tecnológicas nesses processos serem muito pequenas e não trazerem grande peso na ACV do concreto, tendo em vista que para os dois primeiros casos os impactos são constantes independentemente do tipo de mistura utilizada e para o terceiro caso apenas se for considerado o seu efeito isolante, caso em que pode afetar a quantidade de eletricidade consumida para arrefecimento e/ou aquecimento de um edifício (VIEIRA *et al.*, 2018).

Ressalta-se que a título de transporte considerou-se o carregamento de matéria-prima da extração até a usina, tendo em vista as distâncias médias de transportes serem diferentes para os insumos areia natural e pó de pedra/brita, conforme item 5.6.1 “Transporte de agregados da construção” desta Dissertação.

c) Etapa 3 – Coleta de Dados

Após delimitação do escopo foi detalhado o inventário dos processos do ACV em questão. A coleta de dados na ACV é conhecida também como etapa de inventário de ciclo de vida do produto (ICV) e o inventário foi obtido através do banco de dados da *Industrial Design & Engineering Materials* (IDEMAT) que se trata de uma compilação de dados ICV da *Sustainable Impact Metrics Foundation* (SIMF), entidade sem fins lucrativos da *Delft University of Technology*, Holanda.

Os dados do IDEMAT são baseados em artigos científicos revisados por pares, além de ICVs adicionais feitos pela *Delft University of Technology* e *Plastics Europe*²⁷ (40), sendo que o restante dos processos de segundo plano é da *ProBas*²⁸, *USLCP*²⁹, *ELCD*³⁰, *Granta Edu Pack*³¹ e *CPM University Chalmers*³². O objetivo do SIMF é substituir os ICVs de fundo

²⁷ A *Plastics Europe* é uma associação comercial pan-europeia líder com mais de 100 membros, cobrindo 90% da produção de polímeros na União Europeia, Noruega, Suíça, Turquia e Reino Unido.

²⁸ Biblioteca de conjuntos de dados alemã originalmente fornecida pela Agência Federal do Meio Ambiente da Alemanha (*Umweltbundesamt*). Inclui processos unitários e agregados, para os seguintes temas: Energia, Materiais e Produtos, Serviços de Transporte e Resíduos.

²⁹ A *U.S. Life Cycle Inventory* (USLCI) é um banco de dados desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos e o Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) desde 2003 e disponível publicamente e serve como um repositório central para informações sobre os impactos totais de energia e recursos do desenvolvimento e uso de vários materiais de construção, componentes e montagens comerciais

³⁰ Lançado em 2006, a *European Reference Life Cycle Database* (ELCD) inclui dados do *Life Cycle Inventory* (LCI) de associações empresariais da União Europeia e outras fontes para materiais-chave, transportadores de energia, transporte e gestão de resíduos.

³¹ *Granta EduPack*, anteriormente *CES EduPack*, é um conjunto de recursos de ensino para apoiar a educação de materiais, criado em 1994, nos Estados Unidos, e conta com banco de dados de materiais e processos.

³² Banco de dados de inventário de ciclo de vida desenvolvido desde 1994 pelo *Center for Environmental Assessment of Product and Material Systems* (CPM) da Universidade de Chalmers, Suécia.

remanescentes por processos da literatura científica assim que estiverem disponíveis em artigos revisados por pares, uma vez que muitos desses bancos de dados de fundo parecem ser altamente imprecisos, desatualizados ou baseados em estatísticas genéricas em vez de fluxos de processo (IDEMAT, 2023).

Além do banco de dados acima citado, os dados de ICV também tiveram como fonte de pesquisas a literatura científica, relatórios de setores industriais específicos, bancos de dados referenciados, sites de indústrias específicas e estudos acadêmicos. Sendo que para os processos em segundo plano, foram utilizados dados do banco de dados IDEMAT e do *National Renewable Energy Laboratory U.S. Life Cycle Inventory Database* (NREL/USLCI) e Environmental Footprints (PEF) de iniciativa da *European Commission's Single Market for Green Products*.

A avaliação da qualidade dos dados é um elemento obrigatório na fase de interpretação uma vez que as características de dados que se relacionam entre si devem possuir a capacidade de satisfazer os requisitos estabelecidos (ISO NBR 14044, 2009). Os requisitos de qualidade de dados são descritos no objetivo e escopo do estudo ACV, na seção 4.2.3.6 “Qualidade dos dados” e abrangem os 10 aspectos a seguir (ISO NBR 14044, 2009):

- a) cobertura temporal: idade dos dados e período mínimo durante o qual os dados deveriam ser coletados;
- b) cobertura geográfica: área geográfica a partir da qual deveriam ser coletados os dados de modo a satisfazer o objetivo do estudo;
- c) cobertura tecnológica: tecnologia específica ou conjunto de tecnologias dos processos envolvidos;
- d) a precisão: medida da variabilidade dos valores de dados para cada dado expresso;
- e) completeza: porcentagem dos fluxos que é medida ou estimada;
- f) representatividade: avaliação qualitativa do grau em que o conjunto de dados reflete a verdadeira população de interesse;
- g) consistência: avaliação qualitativa quanto à aplicação uniforme da metodologia do estudo aos diversos componentes da análise;
- h) reprodutibilidade: avaliação qualitativa do grau em que as informações sobre a metodologia e os valores dos dados permitiriam a um executante independente reproduzir os resultados relatados no estudo;
- i) fontes dos dados; e

j) incerteza da informação (por exemplo dados, modelos e pressupostos).

Entretanto apesar da NBR ISO 14044 orientar quanto a importância da análise da qualidade dos dados coletados, esta não instrui uma metodologia de como efetuar tal análise de qualidade, mencionando apenas que para a qualidade dos dados dos fluxos é conveniente que seja caracterizada tanto por aspectos quantitativos quanto qualitativos, assim como pelos métodos utilizados para coleta e consolidação daqueles dados, não especificando a que componente, ou nível, a análise da qualidade dos dados deve ser aplicada.

Diante disto, a qualidade dos dados será avaliada usando as diretrizes da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) para avaliação da qualidade dos dados que permite uma compreensão mais pormenorizada da qualidade dos dados que a que pode ser fornecida ao nível do processo, uma vez que o nível do processo pode ser uma combinação de muitos fluxos diferentes provenientes de muitas fontes diferentes (EDELLEN e INGWERSEN, 2016).

Quadro 4: DQG - Matriz de qualidade de dados da EPA

		←		→		
Indicador		1	2	3	4	5
Confiabilidade do fluxo		Dados verificados baseados em medições	Dados verificados com base num cálculo ou dados não verificados com base em medições	Dados não verificados baseados em cálculos	Estimativa documentada	Estimativa não documentada
Fluxo de Representatividade	Correlação temporal	Menos de 3 anos de diferença	Menos de 6 anos de diferença	Menos de 10 anos de diferença	Menos de 15 anos de diferença	Idade dos dados desconhecida ou superior a 15 anos
	Correlação Geográfica	Dados da mesma resolução e da mesma área de estudo	Dentro de um nível de resolução e de uma área de estudo relacionada	Dentro de dois níveis de resolução e de uma área de estudo relacionada	Fora de dois níveis de resolução, mas área de estudo relacionada	De uma área de estudo diferente ou desconhecida
	Correlação Tecnológica	Todas as categorias tecnológicas são equivalentes	Três das categorias tecnológicas são equivalentes	Duas das categorias tecnológicas são equivalentes	Uma das categorias tecnológicas são equivalentes	Nenhuma das categorias tecnológicas é equivalente
	Métodos de coleta de dados	Dados representativos de >80% do mercado relevante, durante um período adequado	Dados representativos de 60-70% do mercado relevante, durante um período adequado Ou dados representativos de >80% do mercado relevante, durante um período mais curto	Dados representativos de 40-59% do mercado relevante, durante um período adequado Ou dados representativos de 60-70% do mercado relevante, durante um período mais curto	Dados representativos de <40% do mercado relevante, durante um período adequado Ou dados representativos de 40-59% do mercado relevante, durante um período mais curto	Desconhecido Ou Dados de um pequeno número de sítios e de períodos mais curtos

Fonte: Edellen e Ingwersen (2016) - Adaptado pelo Autor (2023)

Com isso o método EPA recomenda o uso das matrizes DQI (*Data Quality Indicators*) e da matriz DQG (*Data Quality Goals*) para aplicação ao nível do fluxo e do processo sendo

composta de vários níveis a matriz, disposta no Quadro 4, foi concebida para captar informações pormenorizadas a nível do fluxo, sem deixar de abordar informações mais amplas sobre a qualidade dos dados a nível do processo e é composta por indicadores de representatividade do tipo dinâmicos (temporal, geográfica e tecnológica) e estáticos (confiabilidade e método de coleta de dados) (EDELLEN e INGWERSEN, 2016).

O APÊNDICE G - DADOS DE ICV- QUANTIDADE, FONTES E INFORMAÇÕES DE QUALIDADE conta com os processos, fluxos e respectivos coeficientes de cada etapa da produção do concreto em usina, sendo que a coluna de representatividade consta os indicadores do método EPA de qualidade e o índice emprega um sistema de pontuação de 1 a 5, com 1 indicando a mais alta qualidade conforme Quadro 4.

Com base no Quadro 4 tem-se que o indicador de Confiabilidade de fluxo DQI variou entre os materiais testados devido ao uso de diferentes abordagens (medidas, cálculos e estimativas), resultando na pontuação média de 3, conforme média do APÊNDICE G, em relação aos indicadores, tempo, geografia, tecnologia e método de coleta de dados, o levantamento de inventário do ciclo de vida da presente Dissertação, recebe, as pontuação de 2, 4, 3 e 3, caracterizando-se como sendo ICV do tipo “Dados não verificados baseados em cálculos, com menos de 6 anos de diferença, com área de estudo relacionada, com duas categorias tecnológicas equivalentes e dados representativos de 40-59% do mercado relevante”.

d) Etapa 4 - Escolha da Metodologia e do Software

A escolha da metodologia de cálculo, baseou-se no levantamento e análise dos trabalhos ACV em relação ao setor da produção de concreto, onde definiu-se, inicialmente pela metodologia ReCiPe 2016 – *Midpoint* e posteriormente no intuito de equalizar e comparar os valores de emissão de CO₂, utilizou-se da metodologia IPCC 2021.

A avaliação de impacto foi realizada com base no ReCiPe 2016 *Midpoint* v. 1.13. O método recebeu o nome de ReCiPe, pois fornece uma “receita” para calcular os indicadores de categoria de impacto do ciclo de vida. Além disso, este método integra as abordagens de dois outros métodos reconhecidos (*Eco-indicador 99* e CML 2002), desenvolvendo uma estrutura comum e consistente de avaliação de impacto (STAFFORD *et al.*, 2016).

Tem-se ainda que o método ReCiPe2016 fornece implementação harmonizada das vias de causa e efeito para o cálculo dos fatores de caracterização do ponto médio e do ponto final além de enquadrar-se a nível europeu e é considerada como sucessora de metodologias

anteriores (CML2001 e ECO-Indicator99) e integra a abordagem orientada para o problema ambiental e a abordagem orientada para o dano (SÁNCHEZ *et al.*, 2021).

e) Etapa 5 - Cálculo do Impacto Ambiental

O cálculo do impacto ambiental foi realizado através do software *OpenLCA 2.0.1*, utilizando a base de dados IDEMAT 2023. O *openLCA* é um software livre e de código aberto para Avaliação de Sustentabilidade e Ciclo de Vida e oferece uma grande coleção de conjuntos de dados e banco de dados LCA, alguns para compra e outros gratuitos com licença educacional; ao todo, quase 100.000 conjuntos de dados diferentes estão disponíveis. As bases de dados do software apresentam um conjunto extenso de materiais, processos, tipos de resíduo e transporte que foram utilizados para criar os projetos de ACV das diferentes proporções dos concretos.

O processo consistiu em adicionar ao sistema os componentes do concreto (seja convencional seja verde), com as respectivas matérias primas, quantidades em massa, distância de transporte e resíduos gerados. Para realizar os cálculos, utilizou-se o método ReCiPe World-Midpoint (H), o qual aponta os resultados para 18 categorias de impacto.

4.3 PARÂMETROS DA ANÁLISE ECONÔMICA

A análise de custos foi feita por meio da composição de preço unitário, mecanismo que arrola todos os insumos que entram diretamente na execução do serviço/produto da construção civil, tais como, mão de obra, materiais, equipamentos e taxas de leis sociais e riscos do trabalho identificados que foram necessários para execução de um determinado serviço com suas respectivas quantidades métrica e seus respectivos custos unitários e totais e índices de produtividade (COÊLHO, 2016; MATTOS, 2019). Com isso tem-se que para a composição de custo da presente dissertação foi composta pelos insumos desatacados na Tabela 9.

Tabela 9: Insumos Previstos

TIPO DE INSUMO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
MÃO DE OBRA	Servente	h (hora)
	Operador de Betoneira	h (hora)
EQUIPAMENTOS	Betoneira 400 L (hora produtiva)	chp (custo hora produtiva)
	Betoneira 400 L (hora improdutiva)	chi (custo hora improdutiva)
MATERIAL	Cimento Portland	kg (quilograma)
	Aditivo Plastificante	L (litros)
	Brita 01	m ³ (metros cúbicos)
	Areia	m ³ (metros cúbicos)
	Pó de pedra/brita	m ³ (metros cúbicos)

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Quanto a análise econômica dos materiais, ressalta-se que os índices de composição de custos foram desenvolvidos, assim como os preços unitários de referência e metodologia adotado, com base nos catálogos de precificação do SINAPI/CAIXA ECONÔMICA, do SICRO/DNIT e do Decreto nº 7.983, de 8 de abril de 2013³³ a qual orienta que para a elaboração de custos de referência de serviços de engenharia o custo global de referência de obras e serviços de engenharia, será obtido a partir das composições dos custos unitários previstas no projeto, menores ou iguais à média de seus correspondentes nos custos unitários de referência do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) e do Sistema de Custos Referencias de Obras (SICRO), excetuados os itens caracterizados como montagem industrial ou que não possam ser considerados como de construção civil.

E para tanto, quanto ao marco temporal para fins de pesquisas de preços tomou-se o período compreendido entre janeiro de 2019 a maio de 2023. Esse lapso temporal se justifica pelo fato do aumento do custo da construção que foi diretamente impactado pelo contexto da Pandemia de COVID-19 e pela guerra entre a Rússia e a Ucrânia no ano de 2022 e 2023, refletindo no Índice Nacional de Custo da Construção (INCC³⁴) que registrou aumento de 0,71% em janeiro/2022 os quais as variações registradas no custo dos insumos em 2020 e 2021 foram as maiores da série iniciada em 1997 com isso, a análise de janeiro/20 a janeiro/22 demonstra que o custo com materiais e equipamentos, em dois anos, subiu 50,04% e o INCC Materiais e Equipamentos (INCC-M³⁵) apresentou variação de 19,60%, em 2020 e em 2021, o aumento foi de 24,11%. (CBIC, 2022a e CBIC, 2022b).

Já em relação ao custo da mão de obra, este além de representar o salário dos trabalhadores que manuseiam os materiais e equipamentos da obra, deve também ser acrescido ao custo o valor dos encargos sociais e outras despesas que envolvem a participação dos trabalhadores na obra, tais como os encargos referentes às despesas de alimentação, transporte, EPI - equipamento de proteção individual e ferramentas de uso pessoal (TISAKA, 2011).

Com isso, tem-se que encargos sociais são custos incidentes sobre a folha de pagamento do funcionalismo da empreiteira a qual tem sua origem na Consolidação das Leis

³³ Estabelece regras e critérios para elaboração do orçamento de referência de obras e serviços de engenharia.

³⁴ Índice Nacional de Custo da Construção (INCC) com abrangência Nacional e coletado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) monitorar a evolução dos preços de materiais, serviços e mão-de-obra destinados a construção civil. É um indicador com periodicidade mensal e é composto por subindicadores, a saber: INCC-M, pesquisado entre os dias 21 do mês anterior e 20 do mês de referência; INCC-10, entre os dias 11 do mês anterior e 10 do mês de referência e o INCC-DI, entre o 1º e o último dia do mês de referência.

³⁵ É um indicador econômico que capta a evolução e variação de custos dos materiais e da mão de obra e é pesquisado entre os dias 21 do mês anterior e 20 do mês de referência;

do Trabalho – CLT e na Constituição Federal de 1988, além dessas legislações, ainda há origem nas Convenções Coletivas de Trabalho - CCT que definem, dentre vários aspectos, os benefícios a serem pagos aos trabalhadores e outras vantagens. Para os Encargos Sociais o modelo utilizado foi aquele utilizado pela CAIXA Econômica Federal, amplamente descrito na literatura especializada e agrega 04 (quatro) grupos distintos.

Entretanto como há inúmeros Sindicatos e por consequência várias CCTs, respeitado os incisos I e II do art. 08^o³⁶ da Constituição Federal de 1988, e além do mais, como os percentuais dos Grupos A ao D mudam de Estado para Estado, adotou-se neste trabalho para apuração da mão de obra, composições de custo unitário para cada Estado da Federação contendo seus respectivos Encargos Sociais compreendido em um período de jan/19 a maio/23, aproximadamente 60 (sessenta) meses.

Para fins exemplificativos tem-se que a média dos encargos variam de 69,01% a 74,25% para profissionais do tipo horista e de 110,86% a 117,87% para profissionais do tipo mensalista. Além disso há de se mencionar que há a folha Desonerada e Não Desonerada, para o presente trabalho adotou-se a folha Não Desonerada a fim de permitir uma melhor apropriação de todos os custos que envolvem a fabricação de concreto, além de permitir um estudo mais quantitativo a fim de considerar custos mais gerais ao invés de custos específicos de determinadas empresas tendo em vista que o regime de desoneração da folha de pagamento substitui a contribuição previdenciária patronal de 20% (INSS) sobre o total da folha pela contribuição previdenciária, com alíquota de 4,5%, sobre o valor da receita bruta, conforme publicado na Lei n° 12.844/2013 de 19 de julho de 2013, alterada pela Lei 13.670/2018 de 30 de maio de 2018 e a qual beneficia algumas classes de empresas:

a) Construção Civil, enquadrados nos seguintes grupos da CNAE 2.0

412 – Construção de Edifícios;

432 – Instalações Elétricas, Hidráulicas e Outras Instalações em Construções;

433 – Obras de Acabamento;

439 – Outros Serviços Especializados para Construção (4391-6 – Obras de Fundações e 4399-1 – Serviços Especializados para Construção não especificados anteriormente).

b) Construção de Obras de Infraestrutura, enquadrados nos seguintes grupos da CNAE 2.0:

421 – Construção de Rodovias, Ferrovias, Obras Urbanas e Obras-de-Arte Especiais;

³⁶ Art. 8º É livre a associação profissional ou sindical, observado o seguinte:

I - a lei não poderá exigir autorização do Estado para a fundação de sindicato, ressalvado o registro no órgão competente, vedadas ao Poder Público a interferência e a intervenção na organização sindical;

II - é vedada a criação de mais de uma organização sindical, em qualquer grau, representativa de categoria profissional ou econômica, na mesma base territorial, que será definida pelos trabalhadores ou empregadores interessados, não podendo ser inferior à área de um Município;

422 – Obras de Infraestrutura para Energia Elétrica, Telecomunicações, Água, Esgoto e Transporte Por Dutos;
429 – Construção de Outras Obras de Infraestrutura;
431 – Demolição e Preparação do Terreno.

Quanto aos Encargos Complementares³⁷ foi considerado as composições de custos auxiliares do SINAPI que se encontram no APÊNDICE H – COMPOSIÇÕES DE CUSTO AUXILIARES deste trabalho, a qual é citado o índice de produtividade adotado para cada composição auxiliar que se encontra dividido em: Composição Auxiliar do Operador de betoneira e Composição Auxiliar do Servente.

Quanto aos Equipamentos e Maquinários, estes podem ser alugados ou de propriedade do construtor e servem para movimentação dos materiais e pessoas dentro da obra, tais como elevadores, guias, caminhões, escavadeiras, tratores etc. Segundo Tisaka (2011) quando os equipamentos são de propriedade do construtor, são considerados a depreciação deles, juros do capital investido na compra, óleo, combustível e os custos de manutenção com reposição de peças e outras despesas eventuais.

E para o presente trabalho considerou-se o uso de uma betoneira de 400L a qual dimensionou-se com base nas composições do SINAPI as horas produtivas e improdutivas do equipamento, além disso a depreciação, e para isso foi inserido, assim como para a mão de obra, composições auxiliares da Betoneira a qual prevê os custos da hora improdutiva, juros de capital e depreciação, conforme pode ser visto no APÊNDICE H – COMPOSIÇÕES DE CUSTO AUXILIARES desta dissertação.

³⁷ Encargos referentes às despesas de alimentação, transporte, EPI - equipamento de proteção individual e ferramentas de uso pessoal

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 COMPARAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS

Considerando as diversas morfologias e composição química das partículas dos resíduos produzidas durante o beneficiamento de agregados nas pedreiras, uma perspectiva de sustentabilidade exige uma caracterização e classificação mais abrangentes destes materiais. E visando responder a primeira pergunta do estudo: “Quais são as diferenças nas propriedades químicas e físicas dos agregados de pó de pedra/brita em comparação com as da areia natural?”, tem-se que tais propriedades do pó de pedra/brita dependem fundamentalmente das rochas originais utilizadas, sendo o mármore e o granito as mais prevalentes.

A Tabela 10 apresenta as propriedades químicas do pó de pedra/brita de diferentes fontes obtidas através da revisão da literatura. Para os resíduos de granito e mármore, foi calculada a média das propriedades encontradas nos estudos avaliados, porém para o pó de pedra de calcário, apenas um estudo foi identificado, portanto a média não pode ser calculada.

Tabela 10: Composição química do pó de pedra/brita (%).

Ref.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	CaSO ₄	SO ₃	LoI ³⁸	Tipo
(OMAR <i>et al.</i> , 2012)	6,5	0,8	0,4	-	35,0	14,4	0,1	0,4	-	-	-	0,7	41,0	Calcário
(OMAR <i>et al.</i> , 2012)	14,1	2,7	1,9	-	42,1	2,8	0,9	0,6	-	-	-	-	-	Mármore
(ABD ELMOATY, 2013)	85,5	2,1	0,4	-	4,9	2,5	-	-	-	-	-	1,8	1,1	Granito
(BACARJI <i>et al.</i> , 2013)	55,8	10,4	6,9	-	10,1	2,6	2,6	2,4	-	-	0,04	0,03	6,8	Granito
(KARTINI <i>et al.</i> , 2014)	69,7	12,8	4,3	0,2	1,8	0,4	0,5	8,1	0,2	0,1	-	0,2	1,32	Granito
(TAIWO <i>et al.</i> , 2022)	47,9	11,0	2,4	0,4	1,7	3,7	-	2,9	0,43	0,31	-	0,04	-	Granito
(SINGH <i>et al.</i> , 2016a)	72,6	15,6	-	-	-	0,8	4,2	6,8	-	-	-	-	-	Granito
(ALIYU <i>et al.</i> , 2020)	62,5	18,7	6,5	1,2	4,8	2,6	-	3,2	-	-	-	-	0,5	Granito
(VARDHAN <i>et al.</i> , 2019)	4,7	0,2	0,5	-	28,7	22,3	0,06	0,05	-	-	-	-	43,7	Mármore
(SINGH <i>et al.</i> , 2016b)	72,6	15,6	-	-	-	0,8	4,2	6,8	-	-	-	-	-	Granito
Média Granito	68,4	11,0	4,5	0,7	5,4	2,0	1,6	4,6	0,2	0,1	0,04	0,7	2,4	
Média Mármore	9,4	1,5	1,2	-	35,4	12,5	0,49	0,34	-	-	-	-	43,7	

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

³⁸ Loss of Ignition

A Tabela 10 indica que aproximadamente 68% do pó de pedra/brita de origem granítica é composto por SiO_2 , o que significa que contém principalmente minerais de quartzo. Esta composição indica que este resíduo possui grande potencial de aplicação na produção de materiais de construção duráveis devido à propriedade de dureza do quartzo, conforme estudo de Lim *et al.* (2017) e Taiwo *et al.* (2022).

Além disso, o total de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 para o resíduo de granito foi de 83,9% e este valor é de até 70% estipulado pela ASTM C618-19 (ASTM C618, 2019) para materiais pozolânicos, indicando que as amostras podem ter atividade pozolânica. Diferentemente, os resíduos de calcário e mármore que apresentaram 7,7% e 12,1%, respectivamente, indicando que esses materiais não apresentam propriedades pozolânicas.

No entanto, a porcentagem de CaO é mais elevada no calcário e no mármore do que no granito, como indicado na Tabela 10. Este CaO é responsável pelo processo de cimentação quando misturado com materiais pozolânicos, resultando na formação de compostos cimentícios de cálcio-silicato-hidratado (C-S-H) e cálcio-alumínio-hidratado (C-A-H) (OBIANYO *et al.*, 2021; TAIWO *et al.*, 2022). Assim, independentemente das perspectivas pozolânicas dos materiais, é possível compreender que os três tipos de resíduos têm potencial para serem utilizados na produção de concreto e podem também contribuir para a redução do consumo de cimento.

Já a perda de ignição (LoI) dos resíduos de mármore e calcário é geralmente elevada, podendo ser atribuída à perda de dióxido de carbono devido à dissolução da calcita (CaCO_3) e da dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) conforme estudos de Vardhan *et al.* (2019).

Relativamente às características físicas dos agregados, e conforme Tabela 11, tem-se que o módulo de finura deste material tem uma média de 2,90 mm, enquanto a da areia natural é de aproximadamente 2,96 mm.

Tabela 11: Propriedades físicas do pó de pedra/brita e da areia natural

Ref.	Pó de pedra/brita			Areia natural		
	Densidade específica (g/cm^3)	Absorção de água (%)	Módulo de finura (mm)	Densidade específica (g/cm^3)	Absorção de água (%)	Módulo de finura (mm)
(KANKAM <i>et al.</i> , 2017)	2,66	10,6	3,54	2,64	6,8	2,66
(GUPTA <i>et al.</i> , 2019)	2,56	3,2	3,30	2,64	0,8	2,70
(RATHORE <i>et al.</i> , 2020)	2,59	1,1	3,41	2,65	1,1	3,10
(SINGH <i>et al.</i> , 2017)	2,62	4,4	2,57	2,70	2,9	3,36
(AKHTAR <i>et al.</i> , 2021)	2,59	11,6	1,70	-	-	-
Média	2,60	6,2	2,90	2,66	2,9	2,96

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

De acordo com o ACI 211.1-91 (ACI 211.1, 1991), o módulo de finura do agregado miúdo deve situar-se no intervalo de 2,4 mm a 3,0 mm para aplicação em concreto, e a NBR

7211 (ABNT, 2022) preconiza o intervalo de 2,20 mm a 2,90 mm para a zona ótima e de 2,90 mm a 3,50 mm para a zona utilizável superior. Estas propriedades podem ser consideradas semelhantes entre os dois tipos de agregados.

Em comparação com o agregado miúdo natural, o pó de pedra/brita contém uma maior quantidade de partículas finas, o que se explica pelo fato de ser um produto residual da indústria de mineração devido ao corte, laminação e explosões dos maciços de pedra originais (LI *et al.*, 2022), além do fato das partículas serem mais irregulares (GEHLOT *et al.*, 2021) e tem características de absorção de água mais elevadas, devido à sua elevada porosidade e finura das partículas e, conseqüentemente, uma maior área de contato superficial quando comparado com a areia natural (SINGH *et al.*, 2017). Para além disso, a absorção de água dos agregados pó de pedra/brita apresentou uma variação significativa de valores entre os estudos, situando na média de 6,2% para o pó de pedra/brita e de 2,90% para a areia natural. Este fato pode estar relacionado com as diferentes origens destes agregados (granito, mármore ou calcário).

Ainda em relação às características físicas do pó de pedra/brita, a distribuição do tamanho das partículas de pó de pedra/brita variou entre 2,36 mm e 0,075 mm, enquanto para a areia natural variou entre 4,75 mm e 0,150 mm conforme análises de Akhtar *et al.* (2021); Gupta *et al.* (2019); Selvan e Vijaya (2015); Simão *et al.* (2021); Singh *et al.* (2017) e Vardhan *et al.* (2019). Com isso o pó de pedra/brita pode ser classificado na Zona II e a areia natural pode ser classificado na Zona III de acordo com a IS 383 (IS 383, 2016), equivalente a ASTM C 33 (ASTM C33, 2003) ou Zona Ótima de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022). Além disso, as normas britânicas aceitam alguma tolerância no caso das areias de pedra britada, o limite da peneira de 150 µm pode ser aumentado para 20%. A norma americana ASTM C 33 (ASTM C33, 2003) aceita apenas até o limite de 7% de material fino passando na peneira de 150 µm, e a NBR 7211 (ABNT, 2022) entre 10% e 12%, no máximo, (para concreto sujeito a desgaste superficial e para concreto protegido do desgaste superficial, respetivamente). Alguns autores, tais como, Akhtar *et al.* (2021); Li *et al.* (2022); Nadimalla *et al.* (2018); Selvan e Vijaya (2015) e Singh *et al.* (2017) mostraram que a porcentagem média de retenção na peneira 150µm/75 µm variou de 5,5% a 8,5%.

Com isso, o pó de pedra/brita tem uma gama mais ampla de tamanhos de partículas e uma densidade específica relativamente mais elevada, o que permite melhorar a compacidade do concreto, contribuindo para a durabilidade do concreto em fases posteriores da vida útil, uma vez que, em geral, a densidade está relacionada com a durabilidade (ZAMIR HASHMI *et al.*, 2022). Logo o pó de pedra/brita por mais que não tenha a mesma forma granular que a areia

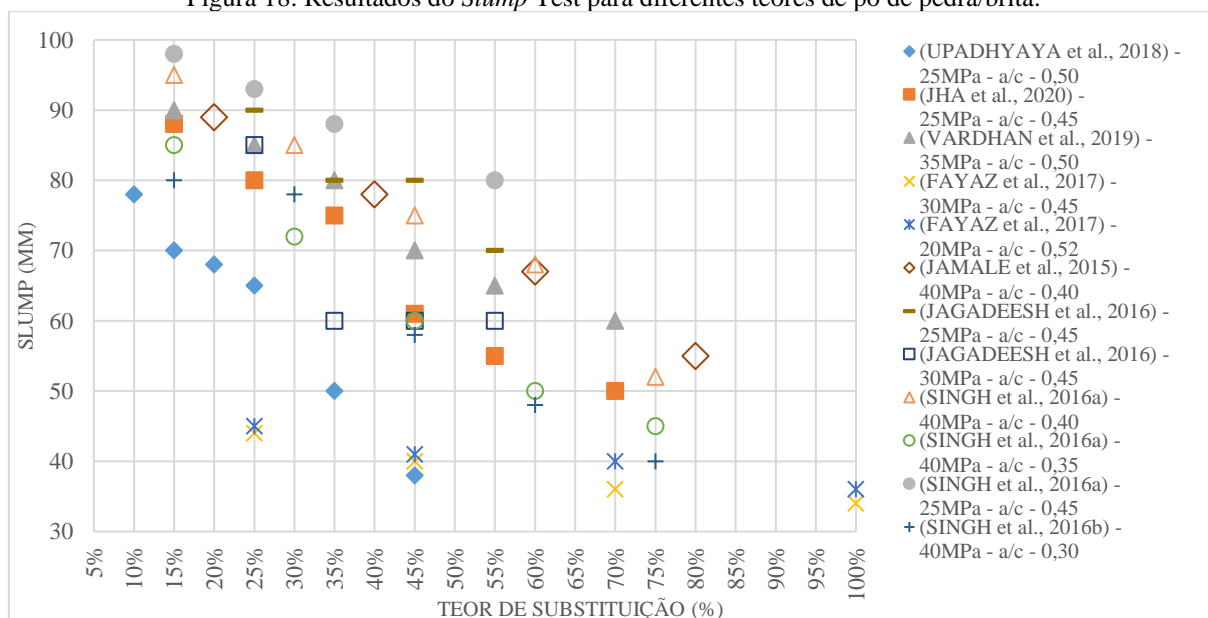
natural, as suas outras propriedades físicas e químicas parecem ser semelhantes às da areia natural, conforme análises de Lim *et al.* (2017).

5.2 INFLUÊNCIA DO PÓ DE PEDRA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

O presente tópico visa responder a primeira parte da pergunta: “Como o pó de pedra/brita influencia a trabalhabilidade, as propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade do concreto reciclado?”

Quanto a trabalhabilidade, e com base nos dados da literatura, foi criado o gráfico apresentado na Figura 18. Esse gráfico foi traçado considerando apenas os estudos que apresentaram resultados de trabalhabilidade pelo *Slump Test* para um mínimo de quatro teores de substituição de areia natural por pó de pedra/brita. Em geral, observa-se que quanto maior o teor de substituição do pó de pedra/brita, menor será o valor do abatimento de tronco de cone, ou seja, menor será a trabalhabilidade do concreto. Nota-se, ainda, que a trabalhabilidade diminuiu vertiginosamente a partir do teor de 40% e de 55% de substituição, considerando o abatimento de cone ideal de 70 ± 10 mm para lançamento manual em vigas, pilares e lajes conforme NM 67/1996³⁹, ABNT NBR 10342/2012⁴⁰ e ABNT NBR 8653⁴¹.

Figura 18: Resultados do *Slump Test* para diferentes teores de pó de pedra/brita.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

³⁹ Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

⁴⁰ Concreto – Perda de abatimento – Método de ensaio

⁴¹ Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência

Ainda em relação com a Figura 18, tem-se que apesar da variação do efeito do pó de pedra/brita na trabalhabilidade do concreto devido às diferentes características físicas do pó de pedra/brita encontradas nas várias empresas de mineração em todo o mundo, tais como angularidade, módulo de finura, morfologia, área de superfície específica e massa específica, a maioria das pesquisas (ALIYU *et al.*, 2020; BALAMURUGAN e PERUMAL, 2013; FAYAZ *et al.*, 2017; JAGADEESH *et al.*, 2016; JAMALE *et al.*, 2015; JHA *et al.*, 2020; NADIMALLA *et al.*, 2018; OMAR *et al.*, 2012; OORKALAN *et al.*, 2020; OPARA *et al.*, 2018; PROKOPSKI *et al.*, 2020; SINGH e KUMAR, 2017; SINGH *et al.*, 2016a; SINGH *et al.*, 2016b; UPADHYAYA *et al.*, 2018) concluíram que quanto maior for o nível de substituição do pó de pedra/brita, maior será o teor de finos e, conseqüentemente, maior será a superfície específica, o que conduzirá a uma menor trabalhabilidade do concreto no estado fresco. Além disso, de acordo com os dados destas publicações, a trabalhabilidade do concreto fresco feito com pó de pedra/brita, substituindo a areia natural como agregado miúdo, sofre uma redução em comparação com o concreto de referência (com 0% de substituição). Os concretos produzidos com pó de pedra/brita apresentaram uma redução média na trabalhabilidade de aproximadamente 0,06%, 26,20%, 33,33% e 16,24%, para resistências à compressão de 20 MPa, 25 MPa, 35 MPa e 40 MPa, respectivamente. A queda média geral na trabalhabilidade, considerando todas as percentagens de substituição (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 75, 80, 90, 100%) e todas as resistências à compressão (20 MPa, 25 MPa, 35 MPa e 40 MPa), foi de 13,41%.

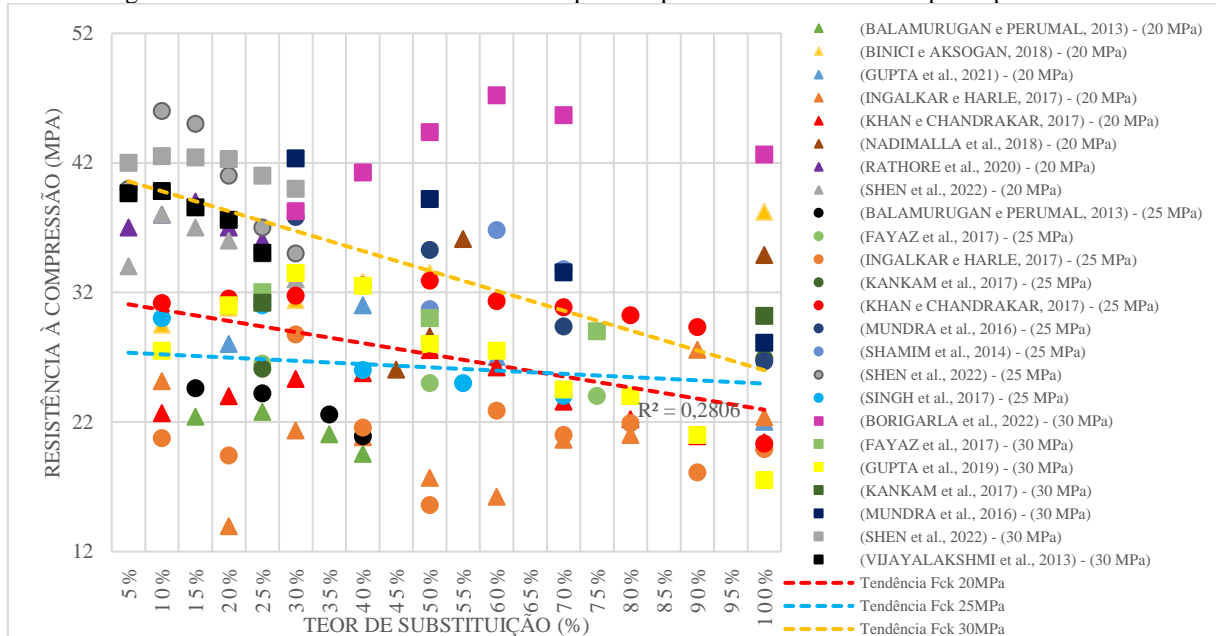
5.3 INFLUÊNCIA DO PÓ DE PEDRA/BRITA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

O presente tópico visa responder a segunda parte da pergunta relativa às propriedades do concreto no estado endurecido: “Como o pó de pedra/brita influencia a trabalhabilidade, as propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade do concreto reciclado?”

Em relação a resistência à compressão, o gráfico da Figura 19, apresenta os resultados obtidos pela revisão de literatura e organizados por classe de resistência mecânica, autor e percentual de substituição de pó de pedra/brita. E observa-se que, para alguns teores de pó de pedra/brita, houve um aumento na resistência à compressão, isso se deve muito provavelmente ao efeito filer, entendimento em acordo com Gupta *et al.* (2019) que desempenha um papel importante na redução dos vazios, resultando em uma matriz de concreto mais densa, em comparação com a matriz de concreto de referência, sem pó de pedra/brita. Além disso, as

partículas finas melhoram o empacotamento dos grãos e a zona de transição interfacial, conforme disposto em Prokopski *et al.* (2020) e Venkata e Sai Ram (2018). Estas propriedades resultam geralmente em características de maior resistência mecânica segundo Gupta *et al.* (2019) e Mundra *et al.* (2016).

Figura 19: Resultados da Resistência à Compressão para diferentes teores de pó de pedra/ brita.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Ainda diante da Figura 19 tem-se que as equações de regressão das linhas de tendência representadas pelas Eq. (2), (3) e (4), e como resultados de percentuais de substituições, considerando as classes de resistências de 20MPa, 25MPa e 30MPa, tem-se, respectivamente, os valores, aproximados, de 40%, 75% e 45% de substituição por pó de pedra/brita.

$$\text{Para } 20\text{MPa} = y = -8,5647 x + 31,514 \text{ (em \%)} R^2 = 0,2806 \quad \text{Eq. 2}$$

$$\text{Para } 25\text{MPa} = y = -12,533 x + 34,413 \text{ (em \%)} R^2 = 0,6750 \quad \text{Eq. 3}$$

$$\text{Para } 30\text{MPa} = y = -9,3914 x + 40,307 \text{ (em \%)} R^2 = 0,6628 \quad \text{Eq. 4}$$

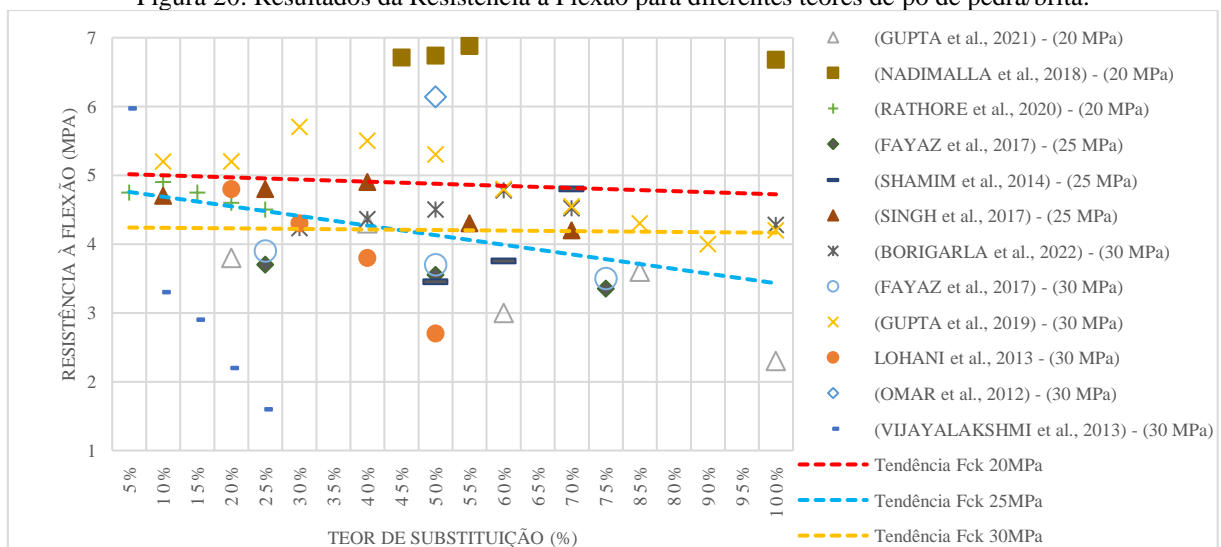
Logo o intervalo aceitável máximo de substituição gira em torno de 40%-75%, estando em consonância com os estudos de Gupta *et al.* (2019) que menciona que em concretos com percentagem de substituição superior a 40% de areia natural por pó de pedra/brita, o excesso de finos resulta em menor resistência à compressão. Uma das hipóteses para este fato advém do caráter angular do pó de pedra/brita, que aumenta a área de superfície a ser coberta pela pasta de cimento, resultando em falhas. A consequência destes vazios é uma zona de transição pasta/pó de pedra/brita mais fraca, reduzindo a compacidade do concreto e aumentando o atrito entre as partículas, o que leva a uma redução da resistência mecânica.

Foram observadas reduções de 40%, 75% e 55% na resistência à compressão aos 28 dias em concretos de 20 MPa, 25 MPa e 30 MPa, respectivamente, quando foi utilizado teores de substituição de pó de pedra/brita iguais ou superiores a 60%. Para que diminua esse efeito, Mundra *et al.* (2016) recomenda que, para misturas com altos teores de substituição de pó de pedra/brita, utilize pó de brita previamente lavado, para remoção de finos em excesso, e tratado em peneiramento adequado quando nas etapas de britagem.

Das 292 misturas analisadas nesta pesquisa, observou-se que aproximadamente 98 foram dosadas para uma resistência à compressão de 20 MPa aos 28 dias, e apenas 12,24% delas não atingiram a resistência de projeto. Para a resistência à compressão de 25 MPa, foram encontradas 97 misturas, e para 30 MPa, 45 misturas. As resistências alvo de 25 MPa e 30 MPa não foram atingidas em 11,34% e 6,67% dos casos, respectivamente.

Ainda em relação a influência do pó de pedra nas propriedades mecânicas do concreto tem-se que a capacidade de suportar a carga de flexão diminui devido à perda de compacidade ocasionado pelo aumento dos vazios com o excesso de finos. O gráfico da Figura 20 indica a queda da resistência a flexão por volta de 50% de substituição em diante a qual se concentram-se as maiores quedas. Uma tendência semelhante à observada para a resistência à compressão ocorreu para a resistência à flexão, sendo esta propriedade também é afetada pelo excesso de finos e pela lamelaridade do pó de pedra/brita. No entanto, no que diz respeito à resistência à flexão, é dada maior ênfase à compacidade (LOHANI *et al.*, 2013) que pode ser afetada negativamente devido aos excessos de finos e textura dos grãos entre si (RATHORE *et al.*, 2020; SINGH *et al.*, 2016) que pode afetar a matriz do concreto devido ao excesso de vazios.

Figura 20: Resultados da Resistência à Flexão para diferentes teores de pó de pedra/brita.



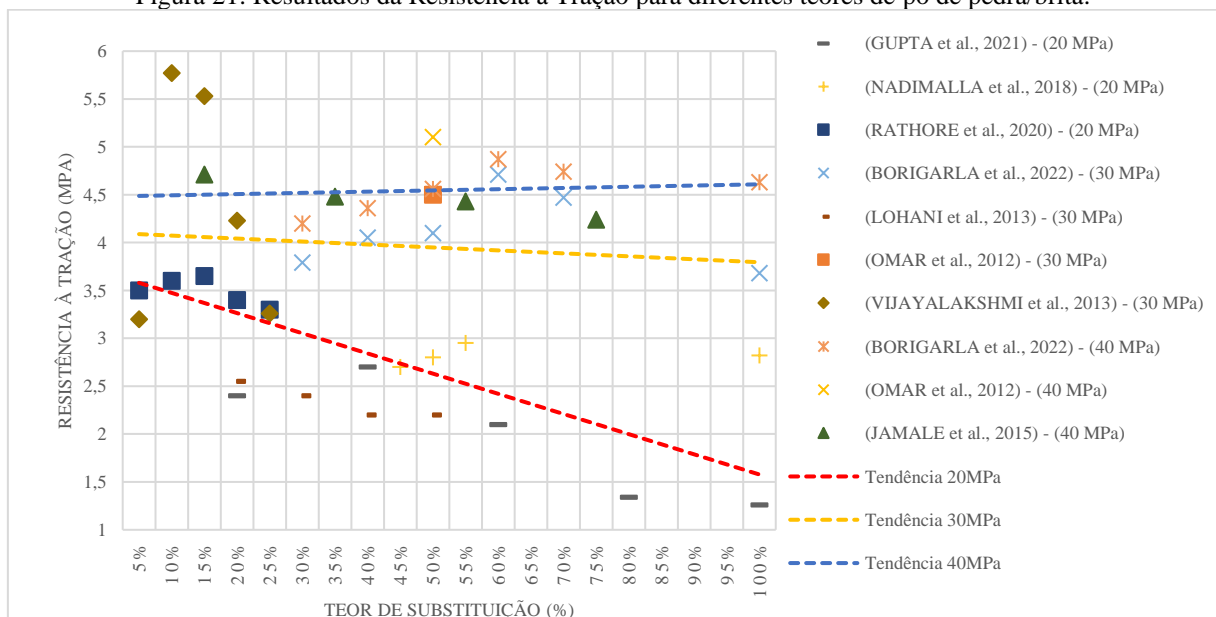
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Logo tem-se que a compacidade e a textura dos grãos tem maiores influência na resistência a flexão, uma vez que a textura rugosa do pó de pedra/brita, quando controlada, sem excessos de finos, pode melhorar a adesão do agregado à superfície da pasta de cimento, resultando em uma maior resistência à flexão.

Este comportamento resulta numa perda de aderência na interface entre a superfície rugosa do pó de pedra/brita e a pasta de cimento, o que conduziria a uma resistência à flexão inferior à da mistura de referência conforme, inclusive, disposto nos estudos de Singh *et al.* (2016) e Vijayalakshmi *et al.* (2013). A adição de pó de pedra/brita até um certo limite melhora a resistência à tração na flexão, sendo que além desse limite esta propriedade começa a diminuir, atingindo valores abaixo da mistura de controle sem adição, conforme estudos de Rathore *et al.* (2020).

Ainda em relação a influência do pó de pedra nas propriedades mecânicas do concreto, observa-se, conforme Figura 21, uma tendência de diminuição da resistência à tração com o aumento do teor de substituição dos agregados naturais por pó de pedra/brita, entretanto esse comportamento não é linear, porém nota-se que com cerca de 60% de substituição em diante concentram-se as maiores quedas de resistência. Em determinados níveis de adição, observa-se uma melhora na resistência à tração, propriedade que começa a diminuir com o aumento desses níveis, atingindo valores abaixo da mistura controle (sem adição de pó de pedra/brita) conforme Rathore *et al.* (2020).

Figura 21: Resultados da Resistência à Tração para diferentes teores de pó de pedra/brita.

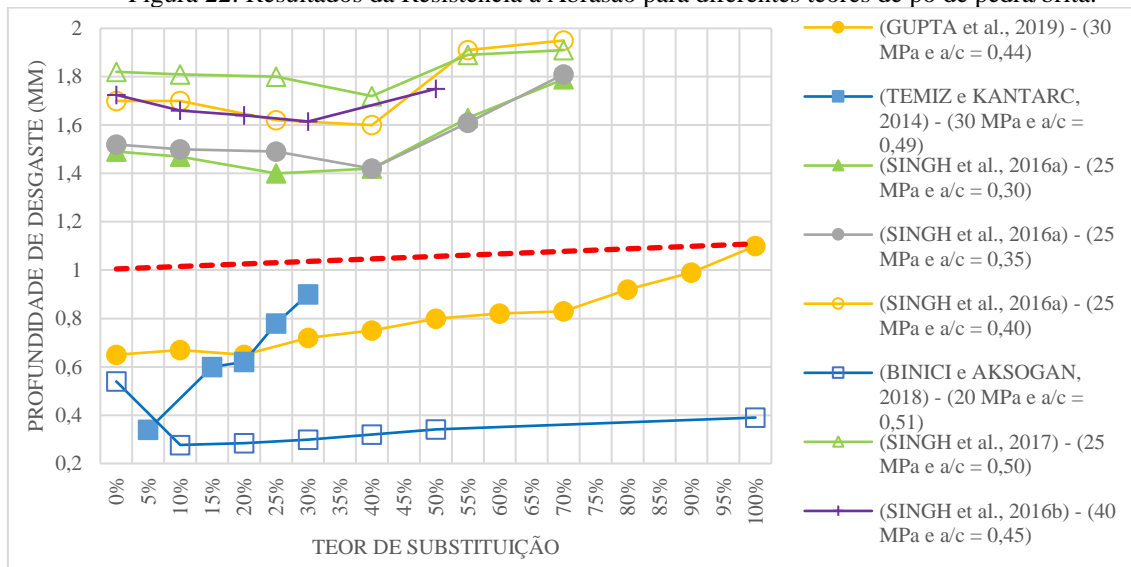


Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Em relação às propriedades físicas e de durabilidade a profundidade do desgaste por abrasão em corpos de prova de concreto, contendo pó de pedra/brita, é apresentada na Figura 22. Como observa-se para maiores níveis de substituição na mistura de concreto, a profundidade de desgaste aumenta, indicando menor resistência à abrasão. A profundidade máxima de desgaste ocorre próximo a 55% de teor de substituição de pó de pedra/brita em todos os fatores a/c. E quanto menor a proporção de água/cimento há uma melhor resistência à abrasão, o que corrobora o resultado da pesquisa e está em consonância com os estudos de Scholz e Keshari (2010) e Singh *et al.* (2017). Sendo que de maneira geral, notou-se que a profundidade de desgaste para as amostras de controle em a/c igual a 0,30, 0,35 e 0,40 foram de 1,46 mm, 1,53 mm e 1,70 mm, respectivamente, e conforme estudos de Singh *et al.* (2016a).

Estando próximo ao teor máximo admissível de cerca de 40% de substituição por pó de pedra/brita dos estudos de Gupta *et al.* (2019); Singh *et al.* (2016) e Singh *et al.* (2017) onde notou-se por um aumento na penetração do desgaste, diminuindo assim a resistência a abrasão, a qual está em acordo com

Figura 22: Resultados da Resistência à Abrasão para diferentes teores de pó de pedra/brita.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Além disso, percebe-se que no geral, considerando todos os teores, em comparação com a mistura de controle, há um aumento de apenas 1,62% na profundidade de desgaste para o concreto de 25MPa e de 0,77% para o concreto da classe de 30MPa, contra, respectivamente, 1,52% e 0,65% de profundidade de desgaste do concreto de referência sem pó de pedra/brita. Podendo ser classificado como do Grupo B sendo adequados para solicitações médias (arraste e rolar de cargas médias, tráfego de veículos de rodas rígidas, tráfego intenso de pedestre e impacto de pequena intensidade) conforme NBR 11801 (ABNT, 2012).

Logo nota-se que a substituição da areia natural por pó de pedra/brita promove um efeito adverso no comportamento abrasivo do concreto. Estando próximo ao percentual médio, dos estudos de Singh *et al.*, 2017, de cerca de 2,72% de profundidade de desgaste para concreto com pó de pedra/brita para a classe de 25MPa (1,20mm em média de profundidade de desgaste com o uso de pó de pedra/brita).

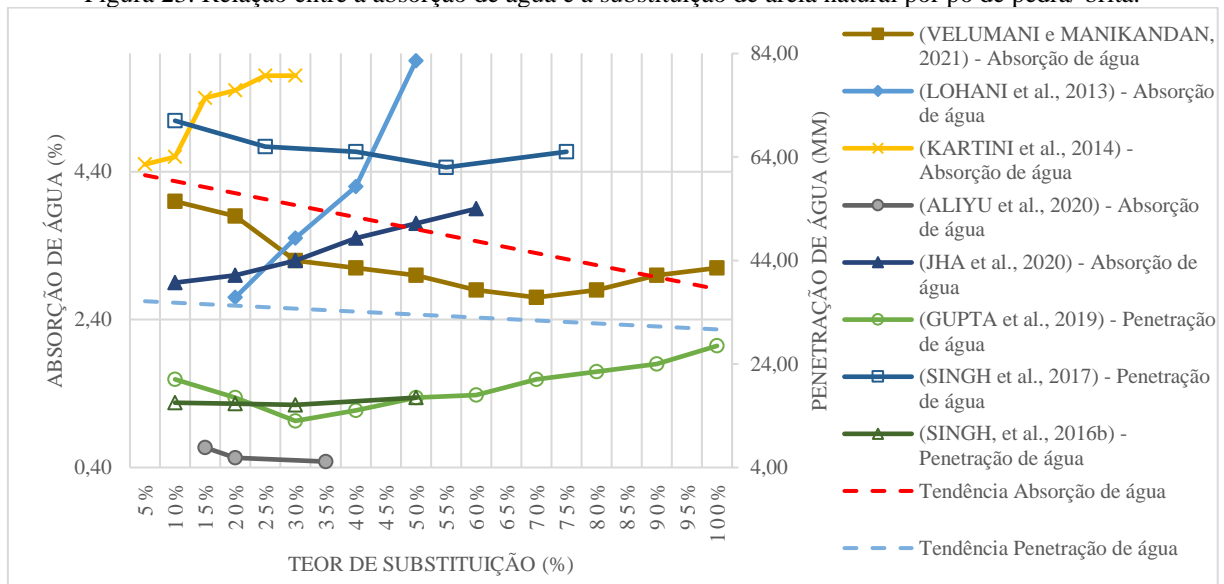
Sendo que a medida que se aumento o teor de substituição de pó de pedra/brita há aumento no desgaste por abrasão, isso se dar devido ao fato dos corpos de prova de concreto que contém maior quantidade de partículas finas são geralmente suscetíveis a maiores valores de abrasão tendo em vista que a pasta de argamassa que contém grande quantidade de partículas finas sofre erosão mais facilmente quando exposta a forças abrasivas, uma vez que são partículas fracamente ligadas a matriz principal do concreto, e as partículas finas alojadas entre os vazios granulares são removidas durante a ação abrasiva o que aumenta a profundidade do desgaste diminuindo a resistência à abrasão (GUPTA *et al.*, 2019; SINGH *et al.*, 2017).

Em relação aos tipos de pó de pedra/brita, as de origem basáltica possuem maiores resistência a abrasão, ou seja, menor taxa de desgaste se comparada com a amostra de controle, sendo aos 7, 28 e 90 dias de cura, uma taxa de 37%, 48% e 55% menor que a taxa de desgaste da amostra de controle, contra, as do pó de granito e mármore, que giram, em percentual, respectivamente, em torno de 25/40/56 e 37/42/54 aos 7, 28 e 90 dias, estando em consonância com os estudos de Binici e Aksogan (2018).

Em relação as propriedades físicas do concreto, tem-se que a penetração de substâncias estranhas no concreto pode ocorrer através de vazios capilares interconectados. No entanto, a água também é absorvida por áreas secas do concreto. À medida que as dimensões dos vazios capilares diminuem, a taxa de incorporação de água capilar tende a aumentar (BINICI e AKSOGAN, 2018).

Verifica-se na Figura 23 que há um ligeiro aumento dos valores de absorção (embora permaneçam inferiores aos do concreto convencional) à medida que se aumenta a porcentagem de pó de pedra/brita, em média em torno da porcentagem de substituição de 30-40%, passando de aproximadamente 2,85% para 3,45%, e após 50% há uma diminuição gradual. Este fato deve-se à formação de vazios devido à angularidade do pó de pedra/brita conforme estudos de Gupta *et al.* (2019) e Kartini *et al.* (2014). E devido ao fato de as partículas finas de pó de pedra/brita aumentarem a densidade de empacotamento do concreto fresco, levando a uma redução no volume dos poros no concreto endurecido, esta redução na capacidade de absorção beneficia o concreto endurecido no aspecto da durabilidade (VENKATA e SAI RAM, 2018).

Figura 23: Relação entre a absorção de água e a substituição de areia natural por pó de pedra/ brita.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

As misturas com pó de granito têm uma capacidade de penetração capilar inferior à das amostras normais conforme estudos de Prokopski *et al.* (2020). A introdução de pó de pedra/brita no concreto reduz o volume total de poros, o diâmetro médio dos poros e a porosidade, garantindo uma baixa penetração de água conforme Gupta *et al.* (2019) e Prokopski *et al.* (2020).

De acordo com os artigos consultados, verifica-se uma diminuição da penetração de água da maioria dos concretos com pó de pedra/brita em relação ao concreto de referência em torno da porcentagem de substituição de 50-55%, diminuindo de aproximadamente 41,85 mm para 17,50 mm, e após 50% há um aumento gradual, porém menor que no concreto convencional. Isto pode ser explicado pelo fato de que a estrutura refinada dos poros levar ao bloqueio capilar e à descontinuidade da estrutura dos poros, o que minimiza a profundidade de penetração da água, o que também foi observado por outros autores como Gupta *et al.* (2019); Kartini *et al.* (2014) e Singh *et al.* (2016b).

No entanto, o concreto com pó de pedra/brita ainda pode ser considerado um concreto de boa qualidade, pois a porcentagem de absorção de água é inferior a 10% em massa (NEVILLE, 2016). E ainda, de acordo com o estudo de Ganjian *et al.* (2009), os valores de penetração de água podem ser classificados em três classes: (1) baixa permeabilidade (menos de 30 mm), (2) média permeabilidade (30-60 mm) e (3) alta permeabilidade (mais de 60 mm). Na presente pesquisa, pode-se observar que todas as misturas de concreto estão na Classe 2 para penetração de água.

Conforme Binici *et al.* (2018), à medida que o teor de pó de pedra/brita aumenta, o coeficiente de permeabilidade capilar diminui. A adição de 10% de pó de pedra/brita reduz em 32% a permeabilidade capilar da amostra de referência, indicando que o uso de pó de pedra/brita aumenta a resistência do concreto à penetração de água. Em geral, de acordo com pesquisas na literatura, nota-se que, em média, o percentual de substituição de 40% é o ideal para se obter bom desempenho em permeabilidade e absorção de água.

Durante sua vida útil, o concreto sofre mecanismos de deterioração que prejudicam sua durabilidade, e o principal parâmetro crítico na avaliação da vida útil das estruturas de concreto armado é sua capacidade de repelir a penetração de íons cloreto e a resistência à carbonatação, conforme Bu *et al.* (2022); Butler *et al.* (2001); Carneiro *et al.* (2021); Lee *et al.* (2014); Vijayalakshmi *et al.* (2013).

Em relação a durabilidade do concreto, tem-se que a presente pesquisa obteve resultados para a penetração de íons cloreto, frente de carbonatação, ataques de sulfato e ataque ácido. Ressalta-se que por serem ensaios mais específicos, foi encontrado poucos resultados na literatura e por isso, não foram confeccionados gráficos comparativos.

Shen *et al.* (2022) avaliou a resistência à penetração de cloretos de acordo com a norma ASTM C1202 (ASTM C1202, 2012), adotando o período de cura de 28 dias e o ensaio acelerado de penetração de íons cloreto. Os autores observaram que o fluxo elétrico do concreto com pó de pedra/brita varia de 1555C (para concreto de 15MPa) a 900C (para concreto de 30MPa), e para o concreto com apenas areia natural varia de 1579C (para concreto de 15MPa) a 1025C (para concreto de 30MPa). De acordo com a normatização, a penetração de cloreto é caracterizada como baixa e muito baixa quando o fluxo elétrico é de 100-1000 C e 1000-2000C, respectivamente. Portanto, é possível afirmar que, neste estudo, a adição de pó de pedra/brita em concretos reduziu a facilidade de permeabilidade de íons cloreto ao reduzir seu fluxo elétrico.

Então em relação à porcentagem de substituição por pó de pedra/brita, a permeabilidade para íons de cloreto aumenta com o aumento da porcentagem de pó de pedra/brita. Em geral, pode-se observar pelos estudos que, com 0% de pó de pedra/brita, o fluxo elétrico fica em torno de 1260C conforme estudos de Bu *et al.* (2022); Singh *et al.* (2017); Sivamani e Renganathan (2022) e Vijayalakshmi *et al.* (2013), com 25% de substituição de pó de pedra/brita, esse valor aumenta para 1713C conforme análises de (Sivamani e Renganathan (2022) e Vijayalakshmi *et al.* (2013), com 50% evolui para 2033C conforme avaliações e estudos de Bu *et al.* (2022) e Sivamani e Renganathan (2022) e com 100% foi 4000C estando

em acordo com estudos de Sivamani e Renganathan (2022). Conforme ASTM C1202 (ASTM C1202, 2012) o fluxo elétrico entre 2000-4000C é classificado como sendo de penetração a íons cloretos do tipo moderado. Singh *et al.* (2017) concluiu que substituições de 25%, 40%, 55%, e 70% de areia natural por pó de pedra/brita resultou em 10,50 mm, 11,25 mm, 12 mm e 12,75 mm de penetração de íons cloretos, respectivamente, sendo que a partir do percentual de 25% começou a haver um crescimento da penetração dos íons cloreto à medida que se aumenta o teor de substituição.

A maior facilidade de penetração de agentes agressivos no concreto pode ser atribuída à maior porosidade das misturas (SIVAMANI e RENGANATHAN, 2022). Em alguns estudos, inicialmente devido à finura do resíduo de granito, foi observada uma mistura densa e compacta com uma textura levemente porosa conforme inclusive estudos de Velumani e Manikandan (2021), o que reduziu a profundidade de penetração dos cloretos. No entanto, com o aumento da porcentagem de substituição, a porosidade aumenta, resultando em uma penetração ligeiramente maior, em acordo com as análises de Bu *et al.* (2022) e Singh *et al.* (2017).

Quanto à resistência à carbonatação, Bu *et al.* (2022) observaram que, aos 14 dias de idade do concreto com pó de pedra/brita, há uma penetração de 2,4mm contra 2,2mm do concreto com apenas areia natural. Aos 28 dias, foi medida uma penetração de 5,2 mm e 4,7 mm, para o concreto com e sem pó de pedra/brita, respectivamente. Isso também foi observado por Binici e Aksogan (2018) para substituições de 25%, 40%, 55% e 70% do pó de pedra/brita, que resultaram em 6 mm, 6,80 mm, 7,10 mm e 7,90 mm de profundidade de penetração da frente de carbonatação, respectivamente. Os autores Bu *et al.* (2022) e Butler *et al.* (2001) concluíram que a profundidade da carbonatação aumentou com o tempo e a menor resistência à carbonatação do concreto com pó de pedra/brita, em comparação com o concreto com apenas areia natural, não depende apenas da alta porosidade, mas também está relacionada ao aumento do fator a/c, que melhora a difusão do CO₂ (BU *et al.*, 2022).

No entanto, apesar do aumento da porosidade, que facilita a entrada de agentes agressivos, o desempenho dos concretos com pó de pedra/brita pode ser melhorado com a adição de aditivos químicos superplastificantes (BU *et al.*, 2022; CARTUXO *et al.*, 2016). O uso de aditivos reduz o fator a/c, resultando em menor porosidade e diminuindo a difusão de CO₂ nos poros do concreto. Estudos mostram que seu uso resulta em uma diminuição da profundidade de carbonatação aos 91 dias de até 59%, e uma diminuição da penetração de íons cloretos em até 38%, estando em acordo com os estudos de Bu *et al.* (2022).

A profundidade de carbonatação dos concretos contendo cerca de 30% a 40% de pó de pedra/brita foi menor ou semelhante à das amostras de controle e proporcionou resistência à carbonatação, conforme menciona Cartuxo *et al.* (2016); Singh *et al.* (2016b), não sendo observada carbonatação em misturas contendo até 25% de pó de pedra/brita, com 0,30 a/c, e após 56 dias de exposição a condições carbônicas extremas.

Além da capacidade de repelir a penetração de íons cloreto e a resistência à carbonatação serem fatores determinantes para se avaliar a durabilidade de um concreto, a especificação de um concreto durável também leva em conta a identificação das condições de exposição, uma vez que o ambiente no qual o concreto é exposto exerce um papel importante no desempenho considerando determinado período (vida útil) e a realização de manutenções (SELVAN e VIJAYA, 2015).

Logo, em ato contínuo da revisão sistemática, no quesito da exposição ambiental, tem-se que é importante, também, o levantamento de estudos que simulem condições ambientais agressivas, tais como: em meio ácido (ácido clorídrico – HCl e ácido sulfúrico – H₂SO₄) e em meios com ataques de sulfatos (sulfato de magnésio - MgSO₄ e sulfato de sódio - Na₂SO₄), ambos na concentração de 5%.

Em meios com ataque de sulfatos, com o uso de sulfato de magnésio (MgSO₄) e sulfato de sódio (Na₂SO₄) com concentração de 5% em meio aquoso e mantendo-se curando por 28 dias, segundo Lohani *et al.* (2013) nota-se uma perda de resistência à compressão na faixa de 2,10% para f_{ck} igual a 30MPa e percentual de substituição de pó de pedra/brita à 50%, para Selvan e Vijaya (2015) a perda da resistência à compressão é cerca de 6,74%, 5,21% e 4,31% para os f_{ck} de 30MPa, 40MPa e 50MPa, respectivamente, todos com teor de substituição de pó de pedra/brita à 60%. Perda de resistência, também, entre 7% e 13% para concretos com f_{ck} de 30MPa com teores de substituição até 35% (TEMIZ e KANTARCI, 2014). Estando dentro do limite da resistência à compressão residual de até 15% ou 2,8MPa a 3MPa (SILVA, 2021; TORRES, 2017).

A perda da capacidade de resistência à compressão do concreto aumenta à medida que se aumenta o tempo de cura de imersão em solução de sulfato, com 180 dias e 365 dias a resistência cai 10% e 30%, respectivamente (VIJAYALAKSHMI *et al.*, 2013) e quanto maior o teor de pó de pedra/brita imerso em solução de sulfato, também, maior a queda da resistência, entre 3,45% e 8,07% de decaimento conforme estudos de Vijayalakshmi *et al.* (2013).

Os poros ocasionados pelo excesso de pó de pedra/brita somada as suas irregularidades, são mais propícios a formação e depósitos de subprodutos da reação química

dos sulfatos (TEMIZ e KANTARCI, 2014), do sulfato de sódio (que ataca o hidróxido de cálcio do cimento Ca(OH)_2) resulta o depósito em excesso do sulfato de cálcio di-hidratado (gipsista) e do sulfato de magnésio (que ataca os silicatos de cálcio C-S-H (CaO , SiO_2 e H_2O)), há a resultante do depósito em excesso do hidróxido de magnésio (Mg(OH)_2) que tem uma significativa contração volumétrica, gerando porosidade da estrutura do concreto e tornando-se altamente reativo devido à elevada área superficial (NEVILLE, 2016; ROUSSEL, 2011) e do sulfato de cálcio (que ataca o aluminato de cálcio hidratado), há a formação do sulfoaluminato de cálcio ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$), conhecido como “etringita” que pode se tornar “etringita tardia” quando não há a dissipação natural, adequada e controlada das elevadas temperaturas durante a hidratação ou em lançamento de uma grande quantidade de concreto (NEVILLE, 2016).

Esses subprodutos excessivos causam aumento do volume, e por consequência, trincas, gerando queda da resistência e aumento da massa do corpo de concreto, em média um leve aumento de 0,20%, devido ao preenchimento dos vazios com os subprodutos, porém após as reações expansivas há a perda de massa devido a deterioração da ligação que forneceria resistência e erosão localizada nas bordas das amostras (TEMIZ e KANTARCI, 2014), o que está em acordo com a explicação de Neville (2016) que, apesar do aumento do volume no início da reação de ataques de sulfato em peças de concreto, esse aumento é localizado, uma vez que ao mesmo tempo, ocorre um aumento na porosidade em outro local da matriz além de danos iniciados normalmente pelas bordas e pelos cantos das peças de concreto, seguidas de fissuração progressiva e lascamento, tornando o concreto friável. Logo, o que se nota com mais frequência nos artigos pesquisados, é a perda de massa por ataque de sulfatos de 1,60%, 1,40% e 0,97% para os f_{ck} de 30MPa, 40MPa e 50MPa, respectivamente, todos com teor de substituição de pó de pedra/brita de 60% e conforme estudos científicos de Selvan e Vijaya (2015).

Fato importante que se observou é que por se tratar de resíduo de britagem, o pó de pedra/brita pode possuir em suas interfaces, vestígios de querosene, óleo diesel e cera (ricos em enxofre) do próprio processo de moagem/trituração e detonação do maciço e que durante o processo de diminuição, onde há a uma grande quantidade de energia empregada, o enxofre é transformado em trióxido de enxofre ($\text{S} \rightarrow \text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$) e a presença desses íons de enxofre no resíduo de pó de pedra/brita diminui a resistência ao sulfato e aumenta a formação de etringita, causando a deterioração do concreto (VIJAYALAKSHMI *et al.*, 2013).

Já em meio ácido, a durabilidade do concreto com pó de pedra/brita, no caso do ácido clorídrico (HCl), foi possível observar que há uma perda de resistência e peso em comparação

com a imersão em água normal, e a perda de resistência aumenta com o aumento dos dias de imersão na solução de HCl, sendo inclusive mais agressivo que o $MgSO_4$ e NaCl, com perda de 50% da resistência à compressão aos 28 dias e 67,78% aos 91 dias em comparação com a imersão em água. (LOHANI *et al.*, 2013). Já a perda de massa aos 28 dias no concreto de 20MPa e 30MPa, com 0% de substituição, foi em torno de 2,21% e 2,20%, respectivamente e à medida que se acrescentava teor de pó de pedra/brita, observou-se a redução de massa, para o concreto de 20MPa de 2,42%, 2,34%, 2,62%, 2,84% e 2,75% para os teores de substituição de 20, 40, 60, 80 e 100%, respectivamente, enquanto que para o concreto de 30MPa, a perda foi de aproximadamente 1,90%, 1,60%, 1,85%, 2,10% e 2,20% da massa inicial conforme análises de Fayaz *et al.* (2017).

Tal comportamento pode ser explicado pela fragilidade que ocorre nas interfaces dos agregados e a matriz cimentícia, favorecendo a penetração do ácido pelos canalículos vazios internos. Em relação ao fator de durabilidade de ataque ácido, o concreto com 40% de pó de pedra/brita apresenta-se com propriedades de durabilidade mais aprimoradas se comparada aos outros teores fato disposto nos estudos de Fayaz *et al.* (2017).

Utilizando-se de ácido sulfúrico (H_2SO_4), na mesma concentração de 5%, percebeu-se uma perda de massa semelhante, ou seja, para os concretos de 30MPa, 40MPa e 50MPa, com teor de substituição de 60%, tem-se, respectivamente, 2,36%, 2,25% e 2,09% e a menor perda a medida que se aumenta a resistência característica se dar pelo fato de que quanto maior a resistência, maior o consumo de cimento, e mis fortes são as ligações intramoleculares entre as partículas do concreto (FAYAZ *et al.*, 2017).

Em média, a perda de peso devido ao ataque de ácido é de 2,65% para o concreto convencional e 2% para o concreto com concreto com substituição, independentemente da classe do concreto, e com substituição de pó de pedra/brita entre 40% e 60%, com isso a durabilidade do concreto com pó de pedra/brita sob ataque de ácido e sulfato pode vim a ser superior à do concreto convencional conforme estudos de Fayaz *et al.* (2017) e Lohani *et al.* (2013).

5.4 TEOR IDEAL DE PÓ DE PEDRA/BRITA EM MISTURAS DE CONCRETO

Analisando os estudos apresentados nos itens anteriores, foi possível responder à pergunta de: “Qual o teor ideal de substituição do agregado miúdo natural por pó de pedra/brita?”, por meio do levantamento dos teores ideais de substituição de areia natural por pó de pedra/brita para cada propriedade avaliada e com base nos percentuais mais críticos para

cada propriedade estudada, nota-se que cada propriedade demonstrou ter um intervalo de percentual onde há maiores reflexos no desempenho do concreto a medida que se aumenta o percentual de teor de substituição de pó de pedra/brita, tem-se que o teor médio de substituição admissível que se pode utilizar sem afetar demasiadamente as características mecânicas e físicas do concreto produzido é de aproximadamente 50% conforme Tabela 12.

Tabela 12: Resumo do teor médio por propriedade do concreto.

Propriedades	Teor Máximo de Substituição Admissível
Trabalhabilidade (<i>Slump</i>)	55%
Resistência à compressão	75%
Resistência à flexão	50%
Resistência à tração	60%
Resistência à abrasão	55%
Penetração de água	40%
Absorção de água	30%
Resistência à penetração de íons cloreto	25%
Resistência à frente de carbonatação	50%
Resistência à Ataque de Sulfato	60%
Resistência à Ataque Ácido	40%
Teor Médio	49% ≈ 50%

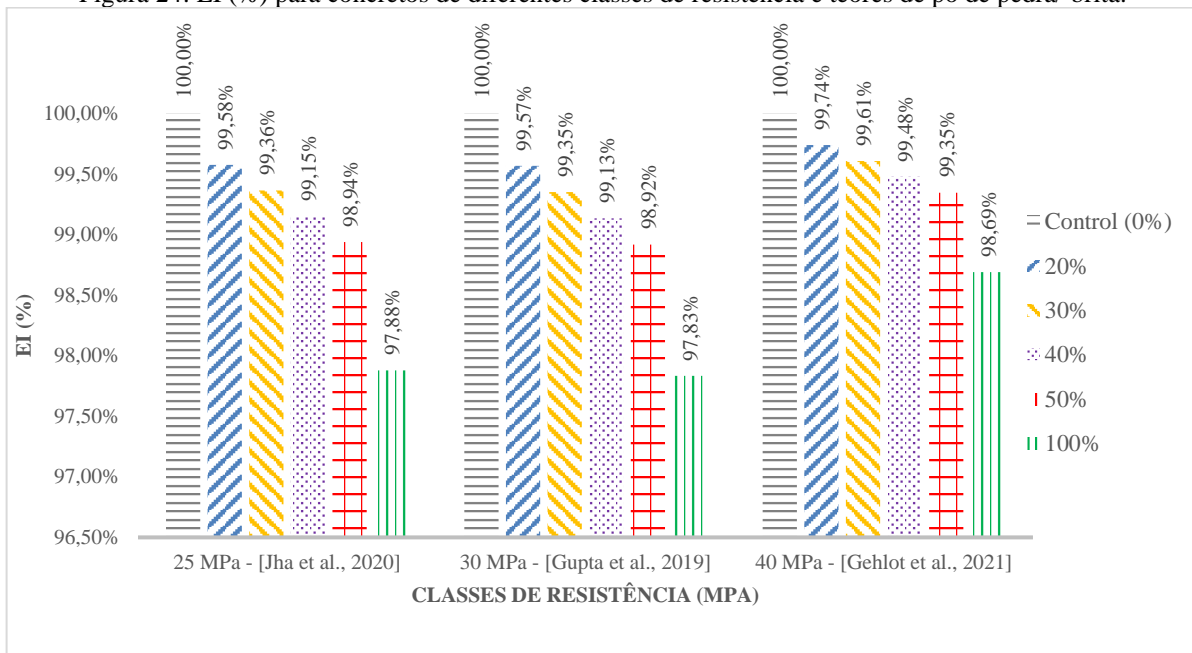
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

5.5 VIABILIDADE AMBIENTAL DO PÓ DE PEDRA/BRITA NA FABRICAÇÃO DE MISTURA DE CONCRETO

De maneira geral, a energia média necessária para produzir um metro cúbico de concreto de cimento Portland é de cerca de 2.775 MJ, que é gerada pela queima de combustíveis fósseis, levando a emissões de CO₂, e a quantidade total de energia consumida durante a produção e lançamento de concreto cimentício (sem armadura) é de 738 MJ/ton, enquanto as emissões de CO₂ durante o processo giram em torno de 134 kg/ton conforme estudos de Singh *et al.*, (2020).

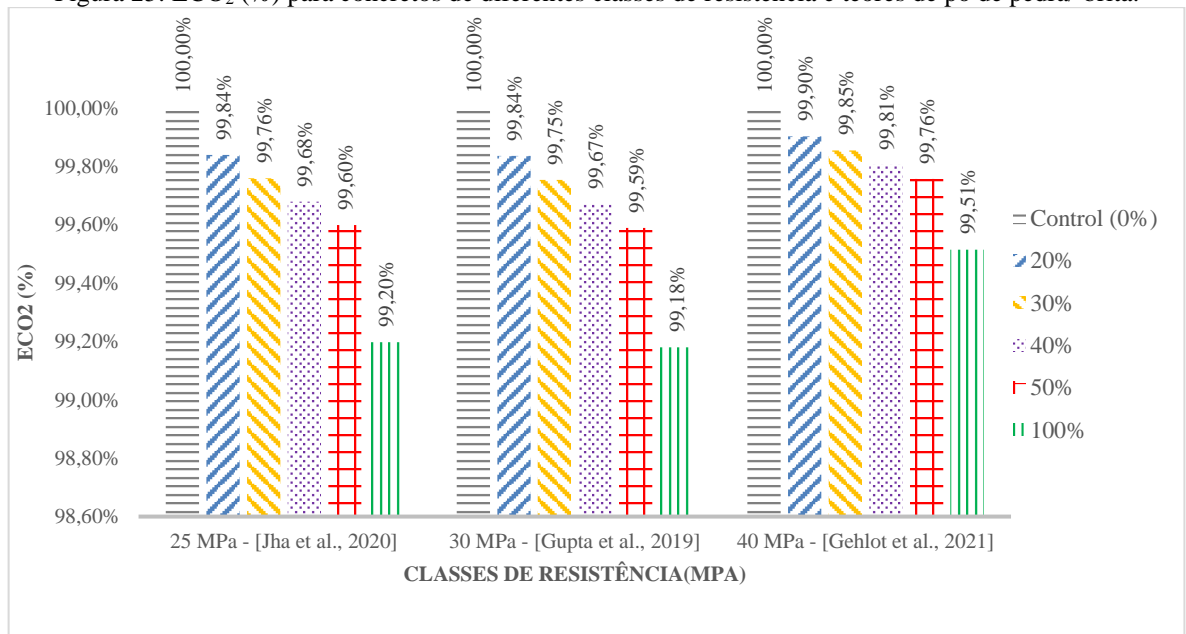
Diante disto e em resposta à quarta pergunta que questiona se a substituição da areia natural pelo pó de pedra/brita pode reduzir os impactos ambientais em termos de energia e emissões, tem-se que, a nível dos indicadores de Energia Incorporada (EI) e Emissão de Dióxido de Carbono (ECO₂), o concreto com pó de pedra/brita possui potencial de sustentabilidade, conforme apresentado na Figura 24, pode-se observar que o uso de pó de pedra/brita reduz a energia incorporada do concreto em mais de 2% para as classes de resistência à compressão de 25 MPa e 30 MPa. Para a resistência mais alta, 40 MPa, essa redução foi um pouco menor, 1,3%. Já a Figura 25 mostra que, para o ECO₂, há uma redução de quase 1% para as classes de resistência à compressão de 25 MPa e 30 MPa e de 0,5% para 40 MPa.

Figura 24: EI (%) para concretos de diferentes classes de resistência e teores de pó de pedra/ brita.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Figura 25: ECO₂ (%) para concretos de diferentes classes de resistência e teores de pó de pedra/ brita.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

O fato de concretos com maior resistência resultarem em maiores valores de EI e CO₂ pode ser justificado pelo maior teor de cimento nas misturas, e a substituição de areia natural por pó de pedra/brita nesses concretos mitiga os impactos ambientais. Talvez, com um estudo mais aprofundado sobre o empacotamento ideal dos grãos, seja possível produzir concretos com maior resistência, reduzindo os teores de cimento e aumentando os teores de pó de pedra/brita, reduzindo, conseqüentemente, os impactos ambientais.

Por meio da Tabela 13, que apresenta os resultados de EI e ECO₂ calculados para diferentes composições de concreto obtidas em estudos anteriores, foram elaborados os gráficos das Figura 24 e Figura 25, adotando algumas classes de resistências de concreto encontradas na literatura, com a premissa de que os percentuais de 20%, 30% e 40% foram adotados por serem os percentuais mais utilizados na pesquisa compilada, sendo que o percentual de 50% foi adotado tendo em vista que, conforme item 5.4 (Teor ideal de pó de pedra/brita em misturas de concreto) desta Dissertação, seria o teor ideal máximo admissível de substituição, e o percentual de 100% de substituição foi adotado como meramente otimizador e comparativo com o percentual de controle de 0%.

Tabela 13: EI e ECO₂ para misturas de concreto com diferentes teores de substituições.

Classe de Resistência do Concreto	% de Pó de Pedra/brita	Composição do Concreto (kg/m ³)					EI	ECO ₂ (kgCO ₂ /m ³)	
		Cimento	Areia Natural	Pó de Pedra/brita	Agregado Graúdo	Água Aditivo (MJ/m ³)			
25 MPa (JHA <i>et al.</i> , 2020)	0%	326,0	698,0	0,0	1255,9	160,7	-	2.193,11	291,56
	20%	326,0	558,4	139,6	1255,9	160,7	-	2.183,80	291,09
	30%	326,0	488,6	209,4	1255,9	160,7	-	2.179,15	290,85
	40%	326,0	418,8	279,2	1255,9	160,7	-	2.174,50	290,62
	50%	326,0	349,0	349,0	1255,9	160,7	-	2.169,84	290,39
	100%	326,0	0,0	698,0	1255,9	160,7	2,21	2.146,57	289,22
30 MPa (GUPTA <i>et al.</i> , 2019)	0%	339,0	745,0	0,0	1248,0	152,5	2,21	2.291,82	304,37
	20%	339,0	596,0	149,0	1248,0	152,5	2,21	2.281,89	303,87
	30%	339,0	521,5	223,5	1248,0	152,5	2,21	2.276,92	303,62
	40%	339,0	447,0	298,0	1248,0	152,5	2,21	2.271,95	303,37
	50%	339,0	372,5	372,5	1248,0	152,5	2,21	2.266,98	303,12
	100%	339,0	0,0	745,0	1248,0	152,5	2,21	2.242,15	301,88
40 MPa (GEHLOT <i>et al.</i> , 2021)	0%	440,5	563,5	0,0	1135,0	167,4	-	2.869,04	389,30
	20%	440,5	450,8	112,7	1135,0	167,4	-	2.861,52	388,93
	30%	440,5	394,5	169,1	1135,0	167,4	-	2.857,76	388,74
	40%	440,5	338,1	225,4	1135,0	167,4	-	2.854,01	388,55
	50%	440,5	281,8	281,8	1135,0	167,4	-	2.850,25	388,36
	100%	440,5	0,0	563,5	1135,0	167,4	-	2.831,46	387,42

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Da Tabela 13, nota-se uma diminuição da EI à medida que se aumenta a quantidade de pó de pedra/brita, fato este justificado devido o pó de pedra/brita ser um resíduo da indústria de agregados, com aproximadamente 0,020 MJ/kg contra 0,087 MJ/kg da areia natural que por ser um produto principal de seu beneficiamento, carrega consigo a maioria da energia necessária e incorporada. Logo pode ser visto que a utilização do pó de pedra/brita reduz a energia incorporada do concreto, podendo os valores de EI afetar substancialmente as misturas de concreto de alta resistência e alto desempenho se forem projetadas com pó de pedra/brita. Fato semelhante ocorre com a Emissão de Dióxido de Carbono, sendo que o pó de pedra/brita responde por 0,001 kgCO₂/kg contra 0,004 kgCO₂/kg da areia natural, além disso a areia natural responde em torno por 42% da ECO₂ se comparado com a emissão de CO₂ dos outros agregados componentes do concreto.

E para confecção da Tabela 13, adotou-se como valores de EI e ECO₂ por matéria-prima constituinte do concretos os valores apurados pela Tabela 14 e Tabela 15 que apresentam os dados de EI e ECO₂ de estudos anteriores, respectivamente. E para estimar os totais de ECO₂ e EI do concreto, é necessário considerar a contribuição de cada constituinte usando a Eq. 5 e a Eq. 6, respectivamente:

$$ECO_{2\text{ incop.}} = \sum_{i=1}^n (W_{ins.} \times CO_{2\text{ ins.}}) \quad \text{Eq. 5}$$

$$EI_{incop.} = \sum_{i=1}^n (W_{ins.} \times EI_{ins.}) \quad \text{Eq. 6}$$

Onde CO_{2 incop.} é o carbono incorporado do concreto (kgCO₂/m³), W_{ins.} é o peso por unidade de volume do componente de concreto (kg/m³), e CO_{2 ins.} é a emissão de dióxido de carbono para cada componente de concreto (kgCO₂/kg). E EI_{incop.} é a energia incorporada do concreto (MJ/kg), W_{ins.} é o peso por unidade de volume do componente de concreto (kg/m³), e EI_{ins.} é a energia necessária para cada componente de concreto (MJ/kg).

Tabela 14: Energia incorporada (MJ/kg) por matéria-prima

	Cimento	Areia Natural	Agregado Graúdo	Água	Aditivo
Valor	4,800	0,081	0,083	0,200	2,600
Ref.	(GUPTA <i>et al.</i> , 2019)	(GUPTA <i>et al.</i> , 2019)	(GUPTA <i>et al.</i> , 2019)	(GUPTA <i>et al.</i> , 2019)	(MA <i>et al.</i> , 2016)
Valor	3,630	0,098	0,098	0,200	11,500
Ref.	(MA <i>et al.</i> , 2016)	(GENG <i>et al.</i> , 2019)	(GENG <i>et al.</i> , 2019)	(HAMMOND e JONES, 2011)	(MITHUN e NARASIMHAN, 2016)
Valor	7,790	0,089	0,180	0,010	4,740
Ref.	(SHUKLA <i>et al.</i> , 2009)	(MA <i>et al.</i> , 2016)	(MA <i>et al.</i> , 2016)	(HAMMOND e JONES, 2019)	(WIJAYASUNDARA <i>et al.</i> , 2017)
Valor	5,232	0,080	0,150	0,010	11,470
Ref.	(CALKINS, 2009)	(SHUKLA <i>et al.</i> , 2009)	(CALKINS, 2009)	(YU <i>et al.</i> , 2017)	(YU <i>et al.</i> , 2017)
Valor	4,600	0,100	0,100	0,017	-
Ref.	(HAMMOND e JONES, 2011)	(CALKINS, 2009)	(HAMMOND e JONES, 2011)	(CRAWFOR <i>et al.</i> , 2019)	-
Valor	5,500	0,100	0,083	-	-
Ref.	(HAMMOND; JONES, 2019)	(HAMMOND; JONES, 2011)	(HAMMOND; JONES, 2019)	-	-
Valor	5,500	0,067	0,083	-	-
Ref.	(YU <i>et al.</i> , 2017)	(HAMMOND e JONES, 2019)	(YU <i>et al.</i> , 2017)	-	-
Valor	11,800	0,081	0,036	-	-
Ref.	(CRAWFOR <i>et al.</i> , 2019)	(YU <i>et al.</i> , 2017)	(CRAWFOR <i>et al.</i> , 2019)	-	-
Média	6,107	0,087	0,102	0,087	7,578

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Tabela 15: Emissão de CO₂ (kgCO₂/kg) por matéria-prima.

	Cimento	Areia Natural	Agregado Graúdo	Água	Aditivo
Valor	0,930	0,005	0,005	0,001	0,720
Ref.	(GUPTA <i>et al.</i> , 2019)	(GUPTA <i>et al.</i> , 2019)	(GUPTA <i>et al.</i> , 2019)	(GUPTA <i>et al.</i> , 2019)	(GENG <i>et al.</i> , 2019)
Valor	0,840	0,004	0,005	0,0002	0,520
Ref.	(GENG <i>et al.</i> , 2019)	(FLOWER e SANJAYAN, 2007)	(FLOWER e SANJAYAN, 2007)	(CARONGE <i>et al.</i> , 2022)	(FLOWER e SANJAYAN, 2007)
Valor	0,820	0,007	0,005	0,001	0,690
Ref.	(FLOWER e SANJAYAN, 2007)	(MA <i>et al.</i> , 2016)	(MA <i>et al.</i> , 2016)	(HAMMOND e JONES, 2019)	(MA <i>et al.</i> , 2016)

Valor Ref.	0,659 (MA <i>et al.</i> , 2016)	0,003 (CARONGE <i>et al.</i> , 2022)	0,007 (CARONGE <i>et al.</i> , 2022)	0,001 (YU <i>et al.</i> , 2017)	0,690 (WIJAYASUNDARA <i>et al.</i> , 2017)
Valor Ref.	0,931 (CARONGE <i>et al.</i> , 2022)	0,005 (CALKINS, 2009)	0,008 (CALKINS, 2009)	0,001 (CRAWFOR <i>et al.</i> , 2019)	0,600 (YU <i>et al.</i> , 2017)
Valor Ref.	0,908 (CALKINS, 2009)	0,005 (HAMMOND e JONES, 2011)	0,005 (HAMMOND e JONES, 2011)	-	-
Valor Ref.	0,830 (HAMMOND e JONES, 2011)	0,002 (CHOI <i>et al.</i> , 2012)	0,002 (HAMMOND e JONES, 2019)	-	-
Valor Ref.	0,930 (HAMMOND e JONES, 2019)	0,005 (YU <i>et al.</i> , 2017)	0,005 (YU <i>et al.</i> , 2017)	-	-
Valor Ref.	0,930 (YU <i>et al.</i> , 2017)	0,003 (CRAWFOR <i>et al.</i> , 2019)	-	-	-
Média	0,864	0,004	0,005	0,001	0,644

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Diante disto para destacar a sustentabilidade do concreto contendo pó de pedra/brita, foi realizada a análise de energia incorporada (EI) e emissão de CO₂ (ECO₂) acima, entretanto devido ao fato de o pó de pedra/brita ser um subproduto de processos industriais e usado em sua forma recebida para a produção de concreto, os valores específicos de seu EI e ECO₂ não estão prontamente disponíveis na literatura.

Conseqüentemente, para atribuir algum valor numérico, tornou-se necessário considerar a quantidade de resíduos gerados durante vários estágios do setor de pedra britada. Pesquisas indicaram que os resíduos gerados nesse setor representam aproximadamente 15% a 25% de sua produção global conforme Venkata (2021), Patel *et al.*, (2013) e Vijayalakshmi *et al.* (2013). O que significa milhões de toneladas de resíduos coloidais por ano e o descarte desses resíduos finos é um dos problemas ambientais em todo o mundo, com isso adotou-se que o pó de pedra/brita responde pela média de 20% da EI e da ECO₂ da produção de agregado graúdo, ou seja, 0,020 MJ/kg (20% de 0,09956) e 0,001 kgCO₂/kg (20% de 0,00521), respectivamente.

Continuando a resposta da quarta pergunta que questiona se a substituição da areia natural pelo pó de pedra/brita pode reduzir os impactos ambientais em termos de energia e emissões, tem-se que, a nível de Matriz de Interação, percebe-se que reduz os impactos ambientais tanto no aspecto quantitativo quanto no qualitativo e conforme APÊNDICE E e F.

E conforme mostrado na Tabela 16, tem-se que no aspecto quantitativo, há um aumento percentual dos impactos positivos em torno de 60,53% e uma diminuição percentual dos impactos negativos em torno de 37,70%. E em relação aos aspectos qualitativos, que leva em conta a (Eq. 1) e os pesos dispostos na metodologia, houve um aumento percentual dos impactos positivo em torno de 57,40% e uma diminuição percentual dos impactos negativos em torno de 44,22%.

Tabela 16: Impactos Ambientais - Aspectos Quantitativas e Qualitativas

Reuso do Pó de Pedra/Brita	Aspecto Quantitativo ^{nota 1}		Aspecto Qualitativo ^{nota 2}	
	Impactos Positivos	Impactos Negativos	Impactos Positivos	Impactos Negativos
Sem destinação	15	84	118	711
Com destinação	38	61	277	493
Resultado	60,53%	-37,70%	57,40%	-44,21%

Nota 1: Considera apenas o somatório dos impactos

Nota 2: Considera os pesos (Caráter, Relevância, Cobertura, Duração e Reversibilidade) da Eq. 1, conforme Tabela 8

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Em continuidade e organizando os impactos por Elementos Naturais (Características Físicas e Química, Condições Biológicas e Fatores Antropológicos), tem-se que o elemento que mais beneficiou-se com o reaproveitamento do pó de pedra/brita foi o de “Características Físicas e Químicas”, com aumento percentual dos impactos positivos, na ótica quantitativa, em torno de 83,33%, seguido das “Condições Biológicas” e “Fatores Antropológicos”, com aumento percentual dos impactos positivos em torno de 80% e 31,25%, respectivamente, conforme pode-se observar na Tabela 17.

Tabela 17: Impactos Ambientais por Elemento Natural

Reuso do Pó de Pedra/Brita - Conjunto de Elementos Naturais		Aspecto Quantitativo ^{nota 1}		Aspecto Qualitativo ^{nota 2}	
		Impactos Positivos	Impactos Negativos	Impactos Positivos	Impactos Negativos
Sem destinação	Características Físicas e Químicas	2	37	10	309
	Condições Biológicas	2	34	17	295
	Fatores Antropológicos	11	13	91	107
Com destinação	Características Físicas e Químicas	12	27	81	216
	Condições Biológicas	10	26	75	216
	Fatores Antropológicos	16	8	121	61
Resultados	Características Físicas e Químicas	83,33%	-37,04%	87,65%	-43,06%
	Condições Biológicas	80,00%	-30,77%	77,33%	-36,57%
	Fatores Antropológicos	31,25%	-62,50%	24,79%	-75,41%
	MÉDIA	64,86%	-43,44%	63,26%	-51,68%

Nota 1: Considera apenas o somatório dos impactos

Nota 2: Considera os pesos (Caráter, Relevância, Cobertura, Duração e Reversibilidade) da Eq. 1, conforme Tabela 8

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Na ótica qualitativa, manteve-se aquela mesma ordem de prevalência, sendo as Características Físicas e Químicas o mais beneficiado, seguido das Condições Biológicas e Fatores Antropológicos, com 87,65%, 77,33% e 24,79%, respectivamente. Isso se apresenta, segundo Galetakis e Sultana (2016), devido durante a trituração, manuseio e descarte, esse resíduo dispersa grande parte das partículas sólidas finas no ar, na água e no solo como poluente.

E quanto aos impactos causados no ambiente biológico, se explicam, em especial, segundo Danish *et al.* (2021), pelo fato de que durante a operação da mineradora a geração de uma mistura semissólida, denominada de lama de mineração, que contamina as águas superficiais e subterrâneas além do pó em suspensão que contamina e cobre superfícies vegetais e terras agrícolas em áreas adjacentes podendo torná-las inférteis.

Já em relação, ao terceiro elemento mais impactado, ou seja, o ambiente antrópico, se dar principalmente, pelo fato de que durante o beneficiamento do agregado graúdo há muita formação e suspensão de pó finos na superfície, podendo gerar problemas respiratórios nos trabalhadores da mina e na vizinhança no entorno da mineradora, além de que, durante a operação, também há o uso de explosivos que podem ser riscos a vida das pessoas que encontram-se no raio de influência dos detonares, além do risco de danos as estruturas de moradias e outros empreendimentos da vizinhança.

Logo, percebe-se por uma viabilidade ambiental da substituição da areia natural por pó de pedra/brita na confecção de concreto estrutural, com diminuição dos impactos negativos, em média de 68,96%, e aumento dos impactos positivos, em média de 28,02%, beneficiando todos os fatores ambientais levantados (características físicas e químicas; fator de condições biológicas e fatores antropológicos), com isso comprova-se, além da viabilidade ambiental.

Em relação a Análise de Ciclo de Vida do Concreto em estudo, sobre as alocações de matéria prima, destaca-se que a inexistência de uma base sólida de dados brasileira faz com que os dados sejam obtidos para um contexto global (Europeia, principalmente) e não nacional e com isso os dados relativos ao processo de produção do concreto foram estimados por meio da revisão bibliográfica e segundo apontamentos e estatísticas do IDEMAT 2023, USLCI 2011 e PEF 2022, conforme disposto no item 4.2 “Parâmetros da Avaliação dos Impactos Ambientais” desta Dissertação.

A apresentação dos resultados começa com a utilização dos quantitativos de insumos da produção de concreto normal, de 25MPa com 50% de teor de substituição, constantes na Tabela 13 desta Dissertação, como parâmetro de produção e posteriormente são mostradas as emissões totais de todo o sistema dos principais processos relacionados a produção do concreto de uma perspectiva do berço à entrega no canteiro de obras, destacando a importância da produção de concreto para os impactos gerais associados as alternativas de substituições de agregados miúdos.

Entretanto para maior clareza, as categorias de impacto estudadas foram divididas em três classes gerais, considerando os elementos da Matriz de AIA de Leopold (características físicas e químicas, condições biológicas e condições e fatores antropológicos) e conforme Quadro 5.

Quadro 5: Classes de impactos do estudo

Características Químicas	Físicas e	Condições Biológicas	Condições e fatores Antropológicos
1. Mudanças climáticas (MC); 2. Redução da camada de ozônio (RCO); 3. Radiação ionizante (RI) 4. Formação de oxidante fotoquímico (FOF); 5. Formação de oxidante fotoquímico (Vegetação) (FOFV); 6. Formação de oxidante fotoquímico (Humano) (FOFH); 7. Formação de material particulado (FMP)		8. Acidificação terrestre (AT); 9. Eutrofização de água doce (EAD); 10. Eutrofização marinha (EMA); 11. Eutrofização aquática geral (EAG); 12. Eutrofização aquática (Nitrogênio) (EAGN); 13. Eutrofização aquática (Potássio) (EAGP); 14. Eutrofização terrestre (ETE); 15. Escassez de Metais (ESM); 16. Escassez de combustíveis fósseis (ECF); 17. Escassez de recursos minerais, fósseis e renováveis (ERR); 18. Escassez de recursos hídricos (ERH) 19. Ocupação do solo urbano (OSU); 20. Ocupação de terras agrícolas (OTA); 21. Transformação do solo natural (TSN); 22. Resíduos a granel (RG)	23. Toxicidade humana geral (TH); 24. Toxicidade humana (qualidade do ar) (THA); 25. Toxicidade humana (qualidade do solo) (THS); 26. Toxicidade humana (qualidade da água) (THAG); 27. Eco Toxicidade terrestre (ECT); 28. Eco Toxicidade de água doce (ECAD); 29. Eco Toxicidade marinha (ECM).

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Estas categorias de impacto foram escolhidas devido à sua relação com a produção de cimento, como ocorre nas alterações climáticas, esgotamento de metais e fósseis e toxicidade humana (VIEIRA *et al.*, 2018). Além disso, as entradas e saídas dos fluxos, foram divididos em oito unidades de produção, a saber: transporte entre a extração e a usina de concreto; reaproveitamento do pó de pedra/brita; extração e uso da areia natural; extração e uso da brita; extração e uso do cimento; uso de água; uso de diesel na fase de produção do concreto e uso de eletricidade na fase de produção do concreto. Adiciona-se ainda que as composições adotadas tiveram como norteador a possibilidade da fabricação de concreto sem uso do pó de pedra/brita (apenas usando a areia natural como agregado miúdo) e com o uso de pó de pedra/brita como substituto parcial da areia natural como sendo agregado miúdo, e o percentual adotado foi o de 50%.

Continuando a resposta da quarta pergunta que questiona se a substituição da areia natural pelo pó de pedra/brita pode reduzir os impactos ambientais, tem-se que, a nível dos indicadores da ACV, o concreto com pó de pedra/brita, com base na metodologia ReCiPe 2016 (*midpoint*) tem-se uma redução média dos impactos em torno de 25,50% para 1 m³, conforme dados resultantes do processamento no *Software OpenLCA* e dispostos no Quadro 6.

Quadro 6: Resultados dos Indicadores método ReCiPe

Item	Indicador Recipe	Sigla	Sem Pó de Pedra/Brita	Com Pó de Pedra/Brita	Unid.
1	Acidificação terrestre	AT	267,63782	267,09141	kg SO ₂ -Eq
2	Ecotoxicidade de água doce	ECAD	0,31211	0,20419	kg 1,4-DCB-Eq
3	Ecotoxicidade marinha	ECM	1,14574	0,58652	kg 1,4-DCB-Eq
4	Ecotoxicidade terrestre	ECT	1.278,34783	690,88061	kg 1,4-DCB-Eq
5	Escassez de água/recursos hídricos	ERH	6,21720	3,13494	m ³
6	Escassez de combustíveis fósseis	ECF	59,84265	32,85061	kg oil-Eq
7	Escassez de recursos minerais	ERR	9,10056	9,27236	kg Cu eq
8	Eutrofização de água doce	EAD	0,00356	0,00178	kg P-Eq
9	Eutrofização marinha	EMA	0,00589	0,00300	kg N eq
10	Formação de material particulado	FMP	81,67466	81,51353	kg PM _{2,5} eq
11	Formação de Ozônio (Ecossistema Terrestre)	FOF	722,17974	722,17376	kg NO _x eq
12	Formação de Ozônio (Saúde humana)	FOF	722,17943	722,17346	kg NO _x eq
13	Mudança climática	MC	227,85936	213,49752	kg CO ₂ -Eq
14	Radiação ionizante	RI	0,00376	0,00347	kBq Co-60 eq
15	Redução da camada de ozônio	RCO	0,00037	0,00018	kg CFC-11-Eq
16	Toxicidade humana (cancerígena)	TH	1,09366	0,54722	kg 1,4-DCB-Eq
17	Toxicidade humana (não cancerígena)	TH	117,11460	58,97338	kg 1,4-DCB-Eq
18	Transformação do solo natural	TSN	0,82267	0,72354	m ² a crop eq ⁴²

Fonte: *Software OpenLCA* 2.0.1 – Elaborado pelo Autor (2023)

E com base na consolidação dos indicadores do Recipe 2016 nas classes ambientais do presente estudo (características físicas e químicas, condições biológicas e condições e fatores antropológicos), conforme organizados no Quadro 5, tem-se como resultado para cada classe a Tabela 18, a qual percebe-se que o elemento natural (classe ambiental) com maior benefício ambiental foram as Condições e fatores Antropológicos com 44,83% de redução.

Tabela 18: Resumo dos resultados da Metodologia Recipe 2016 por Elemento Natural

Elemento Natural	Resultado pelo ACV ReCiPe 2016 - Software OpenLCA 2.0.1
Características Físicas e Químicas	13,11%
Condições Biológicas	18,56%
Condições e fatores Antropológicos	44,83%
Média	25,50%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Porém, os principais e relevantes impactos avaliados e considerado na produção de concreto devem ser o potencial de aquecimento global/mudança climática (MC), potencial de acidificação terrestre (AT), potencial de eutrofização de água doce (EAD), potencial de eutrofização marinha (EMA), potencial de destruição da camada de ozônio (RCO) e potencial de formação de material particulado (FMP) (LAIBLOVÁ *et al.*, 2019; PETROCHE; RAMIREZ, 2022). Entretanto avaliou-se todos os dezoito indicadores do Método ReCiPe, com dados processados no *software OpenLCA*, ANEXO A – INVENTÁRIO DE CÁLCULO DO OPENLCA (COM PÓ DE PEDRA/BRITA) E ANEXO B – INVENTÁRIO DE CÁLCULO DO OPENLCA (SEM PÓ DE PEDRA/BRITA), a fim de conferir uma avaliação mais sistêmica.

⁴² Metro quadrado de área cultivada equivalente

a) Acidificação terrestre: com 0,20% de redução, e considerando que o dióxido de enxofre (SO₂), amônia (NH₃) e óxidos de nitrogênio (NO_x) são as principais causas da acidificação terrestre (MANJUNATHA *et al.*, 2021) tem-se que com a substituição parcial da areia natural por pó de pedra/brita há uma redução de quase 6,05% (de 6,540 para 6,167 kg SO₂ eq/kg) para SO₂.

b) Ecotoxicidade de água doce, Ecotoxicidade marinha e Ecotoxicidade terrestre: com 34,58%, 48,81% e 45,96% de redução, respectivamente, provavelmente devido a diminuição de extração de recursos naturais que devido ao processo fabril despejam nas águas do entorno material residual tais como aglutinantes de separação, águas de lavagem dos agregados durante o peneiramento, além de óleos e graxas dos processos em si e dos transportes envolvidos durante o expediente fabril, com composições de chumbo, mercúrio e níquel, tanto na etapa de extração quanto na etapa de beneficiamento, fatos estes em consonância com os estudos de Kumar e Rudson (1992) e Imtiaz *et al.* (2021). E em relação aos contaminantes, chumbo, mercúrio e níquel, tem-se a redução aproximada de 50%, passando de 89,26 kg 1,4-DCB, 80,42 kg 1,4-DCB e 0,00539 kg 1,4-DCB para 44,63 kg 1,4-DCB, 40,27 kg 1,4-DCB e 0,0027 kg 1,4-DCB, respectivamente.

c) Escassez de água/recursos hídricos: com 49,58% de redução, reduzindo de 6,204 m³ para 3,122 m³, devido a diminuição do uso da areia natural uma vez que a mineração indiscriminada de areia é o principal fator causador dos problemas de água potável afetando severamente a qualidade da água da comunidade usada para beber, cozinhar e irrigar, uma vez que grandes quantidades de água são captadas e liberadas durante o processo de mineração de areia (DA e LE BILLON, 2022; RENTIER e CAMMERAAT, 2022). Além disso durante o processo de mineração/extração e beneficiamento da areia natural de rio, há o consumo de 0,572 m³/m³ de areia extraída e geração de 1,89 m³/m³ de areia extraída de águas residuais, sem contar a água de resfriamento dos maquinários, conforme estudos de Bai *et al.* (2019).

Cita-se ainda que as águas residuais possuem grande potencial poluidor do ecossistema tendo em vista que contribuem para o aumento dos níveis de sólidos em suspensão total (SST) e da turbidez, além da inserção de metais pesados tais como magnésio, ferro, zinco e manganês (BAI *et al.*, 2019; RENTIER e CAMMERAAT, 2022) diante disto um sistema especializado de reciclagem de águas residuais é indicado (BAI *et al.*, 2019).

d) Escassez de combustíveis fósseis: houve uma redução global do consumo de combustíveis fósseis de 45,11%, devido a diminuição dos processos de extração de areia, e o reaproveitamento do resíduo da indústria de britagem a qual acaba se tornando um novo produto

a ser colocado a disposição do mercado, diminuindo alguns processos de extração de areia há a diminuição significativa do consumo de combustíveis fósseis do tipo gás natural que reduziu o consumo em 48,53% (de 38,79 kg oil eq. para 19,96 kg oil eq.) e em 43,01% (de 18,01 kg oil eq. para 10,26 kg oil eq.) o consumo de óleo combustível.

e) Escassez de recursos minerais: com 1,89% de aumento no consumo de recursos minerais, isso se dar pelo fato do maior uso do pó de pedra, que é um recurso mineral, na composição no concreto reciclado, entretanto o material utilizado, entretanto o reflexo é mínimo;

f) Eutrofização de água doce e Eutrofização marinha: com 49,91% e 49,07% de redução, respectivamente, provavelmente devido ao fato da diminuição dos processos industriais de dragagem do leito do rio natural para a extração da areia, fato este em consonância com os estudos de Rathore *et al.* (2020), com a diminuição de interferência na dinâmica do corpo hídrico e menos lançamento de hidrocarbonetos de petróleo (encontrado nos óleos combustíveis dos maquinários) e como consequência com a diminuição do depósito de nutrientes, especialmente fósforo (P), nitrogênio (N) e nitrato (NO₃-), o que diminuindo o surgimento excessivo de organismos como algas e cianobactérias. Diante disto, e conforme o *software OpenLCA*, tem-se que a diminuição do P girou em torno de 50% (de 0,00178 kg P eq. para 0,00089 kg P eq.), a diminuição do N girou em torno de 50% (de 0,00084 kg N eq. para 0,00042 kg N eq.) e a diminuição do NO₃- girou em torno de 16,66% (de 0,00012 kg N eq. para 0,00010 kg N eq.).

g) Formação de material particulado: com 0,20% de redução demonstrando-se a princípio baixa relevância para a confecção do concreto reciclado, entretanto vale mencionar que o Método ReCiPe considera para o indicador de FMP apenas as partículas com diâmetro inferior a 2,5 µm (PM_{2,5}) tendo em vista que para o método estas representam misturas complexas de substâncias orgânicas e inorgânicas e causam problemas de saúde humana, pois atinge a parte superior das vias aéreas e dos pulmões quando inalado (HUIJBREGTS *et al.*, 2017).

Os particulados PM_{2,5} são formados no ar a partir de emissões, principalmente, de dióxido de enxofre (SO₂), amônia (NH₃) e óxidos de nitrogênio (NO_x), entre outros elementos (WHO, 2003), sendo que o material particulado fino está associado à mortes prematuras, doenças mutagênicas e problemas respiratórios, pois é esta a fração que penetra no trato respiratório humano (nível alveolar), onde os mecanismos de expulsão destes poluentes não são eficientes (POPE e DOCKERY, 2006; HARRISON *et al.*, 2008).

Diante disto, e conforme cálculos do *software OpenLCA*, tem-se que a substituição parcial de areia natural por pó de pedra/brita reduziu em 5,70% os particulados menor que 2,5µm dos compostos de SO₂ (de 1,78 kg PM_{2,5} eq. para 1,89 kg PM_{2,5} eq.), provavelmente devido a diminuição do processo de extração da areia, por meio de dragas de sucção e reaproveitamento do resíduo (diminuindo o estoque do passivo) em que há a emissão de partículas, tanto no ar como no solo, em especial nos leitos de rios (no caso da extração dos rios) e no entorno urbano (no caso da poeira do pó de pedra/brita).

h) Formação de Ozônio (Ecossistema Terrestre) e Formação de Ozônio (Saúde humana): não houve alteração nos valores.

i) Mudança climática: com 6,30% de redução provavelmente devido a diminuição das distâncias entre o local de extração e o local da usina quando comparado com o pó de pedra/brita que em média encontra-se 40km de distância das unidades havendo com isso menos emissão de CO₂ e monóxido de dinitrogênio (N₂O) pelos motores a combustão dos caminhões de transporte. Além disso o reaproveitamento de material residual de uma indústria em outra, possibilita a compensação dos processos fabris fazendo com que haja diminuição no uso das máquinas movidas a diesel que emitem CO₂ e metano (CH₄) para a atmosfera, sendo um dos maiores contribuintes para o Efeito Estufa e conseqüentemente para a mudança climática, fatos estes em consonância com os estudos de Hottle *et al.* (2022).

Diante disto, em relação ao CO₂ (geral) houve uma redução de 227,85 kg CO₂-Eq/kg (composição sem pó de pedra/brita) para 213,49 kg CO₂-Eq/kg (composição com pó de pedra/brita), ou seja, uma redução percentual de cerca de 6,30%. E em relação ao CO₂ (queima de combustíveis fósseis), houve uma redução de 200,86 kg CO₂-Eq/kg (composição sem pó de pedra/brita) para 199,82 kg CO₂-Eq/kg (composição com pó de pedra/brita), ou seja, uma redução percentual de cerca de 0,52%, enquanto para os compostos de N₂O e de CH₄ houve uma redução de 49,80% e de 49,27%, respectivamente.

j) Radiação ionizante: com 7,71% de redução, e conforme cálculos do Recipe 2016 OpenLCA, devido ao fato da diminuição de 13,56% (de 0,00118 kBq Co-60 eq para 0,00102 kBq Co-60 eq) e 13,19% (de 0,00091 kBq Co-60 eq para 0,00079 kBq Co-60 eq) dos isótopos Carbono-14⁴³ e Rádônio-222⁴⁴, respectivamente. Compostos radioativos minerais naturais

⁴³ Isótopo radioativo (C¹⁴) natural do elemento carbono e reagindo com o oxigênio do ar forma o dióxido de carbono (C¹⁴O₂), cuja quantidade permanece constante na atmosfera. Este C¹⁴O₂, juntamente com o C¹²O₂ normal, é absorvido pelos animais e vegetais sendo, através de mecanismos metabólicos, incorporados a estrutura destes organismos.

⁴⁴ É um gás radioativo, considerado uma fonte natural de radiação, produzido no interior das rochas e dos solos, naturalmente compoendo a matriz do diesel, (como subproduto do petróleo) e da série radioativa natural do urânio

encontrados na composição do diesel que sofre redução devido a diminuição das distâncias entre a fonte de extração e a usina de concretagem, além da diminuição da extração da areia por meio das dragas de sucção que utilizam grandes quantidades de diesel combustível.

k) Redução da camada de ozônio: com 51,35% de redução provavelmente devido ao fato da diminuição do teor de areia natural e o reaproveitamento de resíduos da indústria de britagem e diminuição das distâncias de transporte.

Diante disto tem-se que a substituição parcial de areia natural por pó de pedra/brita reduziu em 13,78% (de 8,615E-11 para 7,429E-11 kg CFC11 eq/kg) os Clorofluorcarbono (CFC), reduziu em 5,89% (de 5,574E-12 para 5,246E-12 kg CFC11 eq/kg) os Hidroclorofluorcarbonetos (HCFC) e reduziu em 8,96% (de 4,436E-17 para 4,038E-17 kg CFC11 eq/kg) os Hidrocarboneto Halogenado (Halon), substâncias estas, as principais substâncias destruidoras da camada de ozônio que quando liberadas no meio ambiente, deslocam-se atmosfera acima, degradando a camada de ozônio (MMA, 2023). E em 48,85% (de 3,38E-02 para 1,73E-02 kg CFC11 eq/kg), o óxido nitroso (N₂O), que se decompõe na estratosfera para formar óxidos de nitrogênio (NO_x) sendo atualmente a principal substância antrópica destruidora da camada de ozônio (REVELL *et al.*, 2015 e KARL *et al.*, 2008).

l) Toxicidade humana (cancerígena) e Toxicidade humana (não cancerígena): com 49,96% e 49,64% de redução, respectivamente, devido tanto a qualidade da água como a do ar são severamente degradadas por derrames de combustível/óleo e gases de escape, respectivamente, das máquinas utilizadas para escavação e transporte (RENTIER e CAMMERAAT, 2022).

Sendo que as areias dos rios podem conter contaminantes, e especialmente a areia mais fina que pode acumular mais elementos tóxicos como o cádmio (Cd), chumbo (Pb) e o mercúrio (Hg), sem contar a contaminação em cadeia das atividades mineradoras a montante da bacia hidrográfica ou outras atividades antrópicas (KIM *et al.*, 2020 *apud* RENTIER e CAMMERAAT, 2022).

Logo com a redução do uso da areia, há a redução de 49,99% do Cd (de 1,599 kg 1,4-DCB para 0,799 kg 1,4-DCB), de 49,965% do Hg (1,445 kg 1,4-DCB para 0,723 kg 1,4-DCB) e de 50,00% do Pb (de 0,0384 kg 1,4-DCB para 0,0192 kg 1,4-DCB)

m) Transformação do solo natural: com 12,05% de redução, isso se dar pelo fato de que o uso do resíduo de pó de pedra/brita contribui para a limpeza do local de depósito desse

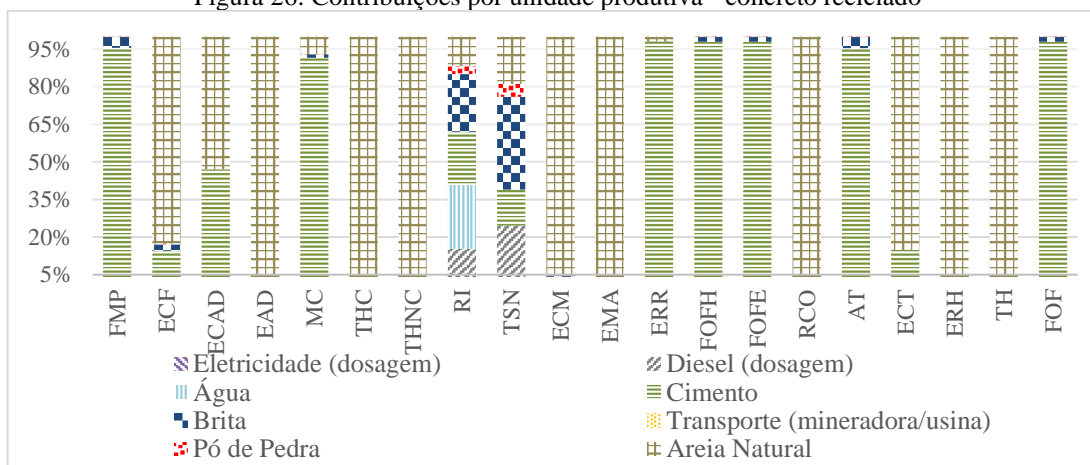
²³⁸U, proveniente do decaimento do rádio ²²⁶Ra, e, ao ser inalado, passa a ser um causador potencial do câncer de pulmão.

resíduo provendo uso ao rejeito, somado a diminuição de dragagem do rio para a extração de areia que utiliza de uma quantidade de água muito elevada para o beneficiamento e essa pressão d'água no corpo hídrico juntamente com as ações de remoção de areia altera o fluxo do rio, aumentando a erosão dos solos, o que impede o crescimento da mata ciliar, bem como contribui para os efeitos da inundações (Zanon *et al.*, 2021 *apud* RENTIER e CAMMERAAT, 2022). Registra-se ainda que as incisões no leito do rio causam instabilidade nas margens do rio, ameaçando as comunidades e infraestruturas nas margens do rio (REVELL *et al.*, 2015; RENTIER e CAMMERAAT, 2022). Estima-se que em rios onde há a dragagem de extração há em média a redução do leito do rio em quase meio metro por ano (RENTIER e CAMMERAAT, 2022).

Logo a mudança na cobertura da terra afeta diretamente o habitat original e, conseqüentemente, a composição original das espécies e o próprio uso da terra (ou seja, atividades agrícolas e urbanas) desqualifica ainda mais a terra como um habitat adequado para muitas espécies (HUIJBREGTS *et al.*, 2017). Diante disto, tem-se que para o parâmetro de transformação do solo natural, houve melhor aproveitamento da ocupação geral do solo e e aumento da preservação das áreas cultiváveis em torno de 12,05%, passando de 0,41112 m²a crop eq para 0,36158 m²a crop eq. e de 0,4115 m²a crop eq para 0,36196 m²a crop eq., respectivamente.

Já em relação as contribuições por unidades de produção, conforme Figura 26, tem-se que o cimento é a unidade produtiva que mais contribui para os impactos ambientais durante o processo de fabricação do concreto. Tendo em vista que a produção de cimento é o terceiro maior poluidor de gases de efeito estufa, totalizando, em média, 4–8% ou 2.296 Gigatons de emissões antropogênicas de dióxido de carbono em todo o mundo (FREEDONIA, 2019 *apud* DA e LE BILLON, 2022).

Figura 26: Contribuições por unidade produtiva - concreto reciclado



Fonte: Software OpenLCA 2.0.1 – Elaborado pelo Autor (2023)

Seguido da areia natural com contribuição percentual máxima de 99,65% no indicador de Eutrofização de água doce devido a extração de areia provocar intensa agitação do corpo hídrico e aumentando a turbidez. Isto, por sua vez, bloqueia a luz solar e reduz a respiração e a fotossíntese, além de bloquear os órgãos respiratórios de animais aquáticos e quando depositadas, as partículas agitadas como lodo e argila formam uma manta no leito do rio que pode sufocar microrganismos como diatomáceas, macro invertebrados, algas bentônicas ou ovos de peixes (BARMAN *et al.*, 2019a ; PADMALAL e MAYA, 2014 *apud* RENTIER e CAMMERAAT, 2022).

E posteriormente a brita com contribuição percentual máxima de 37,05% no indicador de transformação do solo natural devido a mineração de brita que leva ao processo de degradação da terra, perturbando o perfil do solo e alterando consideravelmente a topografia da superfície por causa das terras arrasadas (JAEGER, 2006; SINGH e KUMAR, 2017).

Além disso outro problema relacionado a transformação do solo natural gira em torno do esgotamento da camada fértil do solo e o conseqüente encolhimento das terras agrícolas, tendo em vista que principais nutrientes, como nitrogênio, fósforo e potássio são perdidos (SINGH e KUMAR, 2017).

Estima-se que há uma redução de 37,36%, 56,56% e 35,76%, respectivamente, daqueles nutrientes sendo que em um ano, cerca US\$ 16,213 de nitrogênio, US\$ 30,953 de fósforo e US\$ 51,588 de potássio são perdidos com a extração de agregado para construção civil (brita), considerando uma área de aproximadamente 3 mil hectares escavados a uma profundidade de 50 cm em um ano (SINGH e KUMAR, 2017).

Já o pó de brita demonstrou poucos impactos ambientais, demonstrando-se um material passível de substituir o agregado miúdo natural (areia natural) devido ao seu potencial de compensação ambiental⁴⁵ entre as atividades mineradoras sendo que a maior contribuição foi registrada no indicador de transformação do solo natural com 5,18%, pelos fatos já explanados nessa Dissertação e devido ao grande potencial de deposição dos particulados em áreas urbanas e residenciais, gerando grande acúmulo de resíduo inclusive em aterros sanitários inertes, ocupando áreas poderiam ser utilizado para outras benfeitorias e degradam a camada superficial do solo (MONTEIRO e DA SILVA, 2018).

⁴⁵ Mecanismo financeiro que visa contrabalançar os impactos ambientais previstos ou já ocorridos na implantação de um empreendimento, sendo uma espécie de indenização pela degradação, na qual os custos sociais e ambientais identificados no processo produtivo são incorporados aos custos globais do empreendedor.

Considerando apenas as unidades produtivas complementares da eletricidade (dosagem), diesel (dosagem), água e transporte (mineradora/usina) têm-se que os maiores impactos foram registrados no indicador de Transformação do solo natural com a maior contribuição vindo do diesel, com 24,61%.

Já em relação ao transporte entre a mineradora e a usina de concretagem tem-se que o maior percentual dos impactos gerados, gira em de 0,16% e no indicador de TSN. Importante consignar que apesar do valor ter sido baixo percentualmente, registra-se que a unidade referência é para a produção de 1m³ de concreto, e além disso tendo em vista que no Brasil, o transporte rodoviário é o mais representativo com 95% das operações de transporte sendo feitas por caminhão sem contar as restrições associadas ao transporte rodoviário (velocidade moderada, altos custos de manutenção e limitações de volume e peso para as cargas), a título exemplificativo, tem-se que 100 t de material transportado por 1 km por caminhão é responsável pela emissão de 13,7 kg de CO₂ equivalente, além do consumo de 5,27 kg de óleo equivalente (STAFFORD *et al.*, 2016).

Ainda em relação ao transporte, que é responsável pela entrega de todos os insumos para a produção de concreto, o uso de veículos dentro dos portões da usina e entrega de insumos reciclados para a produção, registra-se que a diminuição das distâncias percorridas para reuso do pó de pedra/brita como agregado miúdo em substituição a areia natural proporcionou uma redução de emissões de gás do efeito estufa, tendo o indicador de MC como parâmetro.

Considerando a aplicação dos parâmetros de abrangência mais global (destruição do ozônio, ao efeito estufa e a mudança climática) como sendo os mais adequados a realidade do Brasil, conforme (FIALA, 2011 *apud* LAIBLOVÁ *et al.*, 2019), tem-se que, com base na Tabela 19, que os valores para ambos os indicadores (RCO e MC) guardam entre si certa equivalência diante dos quatro métodos.

Isso se dá pelo fato que para as categorias da esfera do Aquecimento Global (destruição do ozônio, ao efeito estufa e a mudança climática), há uma padronização quanto aos cálculos visto que a maioria deles estão baseados no Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*), logo, os bancos de dados apresentam resultados muito próximos para a emissão dos gases de efeito estufa (STAFFORD *et al.*, 2016; STRADIOTO NETO, 2020).

Sendo a redução promovida com a substituição da areia natural por pó de pedra/brita, na ordem de 6,30% no método Recipe para o MC, 5,38% no método ILCD e EDIP e 5,80% no método CMILIA, enquanto para o indicador de RCO tem-se uma redução de 6,91% para os quartos métodos, considerando a fabricação na unidade funcional de 1m³ de concreto.

Tabela 19: Comparativo dos indicadores globais aplicando os quatro métodos

Método	Mudança climática - MC (kg CO ₂ eq.)			Redução da camada de ozônio - RCO (kg CFC-11 eq.)		
	Sem	Com	Percentual de Redução	Sem	Com	Percentual de Redução
Recipe	2,28E+02	2,13E+02	6,30%	5,65E-09	5,26E-09	6,91%
ILCD	2,23E+02	2,11E+02	5,38%			
CMILIA	2,24E+02	2,11E+02	5,80%			
EDIP	2,23E+02	2,11E+02	5,38%			

Fonte: *Software OpenLCA 2.0.1* – Elaborado pelo Autor (2023)

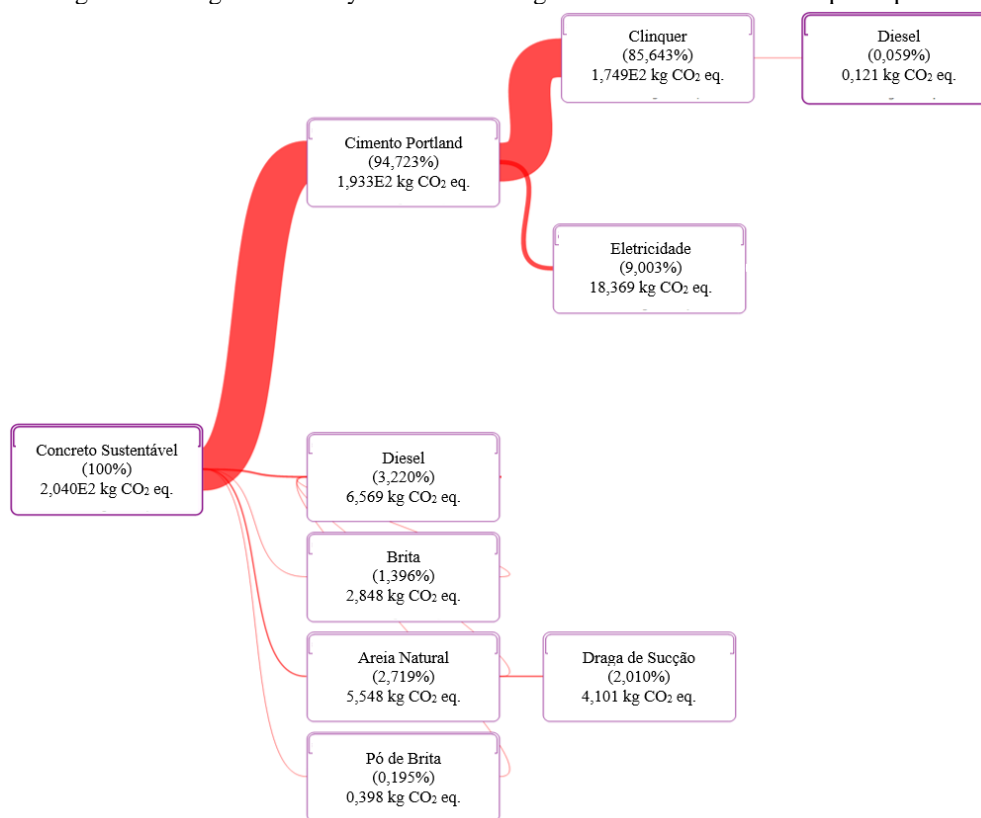
Porém do ponto de vista científico/de sustentabilidade é indicado o uso de uma linha do tempo de 500 anos para o indicador de MC, pois neste caso, são capturados um universo de impactos adicionais relevante maior, diferentemente do período de 100 anos, horizonte temporal geralmente utilizado e recomendado para as tomadas de decisões políticas de um Estado, e utilizado nas metodologias ReCiPe, ILCD, CMILIA e EDIP (HAUSCHILD *et al.*, 2013).

Diante disto, e utilizando-se da ferramenta/metodologia IPCC tem-se que para o universo de 500 anos haveria uma acumulação de 2,04E+02 kg CO₂ eq. para concretos com pó de pedra/brita e 2,09E+02 kg CO₂ eq. para concretos sem pó de pedra/brita, resultando em um percentual de redução na cifra de 2,39% para 1 m³.

Sendo o maior contribuinte sendo o cimento (94,723%), seguido do diesel da central de usinagem (3,220%), areia natural (2,719%), agregados de origem granítica (grauído/brita com 1,396% e pó de brita com 0,195%) e consumo de água na usinagem (0,040%) conforme Figura 27.

Logo analisando, as respostas da quarta pergunta deste estudo (se há redução dos impactos ambientais), foi possível levantar os percentuais de redução dos impactos ambientais resultantes das substituições de areia natural por pó de pedra/brita, para cada conjunto de elementos naturais.

Figura 27: Diagrama Sankey Global Warming 500 anos - Concreto com pó de pedra



Fonte: Software OpenLCA 2.0.1 – Adaptado pelo Autor (2023)

5.6 INDICADOR AMBIENTAL RESULTANTE PARA AS MISTURA DE CONCRETO CONTENDO PÓ DE PEDRA/BRITA

Analisando os estudos apresentados no item anterior referente a viabilidade ambiental do concreto com uso de pó de pedra/brita como alternativa de substituição parcial da areia natural foi possível responder à pergunta: “Se a substituição da areia natural pelo pó de pedra/brita pode reduzir os impactos ambientais?”, por meio do levantamento dos indicadores ambientais que compõe o EI, ECO₂, AIA e ACV. Por meio, desses indicadores, diante da Tabela 20, buscou-se comparar qual o Elemento Natural foi o mais impactado, e diante disto tem-se que as “Condições e fatores Antropológicos” foi o elemento mais beneficiado com redução dos impactos na ordem de 62,50% e 44,83%, por meio das análises do AIA e ACV.

Isso se dá possivelmente, devido a diminuição dos reflexos da toxicidade humana devido a redução da extração de areia há menos degradação e poluição dos leitos dos havendo a melhora da qualidade da água com a diminuição dos derrames de combustível/óleo, águas residuárias da extração e turbidez. E melhora na qualidade do ar com a diminuição dos gases de escape das máquinas utilizadas para escavação e transporte, tanto no beneficiamento da areia natural como devido a destinação adequada do pó residual de pedra/brita, sem mencionar a

diminuição dos particulados em suspensão que causam problemas pulmonares na saúde humana. Estando as análises em consonância com os estudos de Pinheiro (2016) e Pamu e Alugubelli (2023).

Tabela 20: Resumo dos resultados da Viabilidade Ambiental

Elemento Natural	Resultado pelo AIA Matriz de Leopold	Resultado pelo ACV ReCiPe 2016 - Software OpenLCA 2.0.1
Características Físicas e Químicas	37,04%	13,11%
Condições Biológicas	30,77%	18,56%
Condições e fatores Antropológicos	62,50%	44,83%
Média	43,55%	25,50%
Média Geral		34,52%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

5.7 VIABILIDADE ECONÔMICA DO PÓ DE PEDRA/BRITA NA FABRICAÇÃO DE MISTURA DE CONCRETO

Inicialmente cabe destacar que houve a necessidade de adaptação a realidade brasileira dos traços de concreto da Tabela 13 (*EI e ECO₂ para misturas de concreto com diferentes substituições de areia natural por pó de pedra/brita*) tendo em vista a composição de custo abarcar todos os custos inerentes a fabricação de concreto e com isso adotou-se as seguintes composições de custo e seus respectivos coeficientes de produtividade levando em conta as condições do mercado brasileiro, da Tabela 21, conforme tabela SINAPI. Sendo que para os insumos 1379, 4721, 43618, 370 e 4741 foram adotados os coeficientes dos traços segundo Gehlot *et al.* (2021); Gupta *et al.* (2019) e Jha *et al.* (2020).

Tabela 21: Composição de Preços SINAPI para Produção de Concreto Estrutural

Cód. SINAPI	Descrição	Unid.	Coeficientes Adotados		
			25MPa	30MPa	40MPa
88316 (C)	Servente com encargos complementares	h	2,3117	2,2958	2,4383
88377 (C)	Operador de betoneira estacionária/misturador com encargos complementares	h	1,4637	1,449	1,5418
88830 (C)	Betoneira capacidade nominal de 400 L, capacidade de mistura 280 L, motor elétrico trifásico potência de 2 CV, sem carregador - CHP diurno.	CHP	0,7534	0,7458	0,7936
88831 (C)	Betoneira capacidade nominal de 400 L, capacidade de mistura 280 L, motor elétrico trifásico potência de 2 cv, sem carregador - CHI diurno.	CHI	0,7103	0,7032	0,7483
1379 (I)	Cimento Portland	kg			
4721 (I)	Pedra britada n. 1 (9,5 a 19 mm) (retirado na jazida, sem transporte)	m ³			
43618 (I)	Aditivo superplastificante de pega normal para concreto, líquido e isento de cloretos	kg			
370 (I)	Areia media - posto jazida (retirado na jazida, sem transporte ^{nota 1})	m ³			
4741 (I)	Pó de pedra/brita (retirado na jazida, sem transporte ^{nota 1})	m ³			

Nota 1: O valor do transporte será objeto de estudo mais adiante no Capítulo 5.7.1 desta Dissertação

Fonte: Composições SINAPI/CAIXA cód. 94965, 94966 e 94967 (2023) – Elaborado pelo Autor (2023)

O levantamento de custos, representado na Tabela 22, teve como referência os bancos de dados do SINAPI e do SICRO a qual foi organizado conforme mencionado no Capítulo 4.3 (PARÂMETROS DA ANÁLISE ECONÔMICA) desse trabalho para se obter uma melhor amostragem de valores monetários.

Para todos os insumos tomou-se como referência os valores médios de um período entre jan/19 e mai/23, tendo em vista que segundo Musarat *et al.* (2021) e Windapo e Cattell (2010), os materiais de construção impactam de 35% a 60% do custo total da construção e além de serem os itens da composição de preços que mais sofrem oscilação de preço devido os efeitos da inflação, e variação de preços devido as condições de mercado, oferta e demanda e custos regionais, inclusive transporte e disponibilidade de matéria-prima (MUSARAT *et al.*, 2021 e OGHENEKEVWE *et al.*, 2014). Sendo que para os insumos do tipo mão de obra adotou-se, ainda, a média dos encargos complementares conforme valores dispostos no APÊNDICE H – COMPOSIÇÕES DE CUSTO AUXILIARES deste trabalho.

Tabela 22: Levantamento dos Custos por Estado (2019/2023)

ESTADO	SERVENTE GERAL	OPERADOR DE BETONEIRA	BETONEIRA PRODUTIVA	BETONEIRA IMPRODUTIVA	CIMENTO PORTLAND	BRITA	ADITIVO
MÉDIA GERAL	R\$17,65	R\$20,29	R\$1,63	R\$0,32	R\$0,73	R\$99,50	R\$16,74
Acre	R\$16,96	R\$22,35	R\$1,74	R\$0,38	R\$1,00	R\$245,33	R\$18,64
Alagoas	R\$15,67	R\$15,03	R\$1,70	R\$0,30	R\$0,63	R\$72,70	R\$16,79
Amazonas	R\$18,33	R\$24,85	R\$1,77	R\$0,32	R\$1,99	R\$167,33	R\$17,56
Amapá	R\$14,77	R\$15,15	R\$1,52	R\$0,32	R\$0,80	R\$154,64	R\$24,48
Bahia	R\$18,35	R\$25,42	R\$1,73	R\$0,31	R\$0,70	R\$76,97	R\$14,18
Ceará	R\$17,14	R\$18,67	R\$1,63	R\$0,32	R\$0,59	R\$78,79	R\$17,42
Distrito Federal	R\$18,28	R\$18,45	R\$1,45	R\$0,33	R\$0,54	R\$126,66	R\$16,86
Espírito Santo	R\$17,67	R\$21,95	R\$1,57	R\$0,28	R\$0,55	R\$92,32	R\$14,07
Goiás	R\$16,34	R\$23,21	R\$1,71	R\$0,32	R\$0,56	R\$77,98	R\$16,46
Maranhão	R\$15,09	R\$17,03	R\$1,56	R\$0,31	R\$0,68	R\$68,55	R\$18,43
Mato Grosso	R\$17,01	R\$15,40	R\$1,71	R\$0,34	R\$0,68	R\$86,98	R\$15,47
Mato Grosso do Sul	R\$17,04	R\$19,89	R\$1,62	R\$0,28	R\$0,67	R\$69,98	R\$13,93
Minas Gerais	R\$16,66	R\$19,98	R\$1,69	R\$0,33	R\$0,58	R\$87,12	R\$12,41
Pará	R\$17,79	R\$18,10	R\$1,91	R\$0,34	R\$0,93	R\$109,25	R\$18,48
Paraíba	R\$15,65	R\$15,23	R\$1,50	R\$0,32	R\$0,56	R\$87,15	R\$18,35
Paraná	R\$21,35	R\$21,04	R\$1,47	R\$0,28	R\$0,56	R\$52,48	R\$13,82
Pernambuco	R\$17,76	R\$27,11	R\$1,70	R\$0,32	R\$0,56	R\$70,93	R\$17,70
Piauí	R\$16,24	R\$18,72	R\$1,77	R\$0,36	R\$0,75	R\$126,32	R\$19,41
Rio de Janeiro	R\$23,55	R\$25,98	R\$1,69	R\$0,31	R\$0,52	R\$74,17	R\$14,41
Rio Grande do Norte	R\$16,53	R\$22,53	R\$1,49	R\$0,31	R\$0,56	R\$110,46	R\$16,92
Rio Grande do Sul	R\$18,52	R\$21,92	R\$1,64	R\$0,29	R\$0,68	R\$57,40	R\$14,72
Rondônia	R\$18,98	R\$19,00	R\$1,67	R\$0,32	R\$0,87	R\$110,65	R\$17,79
Roraima	R\$16,67	R\$20,02	R\$1,57	R\$0,33	R\$1,14	R\$163,34	R\$16,39
Santa Catarina	R\$18,97	R\$19,39	R\$1,41	R\$0,29	R\$0,63	R\$78,44	R\$14,00
São Paulo	R\$22,63	R\$24,77	R\$1,40	R\$0,31	R\$0,53	R\$60,79	R\$15,86
Sergipe	R\$16,78	R\$19,67	R\$1,67	R\$0,35	R\$0,65	R\$90,82	R\$16,11
Tocantins	R\$15,72	R\$16,91	R\$1,69	R\$0,30	R\$0,71	R\$89,04	R\$21,21

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Segundo Musarat *et al.* (2021) o aumento dos custos de materiais na indústria da construção afeta tanto países desenvolvidos quanto países em desenvolvimento, sendo um aspecto com grandes influências, segundo Catalão *et al.*, (2019), no desenvolvimento de projetos de construção do setor público, onde a elevação dos preços pode inviabilizar a aprovação do projeto nas Casas Legislativas, prejudicando assim a população com a falta do

imóvel, por exemplo, ou viabilizar a aprovação do projeto com valores subdimensionados, gerando os efeitos de desvios de verbas públicas.

Logo diante da expressiva relevância dos materiais em um orçamento de obras, e ainda tendo em vista que segundo Mundra *et al.* (2016) dentre as matérias-primas constituintes, a areia natural forma cerca de 35% do volume do concreto com papel importante na decisão do custo do concreto e a fim de melhor diluir os impactos (e assim minimizar os *outliers*) das oscilações descritas no Capítulo 4 deste trabalho, se buscou nas bases de dados do SICRO⁴⁶ e do SINAPI⁴⁷ o preço do m³ da areia natural (areia média lavada) e da areia artificial (pó de pedra/brita) entre os anos de 2019 e 2023 e considerando a consulta nos bancos de dados dos 26 estados e do Distrito Federal, além de tratar-se de 02 (dois) materiais com muita volatilidade e grande variação de preços entre os Estados Brasileiros.

Resultando em uma média aritmética de 4.320 consultas, sendo 2.240 valores coletados no SINAPI e 1.080 no SICRO, de janeiro de 2019 a maio de 2023, logo, percebe-se que o valor médio da areia natural gira em torno de R\$ 96,95/m³ e do pó de pedra/brita a areia artificial em torno de R\$ 81,45/m³, resultando na média da Tabela 23, e respondendo a quarta pergunta, a qual tem-se que, sim, a substituição da areia natural por pó de pedra/brita pode gerar concretos com custo-benefício mais atrativo para o mercado da construção civil.

Diante disto apresenta-se no APÊNDICE I – LEVANTAMENTO DE CUSTO DA AREIA MÉDIA LAVADA E PÓ DE PEDRA/BRITA (SINAPI E SICRO) desta Dissertação todas as planilhas utilizadas como parâmetro de levantamento a qual resultou no Tabela 23.

Tabela 23: Preços médios da areia natural e pó de pedra/brita

ANO	SISTEMA	Areia Natural	Pó de Pedra/brita
MÉDIA DO ANO 2019	SICRO	90,50	69,07
	SINAPI	69,31	63,02
	MÉDIA	R\$79,90	R\$66,04
MÉDIA DO ANO 2020	SICRO	90,16	60,07
	SINAPI	64,90	64,72
	MÉDIA	R\$77,53	R\$62,39
MÉDIA DO ANO 2021	SICRO	94,56	66,60
	SINAPI	74,68	69,90
	MÉDIA	R\$84,62	R\$68,25
MÉDIA DO ANO 2022	SICRO	137,93	111,21
	SINAPI	97,40	89,06
	MÉDIA	R\$117,67	R\$100,13
MÉDIA DO ANO 2023	SICRO	144,30	120,28
	SINAPI	105,81	100,53
	MÉDIA	R\$125,06	R\$110,40
MÉDIA GERAL		R\$96,95	R\$81,45

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

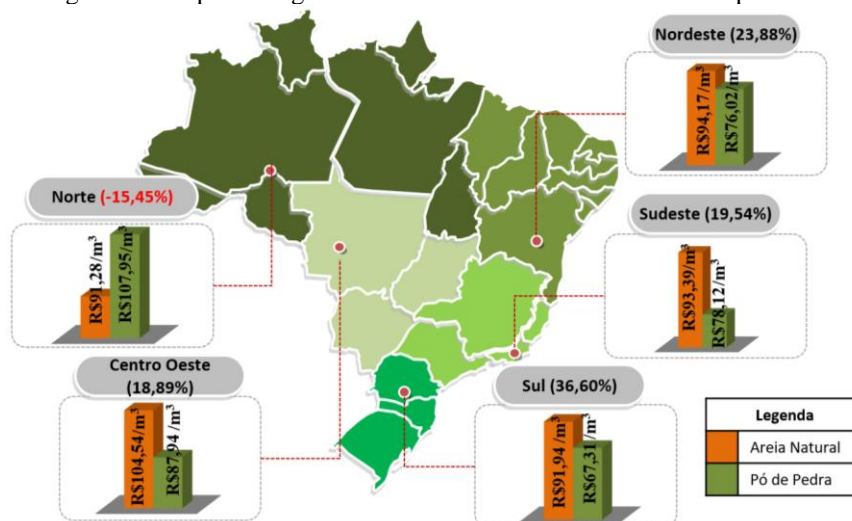
⁴⁶ Base de dados com valores Trimestrais e por Estado.

⁴⁷ Base de dados com valores Mensais e por Estado.

Diante do exposto, pode-se realizar um levantamento por regiões brasileiras referente aos preços praticados do metro cúbico dos respectivos agregados miúdos, como pode ser observado na Figura 28.

Em uma análise, conforme Figura 28, percebe-se que as regiões com melhor custo-benefício no uso do pó de pedra/brita são, em 01° (primeiro) lugar a Região Sul, em 02° (segundo) lugar a Região Nordeste, em 03° (terceiro) lugar a Região Sudeste, em 04° (quarto) lugar a Região Centro Oeste, sendo a Região Norte a única com custo não acessível, com aproximadamente 15,45% maior o preço do m³ do pó de pedra/brita se em comparação com o m³ da areia natural.

Figura 28: Mapa das regiões brasileiras com valores médios comparativos



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023) com dados do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da construção civil (SINAPI) e do Sistema de Custos Referencias de Obras (SICRO) do mês de janeiro/2019 a maio/2023 sem considerar no preço o valor do frete.

Da Figura 29, tem-se que o concreto sustentável com pó de pedra/brita torna-se inviável somente nos estados da região Norte, tendo em vista que o valor é mais elevado. E pelo fato de haver uma maior concentração das usinas de britagem nas regiões Sul e Sudeste e, também, acompanhando os centros urbanos e vias de escoamento, sendo que 76,52% da produção de brita estão concentradas em apenas seis Unidades da Federação, quais sejam, São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná (BRASIL, 2018) e com isso havendo maior geração de resíduo de pó de pedra/brita nessas regiões surgindo então uma maior oferta desse tipo de produto.

Figura 29: Mapa Representativo por Estado (R\$/m³ areia natural e artificial)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Percebe-se que em todas as regiões brasileiras há mineração de areias, cascalhos e rochas para brita. Entretanto, em vastas áreas da Região Norte as rochas próprias para britagem são escassas, devido principalmente ao extenso manto sedimentar que encobre as reservas possíveis de serem aproveitadas economicamente, com isso a produção de agregados graúdos, e consequente geração de pó de pedra/brita, na região Norte são explorados os raros maciços cristalinos no Amapá, Roraima e Amazonas, lateritos e cascalhos no Maranhão; nas localidades assentadas sobre a Bacia do Paraná as rochas basálticas são as mais utilizadas e em áreas litorâneas e principalmente do interior de Goiás, São Paulo, e Estados do Nordeste utilizam-se com maior predominância as de origem de granitos, gnaisses e calcários são usados para brita principalmente nas regiões litorâneas (LA SERNA e REZENDE, 2009).

5.7.1 Transporte de agregados da construção

Ainda em consonância com os custos envolvidos, é importante consignar que umas das principais características do mercado de agregados é o alto custo relativo de transporte, podendo até mesmo ser superior ao custo de produção e ao baixo valor unitário do produto (REZENDE e SERNA, 2017; ADÃO e SALVADOR, 2012). A mineração de agregados possui características típicas como grande volume de produção, simples beneficiamento, baixo preço unitário e alto custo relativo de transporte. Logo, a localização geográfica da mina e do consumidor é de grande importância (ANEPAC, 2022).

Segundo a ANEPAC (2012) ocorrem em média 24,1 milhões de viagens/ano de agregados para construção no território brasileiro, representando, em média, 2,4 bilhões de quilômetros percorridos e um consumo total de óleo diesel da ordem de 1,2 bilhão de litros e sendo um transporte diário de agregados em torno de 2,5 milhões de toneladas em nível nacional e envolve a utilização de uma frota de cerca de 26 mil veículos. Só na região metropolitana de

São Paulo, que abrange 39 municípios, foram feitas 4.300 viagens diárias para o transporte de brita com DMT (Distância Média Transportada) de cerca de 30 km (SINDIPEDRAS, 2019).

Nos coeficientes das composições estão considerados os esforços dos ciclos de transporte para distâncias de até 15 metros, com isso não sendo necessário considerar nas composições do SINAPI valores de transporte até essa distância, porém para distâncias maiores devem-se utilizar do DMT médio e quando necessário do DMT adicional (SINAPI, 2021).

Em termos gerais, o momento de transporte pode ser definido como sendo a multiplicação do peso, em tonelada, do insumo a ser transportado pela sua distância média de transporte (DMT), em quilômetro, e é dividido em duas parcelas: (1) transporte interno, e (2) transporte externo sendo que o primeiro compreende o deslocamento entre o depósito da obra e a frente de serviço, enquanto o segundo refere-se ao trajeto do fornecedor do insumo até o depósito da obra (DNIT, 2019).

Tendo em vista que as distâncias médias de transporte relativas a ambas as parcelas variam de acordo com peculiaridades do modal de transporte e/ou da natureza dos serviços, deve-se, portanto, ser estimadas caso a caso adotando quando necessário as médias de transportes comerciais (DNIT, 2019; SINAPI, 2021). Segundo a ANEPAC (2012), apesar das peculiaridades de cada obra e localização das minas de extração, em média as DMTs entre a jazida e a frente de obra giram em torno de 60 km para a areia e 40 km para material britado. Sendo que distâncias entre os raios de 100 km a 150 km entre a usina e a frente de obra inviabiliza o uso do insumo se tornando uma barreira (REZENDE e SERNA, 2017; DNIT, 2019)

A diferença entre as distâncias de areia e o material brita, aqui inclusivo o pó de pedra/brita, justifica-se pelo fato da grande dificuldade de se encontrar depósitos de areais próximos aos centros urbanos e com isso possibilitou o desenvolvimento do mercado e comércio da areia de brita, produzido devido ao pó de pedra/brita nas instalações de britagem de rocha (REZENDE e SERNA, 2017; ANEPAC, 2016), sendo que os resíduos possuem menores custos de energia e de transporte proporcionados pela possibilidade de serem produzidos nos locais de consumo (REZENDE e SERNA, 2017; ADÃO e SALVADOR, 2012).

Diante de todo o exposto, e com base nas composições SINAPI cód. 95875 (Transporte com caminhão basculante de 10 m³, em via urbana pavimentada, DMT até 30 km) e 93590 (Transporte com caminhão basculante de 10 m³, em via urbana pavimentada, adicional para DMT excedente a 30 km) e adotando-se como valor médio da competência Maio/2023, tendo como unidade de medida m³ x km, elaborou-se a Tabela 24.

Tabela 24: Memória de Cálculo do DMT da areia natural e do pó de pedra/brita

Insumo	Distância Média de Transporte				
	DMT médio (km)	Valor unitário (m ³ x km) até 30km	Valor unitário (m ³ x km) excedente 30km	Total (R\$/m ³ x km) c = a + b	Valor do m ³ + frete
		(a)	(b)		
areia natural	60	R\$ 69,17	R\$ 27,24	R\$ 96,41	R\$ 193,36
pó de pedra/brita	40	R\$ 69,17	R\$ 9,08	R\$ 78,25	R\$ 159,70

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Com base na Tabela 24, tem-se que o transporte da areia natural é superior a 23,21% do valor de transporte do pó de pedra/brita, representando um acréscimo de R\$ 18,16/m³ x km transportado, evidenciando o melhor custo-benefício no transporte do pó de pedra/brita em detrimento ao da areia natural, ou seja, ao usar pó de pedra/brita a redução da taxa de transporte pode diminuir ainda mais o custo total do produto (concreto), estando inclusive em acordo com (YANG *et al.*, 2020).

5.7.2 Simulação econômica das misturas de concreto pesquisadas

Na Tabela 25, e considerando o valor do transporte incluso no custo do insumo de areia natural e pó de pedra/brita, é demonstrada toda a memória de cálculo das composições de custo unitário, considerando as misturas da revisão bibliográfica (GEHLOT *et al.*, 2021; GUPTA *et al.*, 2019; JHA *et al.*, 2020) valores em reais por m³ de concreto nas resistências de 25MPa, 30MPa e 40MPa.

Ressalta-se que houve a necessidade de ajustes quanto aos coeficientes das misturas de concreto, tendo em vista que as unidades adotadas pelas composições de preços do SINAPI são diferentes das unidades adotadas pelos autores na composição do traço, ou seja, houve a conversão de quilograma para metros cúbicos e para isso adotou-se a massa específica de 2,60 g/cm³, 2,66 g/cm³ para o pó de pedra/brita e para a areia natural, respectivamente e conforme o presente estudo e a média de 2,75 g/cm³ para a brita considerando as misturas da revisão bibliográfica (GEHLOT *et al.*, 2021; GUPTA *et al.*, 2019; JHA *et al.*, 2020).

Tabela 25: Comparativo entre composições de custo unitário por classe de resistência

Classe: 25MPa		Percentual de Substituição do Pó de Pedra						Valor Unitário
Descrição	Unid.	0%	20%	30%	40%	50%	100%	
Servente	h	2,312	2,312	2,312	2,312	2,312	2,312	R\$18,25
Op. de betoneira	h	1,464	1,464	1,464	1,464	1,464	1,464	R\$20,69
Betoneira 400 L	CHP	0,753	0,753	0,753	0,753	0,753	0,753	R\$1,62
Betoneira 400 L	CHI	0,710	0,710	0,710	0,710	0,710	0,710	R\$0,32
Cimento Portland	kg	326,000	326,000	326,000	326,000	326,000	326,000	R\$0,68
Pedra britada	m ³	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457	R\$245,33
Aditivo	kg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	R\$18,64
Areia média	m ³	0,262	0,210	0,184	0,157	0,131	0,000	R\$193,36
Pó de pedra	m ³	0,000	0,054	0,081	0,107	0,134	0,268	R\$159,70
		R\$459,28	R\$457,71	R\$456,92	R\$456,14	R\$455,35	R\$451,42	

Continua

Classe: 30MPa		Percentual de Substituição do Pó de Pedra						Valor Unitário
Descrição	Unid.	0%	20%	30%	40%	50%	100%	
		Quant./ Coef.	Quant./ Coef.	Quant./ Coef.	Quant./ Coef.	Quant./ Coef.	Quant./ Coef.	
Servente	h	2,2958	2,2958	2,2958	2,2958	2,2958	2,2958	R\$18,25
Op. de betoneira	h	1,449	1,449	1,449	1,449	1,449	1,449	R\$20,69
Betoneira 400 L	CHP	0,7458	0,7458	0,7458	0,7458	0,7458	0,7458	R\$1,62
Betoneira 400 L	CHI	0,7032	0,7032	0,7032	0,7032	0,7032	0,7032	R\$0,32
Cimento Portland	kg	339	339	339	339	339	339	R\$0,68
Pedra britada	m ³	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454	R\$245,33
Aditivo	kg	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21	R\$18,64
Areia média	m ³	0,280	0,224	0,196	0,168	0,140	0	R\$193,36
Pó de pedra	m ³	0	0,057	0,086	0,115	0,143	0,287	R\$159,70
		R\$511,45	R\$509,78	R\$508,94	R\$508,10	R\$507,26	R\$503,06	

Classe: 40MPa		Percentual de Substituição do Pó de Pedra						Valor Unitário
Descrição	Unid.	0%	20%	30%	40%	50%	100%	
		Quant./ Coef.	Quant./ Coef.	Quant./ Coef.	Quant./ Coef.	Quant./ Coef.	Quant./ Coef.	
Servente	h	2,4383	2,4383	2,4383	2,4383	2,4383	2,4383	R\$18,25
Op. de betoneira	h	1,5418	1,5418	1,5418	1,5418	1,5418	1,5418	R\$20,69
Betoneira 400 L	CHP	0,7936	0,7936	0,7936	0,7936	0,7936	0,7936	R\$1,62
Betoneira 400 L	CHI	0,7483	0,7483	0,7483	0,7483	0,7483	0,7483	R\$0,32
Cimento Portland	kg	440,52	440,52	440,52	440,52	440,52	440,52	R\$0,68
Pedra britada	m ³	0,413	0,413	0,413	0,413	0,413	0,413	R\$245,33
Aditivo	kg	0	0	0	0	0	0	R\$18,64
Areia média	m ³	0,212	0,169	0,148	0,127	0,106	0	R\$193,36
Pó de pedra	m ³	0	0,043	0,065	0,087	0,108	0,217	R\$159,70
		R\$520,92	R\$519,65	R\$519,02	R\$518,38	R\$517,75	R\$514,57	

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

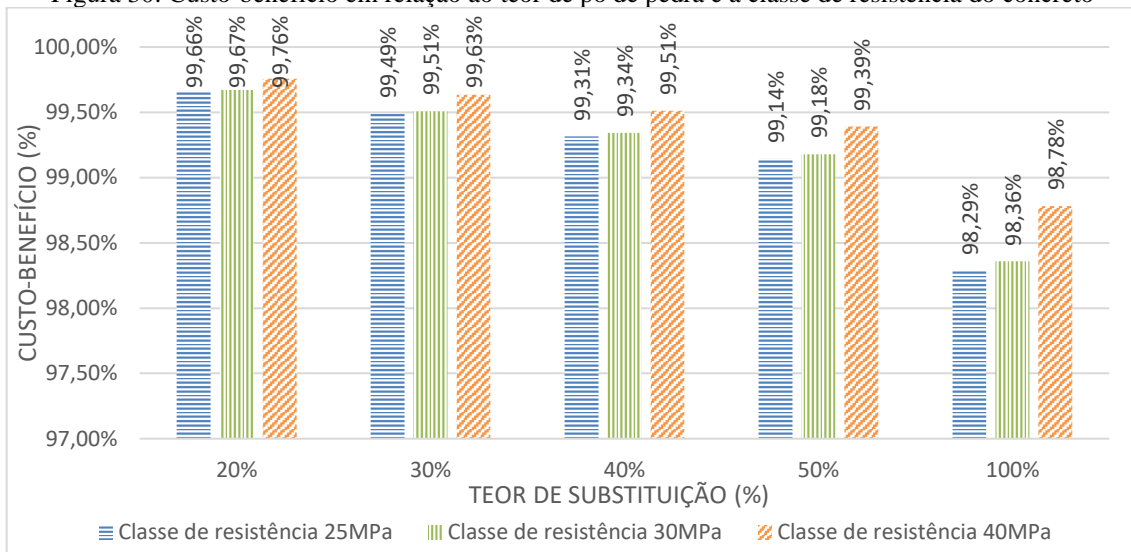
Tabela 26: Redução comparativa em R\$/m³ por classe de resistência

% de PP	Classe de resistência do concreto x Valor R\$/m ³					
	25MPa (R\$/m ³)		30MPa (R\$/m ³)		40MPa (R\$/m ³)	
	Custo/m ³	Redução/m ³	Custo/m ³	Redução/m ³	Custo/m ³	Redução/m ³
0%	R\$459,28	-	R\$511,45	-	R\$520,92	-
20%	R\$457,71	R\$1,57	R\$509,78	R\$1,68	R\$519,65	R\$1,27
30%	R\$456,92	R\$2,36	R\$508,94	R\$2,52	R\$519,02	R\$1,90
40%	R\$456,14	R\$3,15	R\$508,10	R\$3,36	R\$518,38	R\$2,54
50%	R\$455,35	R\$3,93	R\$507,26	R\$4,20	R\$517,75	R\$3,17
100%	R\$451,42	R\$7,87	R\$503,06	R\$8,40	R\$514,57	R\$6,35

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

A Tabela 26 mostra que, para o valor do m³ de concreto, há uma redução média de quase R\$ 3,78/m³, R\$ 4,03/m³ e R\$ 3,05/m³ para as classes de resistência à compressão de 25 MPa, 30 MPa e 40 MPa, respectivamente, resultando em uma média geral para as três classes de resistência, de R\$ 3,62/m³. E diante da Figura 30 tem-se que quanto maior o teor de substituição de areia natural por pó de pedra/brita e a classe de resistência do concreto, maior a economia proporcionada.

Figura 30: Custo-benefício em relação ao teor de pó de pedra e a classe de resistência do concreto



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Capítulo 6

6 CONCLUSÕES

De uma maneira geral, todas as etapas propostas nesse trabalho foram alcançadas com sucesso, provando e demonstrando que a substituição parcial da areia natural por pó de pedra/brita é bastante viável para a confecção de concretos estruturais, isto é, desde que o processo, de britagem e de dosagem do concreto sejam bem gerenciados e planejados, passando por um controle tecnológico eficaz, uma vez que, nem sempre há, nos processos de britagem, uma uniformidade nos grãos do pó. Em muitos países desenvolvidos já se utiliza os agregados miúdos originários da britagem, já que em muitos desses países já há o problema da escassez da areia natural. No Brasil, o uso da areia de britagem vem crescendo a cada dia, pois o país também já passa a vivenciar o mesmo problema da escassez em determinadas regiões.

Quanto à caracterização do agregado, o pó de pedra/brita demonstrou possuir as características físicas necessárias a utilização como agregado na fabricação de concreto estrutural. O pó de pedra/brita apresentou maior quantidade de água para se obter uma boa trabalhabilidade, isso se deve pelo fato que o pó de pedra/brita possui uma proporção mais elevada de partículas menores que 0,075mm se comparado com a areia natural, ou seja, possui um módulo de finura de 2,90mm contra 2,96mm da areia natural. Então, para não se empregar uma quantidade de água excessiva, surge a utilização de aditivos plastificantes como alternativa para se obter uma boa trabalhabilidade sem perda de resistência.

Quanto à resistência à compressão, os traços confeccionados com pó de pedra/brita apresentaram valores satisfatórios em relação aos de referência, com uma superação média de 24,97% do traço referência, sendo que para as resistências de 25 MPa, 30MPa e 40MPa, girou em torno de 22,64%, 16,92% e 11,17%, superior aos traços de controle, respectivamente. Conclui-se que os concretos fabricados com pó de pedra/brita podem ser empregados no dia a dia, levando em consideração apenas as propriedades estudadas nesse trabalho.

Já quanto aos aspectos ambientais, houve uma redução na ECO_2 de quase $1\%/m^3$ para as classes de resistência à compressão de 25 MPa e 30 MPa e de 0,5% para 40 MPa, e uma redução na EI de mais de $2\%/m^3$ para as classes de resistência à compressão de 25 MPa e 30 MPa. Para a resistência mais alta, 40 MPa, essa redução foi um pouco menor, $1,3\%/m^3$. O fato de concretos com maior resistência resultarem em maiores valores de EI e ECO_2 pode ser justificado pelo maior teor de cimento nas misturas, e a substituição de areia natural por pó de pedra/brita nesses concretos mitiga os impactos ambientais. Talvez, com um estudo mais

aprofundado sobre o empacotamento ideal dos grãos, seja possível produzir concretos com maior resistência, reduzindo os teores de cimento e aumentando os teores de pó de pedra/brita, reduzindo, conseqüentemente, os impactos ambientais. Além dos termos e emissão de CO₂ e consumo de energia, restou comprovado, por meio da ACV, que o concreto com pó de pedra/brita contribui para a diminuição dos impactos ambientais em torno de 25,50% e por meio da análise de AIA houve a diminuição dos impactos negativos, em média de 68,96%, e aumento dos impactos positivos, em média de 28,02%, beneficiando todos os fatores ambientais levantados (características físicas e químicas; fator de condições biológicas e fatores antropológicos), sendo o fator mais beneficiado o antropológico e sendo a média total, considerando o ACV e o AIA, de redução dos impactos ambientais de aproximadamente 34,52%.

O pó de pedra/brita que é usado na confecção de concreto possui a vantagem, além de ser econômico, se comparado a areia natural, de servir de destinação a um rejeito do processo de britagem provendo de um descarte adequado, de reduzir os danos causados pela exploração, muita das vezes, indiscriminada da areia natural oferecendo ao construtor uma alternativa diferente do emprego apenas da areia natural na confecção de concreto simples. A vantagem econômica está no valor unitário do metro cúbico que por ser menor garantiu a elaboração de uma composição de preço unitária com custos mais baixos se comparado a uma composição de preço de concreto confeccionado apenas com areia natural. Em expressões monetárias tem-se que o custo do m³ do pó de pedra/brita é de R\$ 193,36/m³ contra R\$ 159,70/m³ da areia, já considerando o valor do frete, conclui-se que o pó de pedra/brita é, em média, 17,41% mais vantajoso que a areia natural. E aplicado a composição de custo unitário, considerando custos de maquinário e mão de obra, a redução média gira em torno de R\$ 3,62/m³.

Logo, o que pode ser concluído com base nos estudos realizados é que o índice econômico e de sustentabilidade do concreto pode ser potencializado com a utilização do pó de pedra/brita como agregado miúdo. E, como o teor influencia diretamente as propriedades, de acordo com as referências consultadas, verificou-se que o teor médio de substituição admissível indicado para a substituição de areia natural por pó de pedra/brita é cerca de 50%.

No entanto, é sugerido que o estudo desse tema seja um pouco mais analisado, avaliando-se outras propriedades que não foram contempladas nesse trabalho, como por exemplo: a retração por secagem, avaliação do comportamento do concreto por um período mais longo (superior a 28 dias) e analisar a durabilidade e resistência do material concreto com o uso de outros diferentes teores de substituições de pó de pedra/brita além dos desse trabalho.

Além disso, trabalhos futuros de investigação foram propostos com base nas lacunas da pesquisa:

- Produzir concreto com teores identificados como ideais por meio dessa revisão sistemática, usando pó de pedra/brita de diferentes composições químicas e físicas, com o objetivo de validar esses teores em termos de trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade;
- Realizar um estudo do empacotamento ideal para o pó de pedra/brita por meio da composição granulométrica dos agregados, para reduzir a influência dos vazios no concreto com essa produção de resíduos;
- Investigar a influência do pré-umedecimento do pó de pedra/brita na trabalhabilidade e na resistência mecânica ao longo do tempo para identificar evidências do fenômeno de cura interna;
- Investigar o impacto ambiental do pó de pedra/brita gerado por meio da quantificação da energia incorporada (EI), da emissão de dióxido de carbono (ECO_2) e da Análise de Ciclo de Vida (ACV) por meio de dados essencialmente primários das indústrias brasileiras quando da implantação consolidada do banco de dados do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) e da Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV).

REFERÊNCIAS

ABD ELMOATY, A. E. M. Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 743–752, 1 out. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.054>>. Acesso em: 20 dez. 2022.

ACI 211.1. **Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete**. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 1991.

ACI 318-14. **Building Code Requirements for Structural Concrete**. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2014.

ADÃO, B.D.L.; SALVADOR, L.M.D.A. **Manual de Agregados para Construção Civil**. 2ed. Rio de Janeiro 2012. 432p.

AHMAD, J. *et al.* Effects of waste glass and waste marble on mechanical and durability performance of concrete. **Scientific Reports**, 2021. 11(1): p. 17. Disponível em:<<https://doi.org/10.1038/s41598-021-00994-0>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

AHMED, M. *et al.* A Comparative Study of Popular Concrete Mix Design Methods from Qualitative and Cost-Effective Point of View for Extreme Environment. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 41(4), 1403–1412. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13369-015-1946-9>>. Acesso em 29 out. 2022.

AHN, J. *et al.* Microplastics as lightweight aggregates for ultra-high-performance concrete: Mechanical properties and autoignition at elevated temperatures. **Compos. Structure**. 2023, 321, 117333. Disponível em: <doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2023.117333>. Acesso em: 25 jul. 2023.

AKHTAR, M.N. *et al.* Performance of sustainable sand concrete at ambient and elevated temperature. **Construction and Building Materials**, v. 280, p. 122404, 19 abr. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122404>>. Acesso em: 05 dez. 2022.

ALEGRE, Luis Fernando Freire Ramadon Porto. **Recursos hídricos e mineração: um estudo sobre a extração de areia na bacia hidrográfica do Rio Guandu/RJ**. 2020. 149f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Universidade Estadual do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, 2020.

ALI, M. *et al.* An Environmentally Friendly Solution for Waste Facial Masks Recycled in Construction Materials. **Sustainability** 2022, 14, 8739. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su14148739>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

ALIYU, I. *et al.* Effect of Sulphuric Acid on the Compressive Strength of Concrete with Quarry Dust as Partial Replacement of Fine Aggregate. **FUDMA Journal of Sciences**, v. 4, n. 1, p. 553–559, 14 abr. 2020.

ALMEIDA, S. L. M. *et al.* **Produção de areia manufaturada em usina piloto**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral – Ministério da Ciência e Tecnologia, 2005.

ALMEIDA, Salvador Luiz Matos; LUZ, Adão Benvindo. **Manual de Agregados para Construção Civil**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral – Ministério da Ciência e Tecnologia, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C494-19: **Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete**, Pennsylvania: 2019.

ARAÚJO, R.C.L.; RODRIGUES, E.H.V; FREITAS, E.G.A. **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro: Editora Universidade Rural do Rio de Janeiro, 2000. 203p.

ASABONGA, M. *et al.* The physical and environmental impacts of sand mining., v. 72, n. 1, p. 1–5, 2 jan. 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1080/0035919X.2016.1209701>>. Acesso em: 09 nov. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO NBR 14044**: Gestão ambiental—avaliação do ciclo de vida—requisitos e orientações. Rio de Janeiro: 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: Informação e documentação - Citações em documentos - Apresentação. Rio de Janeiro: 2002.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: 2022.

_____. **NBR 12721**: Avaliação de custos de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios. Rio de Janeiro: 2005.

_____. **NBR 14724**: Informação e documentação - Trabalhos acadêmicos - Apresentação. Rio de Janeiro: 2011.

_____. **NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: 2021.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: 2018.

_____. **NBR 16889**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: 2020.

_____. **NBR 6023:** Informações e documentação – Referências - Elaboração. Rio de Janeiro: 2003.

_____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: 2014.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: 2022.

_____. **NBR 8522:** Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro: 2021.

_____. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: 2015.

_____. **NBR 9935:** Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro: 2011.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL - ANEPAC: Agregados. São Paulo, 2020. Disponível em: <<http://www.anepac.org.br/wp/agregados.html>>. Acesso em: 17 dez. 2022.

_____. **ANEPAC.** Disponível em: <<http://www.anepac.org.br>>. Acesso em: 20 de março de 2022.

_____. **Revista Areia & Brita.** Edição 57, Abril/Maio/Junho 2012, página 16. Disponível em: <http://anepac.org.br/wp/wp-content/uploads/2011/05/Revista57.pdf>. Acesso em 02 mai. 2023.

_____. **Revista Areia & Brita.** Edição 68, Julho/Agosto/Setembro 2016. Disponível em: <https://www.anepac.org.br/publicacoes/revista-areia-e-brita/item/291-edicao-68-2016-jul-ago-set>. Acesso em: 12 jul. 2023.

ASTM C1202. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Disponível em: <<https://www.astm.org/standards/c1202>>. Acesso em: 29 mar. 2023.

ASTM C33. Standard specification for concrete aggregates. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 2003.

ASTM C618. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Disponível em: <<https://www.astm.org/c0618-22.html>>. Acesso em: 18 mar. 2023.

BACARJI, E. *et al.* Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 1–10, 1 ago. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.032>>. Acesso em: 20 dez. 2022.

BACHINILLA, B. *et al.* High-Speed Railway Bridge and Pile Foundation: A Review. **Infrastructures** 2022, Vol. 7, Page 154, v. 7, n. 11, p. 154, 11 nov. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/infrastructures7110154>>. Acesso em: 26 dez. 2022.

BAI, S. W. *et al.* A methodology for evaluating cleaner production in the stone processing industry: case study of a Shandong stone processing firm. **Journal of Cleaner Production**, v. 102, p. 461–476, 1 set. 2015.

BALAMURUGAN, G.; PERUMAL, P. Behaviour of Concrete on the Use of Quarry Dust to Replace Sand-an Experimental Study. **Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ)**, ISSN: 2250-3498, v. 3, n. 6, p. 2250–3498, 2013.

BAMIGBOYE, G. *et al.* An appraisal of the mechanical, microstructural, and thermal characteristics of concrete containing waste PET as coarse aggregate. **Cleaner Waste Systems**, vol. 1, p. 100001, Mar. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.CLWAS.2022.100001>>. Acesso em: 26 dez. 2022.

BASCOMPTA, M. *et al.* LCA analysis and comparison in quarrying: Drill and blast vs mechanical extraction. **Journal of Cleaner Production**, v. 369, p. 133042, 1 out. 2022.

BASE DE DADOS SINAPI - **Índices da Construção Civil**. Disponível em: http://www1.caixa.gov.br/gov/gov_social/municipal/programa_des_urbano/SINAPI/Relatorios-Insumo-e-Composicao-a-partir-de-Jan-2019.asp. Acesso em: 14 jan. 2019 a 30 mai. 2023.

BAUER, Falcão L.A. **Materiais de Construção**: atualizado pelas normas brasileiras de janeiro de 2018. 6 ed. Vol 1. Rio de Janeiro: LTC, 2019. 568p.

BEHERA, M. *et al.* Recycled aggregate from C&D waste and its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and Building Materials**, 2014. 68: p. 501-516. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>>. Acesso em: 20 dez. 2022.

BENDIXEN, M. *et al.* Time is running out for sand. **Nature**, 571, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/d41586-019-02042-4>>. Acesso em: 04 dez. 2022.

BERTOLINO, Luiz Carlos *et al.* Manual de Agregados para Construção Civil. In: **Geologia**. Rio de Janeiro: CETEM / MCTI, 2012, p.87-100.

BINICI, H.; AKSOGAN, O. Durability of concrete made with natural granular granite, silica sand and powders of waste marble and basalt as fine aggregate. **Journal of Building**

Engineering, v. 19, p. 109–121, 1 set. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.04.022>>. Acesso em: 02 dez. 2022.

BIZAGI MODELER. Software de mapeamento e modelagem de processos de negócio – Bizagi Modeler. v. 4.0.0.065, 2023. Disponível em: <<https://www.bizagi.com/pt/plataforma/modeler>>. Acesso em: 5 jul. 2023.

BORIGARLA, B. *et al.* Experimental study on replacing sand by M–Sand and quarry dust in rigid pavements. **Materials Today: Proceedings**, v. 60, p. 658–667, 1 jan. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.265>>. Acesso em: 06 dez. 2022.

BRAGA, Benedito, *et al.* **Introdução à engenharia ambiental**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRAILE, Victória. **Poluição do ar causado pela operação de pedreiras no Município do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1988.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Mineração 2030** (PNM – 2030). 178f. v 1. Brasília: MME, 2011.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**: promulgada em 5 de outubro de 1988: atualizada até a Emenda Constitucional nº 116, de 17 de fevereiro de 2022. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/ConstituicaoCompilado.htm>. Acesso em 22 mar. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 7.983**: promulgada em 8 de abril de 2013. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/decreto/d7983.htm>. Acesso em 13 nov. 2022.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Cadastro Nacional de Produtores de Brita ano Base 2015**. 82f. Brasília: DNPM, 2018.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 307** de 05 de julho de 2002. Lex: LegisWeb. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=98303>>. Acesso em 14 fev. 2022.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 499** de 06 de outubro de 2020. Lex: LegisWeb. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=403295>>. Acesso em 7 ago. 2023.

BS 8110: Part II. **Structural use of concrete**. British Standards Institution, 1985.

BU, C. *et al.* The Durability of Recycled Fine Aggregate Concrete: A Review. **Materials 2022, Vol. 15, Page 1110**, v. 15, n. 3, p. 1110, 31 jan. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma15031110>>. Acesso em: 04 dez. 2022.

BUTLER, W. B. *et al.* Guide to Durable Concrete. **ACI: Montreal, QC, Canada**, 2001.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – **SINAPI**. Disponível em: http://www1.caixa.gov.br/gov/gov_social/municipal/programades_urbano/SINAPI/index.asp. Acesso em 02 mai. 2023.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – **SINAPI**. **Cadernos Técnicos de Composições para Transportes de Materiais dentro do Canteiro**, 03/2021. Disponível em: https://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-composicoes-aferidas-lote3-saneamento-infraestrutura-urbana/SINAPI_CT_MT3_TRANPORTE_DE_MATERIAIS_CANTEIRO_v002.pdf. Acesso em 12 jul. 2023.

CALDEIRA PIRES, Armando *et al.* **Relatório Oficina 2: GT da construção do PBACV – Avaliação do Ciclo de Vida**. Brasília, julho 2013.

CALKINS, M. **Materials for Sustainable Sites: A Complete Guide to the Evaluation, Selection, and Use of Sustainable Construction Materials**. New Jersey: John Wiley, Hoboken, 2009.

Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC). **Boletim Informativo 2022**. Disponível em < <https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2022/02/informativo-economico-emprego-fevereiro-2022.pdf> >. Acesso em 14 de out. 2022.

Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC). **Comportamento atual e futuro dos preços de materiais é tema de painel no 94º Enic**. 2022b. Disponível em < <https://cbic.org.br/comportamento-atual-e-futuro-dos-precos-de-materiais-e-tema-de-painel-no-94o-enic/> >. Acesso em 13 nov. 2022.

Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC). **Custo com materiais de construção aumentou 50% em dois anos**. 2022a. Disponível em < <https://cbic.org.br/custo-com-materiais-de-construcao-aumentou-50-em-dois-anos/> >. Acesso em 13 nov. 2022.

CAMBUNDO, Osvaldo Kidi. **Os Contratos de Concessão de obras públicas e serviços públicos em Angola: um olhar sobre a nova lei nº 9/19 de 16 de junho**. 2018. Dissertação (Mestrado em Direito em Ciências Jurídico-Forenses) - Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra, UC, Coimbra, 2018.

CAMPOS, Heloisa Fuganti. **Concreto de Alta Resistência utilizando pó de pedra/brita como Substituição Parcial do Cimento Portland: estudo experimental**. 2015. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, 2015.

CARNEIRO, A. F. B. *et al.* Effectiveness of surface coatings in concrete: chloride penetration and carbonation. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 6, n. 1, p. 1–8, 1 dez. 2021.

CARONGE, M.A. *et al.* Feasibility study on the use of processed waste tea ash as cement replacement for sustainable concrete production. **Journal of Building Engineering**, v. 52, p. 104458, 15 jul. 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104458>>. Acesso em: 29 set. 2022.

CARTUXO, F. *et al.* Increased Durability of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates Using Superplasticizers. **Materials** 2016, Vol. 9, Page 98, v. 9, n. 2, p. 98, 8 fev. 2016. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/ma9020098>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

CARVALHO, J. O. **A Indústria do cimento e a Infraestrutura no Brasil**. Comissão de serviços de infraestrutura. Senado Federal. Sindicato Nacional da Industria do Cimento. 2009.

CARVALHO, João Dirceu N. **Estruturas em Concreto I**: notas de aula. Maringá: Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, 2008. 23p.

CARVALHO, Roberto Chust; FILHO, Jasson Rodrigues de Figueiredo. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 3ed. São Paulo: EdUFSCar, 2013. 368p.

CASTRO, A. L. *et al.* Análise da viabilidade técnica da adaptação de dados internacionais de inventário de ciclo de vida para o contexto brasileiro: um estudo de caso do concreto para paredes moldadas no local. In **Anais do 578 Congresso Brasileiro do Concreto**. 2015. Bonito, MS.

CATALÃO *et al.* The determinants of cost deviations and overruns in transport projects, an endogenous models approach. **Transport Policy**, v. 74, p. 224–238, 1 fev. 2019.

CAVALETT, O. *et al.* Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 3, p. 647–658, 1 mar. 2013.

CELIK, T.; MARAR, K. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 7, p. 1121–1130, 1 jul. 1996.

CHAVES, A. P. Estado da arte da produção de areia de britagem. In: **Anais do II SUFFIB – SEMINÁRIO: O uso da fração fina da britagem**. São Paulo, 2005.

CHEN, L. *et al.* Recent developments on natural fiber concrete: A review of properties, sustainability, applications, barriers, and opportunities. **Developments in the Built Environment**, v. 16, p. 100255, 1 dez. 2023.

CHERUBINI, E.; RIBEIRO, P. T. **Diálogos Setoriais Brasil e União Europeia: desafios e soluções para o fortalecimento da ACV no Brasil**. Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia-Ibict, Brasília, 2015.

CHOI, W.-C. *et al.* Development of recycled strain-hardening cement-based composite (SHCC) for sustainable infrastructures. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 2, p. 627–635, mar. 2012. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.11.060>>. Acesso em: 23 out. 2022.

COÊLHO, Ronaldo Sérgio de Araújo. **Orçamento de obras na construção civil**. São Luís: Editora UEMA, 2016. 354p.

Comissão Europeia, **Plano de Ação para a Economia Circular da CE**. 2020. Disponível em: < <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/> >. Acesso em: 10 de novembro de 2022.

COURI, Gilberto Adib. **Perícias de engenharia: patologias em estruturas de concreto**. 1 ed. 280p. São Paulo: Leud, 2021.

CRAUSS, Camila. **Penetração de Cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial**. 2010. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, 2010.

CRAWFOR *et al.* **Environmental Performance in Construction (EPiC) Database**. The University of Melbourne: Melbourne, Australia, 2019.

DA, S.; LE BILLON, P. Sand mining: Stopping the grind of unregulated supply chains. **The Extractive Industries and Society**, v. 10, p. 101070, 1 jun. 2022.

DANISH, A. *et al.* Reusing marble and granite dust as cement replacement in cementitious composites: A review on sustainability benefits and critical challenges. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 102600, 1 dez. 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102600>>. Acesso em: 28 ago. 2022.

DARKO, A. *et al.* Drivers for implementing green building technologies: An international survey of experts. **Journal of cleaner production**, 145, 386-394, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.043> >. Acesso em 21 out. 2022.

DEE, N. *et al.* **Planning methodology for water quality management: Environmental evaluation system**. Battelle-Columbus Laboratories. Columbus, Ohio, U.S.A. 1973.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Ministério da Infraestrutura. **Manual de Custos Médios Gerenciais**, Volume 01, Manual De Metodologia, 2019.

DEVADASS, T. Experimental study on replacement of fine aggregate in concrete with dissimilar curing conditions. **Case Studies in Construction Materials**, v. 11, p. e00245, 1 dez. 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00245>>. Acesso em: 06 dez. 2022.

DIMITRIOU *et al.* Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. **Journal Construct Build Mater.**, 158, pp. 228-235, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.137> >. Acesso em 21 out. 2022.

DIXIT, M.K. *et al.* Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 8, p. 1238–1247, 1 ago. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.016>>. Acesso em: 29 set. 2022.

DOBISZEWSKA, M. *et al.* Utilization of rock dust as cement replacement in cement composites: An alternative approach to sustainable mortar and concrete productions. **Journal of Building Engineering**, v. 69, p. 106180, 15 jun. 2023.

DORFMAN, Gabriel. **História do cimento e do concreto**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2003.

EC-JRC – JOINT RESEARCH CENTRE OF THE EUROPEAN COMMISSION. Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment – background document. **ILCD Handbook – International Reference Life Cycle Data System**, European Union. 2010.

EDELEN, A.; INGWERSEN, W. **Guidance on data quality assessment for life cycle inventory data**. V.1. US Environmental Protection Agency (EPA). EPA/600/R-16/096. Junho 2016. Disponível em:<https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=528687>. Acesso em: 08 ago. 2023.

EJIOGU, I. K. *et al.* Comparison Of ACI, IS and DOE Methods of Concrete Mix Design. **Nigerian Journal of Engineering**, vol 27, n. 1, apr. 2020.

EMMONS, Peter H. **Concrete Repair and Maintenance Illustrated** – Problem Analysis, Repair Strategy and Techniques. Kingston: R.S Means Company, Inc, 1994.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Atlas da eficiência energética Nacional 2020: relatório de indicadores**. 2020. Rio de Janeiro: EPE. Disponível em:<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-556/Atlas%20consolidado_08_03_2021.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2023.

EUROPEAN COMMISSION- Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union, 2010.

European Federation of Concrete Admixture Associations. **EFCA Environmental Declaration, Normal Plasticizing Admixtures**. European Federation of Concrete Admixture Associations, The Netherlands, 2002.

FAIZ *et al.* A state-of-the-art review on the advancement of sustainable vegetation concrete in slope stability. **Construction and Building Materials**, v. 326, p. 126502, 4 abr. 2022.

FALAGARIO, M. *et al.* Using a DEA-cross efficiency approach in public procurement tenders. **European Journal of Operational Research**, v. 218, n. 2, p. 523–529, 16 abr. 2012.

FARAJ, R. H.; SHERWANI, A. F. H.; DARAEI, A. Mechanical, fracture and durability properties of self-compacting high strength concrete containing recycled polypropylene plastic particles. **Journal of Building Engineering**, vol. 25, p. 100808, Sep. 2019 doi:10.1016/J.JOBE.2019.100808.

FAYAZ, S. *et al.* Concrete with Quarry Dust as Partial Replacement of Fine Aggregate. **International Journal for Modern Trends in Science and Technology**, v. 03, p. 105–112, 2017.

FERNANDES, F.R.C., ARAUJO, E.R.. **Mineração no Brasil: crescimento econômico e conflitos ambientais**. In: Conflitos ambientais na indústria mineira e metalúrgica... Rio de Janeiro: CETEM/CICP, 2016, p.65-88.

FERNANDES, Laurianny de Souza. **Avaliação dos Impactos Ambientais provocados pela Mineração de Brita no sítio Mata dos Galdinos, São João do Rio do Peixe - PB**. 2022. 60F. Graduação (Licenciatura em Geografia) - Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Cajazeiras, 2022.

FIGUEIRÔA, Silvia F. de M. **Mineração no Brasil: aspectos técnicos e científicos de suas histórias na Colônia e no Império (séculos XVIII-XIX)**. América Latina en la História Económica, v. 1, n. 1, 1994, p. 41-55.

FLOWER, D. J. M.; SANJAYAN, J. G. Green house gas emissions due to concrete manufacture. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, n. 5, p. 282–288, 2007. Disponível em: < <https://doi.org/10.1065/lca2007.05.327>>. Acesso em: 28 ago. 2022.

FRANÇA, Esquadras Poty. **Tecnologia Básica de Concreto**. Minas Gerais: Centro Federal De Educação Tecnológica De Minas Gerais, 2001. 164p.

GALETAKIS, M.; SOULTANA, A. A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 769–781, 15 jan. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.204>>. Acesso em: 28 ago. 2022.

GANJIAN, E.; KHORAMI, M.; MAGHSOUDI, A. A. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 5, p. 1828–1836, 1 maio 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.020>>. Acesso em: 03 abr. 2023.

GCCA Association. Global Cement and Concrete Association. **Cement and concrete around the world**. Disponível em: <<https://gccassociation.org/concretefuture/cement-concrete-around-the-world/>>. Acesso em: 06 set. 2023.

GEHLOT *et al.* Compressive, flexural strength test and chloride ion permeability test of concrete incorporating quartzite rock dust. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 4724–4730, 1 jan. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.166>>. Acesso em: 26 ago. 2022.

GENG, Y. *et al.* Calculating of CO₂ emission factors for Chinese cement production based on inorganic carbon and organic carbon. **Journal of Cleaner Production**, v. 217, p. 503–509, 20 abr. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.224>>. Acesso em: 28 ago. 2022.

GEORGIOPOULOU, M.; LYBERATOS, G. Life cycle assessment of the use of alternative fuels in cement kilns: A case study. **Journal of Environmental Management**, v. 216, p. 224–234, 15 jun. 2018.

GOEDKOOPE M.; SPRIENSMA R. **The Eco-indicator 99**: A damage oriented method for life cycle impact assessment. Consultants, Amersfoort, 2001. Disponível em: <https://www.pre.nl/eco-indicator99>. Acesso em: 01 ago. 2023.

GOEDKOOPE, M. *et al.* **ReCiPe 2008**: a life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition; Report I: Characterization. 2009. Disponível em: https://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf. Acesso em: 01 ago 2023.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal**: fundamentos e aplicações na engenharia civil. São Paulo: Editora PINI, 1997.

GUINÉE, J. B. *et al.* **Life cycle assessment**; An operational guide to the ISO standards; Parts 1 and 2. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, The Netherlands, 2001.

GUPTA, A. *et al.* Investigation of the mechanical strength of stone dust and ceramic waste based composite. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, p. 29–33, 1 jan. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.011>>. Acesso em: 29 set. 2022.

GUPTA, T. *et al.* Influence of stone processing dust on mechanical, durability and sustainability of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 918–927, 30 out. 2019.

GUSSONI, M. Stone Sector 2017 Trade and Innovation. **Internazionale Marmi e Macchine Carrara Spa**, 2017

HAMEED, M. S.; SEKAR, A. S. S. Properties of Green Concrete Containing Quarry Rock Dust and Marble Sludge Powder as fine Aggregate. ARPN J. **Journal of Engineering and Applied Sciences**. v. 4, n. 4, 2009.

HAMMOND, G.; JONES, C. **A BSRIA guide Embodied Carbon The Inventory of Carbon and Energy** . UK: BSRIA, 2019. v. v3. 0 (ICE).

HAMMOND, G; JONES, C. **Inventory of Carbon and Energy (ICE), Version 2.0**, University of Bath: Bath, UK, 2011; Volume 19, p. 641.

HARRISON *et al.* New Directions: Why are PM₁₀ concentrations in Europe not falling? **Atmospheric environment**, 43, 3, 603-606, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.11.023>>. Acesso em: 23 ago. 2023.

HAUSCHILD M; POTTING J. **Spatial differentiation in life cycle impact assessment e the EDIP2003 methodology**. Danish Ministry of the Environment. 2005. Disponível em: <https://www2.mst.dk/udgiv/publications/2005/87-7614-579-4/pdf/87-7614-580-8.pdf>. Acesso em: 01 ago 2023.

HAUSCHILD, M. Z. *et al.* Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 3, p. 683–697, 1 mar. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/S11367-012-0489-5/TABLES/4>>. Acesso em: 13 ago. 2023.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Editora PINI, 1993.

HELENE, Paulo; TUTIKIAN, Bernardo F. **Concreto: ciência e tecnologia**. In: Capítulo 12 - Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. 1 ed. São Paulo: Editora IBRACON, 2011.

HILAL *et al.* Development of eco-efficient lightweight self-compacting concrete with high volume of recycled EPS waste materials. **Environmental Science and Pollution Research**. 2021, 28, 50028–50051. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11356-021-14213-w>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

HORA, Karoline Matos *et al.* Avaliação do ciclo de vida do pavimento rígido de ciclovia: estudo de caso em Brasília. **Concreto e Construções**, ed. 104, out-dez 2021, p. 49-56, 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2021.104.0003>>. Acesso em: 15 ago. 2023.

HOSSEINPOUR *et al.* Evaluation of positive and negative impacts of mining on sustainable development by a semi-quantitative method. **Journal of Cleaner Production**, v. 366, p. 132955, 15 set. 2022.

HOTTLE, T. *et al.* Environmental life-cycle assessment of concrete produced in the United States. **Journal of Cleaner Production**, v. 363, p. 131834, 20 ago. 2022.

HUIJBREGTS, M.A.J. *et al.* ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 22, 138–147. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

IBICT. **Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia**. Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV). Disponível em: <<https://acv.ibict.br/pbacv/>>. Acesso em: 21 out. 2023.

IDEMAT. **IDEMAT Calculation Rules - Sustainability Impact Metrics**. Disponível em: <<https://www.ecocostsvalue.com/data-tools-books/idemat-calculation-rules/>>. Acesso em: 1 ago. 2023.

IDREES, M. *et al.* Recycling of Waste Facial Masks as a Construction Material, a Step towards Sustainability. **Materials** 2022, 15, 1810. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma15051810>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

IMPERATRIZ. **Resolução COMMAM nº 01** de 19 de dezembro de 2011. Disponível em: <http://novo.imperatriz.ma.gov.br/media/site/download/commam/conselho/RESOLU%C3%87%C3%83O_N%C2%BA_001_COMMAM_EXTRA%C3%87AO_DE_AREIA_RIO_TOCANTINS.pdf>. Acesso em 15 out. 2022.

IMTIAZ, L. *et al.* Life Cycle Impact Assessment of Recycled Aggregate Concrete, Geopolymer Concrete, and Recycled Aggregate-Based Geopolymer Concrete. **Sustainability 2021, Vol. 13, Page 13515**, v. 13, n. 24, p. 13515, 7 dez. 2021.

INGALKAR, R. S.; HARLE, S. M. Replacement of Natural Sand by Crushed Sand in the Concrete. **Landscape Architecture and regional planning**, v. 2, n. 1, p. 13, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Publicações. **IBRAM: Setor Mineral 2020 e 2021**. Belo Horizonte, 2021. disponível em: <https://ibram.org.br/publicacoes/>. Acesso em: 02 fev. 2022.

INTERNATIONAL EPD® SYSTEM. **Environmental Product Declaration for aggregates from the stationary crushing plant Ramnaslätt**. NCC Industry AB, Stockholm; 2017.

IS 383. **Coarse and fine aggregate for concrete–specification**. Bureau of Indian Standards, New Delhi, 2016.

IS 456. **Plain and Reinforced Concrete – Code of Practice**, Bureau of Indian Standards, New Delhi, 2000.

JAEGER, W. K. The hidden costs of relocating sand and gravel mines. **Resources Policy**, 31(3), 146–164, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2006.12.003>>. Acesso em 15 out. 2022.

JAGADEESH *et al.* Influence of Quarry Dust on Compressive Strength of Concrete. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 9, n. 22, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i22/93663>>. Acesso em: 05 dez. 2022.

JAMALE *et al.* Effect of Quarry Dust and Fly Ash Mix on strength properties of M40 grade Concrete. **International Journal of Engineering Research and General Science**, v. 3, n. 2, 2015.

JANE, CB. *et al.* **TRACI**: the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts. *Journal of Industrial Ecology* 6(3-4), 2003.

JEON, D. *et al.* Use of Coal Bottom Ash and CaO-CaCl₂-Activated GGBFS Binder in the Manufacturing of Artificial Fine Aggregates through Cold-Bonded Pelletization. **Materials** 2020, Vol. 13, Page 5598, v. 13, n. 24, p. 5598, 8 dez. 2020.

JESUS, M. S. *et al.* Environmental impact assessment methods: a literature review. **Brazilian Journal of Development**. 2021, v. 7, n. 4, pp. 38039-38070. Disponível em: <<https://doi.org/10.34117/bjdv7n4-321>>. 2021.

JHA *et al.* Utilization of Stone Dust as an Effective Alternative for Sand Replacement in Concrete. **RILEM Bookseries**, v. 29, p. 513–526, 2020.

JOLLIET, O. *et al.* **IMPACT 2002+**: a new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8:324–330. 2003. DOI: 10.1007/BF02978505. Acesso em: 01 ago 2023.

KAISH, A. *et al.* Effects of different industrial waste materials as partial replacement of fine aggregate on strength and microstructure properties of concrete. **Journal of Building Engineering**, 2021. 35: p. 12. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102092>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

KANELLOPOULOS *et al.* Mechanical and durability properties of concretes containing recycled lime powder and recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 253–259, 28 fev. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.102>>. Acesso em: 20 dez. 2022.

KANKAM, C.K. *et al.* Stress-strain characteristics of concrete containing quarry rock dust as partial replacement of sand. **Case Studies in Construction Materials**, v. 7, p. 66–72, 1 dez. 2017.

KANOJIA, A.; JAIN, S. K. Performance of coconut shell as coarse aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 150–156, 1 jun. 2017.

KARL, David M. *et al.* **Chapter 16 - The Nitrogen Cycle in the North Pacific Trades Biome: An Evolving Paradigm.** Nitrogen in the Marine Environment, Academic Press, 2 ed., 2008, pp. 705–769. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-372522-6.00016-5>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

KARTINI, K. *et al.* Quarry dust fine powder as substitute for ordinary portland cement in concrete mix. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 9, n. 2, p. 191–205, abr. 2014.

KAYA, A.; KAR, F. Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. **Construction and Building Materials**. 2016, 105, 572–578. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.177>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

KELLENBERGER, D. *et al.* **Life cycle inventories of building products.** Final reportecoinvent data v2.0 No.7 EMPA. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf. 2007. Disponível em:<<https://www.ecoinvent.org>>. Acesso em: 07 ago. 2023.

KHAN, N.; CHANDRAKAR, R. An Experimental study on uses of Quarry Dust to replace sand in concrete. **International Research Journal of Engineering and Technology**, 2017.

KIRTHIKA *et al.* Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete- A review. **Journal of Cleaner Production**, 2020. 268. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122089>>. Acesso em: 05 dez. 2022.

KOEHNKEN, L.; RINTOUL, M. Impacts of sand mining on ecosystem structure, process and biodiversity in rivers. **World Wildlife Fund International**, 2018. Disponível em: <https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/sandmining_execsum_final_.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2022.

KRISHNAMOORTHY, A.; KUMAR, G. M. Properties of Green Concrete Mix by Concurrent use of Fly Ash and Quarry Dust. **IOSR Journal of Engineering**, v. 3, p. 3–48, 2013.

KUMAR, A. *et al.* An experimental study on the mechanical properties of concrete replacing sand with quarry dust and waste foundry sand. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, p. 828–832, 1 jan. 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.271>>. Acesso em: 06 dez. 2022.

LA SERNA, Humberto Almeida de; REZENDE, Márcio Marques. Economia Mineral do Brasil. In: **Agregados para a construção civil**. Brasília: DNPM/MME, 2009. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1>>. Acesso em 26 jul. 2023.

LAI, Y. T.; WANG, W. C.; WANG, H. H. AHP- and simulation-based budget determination procedure for public building construction projects. **Automation in Construction**, v. 17, n. 5, p. 623–632, 1 jul. 2008.

LAIBLOVÁ, L. *et al.* Environmental Impact of Textile Reinforced Concrete Facades Compared to Conventional Solutions—LCA Case Study. **Materials**, v. 12, n. 19, p. 3194, 29 set. 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/MA12193194>>. Acesso em: 12 ago. 2023.

LANG, Aline Eloyse. **As ferrovias no Brasil e Avaliação Econômica de Projetos: uma aplicação em projetos ferroviários**. 2017. 166f. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Universidade de Brasília, UnB, Brasília, 2007.

LASDON, L. S. *et al.* **Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming**. ACM Transactions on Mathematical Software, New York, v. 4, n. 1, p. 34-50, 1978.

LEE *et al.* **Effects of carbonation on chloride penetration in concrete**. **ACI Materials Journal**. 2014, 111, 458–459.

LEOPOLD, L. B. *et al.* **A Procedure for Evaluating Environmental Impact in Geological**. Washington: 13p., U. S. Geological Survey, Circular 645, 1971, Washington, D.C., U.S.A. Disponível em: <<http://www.eric.ed.gov/PDFS/ED053006.pdf>>. Acesso em 11 nov. 2022.

LEVY, Salomon; HELENE, Paulo. Cura: como, quando e por quê. **Revista Técnica**. jan/fev, n. 20, São Paulo, 1996.

LI, Z. *et al.* A review on substitution of natural sand with granite fines in sustainable concrete. **Construction and Building Materials**, v. 346, p. 128417, 5 set. 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128417>>. Acesso em: 25 mar. 2023.

LIM, S.K. *et al.* Utilizing high volumes quarry wastes in the production of lightweight foamed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 441–448, 1 out. 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.091>>. Acesso em: 19 mar. 2023.

LOHANI, T. *et al.* **Optimum Utilization of Quarry Dust as Partial Replacement of Sand in Concrete.** 2012, 1, 391–404. Disponível em: <<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84905005706&origin=resultslist>>. Acesso em: 19 dez. 2022.

LUAN, J. *et al.* Beneficial utilization of ultra-fine dredged sand from Yangtze River channel as a concrete material based on the minimum paste theory. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e01098, 1 jun. 2022.

LUZ, A. B; ALMEIDA. S. L. M. Manual de Agregados para Construção Civil. In: **Usos e Especificações**. Rio de Janeiro: CETEM / MCTI, 2012, p.121-143.

LUZ, A. B; ALMEIDA. S. L. M. Manual de Agregados para Construção Civil. In: **Operações de Lavras de Areia**. Rio de Janeiro: CETEM / MCTI, 2012, p.181-193.

LUZ, Adão Benvindo da; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de; PINTO, Uile Reginaldo. **Manual de agregados para construção civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. 432p.

LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Antonio Freitas. Tratamento de Minérios. n: **Introdução ao Tratamento de Minério**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2010. p.3-18.

MA, F. *et al.* The Greenhouse Gas Emission from Portland Cement Concrete Pavement Construction in China. **International Journal of Environmental Research and Public Health** 2016, Vol. 13, Page 632, v. 13, n. 7, p. 632, 24 jun. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ijerph13070632>>. Acesso em: 28 ago. 2022.

MACHADO, Iran Ferreira; FIGUEIRÔA, Silvia Fernanda de Mendonça. **História da mineração brasileira**. 1 ed. Curitiba: Editora CRV, 2020. 732p.

MACHADO, Raphael Boechat Alves. **Propriedade minerária**. 1 ed. Belo Horizonte: Editora Expert, 2020. 274p.

MALINWSKI, R; GARFINKEL. Prehistory of concrete. **Concrete Internacional**. Detroit, v. 13, n. 3, p. 62-80, 1991.

MANJUNATHA, M. *et al.* Life cycle assessment (LCA) of concrete prepared with sustainable cement-based materials. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, p. 3637–3644, 1 jan. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.01.248>>. Acesso em: 12 ago. 2023.

MARSCHKE, M.; ROUSSEAU, J. F. Sand ecologies, livelihoods and governance in Asia: A systematic scoping review. **Resources Policy**, v. 77, p. 102671, 1 ago. 2022.

MARTÍNEZ, E. *et al.* Comparative evaluation of life cycle impact assessment software tools through a wind turbine case study. **Renewable Energy**, v. 74, p. 237–246, 1 fev. 2015.

MARTINS, Ester Léa Silva. **Diagnóstico Ambiental da Bacia Hidrográfica do Córrego Grotão, Ceilândia (DF)**. 2014. 112F. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Rural Sustentável) - Universidade de Brasília, UnB, Brasília, 2014.

MARTINS, Thamires; CARMO JUNIOR, Gersina. Avaliação de Impacto Ambiental: Uma Revisão Sistemática sob a Ótica Metodológica. **Engineering and Science**. 2018, v.2, ed. 7.
MATTOS, Aldo Dórea. **Como preparar orçamentos de obras**. 3ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 328p.

MCTIC (Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações). **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 5 ed. 2020. Brasília: MCTIC.

MEHTA, Kumar P; MONTEIRO, Paulo J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. São Paulo: Editora IBRACON, 2014. 782p.

MELLER, Guilherme Semprebom; BERNANRDINO, Alexsandra Gleci; SMANIOTT, André Luiz Amorim. Mineração x Meio Ambiente: mitigação de impactos ambientais causados pela mineração a céu aberto de basalto. In: 75ª Semana Oficial de Engenharia e de Agronomia - Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 2018, Foz do Iguaçu. **Anais... Maceió: SOEA/CONTECC**, 2018.

MEMON, A.H. *et al.* Avaliando as relações causais entre os recursos de construção e a superação de custos usando a modelagem de caminho PLS com foco na região sul e central da Malásia. **Jornal de Engenharia e Tecnologia (JET)**, [S. l.], v. 4, n. 1, pág. 67–78, 2013. Disponível em: <https://jet.utem.edu.my/jet/article/view/179>. Acesso em: 12 nov. 2022.

MENDES, Natalia Crespo. **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil**. 2013. 149F. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, UnB, Brasília, 2015.

MILARÉ, E. **Direito do Ambiente: a gestão ambiental em foco -doutrina, jurisprudência, glossário**. 7. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2011.

MILLER, S. A.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. **Nature Sustainability** 2018 1:1, v. 1, n. 1, p. 69–76, 8 jan. 2018.

MINGUILLÓN, M. C. *et al.* Seasonal and spatial variations of sources of fine and quasi-ultrafine particulate matter in neighborhoods near the Los Angeles–Long Beach harbor. **Atmospheric Environment**, 42, 32, 7317–7328, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.036>>. Acesso em: 23 ago. 2023.

MITHUN, B. M.; NARASIMHAN, M. C. Performance of alkali activated slag concrete mixes incorporating copper slag as fine aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 837–844, 20 jan. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.026>>. Acesso em: 29 set. 2022.

MOGRE, R. P.; PARBAT, D. K.; BAJAD, S. P. Feasibility Of Artificial Sand In Concrete. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, v. 2, n. 7, jul. 2013.

MOLAY, T.G.G. *et al.* Mechanical and physical performances of concretes made from crushed sands of different geological nature subjected to high temperatures. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 22, n. 4, p. 1116–1124, 1 ago. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.02.007>>. Acesso em: 05 dez. 2022.

MONTEIRO, N. B. R.; DA SILVA, E. A. Environmental licensing in Brazilian's crushed stone industries. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 71, p. 49–59, 1 jul. 2018.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. [s.l.] John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2020.

MORAES, C. D.; D'AQUINO, C. A. Avaliação de impacto ambiental: uma revisão da literatura sobre as principais metodologias. In: SIMPÓSIO DE INTEGRAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DO SUL CATARINENSE, 5, 2016, Araranguá. **Anais...** Araranguá: [s.n], 2016.

MORRISEY, L. J. Bibliometric and bibliographic analysis in an era of electronic scholarly communication. **Scholarly Communication in Science and Engineering Research in Higher Education**, p. 162–173, 1 jan. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1300/J122v22n03_12>. Acesso em: 13 dez. 2022.

MUNDRA, S. *et al.* Crushed rock sand – An economical and ecological alternative to natural sand to optimize concrete mix. **Perspectives in Science**, v. 8, p. 345–347, 1 set. 2016.

MUSARAT, M. A. *et al.* Impact of inflation rate on construction projects budget: A review. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, n. 1, p. 407–414, 1 mar. 2021.

MUTHU, Subramanian Senthilkannan. **Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing**. 400p, 1 ed., 2015. Reino Unido: Woodhead Publishing.

NADIMALLA, A. *et al.* The Effect of Replacement of Natural Sand by Manufactured Sand on the Properties of the Concrete. In **Proceedings of the 2018 IEEE 5th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences, ICETAS 2018**. Bangkok, Thailand, 22–23 November 2018; pp. 1–7.

NEVILLE, A. M. BAUER, **Propriedade do Concreto**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 912p.

NILIMAA, J. Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. **Developments in the Built Environment**, v. 15, p. 100177, 1 out. 2023.

NREL (National Renewable Energy Laboratory). **US Life Cycle Inventory database (USLCI)**. 2011. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/lci>>. Acesso em: 01 ago. 2023.

OBIANYO, I.I. *et al.* Performance of lateritic soil stabilized with combination of bone and palm bunch ash for sustainable building applications. **Cogent Eng.** 2021, 8, 1921673. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1921673>>. Acesso em: 19 mar. 2023.

OCHARÁN, José Luis Saravia; LIMA, Francisco Mariano da Rocha de Souza. Avaliação do ciclo de vida da produção de areia, brita e agregados reciclados para a construção civil. In **Anais VIII Jornada do Programa de Capacitação Institucional - PCI**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2019; pp. 54-61.

OGHENEKEVWE, Ogun *et al.* Ugochukwu Stanley. An assessment of the impact of inflation on construction material prices in Nigeria. **PM World Journal**, 3 (4) (2014), pp. 1-22.

OLIVEIRA, Elvis Martins de. **Impacto Ambiental na Exploração de Pedreiras: contribuição para uma prática sustentável**. 2006. 138F. Dissertação (Mestrado em Geologia para o Ensino) - Faculdade de Ciência da Universidade do Porto, Porto, 2006.

OMAR, O. M. *et al.* Influence of limestone waste as partial replacement material for sand and marble powder in concrete properties. **HBRC Journal**, v. 8, n. 3, p. 193–203, 1 dez. 2012.

OORKALAN, A. *et al.* Experimental study on high volume fly ash concrete made with coir pith and quarry dust. **Materials Today: Proceedings**, v. 21, p. 833–836, 1 jan. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.588>>. Acesso em: 11 dez. 2022.

OPARA *et al.* Comparison of physical and mechanical properties of river sand concrete with quarry dust concrete. **Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering**, v. 13, n. s1, p. 127–134, 1 mar. 2018.

PALANISAMY, C. *et al.* Experimental investigation on self-compacting concrete with waste marble and granite as fine aggregate. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 1900–1907, 1 jan. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.159>>. Acesso em: 15 out. 2022.

PAMPLONA, João Batista; PENHA, Ana Carolina. A política de inovação para o setor mineral no Brasil: uma análise comparativa com a Suécia centrada na interação dos agentes envolvidos. **Cadernos EBAPE.BR**. 2019, v. 17, n. 4, pp. 959-974. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1679-395174445>>.

PAMU, Y.; ALUGUBELLI, S. A comparative study of environmental impacts due to conventional and sustainable concrete. **Materials Today: Proceedings**, 15 abr. 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.03.817>>. 2019. Acesso em: 09 set. 2023.

PEF. **Product Environmental Footprints (PEF)** Database. European Commission's Single Market for Green Products, 2019. Disponível em: < <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/EnvironmentalFootprint.html>>. Acesso em: 15 ago. 2023.

PETEK GURSEL, A. *et al.* Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. **Cement and Concrete Composites**, v. 51, p. 38–48, 1 ago. 2014.

PETROCHE, D. M.; RAMIREZ, A. D. The Environmental Profile of Clinker, Cement, and Concrete: A Life Cycle Perspective Study Based on Ecuadorian Data. **Buildings**, v. 12, n. 3, p. 311, 1 mar. 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12030311/S1>>. Acesso em: 12 ago. 2023.

PIEKARSKI, C. M. **Proposta de melhoria do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida da produção do painel de madeira mdf**. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná- UTFPR, Ponta Grossa, 2013.

PIMENTA, Dhiego Saraiva. **Produção de concreto convencional com a utilização de pó de pedra/brita**. 2012. 60 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

PINHEIRO, Cleane do Socorro da Silva. **Extração de Areia e Seixo: desenvolvimento ou degradação? O caso de Porto Grande/AP**. 2016. 134F. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Naturais e Desenvolvimento Local na Amazônia) - Universidade Federal do Pará, UFPA, Macapá, 2016.

PINTO, José Vandério Cirqueira. **Impactos socioambientais na serra das areias decorrentes do crescimento urbano desordenador em Aparecida de Goiânia**. In: XIV Encontro Nacional de Geógrafos. 16 a 21 de julho de 2006, Rio Branco, 2006.

PNUMA, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. **Sand e Sustainability: finding new solutions for environmental governance of global sand resources.**, Genebra, Suíça. 2019. Portal Eletrônico do Sistema de Contas Nacionais Trimestrais (SCNT), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2023. Disponível em < <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9300-contas-nacionais-trimestrais.html?edicao=33060&t=o-que-e>>. Acesso em 26 de jul. 2023.

POPE, C. A.; DOCKERY, D. W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. **Journal of the Air & Waste Management Association**, 56, 6, 709-742, 2006.

Disponível em: < <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>>. Acesso em: 23 ago. 2023.

PRADHAN, S. *et al.* Comparative LCA of recycled and natural aggregate concrete using Particle Packing Method and conventional method of design mix. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 679–691, 10 ago. 2019.

PRASITTISOPIN *et al.* Microplastics in construction and built environment. **Developments in the Built Environment**. 2023, 15, 100188.

PROKOPSKI *et al.* The effect of using granite dust as a component of concrete mixture. **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, p. e00349, 1 dez. 2020.

QU, F. *et al.* Durability deterioration of concrete under marine environment from material to structure: A critical review. **Journal of Building Engineering**, v. 35, p. 102074, 1 mar. 2021.

QUIETMEYER, F. In RIEPERT, P. H. Die **Deutsche Zement Industrie**, Zementeverlag, Charlottenbug 1927, p. 44-46.

RATHORE *et al.* Green concrete: Using quarry waste of sandstone as fine aggregate with high levels of microfines. **Materials Today: Proceedings**, v. 32, p. 728–733, 1 jan. 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.463>>. Acesso em: 05 dez. 2022.

RAY, S. *et al.* Analysing properties of concrete made with stone dust and jute fibre using response surface methodology. **International Journal of Sustainable Materials and Structural Systems**, v. 5, n. 3, p. 206, 2021.

RAY, S. *et al.* Predicting the strength of concrete made with stone dust and nylon fiber using artificial neural network. **Heliyon**, v. 8, n. 3, p. e09129, 1 mar. 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09129>>. Acesso em: 26 ago. 2022.

RENTIER, E. S.; CAMMERAAT, L. H. The environmental impacts of river sand mining. **Science of The Total Environment**, v. 838, p. 155877, 10 set. 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155877>>. Acesso em: 15 out. 2022.

REVELL, L. E. *et al.* The changing ozone depletion potential of N₂O in a future climate, **Geophysical Research Letters**, 42, 10,047–10,055, 2015. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/2015GL065702>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

RIO GRANDE DO SUL. **Resolução CONSEMA nº 442** de 26 de abril de 2021. Lex: LegisWeb. Disponível em: < <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=413280>>. Acesso em 15 out. 2022.

ROSS, S. M. **Analysis of Variance. Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists**. [s.l.: s.n.]. v. 92.

ROSSI, Efigênia. **Avaliação do Ciclo de Vida da Brita para a Construção Civil**: estudo de caso. 2013. 150F. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos, 2013.

ROSSINI, Fabiano. **Gestão Ambiental na Mineração**: planejamento ambiental aplicado na pedreira Aratu, município de Salvador (BA). 2015. 160F. Dissertação (Mestrado em Planejamento Ambiental) - Universidade Católica do Salvador, UCS, Salvador, 2014.

ROUSSEL, Nicolas (Ed.). **Understanding the rheology of concrete**. Elsevier, 2011.

RUPPENTHAL, J.E. **Gestão ambiental**. Rio Grande do Sul. Rede e-Tec Brasil, 2014.

SAGHAFI, M. D.; HOSSEINI, T. Z. S. Recycling value of building materials in building assessment systems. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 11, p. 3181–3188, 1 nov. 2011. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.016>>. Acesso em: 29 set. 2022.

SAHU *et al.* Crushed stone waste as fine aggregate for concrete. **Indian Concrete Journal**, v. 77, n. 1, p. 845–848, jan. 2003.

SÁNCHEZ, A. R. *et al.* Life cycle assessment of cement production with marble waste sludges. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 20, p. 10968, 1 out. 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/IJERPH182010968/S1>>. Acesso em: 12 ago. 2023.

SÁNCHEZ, Luis Enrique. **Avaliação de Impacto Ambiental**: conceitos e métodos. 3 ed. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2020. 447p.

SANTHOSH, K. G. *et al.* Cleaner production of concrete by using industrial by-products as fine aggregate: A sustainable solution to excessive river sand mining. **Journal of Building Engineering**, v. 42, p. 102415, 1 out. 2021.

SANTOS *et al.* Argamassa com substituição de agregado natural por resíduo de britagem de granito. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, p.1818-1828, set-dez, 2012. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.5902/223611707238> >. Acesso em: 26 jul. 2023.

SANTOS, Antônio Héilton Vasconcelos *et al.* **Desenvolvimento em Questão**, ano 20, n 58, 2022. doi.org/10.21527/2237-6453.2022.58.12351.

SCHOLZ, T. V.; KESHARI, S. **Abrasion-resistant concrete mix designs for precast bridge deck panels**. FHWA-OR-RD-11-04, Oregon Dept. of Transportation, Salem, 2010.

SCOTTO, Gabriela. Estados Nacionais, Conflitos Ambientais e Mineração na América Latina. **Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales**, n. 14, p. 95-116, set. 2013.

SEGURA-SALAZAR, J.; TAVARES, L. M. A life cycle-based, sustainability-driven innovation approach in the minerals industry: Application to a large-scale granitic quarry in Rio de Janeiro. **Minerals Engineering**, v. 172, p. 107149, 1 out. 2021.

SELVAN, S. S.; VIJAYA, B. Comparative Study on the Strength and Durability Properties of Concrete with Manufactured Sand. **Article in Indian Journal of Science and Technology**, v. 8, n. 36, 2015.

SENA, Gildeon Oliveira; NASCIMENTO, Matheus Leoni Martins; NETO, Abdala Carim Nabut. **Patologia das Construções**. 1 ed. Salvador: Ed. 2B Educação, 2020. 256p.

SHAMIM, S.; SRIVASTAVA, V.; AGARWAL, V. C. Compressive and Flexural Strengths of Concrete using Stone Dust and Recycled Aggregate as Partial Replacement of Natural Aggregate. **Journal of Academia and Industrial Research (JAIR)**, v. 3, p. 322, 2014.

SHEN, W. *et al.* Cleaner production of high-quality manufactured sand and ecological utilization of recycled stone powder in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 375, p. 134146, 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134146>>. Acesso em: 15 out. 2022.

SHUKLA *et al.* Embodied energy analysis of adobe house. **Renewable Energy**, v. 34, n. 3, p. 755–761, 1 mar. 2009. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.002>>. Acesso em: 29 set. 2022.

SHYAM PRAKASH, K.; RAO, C. H. Study on Compressive Strength of Quarry Dust as Fine Aggregate in Concrete. **Advances in Civil Engineering**, v. 2016, 2016.

SILVA, Fabiana Cabrine da. **Estudo de aproveitamento de areia industrial em materiais cimentícios**. 2018. 58 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Curso de Graduação em Engenharia de Minas, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, Araxá, Minas Gerais, 2018.

SILVA, L. S. *et al.* A Comprehensive Review of Stone Dust in Concrete: Mechanical Behavior, Durability, and Environmental Performance. **Buildings**, v. 13, n. 7, p. 1856, 2023. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/buildings13071856>>.

SILVA, Willian Menezes da. **Resistência do Concreto após Incêndio: Comparação entre os ensaios de ultrassom e destrutivos na determinação das propriedades mecânicas do material**. 2021. 91F. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, 2021.

SILVEIRA, Leonardo Ramos da. **Reaproveitamento de finos de pedreiras em pavimentação: uma abordagem técnica e econômica**. 2010. 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Universidade Federal de Goiás, UFG, Goiânia, 2010.

SIMAO, L. *et al.* Assessment of the recycling potential of stone processing plant wastes based on physicochemical features and market opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 319, p. 128678, 15 out. 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128678>>. Acesso em: 02 jan. 2023.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO DE PEDRA BRITADA DO ESTADO DE SÃO PAULO – **SINDIPEDRAS**. Disponível em: < <http://www.sindipedras.org.br/>>. Acesso em 02 out. 2023.

SINGH, A.; SAMPATH, P. V.; BILIGIRI, K. P. A review of sustainable pervious concrete systems: Emphasis on clogging, material characterization, and environmental aspects. **Construction and Building Materials**, v. 261, p. 120491, 20 nov. 2020.

SINGH, O.; KUMAR, A. Sand and gravel extraction from piedmont and floodplain zones of Yamunanagar district in Haryana, India: Environmental tragedy or economic gain? **Int. J. Environ. Stud.** 2018, 75, 267–283. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00207233.2017.1353359>>. Acesso em: 04 dez. 2022.

SINGH *et al.* Experimental Investigation of Sustainable Concrete Made with Granite Industry By-Product. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 6, p. 04017017, 9 fev. 2017. Disponível em: < [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001862](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001862)>. Acesso em: 05 dez. 2022.

SINGH *et al.* Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 119, p. 86–98, 15 abr. 2016b. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.008>>. Acesso em: 11 dez. 2022.

SINGH *et al.* Sustainable utilization of granite cutting waste in high strength concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 116, p. 223–235, 10 mar. 2016a. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.110>>. Acesso em: 11 dez. 2022.

SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Relatórios de Insumos e Composições**. Disponível em: http://www.caixa.gov.br/gov/gov_social/municipal/programa_des_urbano/SINAPI/relatorio_insumos.html. Acesso em: 27 jan. 2014 e em 15 fev. 2022.

SIVAMANI, J.; RENGANATHAN, N. T. Effect of fine recycled aggregate on the strength and durability properties of concrete modified through two-stage mixing approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 57, p. 85869–85882, 1 dez. 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14420-5>>. Acesso em: 30 mar. 2023.

SNYDER, H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 104, p. 333–339, 1 nov. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>>. Acesso em: 13 dez. 2022.

SOMBRIO, Catarina Moraes de Oliveira. **ACV de Painéis de Blocos Cerâmicos e Concreto Armado: Um Exercício de Aplicação do Manual do ILCD**. 2015. 138F. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2013.

SOUNIS, E. **Manual de higiene e medicina do trabalho**. São Paulo: McGraw-Hill, 1991.

SPARREVIK, M. *et al.* Green public procurement – A case study of an innovative building project in Norway. **Journal of Cleaner Production**, v. 188, p. 879–887, 1 jul. 2018.

STAFFORD, F. N. *et al.* Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1293–1299, 20 nov. 2016.

STRADIOTO NETO, L. A. *et al.* Avaliação dos métodos para aplicação da análise do inventário do ciclo de vida na indústria moveleira. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [S. l.], v. 9, n. 4, p. 126–152, 2020. DOI: 10.19177/rgsa.v9e42020126-152. Disponível em: https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/10237. Acesso em: 1 ago. 2023.

SYMONS, K. **Embodied carbon: the inventory of carbon and energy (ICE)**. A BSRIA guide. Proc. Inst. Civ. Eng., 164 (EN4), 2011.

TAIWO, L.A. *et al.* Mechanical behaviour of composite produced with quarry dust and rice husk ash for sustainable building applications. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01157, 1 dez. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01157>>. Acesso em: 01 out. 2022.

TCU, Tribunal de Contas da União. **Obras Públicas: recomendações básicas para a contratação e fiscalização de obras de edificações públicas**. 4 ed. Brasília: TCU, 2014. 104p.

TEMIZ, H.; KANTARCI, F. Investigation of durability of CEM II B-M mortars and concrete with limestone powder, calcite powder and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 517–524, 15 out. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.078>>. Acesso em: 20 dez. 2022.

TESSLER, Moysés Gonzalez; FARINACCIO, Alessandro. Assessment of Environmental Impacts on the Physical Environment due to Coastal Engineering Works - A Proposed Methodology. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**. 2010, v. 10, ed. 4.

TISAKA, Maçahiko. **Orçamento na construção civil**: consultoria, projeto e execução. 2 ed São Paulo: Editora PINI, 2011. 470p.

TORRES, A. *et al.* A looming tragedy of the sand commons. **Science**. 80-, 357, p 970-971, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1126/science.aao0503> >. Acesso em 21 out. 2022.

TORRES, Ana Luisa Tavares. **Avaliação dos mecanismos de degradação do concreto por ataque de ácido sulfúrico**. 2017. 135F. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC/RJ, Rio de Janeiro, 2017.

UDAWATTHA, C.; HALWATURA, R. Embodied energy of mud concrete block (MCB) versus brick and cement blocks. **Energy and Buildings**, v. 126, p. 28–35, 15 ago. 2016. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.059> >. Acesso em: 29 set. 2022.

UKPATA, J. O.; EPHRAIM, M. E.; AKEKE, G. A. Compressive strength of concrete using lateritic sand and quarry dust as fine aggregate. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 7, n. 1, p. 81–92, jan. 2012.

UMAR, T. *et al.* An Experimental Study on Non-Destructive Evaluation of the Mechanical Characteristics of a Sustainable Concrete Incorporating Industrial Waste. **Materials**, 2022. 15(20): p. 14. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/ma15207346> >. Acesso em: 25 jul. 2023.

UNITED NATIONS COMTRADE DATABASE - UN COMTRADE. **International Trade Statistics Database**. 2014. Disponível em: <Disponível em: <https://comtrade.un.org/> >. Acesso em: 25 ago. 2022.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP. **Life Cycle Management. A Business Guide to Sustainability**. 2007. Disponível em: <<https://www.unep.org/resources/report/life-cycle-management-business-guide-sustainability>>. Acesso em: 10 ago. 2023.

UPADHYAYA *et al.* Effect of Granite Dust as Partial Replacement to Natural Sand on Strength and Ductility of Reinforced Concrete Beams. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series A 2020 101:4**, v. 101, n. 4, p. 669–677, 15 set. 2020.

UPADHYAYA, *et al.* Experimental analysis on partial replacement of fine aggregate by granite dust in concrete. In **Sustainable Construction and Building Materials: Select Proceedings of ICSCBM 2018**; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2018; pp. 335–344.

VALVERDE, Fernando Mendes. **Mineradores de areia tentam reinventar mercado** – entrevista concedida a Altair Santos, no Portal Itambé, 25/04/2014. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/mineradores-de-areia-tentam-reinventar-mercado/>> Acesso em 01 ago. 2023.

VAN DEN HEEDE, P.; DE BELIE, N. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 4, p. 431–442, 1 abr. 2012.

VARDHAN *et al.* Influence of marble waste as partial replacement of fine aggregates on strength and drying shrinkage of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 228, p. 116730, 20 dez. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116730>>. Acesso em: 07 dez. 2022.

VELUMANI, P.; MANIKANDAN, P. Steel mill scale waste and granite powder waste in concrete production -An experimental study. **Materials Today: Proceedings**, v. 37, n. Part 2, p. 1748–1752, 1 jan. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.358>>. Acesso em: 07 dez. 2022.

VENKATA, S. K. N. Crushed rock dust as filler material in concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 43, p. 1714–1719, 1 jan. 2021.

VENKATA S. K. N.; SAI RAM, K. S. Experimental study on properties of concrete containing crushed rock dust as a partial replacement of cement. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 2, p. 7240–7246, 1 jan. 2018.

VIEIRA, D. R. *et al.* Consideration of strength and service life in cradle-to-gate life cycle assessment of self-compacting concrete in a maritime area: a study in the Brazilian context. **Environment, Development and Sustainability**, v. 20, n. 4, p. 1849–1871, 1 ago. 2018.

VIEIRA, Eriton Geraldo; REZENDE, Elcio Nacur. Exploração Mineral de Areia e um Meio Ambiente Ecologicamente Equilibrado: É possível conciliar? **Sustentabilidade em Debate**, v. 6, n. 2, p. 171-192. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.18472/SustDeB.v6n2.2015.10795>>. Acesso em 05 nov. 2022.

VIEIRA, Letícia Canal; RIGON, Magali Rejane; DEBASTIANI, Ricardo Salami; BRANDLI, Luciana Londero. Avaliação dos impactos ambientais do beneficiamento de pedras preciosas. In: 3º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, 2012, Bento Gonçalves. **Anais...** Rio Grande do Sul CITMA, 2012.

VIJAYALAKSHMI *et al.* Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. **Construction and Building Materials**, v. 46, p. 1–7, 1 set. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.018>>. Acesso em: 01 out. 2022.

VILLAS-BÔAS, Ana Lúcia. **Mineração e Desenvolvimento Econômico: a questão nacional nas estratégias de desenvolvimento do setor mineral (1930-1964)**. Rio de Janeiro, CETEM/MCTI: 1995.

WANI, S. B; MUNTAZARI, T. H; RAFIQUE, N. P. Study on concrete proportioning methods: a qualitative and economical perspective. **Challenge Journal of Concrete Research Letters**,

12 (1), 20-29. 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.37896/jxu14.7%2F120> >. Acesso em 29 out. 2022.

WIJAYASUNDARA *et al.* Comparative assessment of embodied energy of recycled aggregate concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 152, p. 406–419, 20 maio 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.118>>. Acesso em: 29 set. 2022.

WINDAPO, A. O; CATTELL, K. Perceptions of key construction and development challenges facing the construction industry in South Africa. **Proceedings**; 2010.

WOLF, Marc-Andree; *et al.* European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook**. Luxembourg. Publications Office of the European Union, 2012.

XU, L. Y. *et al.* Development of artificial one-part geopolymer lightweight aggregates by crushing technique. **Journal of Cleaner Production**, v. 315, p. 128200, 15 set. 2021.

YANG, R. *et al.* Feasibility analysis of treating recycled rock dust as an environmentally friendly alternative material in Ultra-High Performance Concrete (UHPC). **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120673, 10 jun. 2020.

YU, J. *et al.* Mechanical properties of green structural concrete with ultrahigh-volume fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 510–518, 30 ago. 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.188> >. Acesso em: 23 out. 2022.

ZAMIR HASHMI, S. R. *et al.* Prediction of Strength Properties of Concrete Containing Waste Marble Aggregate and Stone Dust: Modeling and Optimization Using RSM. **Materials 2022, Vol. 15, Page 8024**, v. 15, n. 22, p. 8024, 14 nov. 2022.

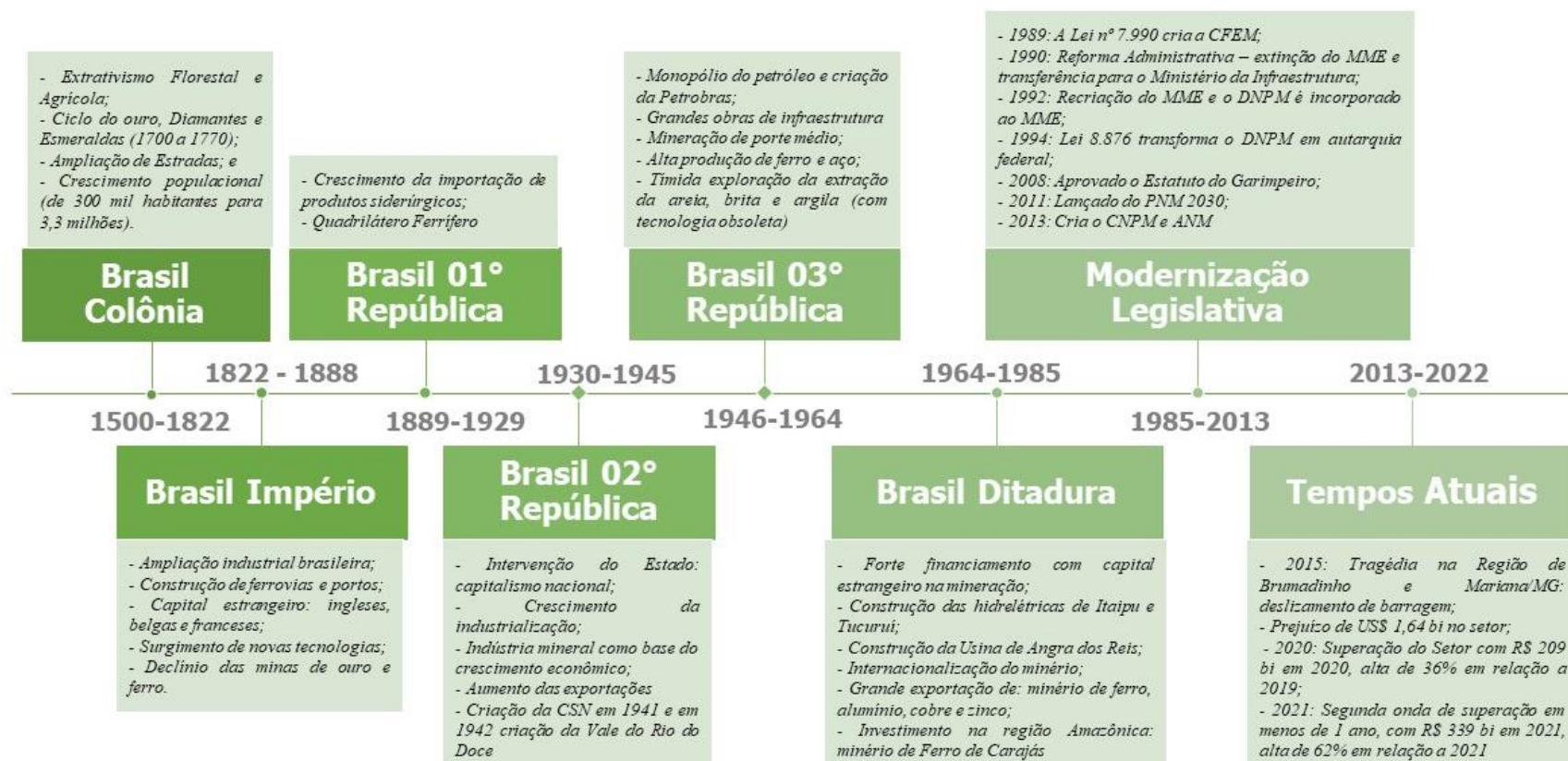
ZANOLETTI, A. *et al.* Embodied energy as key parameter for sustainable materials selection: The case of reusing coal fly ash for removing anionic surfactants. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 230–236, 10 jan. 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.070> >. Acesso em: 29 set. 2022.

ZHANG, H. *et al.* Sun. Long-term shrinkage and mechanical properties of fully recycled aggregate concrete: Testing and modelling. **Cement and Concrete Composites**, 130, 10452. 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2022.104527> >. Acesso em 21 out. 2022.

ZHANG, L.; MABEE, W. E. Comparative study on the life-cycle greenhouse gas emissions of the utilization of potential low carbon fuels for the cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 122, p. 102–112, 20 maio 2016.

WHO. Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone, and nitrogen dioxide; report on a WHO working group. World Health Organization, Bonn, Germany, 13-15 January 2003.

APÊNDICE A - LINHA DO TEMPO DA MINERAÇÃO BRASILEIRA



APÊNDICE B - IMPACTOS AMBIENTAIS EXTRAÇÃO DE BRITA E AREIA

Fase	Brita		Areia	
	Impactos Positivo	Impactos Negativo	Impactos Positivo	Impactos Negativo
Instalação	<p>01. Geração de empregos diretos e indiretos;</p> <p>02. Crescimento econômico no entorno da região de instalação;</p> <p>03. Dinamização do setor comercial, como consequência da aquisição de insumos e peças de maquinário;</p> <p>04. Aumento da receita das municipalidades e do Estado;</p> <p>05. Incentivo ao desenvolvimento local e instalação de mão de obra especializada;</p>	<p>01. Erosão do solo;</p> <p>02. Assoreamento das margens dos rios;</p> <p>03. Desmatamento das matas ciliares;</p> <p>04. Depreciação da qualidade do ar e do solo;</p> <p>05. Impactos nos corpos hídricos, devido ao aumento da turbidez no curso d'água e desregulação da vazão;</p> <p>06. Diminuição do habitat da fauna e flora, além de impactos na microbiota do solo;</p> <p>07. Diminuição do suporte e resistência do solo, taludes e aterros das regiões ribeirinhas;</p> <p>08. Impacto visual</p>	<p>01. Geração de empregos diretos e indiretos;</p> <p>02. Crescimento econômico no entorno da região de instalação;</p> <p>03. Dinamização do setor comercial, como consequência da aquisição de insumos e peças de maquinário;</p> <p>04. Aumento da receita das municipalidades e do Estado;</p> <p>05. Incentivo ao desenvolvimento local e instalação de mão de obra especializada;</p>	<p>01. Erosão do solo</p> <p>02. Assoreamento das margens dos rios;</p> <p>03. Desmatamento das matas ciliares;</p> <p>04. Depreciação da qualidade do ar e do solo;</p> <p>05. Impactos nos corpos hídricos, devido ao aumento da turbidez no curso d'água e desregulação da vazão;</p> <p>06. Diminuição do habitat da fauna e flora, além de impactos na microbiota do solo;</p> <p>07. Diminuição do suporte e resistência do solo, taludes e aterros das regiões ribeirinhas;</p> <p>08. Impacto visual</p>
Operação	<p>06. Aumento do canal dos corpos hídrico, devido a retirada de sedimentos por meio das dragas;</p> <p>07. Aumento da oferta do produto no mercado, o que contribui para a urbanização da região, sendo este mineral de grande importância para a construção civil;</p> <p>08. Aumento da oferta de areia, com repercussões positivas para a sociedade em geral, mediante o seu uso para diversos fins, com a consequente melhoria da qualidade de vida.</p>	<p>09. Depreciação da qualidade do ar e do solo, devido aos maquinários;</p> <p>10. Impactos nos corpos hídricos, devido ao aumento da turbidez no curso d'água e desregulação da vazão;</p> <p>11. Interferência na velocidade e direção dos cursos d'água dos corpos hídricos;</p> <p>12. Possibilidade de diminuição das espécies vegetais e aquáticas, inclusive geneticamente;</p> <p>13. Depreciação do patrimônio público e ecológico;</p> <p>14. Diminuição do uso múltiplos dos corpos hídricos, inclusive riscos de acidentes devido aos bancos de areia e "panelões" que se criam quando da operacionalização do maquinário, diminuindo assim as possibilidades de lazer por parte de turistas e ribeirinhos;</p> <p>15. Diminuição da toponímia e topografia;</p>	<p>06. Aumento do canal dos corpos hídrico, devido a retirada de sedimentos por meio das dragas;</p> <p>07. Aumento da oferta do produto no mercado, o que contribui para a urbanização da região, sendo este mineral de grande importância para a construção civil;</p> <p>08. Aumento da oferta de areia, com repercussões positivas para a sociedade em geral, mediante o seu uso para diversos fins, com a consequente melhoria da qualidade de vida.</p>	<p>09. Depreciação da qualidade do ar e do solo, devido aos maquinários;</p> <p>10. Impactos nos corpos hídricos, devido ao aumento da turbidez no curso d'água e desregulação da vazão;</p> <p>11. Interferência na velocidade e direção dos cursos d'água dos corpos hídricos;</p> <p>12. Possibilidade de diminuição das espécies vegetais e aquáticas, inclusive geneticamente;</p> <p>13. Depreciação do patrimônio público e ecológico;</p> <p>14. Diminuição do uso múltiplos dos corpos hídricos, inclusive riscos de acidentes devido aos bancos de areia e "panelões" que se criam quando da operacionalização do maquinário, diminuindo assim as possibilidades de lazer por parte de turistas e ribeirinhos;</p> <p>15. Diminuição da toponímia e topografia;</p>

		16. Impacto visual e sonoro;		16. Impacto visual e sonoro;
Desativação	09.Melhoria da qualidade física e química dos corpos hídricos; 10.Retorno do habitat de algumas espécies de fauna e flora; 11.Reocupação da biota aquática; 12.Melhoria do paisagismo da região com a possibilidade de aumento do suporte de crescimento de espécies ativas; 13.Dinamização social do espaço ecologicamente equilibrado, permitindo o ecoturismo e o lazer na região;	17. Desemprego; 18. Desativação de benfeitorias no entorno; 19. Diminuição da oferta de areia; 20. Diminuição do crescimento regional; 21. Esquecimento social da região extrativista;	09. Melhoria da qualidade física e química dos corpos hídricos; 10. Retorno do habitat de algumas espécies de fauna e flora; 11. Reocupação da biota aquática; 12. Melhoria do paisagismo da região com a possibilidade de aumento do suporte de crescimento de espécies ativas; 13. Dinamização social do espaço ecologicamente equilibrado, permitindo o ecoturismo e o lazer na região;	17. Desemprego; 18. Desativação de benfeitorias no entorno; 19. Diminuição da oferta de areia; 20. Diminuição do crescimento regional; 21. Esquecimento social da região extrativista;

Fonte: Bascompta *et al.* (2022); Galetakis e Soutana (2016); Santhosh *et al.* (2021), Shen *et al.* (2022), Asabonga *et al.*, (2016), Da e Le Billon (2022), Rentier e Cammeraat (2022) e Torres *et al.*, (2017) – Adaptado pelo Autor (2023)

APÊNDICE C – CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS MÉTODOS DE ACV

Método	Característica	Referência
Método CML 2001	<p>Criado em 1992 pelo Centro de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden (CML) como sendo um guia de referência sobre uma metodologia de avaliação de ciclo de vida.</p> <p>Com a colaboração da Organização Holandesa para Pesquisa Científica Aplicada (TNO) e com o Escritório de Combustíveis e Matérias-Primas (<i>Bureau B & G</i>) o método visa oferecer melhores práticas para indicadores de ponto médio, operacionalizando a série de padrões ISO14040. Inclui métodos recomendados para normalização, mas a ponderação não está incluída.</p> <p>O CML é baseado em uma abordagem <i>midpoint</i> que cobre todas as emissões e recursos relacionados aos impactos para os quais práticas e modelos de caracterização aceitáveis estão disponíveis. Exceto para as categorias de impacto acidificação e formação de foto-oxidantes as quais apresentam o escopo de aplicação regional para a Europa, todas as outras categorias do método apresentam um escopo global.</p>	(GUINÉE <i>et al.</i> , 2001; EC-JRC, 2010; MENDES, 2013)
Eco indicador 99	<p>Foi desenvolvido como parte da Política Integrada de Produto do Ministério Holandês de Moradia, Planejamento Especial e Ambiental (VROM) e com o objetivo de simplificar a interpretação e ponderação dos resultados. Uma das aplicações potenciais é o cálculo de escores de eco indicadores de ponto único que podem ser usados para a tomada de decisões.</p> <p>Primeira ferramenta de software de avaliação de impacto de <i>endpoint</i> que permitiu que a carga ambiental de um produto fosse expressa em uma única pontuação.</p> <p>Uma das aplicações pretendidas é o cálculo de uma única pontuação (eco indicadores) que possa ser usado no dia a dia por designers para a tomada de decisão, além do uso de uma ferramenta de ACV.</p> <p>O Eco indicador 99 aborda três grandes áreas de danos Saúde humana (DALY), qualidade do ecossistema (% de espécies que desapareceram) e recursos (MJ de energia requerida). Sendo que apresenta escopo de aplicação global para as categorias de impacto mudança climática, depleção do ozônio e consumo de recursos e para as outras categorias apresenta aplicação a nível de Europa, e para as categorias de impacto acidificação e eutrofização são baseadas em modelos com escopo de aplicação regional direcionado para a Holanda e categoria de impacto uso de terra é baseado em um modelo para aplicação na Suíça.</p> <p>Outra relevância do método é quanto a introdução na comunidade científica de ACV das abordagens DALY - <i>Disability Adjusted Life Years</i>⁴⁸, PAF – <i>Potentially Affected Fraction</i>⁴⁹ e PDF – <i>Potentially Disappeared Fraction</i>⁵⁰ e abordagem de excedente de energia</p>	(GOEDKOOP e SPRIENSMA, 2001; EC-JRC, 2010; MENDES, 2013; UNEP, 2007)
EDIP 2003	<p>Desenvolvido pelo <i>Centre for the Environmental Design of Industrial Products</i> (EDIP) na Holanda e trata-se de um método <i>midpoint</i> desenvolvido para apoiar análises ambientais durante o desenvolvimento de produtos industriais e fornecer fatores de caracterização espacialmente diferenciados.</p> <p>Apresenta escopo de aplicação global apenas para categorias de impactos globais, como aquecimento global e depleção de ozônio, e usa valores médios europeus para as demais categorias de impacto.</p>	(HAUSCHILD e POTTING, 2005; EC-JRC, 2010; MENDES, 2013)

⁴⁸ Em tradução livre: anos de vida perdidos ajustados por incapacidade.

⁴⁹ Em tradução livre: fração de espécies potencialmente afetadas.

⁵⁰ Em tradução livre: fração de espécies potencialmente desaparecidas.

	<p>Suporta as categorias clássicas de impacto relacionadas às emissões em um nível intermediário, bem como recursos. Inclui normalização e ponderação de impactos ambientais com base em metas ambientais políticas.</p> <p>A principal inovação do EDIP 2003, reside na tentativa mais consistente de incluir a modelagem de dispersão da substância e o aumento da exposição subsequente, através da inclusão de uma parte maior da cadeia de causalidade para todas as categorias de impactos não globais e através da introdução de diferenciação espacial em relação à emissão e do meio receptor.</p>	
Impact 2002	<p>O método <i>IMPact Assessment of Chemical Toxics</i> (IMPACT 2002) foi desenvolvido em colaboração com os desenvolvedores dos métodos LIME e Eco Indicator 99, sendo algumas categorias de impacto adaptadas daqueles métodos e fornece fatores de caracterização para quase 1500 substâncias</p> <p>Trata-se de um método suíço que propõe uma implementação viável de abordagem combinada <i>midpoint/endpoint</i>, ligando todos os tipos de resultados de fluxos elementares e outras intervenções através de catorze categorias <i>midpoint</i> e quatro <i>endpoint</i>.</p> <p>Esse método tem escopo de aplicação válido para a Europa e as categorias de impacto <i>midpoint</i> abordadas são: toxicidade humana, efeitos respiratórios, radiação ionizante, depleção de ozônio, formação de ozônio fotoquímico, eco toxicidade aquática, eco toxicidade terrestre, acidificação aquática, eutrofização aquática, acidificação e eutrofização terrestre, ocupação do solo, aquecimento global, uso de energia renovável e extração mineral, enquanto que as categorias <i>endpoint</i> são: saúde humana, qualidade dos ecossistemas, mudança climática e recursos.</p>	(JOLLIET <i>et al.</i> , 2003; EC-JRC, 2010; MENDES, 2013)
ReCiPe	<p>É uma continuação dos métodos Eco Indicator 99 e CML 2002. Ele integra a abordagem de ponto médio e ponto final em uma estrutura consistente e quase todas as categorias de impacto foram atualizadas.</p> <p>Desenvolvido em 2000, em Brighton, após conferências da Sociedade Internacional para a Química e Toxicologia Ambiental (SETAC) onde cerca de 50 especialistas em ACV discutiram sobre a compreensão dos pontos fortes e fracos dos métodos <i>midpoint e endpoint</i> dos métodos ACV e concluíram que havia a necessidade da criação de uma estrutura comum, na qual ambos os indicadores pudessem ser usados, de maneira mais ampla, nascendo assim, os primeiros princípios dos métodos ReCiPe.</p> <p>Para todas as categoriais de emissões, princípios e escolhas semelhantes são usados e todas as categoriais de impacto da mesma área de proteção têm a mesma unidade de indicador. Além do mais esses métodos tem escopo de aplicação global para as categorias de impacto mudança climática, destruição da camada de ozônio e consumo de recursos escopo de aplicação válido para a Europa para as demais categoriais de impacto.</p>	(GOEDKOOPE <i>et al.</i> , 2009; EC-JRC, 2010; MENDES, 2013)
TRACI	<p>Foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) Norte Americana como um método de ponto médio que representa as condições ambientais nos EUA, dimensionado também para encontrar uma aplicação mais ampla na Prevenção da Poluição e em medidas de sustentabilidade para os Estados Unidos.</p> <p>Trata-se de um método <i>midpoint</i> que representa as condições ambientais dos Estados Unidos como um todo ou por estado. O método apresenta escopo de aplicação global para as categoriais depleção de ozônio e aquecimento global e escopo de aplicação válido para a América do Norte para acidificação, eutrofização e formação de fumaça e válido para os Estados Unidos para as categorias relacionadas à saúde humana e eco toxicidade.</p>	(JANE <i>et al.</i> , 2003; EC-JRC, 2010; MENDES, 2013; UNEP, 2007)
ILCD	<p>O Manual ILCD consiste em uma série de documentos técnicos que orientam a prática da ACV na indústria e no governo. Estes documentos cobrem todos os passos necessários para a realização de qualquer tipo de ACV, incluindo a coleta e modelagem dos dados necessários para cada avaliação.</p>	(WOLF <i>et al.</i> , 2012; SOMBRIO, 2015; EUROPEAN COMMISSION, 2010)

	<p>A metodologia do ILCD divide os estudos de ACV em três situações distintas de acordo com as possíveis consequências da divulgação do resultado do estudo.</p> <ul style="list-style-type: none">- Situação A, quando os resultados não interferem de forma ampla e não trazem grandes consequências no contexto em que o produto está inserido;- Situação B, quando, ao contrário da situação A, os resultados trazem grandes consequências; e- Situação C1 e C2, quando os resultados servem como registro de informação sem consequências adicionais.	
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

APÊNDICE D – RESUMO DOS ESTUDOS PUBLICADOS SOBRE PÓ DE PEDRA/BRITA NO CONCRETO

Ref.	Agregados	Aglutinantes e aditivos	Testes de concreto realizados no estudo	Propriedades analisadas
(SHEN <i>et al.</i> , 2022)	pó de pedra/brita de granito (0-30%), cinzas volantes, areia natural e brita.	Cimento Portland comum de grau 43 (IS), superplastificante (ASTM Tipo I)	Resistência à penetração de cloreto, resistência à compressão, resistência ao congelamento-descongelamento, J-Ring e slump test.	SL, S, C
(OMAR <i>et al.</i> , 2012)	pó de pedra/brita calcária (0-75%), pó de pedra/brita de mármore (5-15%), areia natural e brita.	Cimento Portland comum de grau 53 (IS), superplastificante (ASTM Tipo II)	Resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à tração, módulo de elasticidade, permeabilidade e slump test.	CH, P, SL, S, F, T, M, WA
(MUNDRA <i>et al.</i> , 2016)	pó de pedra/brita de granito (0-100%), cinzas volantes (0-35%), areia natural e brita.	Cimento Portland comum de grau 43 (IS), superplastificante (ASTM Tipo I)	Resistência à compressão, resistência à flexão e teste de slump test.	P, SL, S, F
(ABD ELMOATY, 2013)	areia natural, brita e pó de pedra/brita de granito (0-15%)	ASTM Tipo I, aditivo redutor de água (CEM I 42,5N)	Resistência à compressão, teste de célula de corrosão, microestrutura, tempo de endurecimento e expansão da pasta de cimento, resistência à tração, porosidade e XRD.	P, CH
(BACARJI <i>et al.</i> , 2013)	pó de pedra/brita de mármore e granito (0-20%).	Cimento Portland brasileiro CII F-32 (CEM II 32,5/ ASTM Tipo II)	Resistência à compressão, microestrutura, módulo de elasticidade, teste de slump test e absorção de água.	CH
(KARTINI <i>et al.</i> , 2014)	pó de pedra/brita de granito (0-15%), areia natural e brita.	CEM I, superplastificante (ASTM Tipo I)	Resistência à compressão, martelo de Schmidt, slump test, absorção de água e permeabilidade à água.	P, CH
(VIJAYALAKSHMI <i>et al.</i> , 2013)	Pó de granito (0-25%), areia natural e brita.	CEM-II (ASTM Tipo II)	Ataque ácido, profundidade de carbonatação, resistência à compressão, teste de resistividade elétrica, resistência à flexão, teste rápido de permeabilidade ao cloreto, slump test e resistência à tração.	P, SL, S, F, T, U, C, AA
(KRISHNAMOORTHY; KUMAR, 2013)	pó de pedra/brita de granito (0-100%), areia natural, cinzas volantes (10-20%) e brita.	ASTM Tipo I, superplastificante (CEM I 42,5N)	Fator de compactação, resistência à compressão, resistência à flexão, slump test e resistência à tração.	P
(LOHANI <i>et al.</i> , 2013)	pó de pedra/brita de granito (0-50%), areia e brita.	ASTM Tipo I (CEM I 42,5N)	Fator de compactação, resistência à compressão, resistência à flexão, módulo de elasticidade, resistência a soluções químicas, slump test, resistência à tração e absorção de água.	SL, S, C, T, F, M, WA, AA
(UKPATA; EPHRAIM; AKEKE, 2012)	Laterita (0-100%), pó de pedra/brita de granito (0-100%) e brita.	CEM I (ASTM Tipo I)	Fator de compactação, resistência à compressão e slump test.	P

(RAY <i>et al.</i> , 2022)	pó de pedra/brita (20%-50%), fibra de nylon (0,25%-0,75%), areia natural e brita.	Cimento Portland Calcário (PLC) (ASTM Tipo I)	Resistência à compressão, slump test e resistência à tração.	SL, S, P
(KANKAM <i>et al.</i> , 2017)	pó de pedra/brita (0-100%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 53 (IS), superplastificante. (ASTM Tipo II)	Resistência à compressão, módulo de elasticidade estático e curvas tensão-deformação.	P, M, S,
(GUPTA <i>et al.</i> , 2019)	pó de pedra/brita de granito (0-100%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 43 (IS) (ASTM Tipo I)	Resistência à abrasão, resistência à compressão, profundidade de desgaste, resistência à flexão, resistência ao impacto, módulo de elasticidade, slump test e penetração de água.	S, F, DW, W, M, P
(GUPTA <i>et al.</i> , 2021)	pó de pedra/brita (0%-100%), resíduos de agregados cerâmicos (0%-20%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 43, superplastificante (ASTM Tipo I)	Resistência à compressão, resistência à flexão e resistência ao cisalhamento.	S, P
(TAIWO <i>et al.</i> , 2022)	pó de pedra/brita (0-25%), cinza de casca de arroz (0-25%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 43 (IS) (ASTM Tipo I)	Resistência à compressão, Espectrômetro de infravermelhos com transformada de Fourier (FTIR), Microscópio eletrônico de varredura (SEM) e Fluorescência de raios X (XRF).	P, CH, S
(TEMIZ; KANTARCI, 2014)	pó de pedra/brita calcária (5-35%), pó de pedra/brita calcítica (5-35%), areia natural e cinzas volantes (5-30%).	CEM II 32,5/B-M (ASTM Tipo II)	Resistência à abrasão, resistência à compressão, durabilidade em soluções químicas, microestrutura, tempo de endurecimento, peso unitário, expansão de volume e permeabilidade à água.	S, DW, W, AA
(KANELLOPOULOS <i>et al.</i> , 2014)	areia natural, brita e pó de pedra/brita calcária (5-20%).	CEM I 32,5, CEM II 42,5, superplastificante (ASTM Tipo I/II)	Resistência à abrasão, permeabilidade a íons cloretos, resistência à compressão, resistência à flexão, porosidade e slump test	P
(GEHLOT <i>et al.</i> , 2021)	pó de pedra/brita (0-100%), areia natural e brita.	Cimento de calcário Portland	Resistência à compressão, resistência à flexão e slump test.	P, SL, S, F
(RAY <i>et al.</i> , 2021)	pó de pedra/brita de granito (100%), fibra de juta (0,10-0,15%), areia natural e brita.	CEM-II (ASTM Tipo II)	Resistência à compressão, slump test, resistência à tração por compressão, superfície de resposta estatística.	SL, P, S, T
(SHYAM PRAKASH; RAO, 2016)	pó de pedra/brita (0-30%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 53 (IS) (ASTM Tipo II)	Resistência à compressão com diferentes taxas de água-cimento.	S, P
(PALANISAMY <i>et al.</i> , 2022)	Areia artificial (75%), pó de resíduos de mármore (25%), pó de pedra/brita de granito (25%), cinzas volantes (35%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 43 (IS), superplastificante (ASTM Tipo I)	Resistência à compressão, resistência à flexão, slump test e resistência à tração.	P, SL, S, T, F

(INGALKAR; HARLE, 2017)	pó de pedra/brita (0-100%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 53 (IS) (ASTM Tipo II)	Resistência à compressão e slump test.	SL, S, P
(SINGH <i>et al.</i> , 2016)	pó de pedra/brita de granito (0-70%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 43 (IS), superplastificante (ASTM Tipo I)	Resistência à abrasão, carbonatação, resistência à compressão, corrosão, resistência à flexão, microscopia eletrônica de varredura, slump test, análise termogravimétrica e absorção de água.	P, CH, S, SL, F, WA, CD, DW
(BINICI; AKSOGAN, 2018)	pó de pedra/brita de granito (10-100%), pó de pedra/brita de mármore (10-100%), basalto granulado (10-100%), areia natural e brita.	CEM I 42,5 (ASTM Tipo I)	Permeabilidade à água capilar, resistência à compressão, propriedades de congelamento-descongelamento, resistência à abrasão e resistência aos sulfatos.	P, WA, S, DW, U
(RATHORE <i>et al.</i> , 2020)	pó de pedra/brita de granito (0-25%), areia natural e brita.	CEM-II (ASTM Tipo II), superplastificante	Resistência à compressão, resistência à flexão, slump test, resistência à tração e velocidade de impulso ultrassônico	P, U, S, T, F
(SINGH <i>et al.</i> , 2017)	pó de pedra/brita de granito (0-70%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 43 (IS) (ASTM Tipo I)	Resistência à abrasão, ataque ácido, carbonatação, penetração de cloretos, resistência à compressão, resistência à flexão por corrosão, análise da microestrutura (microscopia eletrônica de varredura - MEV), slump test, permeabilidade à água e difração de raios X em pó (DRX).	SL, S, F, DW, W, CD, D, P
(BALAMURUGAN; PERUMAL, 2013)	pó de pedra/brita (0-40%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 43 (IS), superplastificante (ASTM Tipo I)	Resistência à compressão e slump test.	SL, S
(KHAN; CHANDRAKAR, 2017)	pó de pedra/brita (0-100%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 53 (IS) (ASTM Tipo II)	Resistência à compressão e slump test	SL, S, P
(AKHTAR <i>et al.</i> , 2021)	pó de pedra/brita (0%-100%), borracha fragmentada (0%-20%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 43 (ASTM Tipo I)	Análise química pH (espectrômetro FTIR), resistência à compressão e relação da resistência à compressão e a temperatura.	S, P
(JAGADEESH <i>et al.</i> , 2016)	pó de pedra/brita (0%-50%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 53 (IS), superplastificante. (ASTM Tipo II)	Ensaio do fator de compactação, resistência à compressão e slump test.	SL, S, P
(MOGRE; PARBAT; BAJAD, 2013)	pó de pedra/brita (0%-100%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 43 (ASTM Tipo I)	Resistência à compressão, slump test e resistência à tração por compressão.	SL, S, P

(KUMAR <i>et al.</i> , 2020)	pó de pedra/brita (20%-30%), resíduos de areia de fundição (70%-80%) e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 43 (ASTM Tipo I)	Resistência à compressão, resistência à flexão, slump test e resistência à tração.	P
(DEVADASS, 2019)	pó de pedra/brita (0-50%), polímero (0,3/0,4%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 53 (IS) (ASTM Tipo II)	Resistência à compressão e resistência à tração.	P
(ALIYU <i>et al.</i> , 2020)	pó de pedra/brita (0-35%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 43 (ASTM Tipo I)	Efeito ácido, resistência à compressão, slump test e absorção de água.	SL, S, P, WA, CH,
(OPARA <i>et al.</i> , 2018)	pó de pedra/brita (100%), areia natural e brita.	CEM I 42,5N (ASTM Tipo I)	Resistência à compressão e slump test.	SL, S, P
(JAMALE <i>et al.</i> , 2015)	pó de pedra/brita (0-75%), cinzas volantes (0-20%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 53 (IS), superplastificante (ASTM Tipo II)	Resistência à compressão, resistência à flexão, slump test e resistência à tração.	SL, S, P, T, F
(SELVAN; VIJAYA, 2015)	Areia artificial (0-100%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 43 (IS) (ASTM Tipo I)	Ataque ácido, permeabilidade aos cloretos, resistência à compressão, resistência à flexão, slump test, resistência à tração e permeabilidade à água.	P, SL, S, F, T, W, AA
(BORIGARLA <i>et al.</i> , 2022)	pó de pedra/brita (0-100%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 53 (IS), superplastificante. (ASTM Tipo II)	Resistência à compressão, resistência à flexão, slump test, temperatura e resistência à tração.	P, SL, S, F, T
(MOLAY <i>et al.</i> , 2019)	pó de pedra/brita de gnaiss (0- 5%), pó de pedra/brita de basalto (0-5%), areia natural e brita.	CEM II/A 42.5 R (ASTM Tipo II)	Resistência à compressão, perda de massa sob alta temperatura, aspeto físico sob alta temperatura, resistência à tração, variação de volume sob alta temperatura e absorção de água.	P, S, T, WA
(NADIMALLA <i>et al.</i> , 2018)	Areia artificial (0-100%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 53 (IS) (ASTM Tipo II)	Resistência à compressão, resistência à flexão, slump test e resistência à tração.	P, SL, S, F, T
(VELUMANI; MANIKANDAN, 2021)	Resíduos de siderurgia (0-100%), pó de pedra/brita de granito (0- 100%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 43 (IS) (ASTM Tipo I)	Densidade aparente, resistência à compressão e absorção de água.	P, S, WA
(VARDHAN <i>et al.</i> , 2019)	pó de pedra/brita de mármore (0- 60%), areia natural e brita.	pó de pedra/brita de mármore (0-60%), areia natural e brita. (ASTM Tipo I)	Resistência à compressão, secagem e retração por deformação, análise microestrutural, slump test e espectros de difração de raios X (XRD).	P, CH, SL, S
(JHA <i>et al.</i> , 2020)	pó de pedra/brita (0-60%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 43 (IS), superplastificante. (ASTM Tipo I)	Ataque ácido, resistência à compressão, slump test, resistência à tração e absorção de água.	P, S, SL, AA, T, WA

(UPADHYAYA <i>et al.</i> , 2018)	pó de pedra/brita de granito (0-40%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 43 (IS) (ASTM Tipo I)	Resistência à compressão, análise microestrutural, ensaio de arrancamento e slump test.	P, S, SL
(SHAMIM; SRIVASTAVA; AGARWAL, 2014)	pó de pedra/brita (0-50%), areia natural e brita.	Cimento Portland Pozzolana (ASTM Tipo I)	Resistência à compressão, resistência à flexão e slump test.	P, SL, S, F
(UPADHYAYA <i>et al.</i> , 2020)	pó de pedra/brita de granito (0-20%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 43 (IS) (ASTM Tipo I)	Resistência à compressão, ductilidade, rigidez à flexão da viga de betão armado, resistência à flexão, características carga-deflexão, padrão de fissuras e slump test.	P
(FAYAZ <i>et al.</i> , 2017)	pó de pedra/brita (0-100%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 43 (IS) (ASTM Tipo I)	Ataque ácido, resistência à compressão, resistência à flexão, slump test e resistência à tração.	P, S, SL, F, T, AA
(SINGH <i>et al.</i> , 2016b)	pó de pedra/brita de granito (0-50%), areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 43 (IS), superplastificante (ASTM Tipo I)	Resistência à abrasão, resistência à compressão, resistência à flexão, microscópio eletrônico de varredura (MEV), slump test, absorção de água e espectros de difração de raios X (XRD).	P, CH, S, SL, F, DW, WA
(PROKOPSKI <i>et al.</i> , 2020)	pó de pedra/brita de granito (0-50%), areia natural e brita.	CEM I 32,5 R e CEM I 42,5 R, superplastificantes (ASTM Tipo I/II)	Resistência à compressão, resistência à flexão, microscopia eletrônica de varredura, slump test, resistência à tração e absorção de água.	P, S, SL, WP, WA
(OORKALAN <i>et al.</i> , 2020)	pó de pedra/brita (0-75%), fibra de coco (5%), cinzas volantes, areia natural e brita.	Cimento Portland ordinário de grau 53 (IS) (ASTM Tipo II)	Resistência à compressão, resistência à flexão, slump test e resistência à tração.	P, S, SL

APÊNDICE E – MATRIZ DE LEOPOLD ADAPTADA (SEM DESTINAÇÃO)

AÇÕES IMPACTANTES		Elementos Naturais e Humanos													
		Meio Físico						Meio Biótico					Meio Antrópico		
		Solos		Água			Ar	Flora		Fauna			Saúde	Social	
		Erosões / Assoreamento	Características Físicas	Superficial	Qualidade	Fluxo / Recarga	Qualidade (gases, particulados)	Qualidade da Cobertura Vegetal	Arborização	Perda da Biodiversidade	Descaracterização do Habitat	Peixes e Moluscos	Saúde Ocupacional	Geração de Emprego e Renda	Vizinhança e Valoração
TRANSFORMAÇÃO DO ESPAÇO E CONSTRUÇÃO	Modificação de Habitat	-11	-10	-7	-10	-8	-11	-10	-10	-7	-10	-9	-10	7	-7
	Alteração da Cobertura do Solo (decapeamento / acessos)	-10	-10	-9	-9	-9	-10	-10	10	-9	-9	-9	-10	10	9
	Detonações na Perfuração	-10	-11	-5	-5	-5	-8	-9	-8	-10	-10	0	-7	8	-8
	Escavações de Superfície (lavra em bancada)	-10	-10	-7	-7	-6	-5	-6	0	-9	-7	0	0	8	-8
PROCESSOS	Carregamento e Transporte	-10	-8	0	0	0	-10	-8	-7	-9	-10	0	10	9	9
	Britagem (Ruído e Vibração)	0	0	0	0	0	0	0	0	-8	-8	0	-9	0	-9
	Serviços de Manutenção (oficinas / frotas de veículos / maquinário)	0	5	-7	-7	0	5	7	-7	0	0	-6	7	7	7
DISPOSIÇÃO E TRATAMENTO DE RESÍDUOS	Disposição dos Rejeitos	-8	-8	-7	-9	-7	-6	-7	-7	-7	-7	-9	-8	-8	-8
	Emissão de gases de efeito estufa	0	0	0	0	-7	-12	-11	-11	-11	-11	-9	-9	0	-6

APÊNDICE F – MATRIZ DE LEOPOLD ADAPTADA (COM DESTINAÇÃO)

AÇÕES IMPACTANTES	Elementos Naturais e Humanos														
	Meio Físico						Meio Biótico						Meio Antrópico		
	Solos		Água			Ar	Flora		Fauna			Saúde	Social		
	Erosões / Assoreamento	Características Físicas	Superficial	Qualidade	Fluxo / Recarga	Qualidade (gases, particulados)	Qualidade da Cobertura Vegetal	Arborização	Perda da Biodiversidade	Descaracterização do Habitat	Peixes e Moluscos	Saúde Ocupacional	Geração de Emprego e Renda	Vizinhança e Valoração	
TRANSFORMAÇÃO DO ESPAÇO E CONSTRUÇÃO	Modificação de Habitat	-11	-10	-7	-9	-8	8	8	-8	-7	8	8	8	5	7
	Alteração da Cobertura do Solo (decapeamento / acessos)	7	7	-9	-9	-9	7	7	7	-9	-9	-9	7	7	9
	Detonações na Perfuração	-10	-11	-5	-5	-5	-8	-9	-8	-10	-10	0	-7	8	-8
	Escavações de Superfície (lavra em bancada)	-10	-10	-7	-7	-6	-5	-6	0	-9	-7	0	0	8	-8
PROCESSOS	Carregamento e Transporte	-10	-8	0	0	0	-10	-8	-7	-9	-10	0	10	9	9
	Britagem (Ruído e Vibração)	0	0	0	0	0	0	0	0	-8	-8	0	-9	0	-9
	Serviços de Manutenção (oficinas / frotas de veículos / maquinário)	0	5	-7	-7	0	5	7	-7	0	0	-6	7	7	7
DISPOSIÇÃO E TRATAMENTO DE RESÍDUOS	Disposição dos Rejeitos	6	6	7	7	7	-6	-7	-7	-7	7	7	7	-7	-7
	Emissão de gases de efeito estufa	0	0	0	0	-7	9	8	8	-11	-11	-9	6	0	-6

APÊNDICE G – QUANTIDADE, FONTES E INFORMAÇÕES DE QUALIDADE

Processo Principal	Tipo de fluxo	Fluxo	Quantidade	Fonte	DQI				
					Representatividade				
					FC	CTP	CG	CTE	MC
Cimento (1 kg)	Recursos/materiais	Clínquer	0,95 kg	NBR 16697 (ABNT, 2018)	4	1	3	2	4
		Gesso	0,05 kg		4	1	3	2	4
	Energia	Eletricidade, voltagem média	0,111 kWh	(EPE, 2020) (clínquer incluso)	4	1	3	2	1
	Emissões	Particulados, PPM	0,05 g	(CONAMA, 2020)	2	1	3	2	1
Clínquer (1 kg)	Recursos/materiais	Calcário	1,4 kg	(CARVALHO, 2009)	5	3	3	2	5
		Argila	0,2 kg		5	3	3	2	5
		Areia natural	0,10 kg		5	3	3	2	5
		Minério de ferro	0,03 kg		5	3	3	2	5
	Energia	Coque de petróleo (33 MJ/ kg)	0,09975 kg	(HORA <i>et al.</i> , 2021)	4	1	3	3	1
		Carvão vegetal (31 MJ/kg)	0,00368 kg		4	1	3	3	1
		Carvão mineral (20 MJ/kg)	0,00592 kg		4	1	3	3	1
		Lenha (15 MJ/kg)	0,00493 kg		4	1	3	3	1
		Diesel	0,0406 MJ		4	1	3	3	1
		Natural Gás (36 MJ/m ³)	0,000770 m ³		4	1	3	3	1
		Óleo combustível (40MJ/kg)	0,000380 kg		4	1	3	3	1
	Emissões	Eletricidade	Incl. processo do cimento		-	-	-	-	-
		Dióxido de carbono	0,536 kg	(MCTIC, 2016)	4	2	3	2	1
Monóxido de carbono		0,47 kg	(KELLENBERGER <i>et al.</i> , 2007)	1	4	5	5	5	
Óxidos de nitrogênio		2,17 kg	(VIEIRA <i>et al.</i> , 2018)	2	2	3	2	4	
Particulados, PPM		0,16 g	(VIEIRA <i>et al.</i> , 2018)	2	2	3	2	4	
Óxidos de enxofre		0,40 g	(CONAMA, 2020)	2	1	3	2	1	
areia natural (1 kg)	Recursos/materiais	Areia (quartzo)	1 kg	(CASTRO <i>et al.</i> , 2015)	5	3	3	2	5
		Draga de sucção (rio – cap. 1.330 t/ano)	1 kg	(IDEMAT, 2023; PEF, 2019)	4	3	3	2	5
	Refino/peneiramento	Eletricidade, voltagem média	0,00052 kWh	(LIM <i>et al.</i> , 2017b)	2	1	5	4	5
		Eletricidade, voltagem média	0,00013 kWh	(CASTRO <i>et al.</i> , 2015)	3	2	5	5	5
	Energia	Diesel	0,04991 MJ	(HORA <i>et al.</i> , 2021)	4	1	3	3	1
Emissões	Particulados (<2,5 µm)	0,0042 g	(OCHARÁN e LIMA, 2019)	4	1	3	3	1	
Brita (1 kg)	Recursos/materiais	Granito	1 kg	(VIEIRA <i>et al.</i> , 2018)	4	2	3	2	4
		Água	0,0000317 m ³	(CASTRO <i>et al.</i> , 2015)	5	3	3	2	5
		Detonação	0,0773g	(KELLENBERGER <i>et al.</i> , 2007; PEF, 2019)	2	4	5	4	5
	Energia	Eletricidade, voltagem média (BR)	0,0072 kWh	(CASTRO <i>et al.</i> , 2015)	5	3	3	5	5
		Diesel	0,02721 MJ	(HORA <i>et al.</i> , 2021)	4	1	3	3	1
Emissões	Particulados (≤10µm)	0,112 g	(KELLENBERGER <i>et al.</i> , 2007)	5	4	5	4	5	

		Particulados (>2,5 µm; <10 µm)	0,040 g		5	4	5	4	5
		Particulados (<2,5 µm)	0,008 g		5	4	5	4	5
		Água	0,0205 g	(HORA <i>et al.</i> , 2021)	4	1	3	3	1
		Dióxidos de nitrogênio	0,0014 kg		4	1	3	3	1
		Dióxidos de enxofre	0,0046 kg	(OCHARÁN e LIMA, 2019)	4	1	3	3	1
		Óxidos de nitrogênio	0,0117 kg		4	1	3	3	1
	Aterro de (como resíduo inerte)	pó de pedra/brita	0,20 kg	(VENKATA, 2021; PATEL <i>et al.</i> , 2013; VIJAYALAKSHMI <i>et al.</i> , 2013)	4	1	5	4	5
	Recursos/materiais	pó de pedra/brita	0,20 kg	(VENKATA, 2021; PATEL <i>et al.</i> , 2013; VIJAYALAKSHMI <i>et al.</i> , 2013)	4	1	5	4	5
	Coleta do resíduo	Transporte	1,158848 kg.km	(NRE, 2011)	2	4	5	5	4
		Eletricidade, voltagem média	0,00052 kWh	(LIM <i>et al.</i> , 2017b)	3	2	5	5	5
	Preparo (pré peneiramento)	Água de lavagem	2,64 kg	(Internacional EPD, 2017)	3	2	5	5	5
		Lavagem (40 t/h)	0,00012 kWh		4	2	5	4	5
		Sucção de finos (6 bags – 40t/h)	0,0005 kWh		4	2	5	5	5
	Peneiramento e seleção	Eletricidade, voltagem média	0,00025 kWh	Estimado, (LIM <i>et al.</i> , 2017b; PRADHAN <i>et al.</i> , 2019)	4	2	5	5	5
	Estoque (carregamento em caminhão)	Diesel	0,013713 MJ		4	2	5	4	5
		Particulados (<2,5 µm)	0,008 g	(KELLENBERGER <i>et al.</i> , 2007; IDEMAT, 2023)	5	1	5	4	4
	Emissões	Dióxidos de nitrogênio	0,00028 kg		4	2	5	4	5
		Dióxidos de enxofre	0,00092 kg	(VENKATA, 2021; PATEL <i>et al.</i> , 2013; VIJAYALAKSHMI <i>et al.</i> , 2013;	4	2	5	4	5
		Óxidos de nitrogênio	0,00234 kg	OCHARÁN e LIMA, 2019)	4	2	5	4	5
	Central de dosagem (1m ³)	Eletricidade, voltagem média (BR)	4,36 kWh	(KELLENBERGER <i>et al.</i> , 2007)	1	4	5	5	5
		Diesel	22,7MJ		1	4	5	5	5
	Emissões	Água	0,03708 kg	(HORA <i>et al.</i> , 2021)	4	1	3	3	1
MÉDIA					3	2	4	3	3

Nota: FC-fluxo de confiabilidade; CT_P-correlação do tempo; CG-correlação geográfica; CT_E-correlação tecnológica; MC-método de coleta de dados

APÊNDICE H – COMPOSIÇÕES DE CUSTO AUXILIARES

Composições Analíticas com Preço Unitário	Bancos	B.D.I.	Encargos Sociais
MÉDIA GERAL DE INSUMOS	SINAPI - 2023 - GERAL	25,0%	Não Desonerado: Horista: VÁRIAVEL POR ESTADO Mensalista: VÁRIAVEL POR ESTADO

Composições Analíticas com Preço Unitário

Composições Auxiliares - BETONEIRA

	Código	Banco	Descrição	Tipo	Und	Quant.
Composição	88831	SINAPI	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL DE 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV, SEM CARREGADOR - CHI DIURNO. AF_10/2014	CHOR - CUSTOS HORÁRIOS DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	CHI	1,0000000
Composição Auxiliar	88826	SINAPI	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL DE 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV, SEM CARREGADOR - DEPRECIAÇÃO. AF_10/2014	CHOR - CUSTOS HORÁRIOS DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	H	1,0000000
Composição Auxiliar	88827	SINAPI	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL DE 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV, SEM CARREGADOR - JUROS. AF_10/2014	CHOR - CUSTOS HORÁRIOS DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	H	1,0000000

	Código	Banco	Descrição	Tipo	Und	Quant.
--	--------	-------	-----------	------	-----	--------

Composição	88830	SINAPI	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL DE 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV, SEM CARREGADOR - CHP DIURNO. AF_10/2014	CHOR - CUSTOS HORÁRIOS DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	CHP	1,0000000
Composição Auxiliar	88829	SINAPI	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL DE 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV, SEM CARREGADOR - MATERIAIS NA OPERAÇÃO. AF_10/2014	CHOR - CUSTOS HORÁRIOS DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	H	1,0000000
Composição Auxiliar	88828	SINAPI	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL DE 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV, SEM CARREGADOR - MANUTENÇÃO. AF_10/2014	CHOR - CUSTOS HORÁRIOS DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	H	1,0000000
Composição Auxiliar	88826	SINAPI	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL DE 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV, SEM CARREGADOR - DEPRECIAÇÃO. AF_10/2014	CHOR - CUSTOS HORÁRIOS DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	H	1,0000000
Composição Auxiliar	88827	SINAPI	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL DE 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV, SEM CARREGADOR - JUROS. AF_10/2014	CHOR - CUSTOS HORÁRIOS DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	H	1,0000000

	Código	Banco	Descrição	Tipo	Und	Quant.
Composição	88826	SINAPI	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL DE 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV, SEM CARREGADOR - DEPRECIAÇÃO. AF_10/2014	CHOR - CUSTOS HORÁRIOS DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	H	1,0000000
Insumo	00010535	SINAPI	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELETRICO TRIFASICO 220/380 V POTENCIA 2 CV, SEM CARREGADOR	Equipamento	UN	0,0000640

	Código	Banco	Descrição	Tipo	Und	Quant.
Composição	88827	SINAPI	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL DE 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV, SEM CARREGADOR - JUROS. AF_10/2014	CHOR - CUSTOS HORÁRIOS DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	H	1,0000000
Insumo	00010535	SINAPI	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELETRICO TRIFASICO 220/380 V POTENCIA 2 CV, SEM CARREGADOR	Equipamento	UN	0,0000076

	Código	Banco	Descrição	Tipo	Und	Quant.
Composição	88828	SINAPI	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL DE 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV, SEM CARREGADOR - MANUTENÇÃO. AF_10/2014	CHOR - CUSTOS HORÁRIOS DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	H	1,0000000
Insumo	00010535	SINAPI	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELETRICO TRIFASICO 220/380 V POTENCIA 2 CV, SEM CARREGADOR	Equipamento	UN	0,0000600

	Código	Banco	Descrição	Tipo	Und	Quant.
Composição	88829	SINAPI	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL DE 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV, SEM CARREGADOR - MATERIAIS NA OPERAÇÃO. AF_10/2014	CHOR - CUSTOS HORÁRIOS DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	H	1,0000000
Insumo	00002705	SINAPI	ENERGIA ELETRICA ATE 2000 KWH INDUSTRIAL, SEM DEMANDA	Material	KWH	1,2500000

Composições Auxiliares - OPERADOR DE BETONEIRA

	Código	Banco	Descrição	Tipo	Und	Quant.
Composição	88377	SINAPI	OPERADOR DE BETONEIRA ESTACIONÁRIA/MISTURADOR COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	SEDI - SERVIÇOS DIVERSOS	H	1,0000000
Composição Auxiliar	95389	SINAPI	CURSO DE CAPACITAÇÃO PARA OPERADOR DE BETONEIRA ESTACIONÁRIA/MISTURADOR (ENCARGOS COMPLEMENTARES) - HORISTA	SEDI - SERVIÇOS DIVERSOS	H	1,0000000
Insumo	00037370	SINAPI	ALIMENTACAO - HORISTA (COLETADO CAIXA)	Outros	H	1,0000000
Insumo	00043488	SINAPI	EPI - FAMILIA OPERADOR ESCAVADEIRA - HORISTA (ENCARGOS COMPLEMENTARES - COLETADO CAIXA)	Equipamento	H	1,0000000
Insumo	00037372	SINAPI	EXAMES - HORISTA (COLETADO CAIXA)	Outros	H	1,0000000
Insumo	00043464	SINAPI	FERRAMENTAS - FAMILIA OPERADOR ESCAVADEIRA - HORISTA (ENCARGOS COMPLEMENTARES - COLETADO CAIXA)	Equipamento	H	1,0000000
Insumo	00037666	SINAPI	OPERADOR DE BETONEIRA ESTACIONARIA / MISTURADOR	Mão de Obra	H	1,0000000
Insumo	00037373	SINAPI	SEGURO - HORISTA (COLETADO CAIXA)	Taxas	H	1,0000000
Insumo	00037371	SINAPI	TRANSPORTE - HORISTA (COLETADO CAIXA)	Serviços	H	1,0000000

	Código	Banco	Descrição	Tipo	Und	Quant.
Composição	95389	SINAPI	CURSO DE CAPACITAÇÃO PARA OPERADOR DE BETONEIRA ESTACIONÁRIA/MISTURADOR (ENCARGOS COMPLEMENTARES) - HORISTA	SEDI - SERVIÇOS DIVERSOS	H	1,0000000
Insumo	00037666	SINAPI	OPERADOR DE BETONEIRA ESTACIONARIA / MISTURADOR	Mão de Obra	H	0,0059000

Composições Auxiliares - SERVENTE

	Código	Banco	Descrição	Tipo	Und	Quant.
Composição	88316	SINAPI	SERVENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	SEDI - SERVIÇOS DIVERSOS	H	1,0000000
Composição Auxiliar	95378	SINAPI	CURSO DE CAPACITAÇÃO PARA SERVENTE (ENCARGOS COMPLEMENTARES) - HORISTA	SEDI - SERVIÇOS DIVERSOS	H	1,0000000
Insumo	00037370	SINAPI	ALIMENTACAO - HORISTA (COLETADO CAIXA)	Outros	H	1,0000000
Insumo	00043491	SINAPI	EPI - FAMILIA SERVENTE - HORISTA (ENCARGOS COMPLEMENTARES - COLETADO CAIXA)	Equipamento	H	1,0000000
Insumo	00037372	SINAPI	EXAMES - HORISTA (COLETADO CAIXA)	Outros	H	1,0000000
Insumo	00043467	SINAPI	FERRAMENTAS - FAMILIA SERVENTE - HORISTA (ENCARGOS COMPLEMENTARES - COLETADO CAIXA)	Equipamento	H	1,0000000
Insumo	00037373	SINAPI	SEGURO - HORISTA (COLETADO CAIXA)	Taxas	H	1,0000000
Insumo	00006111	SINAPI	SERVENTE DE OBRAS	Mão de Obra	H	1,0000000
Insumo	00037371	SINAPI	TRANSPORTE - HORISTA (COLETADO CAIXA)	Serviços	H	1,0000000

	Código	Banco	Descrição	Tipo	Und	Quant.
Composição	95378	SINAPI	CURSO DE CAPACITAÇÃO PARA SERVENTE (ENCARGOS COMPLEMENTARES) - HORISTA	SEDI - SERVIÇOS DIVERSOS	H	1,0000000
Insumo	00006111	SINAPI	SERVENTE DE OBRAS	Mão de Obra	H	0,0151000

APÊNDICE I – LEVANTAMENTO DE CUSTO DA AREIA MÉDIA LAVADA E PÓ DE PEDRA/BRITA (SINAPI E SICRO ANO 2019 A 2023)

Areia - 2019 (SINAPI)											MÉDIA TOTAL		R\$60,16	
0000370 - AREIA MÉDIA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)													MÉDIA REGIONAL GERAL	
REGIÃO	jan/19	fev/19	mar/19	abr/19	mai/19	jun/19	jul/19	ago/19	set/19	out/19	nov/19	dez/19	MÉDIA	Coef. Variação
Média Norte	57,79	59,04	59,47	58,90	60,64	59,87	58,95	59,64	61,11	63,57	62,36	61,14	60,21	10,53%
Média Nordeste	53,89	55,33	56,38	57,16	57,77	58,55	59,49	60,00	60,14	61,20	60,44	60,39	58,40	
Média Centro-Oeste	67,19	69,06	68,39	69,14	68,86	68,88	68,34	68,36	68,11	69,15	72,00	74,25	69,31	
Média Sudeste	52,82	52,82	52,82	51,40	50,56	49,31	51,40	51,40	51,40	51,40	52,02	52,44	51,65	
Média Sul	57,17	59,67	60,50	61,50	61,50	61,50	61,50	61,83	62,20	62,19	62,74	62,74	61,25	
													60,16	
	jan/19	fev/19	mar/19	abr/19	mai/19	jun/19	jul/19	ago/19	set/19	out/19	nov/19	dez/19	MÉDIA	Coef. Variação
acre	34,48	34,57	43,90	55,45	55,45	55,07	59,50	60,11	60,44	60,44	62,34	62,13	53,66	19,06%
alagoas	67,00	67,00	70,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	64,00	64,00	66,75	2,31%
amazonas	45,00	43,80	43,80	43,80	50,00	45,00	47,33	45,00	56,30	70,00	72,50	72,50	52,92	22,41%
amapá	60,00	75,00	75,00	79,00	80,00	80,00	75,00	79,50	79,50	79,00	72,50	72,50	75,58	7,53%
bahia	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	72,00	73,00	73,00	73,00	70,00	73,00	66,17	9,81%
ceará	36,00	43,00	43,00	53,00	53,50	54,00	55,00	57,50	57,50	57,50	57,50	57,50	52,08	14,01%
distrito federal	87,50	95,00	89,82	89,82	89,82	89,82	89,17	89,17	89,17	93,34	95,00	100,00	91,47	3,95%
espírito santo	37,50	37,50	37,50	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	37,50	39,17	36,18	4,22%
goiás	72,50	72,50	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	78,00	78,00	86,50	86,50	77,00	6,15%
maranhão	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	0,00%
mato grosso	62,75	62,75	62,75	62,75	62,75	62,75	61,25	61,25	61,25	61,25	62,50	62,50	62,21	1,15%
mato grosso do sul	46,00	46,00	46,00	49,00	47,85	47,95	47,95	48,00	44,00	44,00	44,00	48,00	46,56	3,90%
minas gerais	66,67	66,67	66,67	66,67	63,33	58,33	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	65,70	3,82%
pará	65,00	65,00	65,00	65,00	65,00	64,56	60,00	60,00	60,00	59,00	59,00	59,00	62,21	4,60%
paraíba	60,00	67,00	69,45	69,45	69,45	69,45	69,45	69,00	69,00	69,00	69,00	69,00	68,27	3,94%
paraná	54,00	54,00	54,00	57,00	57,00	57,00	57,00	58,00	60,42	60,42	62,05	62,05	57,75	5,11%
pernambuco	65,00	65,00	65,00	65,00	65,00	75,00	75,00	75,00	75,00	77,00	77,00	77,00	71,33	7,92%
piauí	27,00	30,00	30,00	30,00	30,00	26,50	27,00	26,50	27,50	30,00	30,00	30,00	28,71	5,63%
rio de janeiro	54,64	54,64	54,64	51,43	51,43	51,43	51,43	51,43	51,43	51,43	51,43	51,43	52,23	2,78%
rio grande do norte	60,00	60,00	60,00	60,00	65,00	65,00	60,00	60,00	60,00	65,00	70,00	70,00	62,92	6,30%
rio grande do sul	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	0,00%
rondônia	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	62,50	60,84	60,00	60,00	65,00	65,00	65,00	61,53	3,60%
roraima	30,00	30,00	30,00	27,50	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	25,00	29,38	5,29%
santa catarina	57,50	65,00	67,50	67,50	67,50	67,50	67,50	67,50	66,17	66,16	66,16	66,16	66,01	4,26%
são paulo	52,48	52,48	52,48	52,48	52,48	52,48	52,48	52,48	52,48	52,48	52,48	52,48	52,48	0,00%
sergipe	85,00	81,00	85,00	85,00	85,00	85,00	85,00	87,00	87,30	87,30	81,50	78,00	84,34	3,33%
tocantins	77,50	72,50	72,50	70,00	72,50	70,00	72,50	76,00	75,00	75,00	73,50	70,00	73,08	3,34%

Pó de pedra/brita - 2020 (SINAPI)												MÉDIA TOTAL		R\$60,22	
00004741 - Pó de pedra/brita (POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE)															
REGIÃO	jan/19	fev/19	mar/19	abr/19	mai/19	jun/19	jul/19	ago/19	set/19	out/19	nov/19	dez/19	MÉDIA REGIONAL GERAL		
													MÉDIA	Coef. Variação	
Média Norte	71,08	71,53	72,13	71,97	67,19	67,41	68,53	68,58	67,50	67,89	68,75	70,27	69,40	12,01%	
Média Nordeste	59,41	61,27	61,39	59,65	59,56	59,54	60,94	60,60	61,12	61,61	61,57	62,29	60,75		
Média Centro-Oeste	61,57	63,01	61,53	61,93	63,12	62,76	62,41	62,89	63,21	63,21	63,53	67,03	63,02		
Média Sudeste	56,49	57,52	57,54	58,81	58,27	58,98	59,03	57,82	58,08	58,21	59,26	60,62	58,39		
Média Sul	48,40	49,24	48,52	48,52	49,27	49,79	50,70	50,45	50,15	50,65	49,85	49,20	49,56		
													60,22		

	jan/19	fev/19	mar/19	abr/19	mai/19	jun/19	jul/19	ago/19	set/19	out/19	nov/19	dez/19	MÉDIA	Coef. Variação
acre	224,34	224,34	233,88	233,88	233,88	224,34	219,56	221,95	221,95	229,11	229,11	233,88	227,52	2,38%
alagoas	60,38	66,63	69,11	69,11	66,08	66,08	66,08	66,08	66,08	66,08	66,08	66,08	66,16	3,26%
amazonas	108,65	108,65	109,78	108,65	108,65	106,43	114,28	114,55	114,55	118,02	114,55	114,55	111,78	3,28%
amapá	111,54	111,54	111,54	111,54	47,72	47,72	47,72	47,72	47,72	47,72	50,87	50,87	69,52	44,67%
bahia	55,70	55,70	55,70	55,70	55,70	55,70	55,70	55,70	56,44	56,44	55,70	55,70	55,89	0,60%
ceará	47,63	52,50	47,61	52,82	57,92	57,92	63,13	59,41	62,37	66,82	66,82	66,82	58,48	12,10%
distrito federal	80,46	81,26	75,32	76,91	76,91	76,91	77,96	77,96	79,55	79,55	79,55	79,55	78,49	2,24%
espírito santo	58,71	60,61	60,61	60,61	60,61	61,26	61,90	63,17	61,90	62,70	64,91	64,43	61,79	2,88%
goiás	50,50	56,44	56,44	56,44	56,44	56,44	56,44	56,44	54,22	54,22	54,22	54,22	55,21	3,31%
maranhão	63,13	61,65	59,41	57,92	57,92	59,41	59,41	59,41	59,41	59,41	53,47	59,41	59,16	3,88%
mato grosso	63,28	63,28	63,28	63,28	65,66	65,66	64,18	64,18	64,18	64,18	66,41	79,37	65,58	6,82%
mato grosso do sul	52,02	51,07	51,07	51,07	53,45	52,02	51,07	52,98	54,89	54,89	53,93	54,98	52,79	3,04%
minas gerais	62,44	64,67	64,57	67,26	65,10	67,26	66,84	65,50	66,84	68,00	66,84	68,00	66,11	2,53%
pará	47,53	47,53	47,72	47,72	47,72	47,72	47,72	47,72	47,72	47,72	50,87	66,82	49,54	11,14%
paraíba	49,64	53,45	57,27	57,27	57,27	57,27	63,00	66,82	66,82	66,82	66,82	66,82	60,77	10,10%
paraná	42,00	42,00	42,95	42,95	45,19	42,95	43,76	43,01	43,07	44,56	44,56	43,07	43,34	2,29%
pernambuco	57,92	57,92	57,92	57,92	57,92	57,92	56,44	56,44	56,44	56,44	56,44	56,44	57,18	1,35%
piauí	47,53	47,53	47,72	47,72	47,72	47,72	47,72	47,72	47,72	47,72	50,87	50,87	48,21	2,58%
rio de janeiro	57,27	57,27	57,27	59,66	59,66	59,66	59,66	54,89	55,84	54,41	54,41	59,18	57,43	3,72%
rio grande do norte	85,91	85,91	90,69	71,59	71,59	71,59	71,59	71,59	71,59	71,59	71,59	71,59	75,57	9,65%
rio grande do sul	44,50	46,05	42,95	42,95	42,95	46,77	48,68	48,68	47,73	47,73	45,34	44,86	45,77	4,76%
rondônia	47,53	47,53	47,72	47,72	81,14	81,14	81,14	81,14	81,14	81,14	81,14	83,53	70,17	23,75%
roraima	47,53	47,53	47,72	47,72	47,72	47,72	47,72	47,72	47,72	47,72	50,87	50,87	48,21	2,58%
santa catarina	58,71	59,66	59,66	59,66	59,66	59,66	59,66	59,66	59,66	59,66	59,66	59,66	59,58	0,46%
são paulo	47,53	47,53	47,72	47,72	47,72	47,72	47,72	47,72	47,72	47,72	50,87	50,87	48,21	2,58%
sergipe	66,82	70,16	67,06	66,82	63,96	62,22	65,40	62,22	63,17	63,17	65,64	66,84	65,29	3,69%
tocantins	74,39	71,32	71,32	71,32	71,32	75,03	75,03	75,12	67,60	66,82	66,84	59,18	70,44	6,68%

Areia - 2019 (SICRO)					R\$80,75	
M0082 - Areia média lavada						
REGIÃO	jan/19	abr/19	jul/19	out/19	MÉDIA REGIONAL GERAL	
					MÉDIA	Coef. Variação
Média Norte	65,57	70,80	74,83	77,48	72,17	9,93%
Média Nordeste	67,27	71,91	76,82	82,33	74,58	
Média Centro-Oeste	83,09	87,99	91,90	99,02	90,50	
Média Sudeste	84,51	85,37	86,84	93,78	87,62	
Média Sul	75,49	77,26	78,45	84,32	78,88	
					80,75	

	jan/19	abr/19	jul/19	out/19	MÉDIA	Coef. Variação
acre	41,62	39,95	37,03	38,91	39,38	4,88%
alagoas	66,84	71,75	77,07	83,22	74,72	9,42%
amazonas	67,83	73,94	78,16	79,06	74,75	6,85%
amapá	66,16	72,11	76,86	77,99	73,28	7,35%
bahia	73,41	74,98	74,89	80,53	75,95	4,13%
ceará	67,56	73,01	78,87	85,52	76,24	10,13%
distrito federal	116,51	120,35	117,35	126,21	120,11	3,66%
espírito santo	91,45	91,36	92,75	100,04	93,90	4,41%
goiás	66,29	71,39	77,53	83,84	74,76	10,16%
maranhão	56,01	60,41	65,29	64,97	61,67	7,11%
mato grosso	73,26	78,41	84,55	91,35	81,89	9,54%
mato grosso do sul	76,29	81,81	88,15	94,68	85,23	9,32%
minas gerais	84,29	84,83	86,38	93,74	87,31	5,01%
pará	64,06	69,82	74,28	75,40	70,89	7,27%
paraíba	76,79	81,50	86,57	92,80	84,42	8,14%
paraná	69,20	71,04	71,08	75,20	71,63	3,54%
pernambuco	69,18	74,16	79,58	85,88	77,20	9,30%
piauí	62,54	67,40	73,26	79,51	70,68	10,39%
rio de janeiro	83,02	80,69	81,07	87,40	83,05	3,71%
rio grande do norte	67,60	72,60	78,70	85,34	76,06	10,09%
rio grande do sul	66,97	67,16	65,26	70,88	67,57	3,50%
rondônia	77,47	81,98	82,55	88,26	82,57	5,36%
roraima	67,10	73,13	77,43	78,22	73,97	6,89%
santa catarina	90,30	93,58	99,00	106,87	97,44	7,43%
são paulo	79,26	84,59	87,16	93,92	86,23	7,06%
sergipe	65,52	71,42	77,13	83,21	74,32	10,21%
tocantins	49,52	52,89	57,46	60,19	55,02	8,62%

Pó de pedra/brita - 2019 (SINAPI)					R\$59,20	
M1135 - Pó de pedra/brita						
REGIÃO	jan/19	abr/19	jul/19	out/19	MÉDIA REGIONAL GERAL	
					MÉDIA	Coef. Variação
Média Norte	66,17	66,75	67,13	71,24	67,82	14,97%
Média Nordeste	47,91	48,35	49,08	51,97	49,33	
Média Centro-Oeste	62,94	65,19	75,06	73,11	69,07	
Média Sudeste	56,10	55,83	55,76	59,75	56,86	
Média Sul	49,60	51,23	53,42	57,45	52,92	
					59,20	

	jan/19	abr/19	jul/19	out/19	MÉDIA	Coef. Variação
acre	85,49	78,16	71,70	72,81	77,04	8,18%
alagoas	63,46	63,59	63,14	67,37	64,39	3,10%
amazonas	62,21	64,88	64,96	69,06	65,28	4,33%
amapá	42,73	46,60	50,62	55,04	48,75	10,85%
bahia	60,12	60,95	61,51	65,78	62,09	4,07%
ceará	38,69	40,29	42,73	45,82	41,88	7,42%
distrito federal	63,44	67,75	71,62	76,48	69,82	7,96%
espírito santo	56,30	55,09	50,70	54,36	54,11	4,46%
goiás	47,95	47,62	49,63	53,18	49,60	5,14%
maranhão	27,70	27,55	27,49	29,24	28,00	2,98%
mato grosso	72,27	77,06	82,91	89,42	80,42	9,22%
mato grosso do sul	68,09	68,34	96,06	73,36	76,46	17,38%
minas gerais	48,55	48,89	52,59	56,64	51,67	7,33%
pará	88,48	88,74	88,94	90,13	89,07	0,82%
paraíba	63,16	65,54	67,74	71,49	66,98	5,28%
paraná	50,94	51,93	53,88	58,04	53,70	5,85%
pernambuco	39,25	39,31	39,12	42,07	39,94	3,57%
piauí	54,79	54,62	55,61	55,94	55,24	1,15%
rio de janeiro	58,91	59,53	58,00	62,03	59,62	2,90%
rio grande do norte	40,41	39,07	39,77	42,76	40,50	3,95%
rio grande do sul	49,91	53,55	54,73	58,81	54,25	6,76%
rondônia	74,69	72,27	69,99	75,63	73,15	3,47%
roraima	68,39	68,72	68,79	73,94	69,96	3,80%
santa catarina	47,94	48,20	51,66	55,50	50,83	6,98%
são paulo	60,62	59,79	61,74	65,95	62,03	4,41%
sergipe	43,59	44,24	44,65	47,27	44,94	3,59%
tocantins	63,23	62,43	63,45	67,48	64,15	3,53%

Areia - 2020 (SINAPI)											MÉDIA TOTAL		R\$64,90	
0000370 - AREIA MÉDIA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)														
REGIÃO	jan/20	fev/20	mar/20	abr/20	mai/20	jun/20	jul/20	ago/20	set/20	out/20	nov/20	dez/20	MÉDIA REGIONAL GERAL	
													MÉDIA	Coef. Variação
Média Norte	62,54	63,55	63,64	64,54	66,69	67,41	68,48	67,00	67,48	67,67	68,38	70,48	66,49	11,77%
Média Nordeste	60,78	61,89	62,39	64,11	64,11	64,56	64,78	64,61	68,33	66,79	68,46	72,85	65,30	
Média Centro-Oeste	72,00	68,50	72,63	71,23	72,17	72,80	75,31	76,31	76,31	80,81	79,77	80,63	74,87	
Média Sudeste	52,44	53,06	52,44	52,44	53,33	53,33	53,33	53,54	53,54	53,54	54,79	55,63	53,45	
Média Sul	62,74	63,39	63,72	63,72	63,71	63,72	63,72	62,74	63,83	64,92	69,40	67,10	64,39	
													64,90	
	jan/20	fev/20	mar/20	abr/20	mai/20	jun/20	jul/20	ago/20	set/20	out/20	nov/20	dez/20	MÉDIA	Coef. Variação
acre	63,20	50,00	50,00	50,00	64,46	65,04	65,69	66,43	67,81	68,77	70,80	70,80	62,75	12,80%
alagoas	64,00	64,00	65,00	65,00	70,00	70,00	70,00	70,00	71,19	70,00	70,00	80,00	69,10	6,38%
amazonas	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	65,00	65,00	65,00	70,00	70,00	71,67	6,19%
amapá	74,50	77,00	77,50	85,00	95,00	100,00	105,00	107,50	110,00	110,00	110,00	110,00	96,79	14,92%
bahia	73,00	75,50	75,50	75,50	75,50	77,50	80,00	80,00	80,00	80,00	90,00	90,00	79,38	6,92%
ceará	62,50	70,00	75,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	85,00	80,00	85,00	85,00	78,54	8,42%
distrito federal	95,00	95,00	95,00	95,00	98,75	98,75	98,75	98,75	98,75	98,75	91,67	95,00	96,60	2,51%
espírito santo	39,17	41,67	39,17	39,17	39,17	39,17	39,17	40,00	40,00	40,00	40,00	45,00	40,14	4,23%
goiás	86,50	68,50	85,00	83,43	83,43	85,93	95,00	100,00	100,00	117,50	117,50	119,90	95,22	17,07%
maranhão	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	47,50	26,88	24,17%
mato grosso	62,50	62,50	62,50	62,50	62,50	62,50	62,50	62,50	62,50	63,00	63,00	63,00	62,63	0,36%
mato grosso do sul	44,00	48,00	48,00	44,00	44,00	44,00	45,00	44,00	44,00	44,00	46,90	44,60	45,04	3,59%
minas gerais	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	63,34	66,39	1,45%
pará	59,00	59,00	59,00	59,00	59,00	59,00	59,00	54,50	55,00	55,00	55,00	55,00	57,29	3,69%
paraíba	70,00	70,00	69,50	69,50	69,50	69,50	70,00	70,00	70,75	74,50	74,50	74,00	70,98	2,90%
paraná	62,05	64,00	65,00	65,00	65,00	65,00	65,00	62,05	65,32	68,59	68,59	68,00	65,30	3,34%
pernambuco	77,00	77,00	82,00	82,00	82,00	87,00	82,50	82,50	92,50	87,50	85,00	87,50	83,71	5,35%
piauí	30,00	30,00	25,00	34,00	34,00	25,00	26,00	24,00	27,00	26,00	25,00	25,00	27,58	12,88%
rio de janeiro	51,43	51,43	51,43	51,43	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	60,00	62,50	54,85	6,31%
rio grande do norte	67,50	67,50	67,50	70,00	65,00	65,00	67,50	67,50	77,50	74,50	74,50	79,50	70,29	7,01%
rio grande do sul	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	0,00%
rondônia	67,50	68,75	68,75	67,50	67,50	67,50	70,00	70,00	70,00	75,00	75,00	75,00	70,21	4,35%
roraima	25,00	28,33	27,50	27,50	28,34	28,34	28,34	30,00	29,17	26,67	26,67	28,33	27,85	4,68%
santa catarina	66,16	66,16	66,16	66,16	66,14	66,16	66,16	66,16	66,16	66,16	79,60	73,30	67,87	6,23%
são paulo	52,48	52,48	52,48	52,48	52,48	52,48	52,48	52,48	52,48	52,48	52,48	51,69	52,41	0,44%
sergipe	78,00	78,00	77,00	76,00	76,00	82,00	82,00	82,50	86,00	83,65	87,15	87,15	81,29	5,18%
tocantins	72,75	72,75	72,75	72,75	72,00	72,00	72,00	72,00	72,00	72,00	72,00	75,00	72,50	1,19%

Pó de pedra/brita - 2020 (SINAPI)											MÉDIA TOTAL		R\$64,72	
00004741 - Pó de pedra/brita (POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE)													MÉDIA REGIONAL GERAL	
REGIÃO	jan/20	fev/20	mar/20	abr/20	mai/20	jun/20	jul/20	ago/20	set/20	out/20	nov/20	dez/20	MÉDIA	Coef. Variação
													64,72	
Média Norte	82,96	79,97	81,33	79,77	79,99	80,35	80,35	79,97	80,11	87,85	88,25	92,47	82,78	18,66%
Média Nordeste	62,22	61,96	61,53	61,21	61,38	61,38	60,44	60,23	63,05	64,87	65,15	63,98	62,28	
Média Centro-Oeste	66,63	66,54	66,16	62,45	62,45	62,45	62,45	62,45	69,29	76,56	79,34	80,51	68,11	
Média Sudeste	59,56	60,28	60,91	60,98	60,26	60,94	60,07	59,51	60,92	61,11	62,12	60,84	60,62	
Média Sul	49,20	49,20	49,20	49,20	49,20	49,20	49,32	49,32	49,59	51,70	51,70	50,64	49,79	
													64,72	
	jan/20	fev/20	mar/20	abr/20	mai/20	jun/20	jul/20	ago/20	set/20	out/20	nov/20	dez/20	MÉDIA	Coef. Variação
acre	233,88	233,88	233,88	233,88	233,88	233,88	233,88	233,88	233,88	233,88	233,88	246,19	234,91	1,51%
alagoas	66,08	66,08	66,08	63,22	64,71	64,71	64,71	60,41	60,41	68,33	68,33	67,26	65,03	4,05%
amazonas	114,55	93,58	93,58	90,32	90,32	89,12	89,12	90,32	90,32	90,32	90,32	88,91	92,57	7,66%
amapá	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,07	50,80	0,45%
bahia	57,19	57,19	56,44	56,44	56,44	56,44	57,19	57,19	60,16	60,16	60,90	62,87	58,22	3,78%
ceará	66,82	62,38	61,64	61,64	61,64	61,64	52,50	52,50	54,60	61,64	54,60	53,74	58,78	8,23%
distrito federal	80,95	80,95	77,24	62,38	62,38	62,38	62,38	62,38	76,37	103,97	111,40	116,97	79,98	25,30%
espírito santo	61,36	61,36	62,70	64,14	61,26	64,13	64,13	61,90	67,54	68,29	67,54	66,48	64,24	4,11%
goiás	54,22	54,22	56,44	56,44	56,44	56,44	56,44	56,44	69,81	71,30	77,09	75,88	61,76	14,43%
maranhão	59,41	59,41	59,41	59,41	59,41	59,41	59,41	59,41	63,87	63,87	63,87	62,87	60,81	3,44%
mato grosso	76,37	76,37	76,37	76,37	76,37	76,37	76,37	76,37	76,37	76,37	76,37	75,17	76,27	0,45%
mato grosso do sul	54,98	54,60	54,60	54,60	54,60	54,60	54,60	54,60	54,60	54,60	52,50	54,03	54,41	1,17%
minas gerais	66,84	66,84	68,00	66,84	66,84	66,72	68,00	68,00	68,00	68,00	68,00	68,07	67,51	0,91%
pará	66,82	66,82	76,37	66,82	66,82	66,82	66,82	66,82	66,82	76,37	76,37	75,17	69,90	6,53%
paraíba	66,82	66,82	66,82	66,82	66,82	66,82	66,82	69,21	69,21	69,21	69,21	70,47	67,92	2,06%
paraná	43,07	43,07	43,07	43,07	43,07	43,07	41,59	41,59	41,59	44,56	44,56	43,86	43,01	2,39%
pernambuco	56,44	56,44	56,44	56,44	56,44	56,44	56,44	56,44	54,96	56,44	56,44	55,56	56,24	0,85%
piauí	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,07	50,80	0,45%
rio de janeiro	59,18	62,05	62,05	62,05	62,05	62,05	57,27	57,27	57,27	57,27	62,05	58,72	59,94	3,81%
rio grande do norte	69,09	71,59	69,22	69,22	69,22	69,22	69,22	69,22	83,53	83,53	87,82	79,87	74,23	9,73%
rio grande do sul	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	46,72	46,72	47,53	47,53	47,53	46,04	45,94	2,61%
rondônia	83,53	83,53	83,53	83,53	83,53	83,53	83,53	84,00	84,96	121,71	123,76	121,84	93,42	18,75%
roraima	143,19	143,19	143,19	147,96	147,96	147,96	147,96	147,96	147,96	147,96	147,96	185,58	149,90	7,63%
santa catarina	59,66	59,66	59,66	59,66	59,66	59,66	59,66	59,66	59,66	63,00	63,00	62,01	60,41	2,29%
são paulo	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,87	50,07	50,80	0,45%
sergipe	67,30	66,84	66,84	66,84	66,84	66,84	66,84	66,84	69,81	69,81	74,27	73,10	68,51	3,90%
tocantins	55,70	55,70	55,70	55,70	55,70	59,41	59,41	59,41	59,41	59,41	60,16	58,48	57,85	3,34%

Areia - 2020 (SICRO)					R\$90,16	
M0082 - Areia média lavada						
REGIÃO	jan/20	abr/20	jul/20	out/20	MÉDIA REGIONAL GERAL	
					MÉDIA	Coef. Variação
Média Norte	78,80	81,81	86,92	87,38	83,73	6,69%
Média Nordeste	85,80	88,58	94,19	95,80	91,09	
Média Centro-Oeste	93,74	94,00	95,88	95,81	94,86	
Média Sudeste	97,38	97,80	95,68	96,77	96,91	
Média Sul	83,29	83,38	83,62	86,47	84,19	
					90,16	

	jan/20	abr/20	jul/20	out/20	MÉDIA	Coef. Variação
acre	36,67	35,15	35,19	35,39	35,60	2,03%
alagoas	90,07	94,03	99,97	99,80	95,97	5,01%
amazonas	80,19	84,18	88,08	88,00	85,11	4,41%
amapá	79,35	82,89	86,85	86,78	83,97	4,28%
bahia	83,46	86,13	96,45	99,57	91,40	8,55%
ceará	91,60	95,80	91,68	95,59	93,67	2,50%
distrito federal	130,20	133,52	144,43	141,92	137,52	4,91%
espírito santo	108,43	108,99	106,65	108,94	108,25	1,01%
goiás	77,59	78,42	73,07	74,75	75,96	3,27%
maranhão	59,91	57,25	56,66	62,33	59,04	4,42%
mato grosso	85,59	86,12	80,42	82,33	83,62	3,24%
mato grosso do sul	81,57	77,95	85,61	84,22	82,34	4,09%
minas gerais	101,89	101,83	99,56	102,27	101,39	1,22%
pará	76,40	80,14	84,13	84,18	81,21	4,59%
paraíba	100,10	103,60	109,76	109,21	105,67	4,39%
paraná	77,00	77,93	77,71	80,31	78,24	1,84%
pernambuco	91,03	94,93	100,84	100,95	96,94	4,99%
piauí	85,64	89,48	95,46	95,65	91,56	5,33%
rio de janeiro	83,29	84,49	81,92	79,75	82,36	2,47%
rio grande do norte	80,97	82,56	97,59	99,98	90,28	10,96%
rio grande do sul	69,20	66,30	65,36	68,48	67,34	2,68%
rondônia	86,07	89,52	100,86	101,37	94,46	8,28%
roraima	79,61	83,26	87,31	87,44	84,41	4,43%
santa catarina	103,67	105,92	107,78	110,62	107,00	2,75%
são paulo	95,90	95,88	94,60	96,11	95,62	0,72%
sergipe	89,40	93,46	99,34	99,13	95,33	5,04%
tocantins	59,91	58,65	61,27	64,12	60,99	3,85%

Pó de pedra/brita - 2020 (SICRO)					R\$60,07	
M1135 - Pó de pedra/brita						
REGIÃO	jan/20	abr/20	jul/20	out/20	MÉDIA REGIONAL GERAL	
					MÉDIA	Coef. Variação
Média Norte	66,91	65,15	65,73	64,13	65,48	16,20%
Média Nordeste	50,49	48,63	45,69	45,79	47,65	
Média Centro-Oeste	72,02	71,35	74,44	74,51	73,08	
Média Sudeste	60,32	58,94	57,09	59,95	59,07	
Média Sul	55,17	54,25	54,41	56,51	55,09	
					60,07	

	jan/20	abr/20	jul/20	out/20	MÉDIA	Coef. Variação
acre	69,71	67,44	66,63	65,72	67,38	2,53%
alagoas	65,00	62,07	56,20	56,68	59,99	7,12%
amazonas	71,77	69,41	76,45	67,06	71,17	5,63%
amapá	59,01	59,40	64,28	61,27	60,99	3,94%
bahia	62,51	59,97	59,07	59,55	60,28	2,55%
ceará	47,61	48,84	48,47	49,37	48,57	1,52%
distrito federal	77,57	79,67	82,39	80,23	79,97	2,48%
espírito santo	56,95	55,50	51,04	50,87	53,59	5,79%
goiás	57,39	56,90	54,69	56,81	56,45	2,12%
maranhão	27,79	27,85	27,72	27,69	27,76	0,26%
mato grosso	83,37	79,46	89,33	87,88	85,01	5,28%
mato grosso do sul	69,75	69,37	71,36	73,10	70,90	2,40%
minas gerais	57,31	54,12	53,92	56,75	55,53	3,16%
pará	57,31	54,12	53,92	55,75	55,28	2,87%
paraíba	70,5	65,55	59,72	58,67	63,61	8,65%
paraná	54,43	53,53	53,26	53,29	53,63	1,02%
pernambuco	39,60	39,40	39,31	39,28	39,40	0,37%
piauí	55,69	51,66	41,66	42,04	47,76	14,71%
rio de janeiro	59,25	59,81	57,03	59,23	58,83	2,09%
rio grande do norte	40,31	37,14	34,23	34,50	36,55	7,75%
rio grande do sul	55,48	53,49	54,76	55,80	54,88	1,87%
rondônia	75,00	77,48	78,36	76,79	76,91	1,85%
roraima	76,45	71,59	68,65	68,81	71,38	5,10%
santa catarina	55,60	55,74	55,22	60,44	56,75	4,35%
são paulo	67,77	66,31	66,37	72,94	68,35	4,59%
sergipe	45,36	45,15	44,79	44,29	44,90	1,04%
tocantins	63,81	61,99	62,22	62,55	62,64	1,30%

Areia - 2021 (SINAPI)											MÉDIA TOTAL		R\$74,68	
0000370 - AREIA MÉDIA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)														
REGIÃO	jan/21	fev/21	mar/21	abr/21	mai/21	jun/21	jul/21	ago/21	set/21	out/21	nov/21	dez/21	MÉDIA REGIONAL GERAL	
													MÉDIA	Coef. Variação
Média Norte	71,53	72,04	72,34	71,27	71,40	72,83	73,00	73,27	73,62	75,77	75,77	76,60	73,29	9,91%
Média Nordeste	75,09	74,31	74,19	76,57	72,49	80,29	80,78	81,39	82,06	83,06	85,72	86,67	79,38	
Média Centro-Oeste	83,95	83,95	84,14	84,14	54,77	84,51	86,10	91,72	89,24	90,97	67,36	100,14	83,42	
Média Sudeste	56,52	58,16	59,49	59,95	88,50	60,27	62,42	62,11	62,97	63,50	65,00	67,45	63,86	
Média Sul	72,31	72,65	72,71	70,86	76,42	72,62	71,09	74,43	72,09	73,44	74,96	77,68	73,44	
													74,68	
	jan/21	fev/21	mar/21	abr/21	mai/21	jun/21	jul/21	ago/21	set/21	out/21	nov/21	dez/21	MÉDIA	Coef. Variação
acre	71,70	72,21	72,42	72,42	74,55	74,84	75,44	75,65	75,46	78,12	78,69	80,31	75,15	3,68%
alagoas	80,00	80,00	80,00	80,00	82,74	82,74	80,00	80,00	80,00	90,00	90,00	90,00	82,96	5,27%
amazonas	80,00	80,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	77,50	76,04	2,61%
amapá	110,00	110,00	110,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	95,00	95,00	95,00	101,25	5,62%
bahia	90,00	90,25	87,75	94,95	99,95	99,95	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,90	4,97%
ceará	90,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	90,00	90,00	89,00	90,00	84,08	6,01%
distrito federal	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00	87,50	90,00	115,00	105,00	110,00	15,00	141,00	94,88	30,68%
espírito santo	45,00	47,50	47,50	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	53,54	46,13	5,47%
goiás	119,90	119,90	115,00	115,00	120,00	122,45	124,90	129,90	124,95	129,90	127,45	127,45	123,07	4,23%
maranhão	47,50	47,50	47,50	52,50	52,50	52,50	52,50	52,50	52,50	52,50	52,50	52,50	51,25	4,41%
mato grosso	70,00	70,00	74,17	74,17	74,17	74,59	74,59	67,09	72,09	72,09	72,09	72,09	72,26	3,20%
mato grosso do sul	50,90	50,90	52,40	52,40	52,40	53,50	54,90	54,90	54,90	51,90	54,90	60,00	53,67	4,68%
minas gerais	66,67	66,67	69,17	69,17	69,17	69,17	75,00	74,17	74,14	76,25	78,75	80,00	72,36	6,36%
pará	55,00	52,50	52,50	52,50	52,50	52,50	55,00	55,00	60,00	65,00	70,00	72,50	57,92	12,60%
paraíba	74,00	74,00	74,00	75,00	80,00	80,00	85,00	85,00	85,00	85,00	90,00	90,00	81,42	7,49%
paraná	66,14	68,59	65,32	68,59	68,59	68,59	60,00	66,00	65,00	65,32	65,32	73,49	66,75	4,84%
pernambuco	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	91,95	90,00	95,00	90,00	90,00	95,00	97,50	91,62	2,92%
piauí	37,00	37,00	38,50	46,67	50,00	54,00	57,00	60,00	65,00	70,00	70,00	70,00	54,60	23,54%
rio de janeiro	62,50	62,50	65,32	67,66	67,66	67,66	67,66	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	67,58	4,14%
rio grande do norte	80,00	80,00	80,00	80,00	82,50	82,50	82,50	80,00	80,00	80,00	82,50	80,00	80,83	1,52%
rio grande do sul	60,00	60,00	62,00	62,00	62,00	63,50	66,00	70,00	64,00	70,00	70,00	70,00	64,96	6,25%
rondônia	75,00	75,00	80,00	80,00	80,00	85,00	85,00	85,00	85,00	85,00	80,00	80,00	81,25	4,64%
roraima	25,71	26,79	28,87	28,87	29,59	29,59	28,52	30,36	30,36	30,36	30,36	31,19	29,21	5,49%
santa catarina	90,80	89,35	90,80	82,00	82,00	85,78	87,28	87,28	87,28	85,00	89,55	89,55	87,22	3,50%
são paulo	51,92	55,96	55,95	57,96	59,26	59,26	62,00	59,26	62,73	62,73	66,26	66,26	59,96	7,13%
sergipe	87,30	90,00	90,00	90,00	99,00	99,00	100,00	100,00	96,00	90,00	102,50	110,00	96,15	7,07%
tocantins	75,00	80,00	80,00	82,50	80,00	85,00	87,50	87,50	85,00	90,00	90,00	90,00	84,38	5,81%

Pó de pedra/brita - 2021 (SINAPI)											MÉDIA TOTAL		R\$69,90	
00004741 - Pó de pedra/brita (POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE)														
REGIÃO	jan/21	fev/21	mar/21	abr/21	mai/21	jun/21	jul/21	ago/21	set/21	out/21	nov/21	dez/21	MÉDIA REGIONAL GERAL	
													MÉDIA	Coef. Variação
Média Norte	93,38	93,89	96,70	102,06	98,18	98,34	93,85	118,58	119,05	121,28	128,62	135,37	108,27	15,57%
Média Nordeste	66,10	67,86	68,39	70,68	72,23	72,33	75,93	78,04	78,91	81,82	84,26	85,76	75,19	
Média Centro-Oeste	77,22	79,69	78,72	79,82	79,89	79,89	81,85	81,85	82,76	80,01	81,73	82,83	80,52	
Média Sudeste	63,53	63,90	64,86	65,16	68,19	68,16	67,11	67,65	70,32	72,13	74,39	77,31	68,56	
Média Sul	51,22	51,22	51,25	52,52	53,66	53,62	54,76	54,76	57,01	60,63	61,25	61,96	55,32	
													69,90	
													MÉDIA	Coef. Variação
acre	205,31	210,95	201,56	210,95	210,95	210,95	210,95	210,95	230,69	227,40	227,40	230,69	215,73	4,77%
alagoas	67,26	67,26	67,26	67,26	67,26	67,26	67,26	70,18	70,18	70,18	65,79	77,79	68,75	4,64%
amazonas	88,91	88,91	88,91	97,96	97,96	97,96	97,96	97,96	93,96	93,96	93,96	129,20	97,30	11,02%
amapá	53,73	55,19	55,19	56,38	56,38	57,58	51,32	234,91	221,76	225,52	234,91	234,91	128,15	70,51%
bahia	62,14	62,87	62,87	63,60	63,66	63,60	61,40	62,87	64,33	65,79	66,52	73,10	64,40	4,80%
ceará	60,46	60,46	64,49	73,10	73,11	73,11	73,10	73,10	73,10	83,33	76,02	73,30	71,39	9,17%
distrito federal	103,81	116,97	116,97	116,97	116,97	120,62	124,28	124,28	127,93	124,28	129,20	126,87	120,76	5,81%
espírito santo	66,22	66,22	66,93	66,93	77,49	74,70	73,99	73,99	73,10	75,08	76,53	87,85	73,25	8,51%
goiás	75,88	75,88	75,88	75,88	73,83	70,18	69,45	69,45	69,45	73,10	70,18	73,10	72,69	3,86%
maranhão	62,87	64,33	62,87	62,87	62,87	62,87	62,87	62,87	62,87	65,79	65,79	65,79	63,72	2,06%
mato grosso	75,17	75,17	68,29	72,68	75,03	75,03	75,03	75,03	75,03	65,79	65,79	66,52	72,05	5,73%
mato grosso do sul	54,03	50,74	53,74	53,74	53,74	53,74	58,63	58,63	58,63	56,85	61,73	64,83	56,59	7,15%
minas gerais	73,10	73,10	76,25	76,25	77,49	78,95	81,88	81,88	81,88	81,88	84,80	86,26	79,48	5,42%
pará	75,17	75,17	75,17	84,57	84,57	84,57	95,03	93,96	93,96	93,96	93,96	93,96	87,00	9,45%
paraíba	75,17	70,47	70,47	75,17	74,23	75,17	89,26	75,71	77,52	77,52	82,22	82,22	77,09	6,88%
paraná	44,30	44,30	44,30	45,32	45,32	45,21	45,32	45,32	48,75	51,15	51,15	51,15	46,80	6,13%
pernambuco	55,56	55,56	55,56	58,48	58,48	58,48	61,40	61,40	61,40	61,40	61,40	61,40	59,21	4,27%
piauí	53,73	72,10	72,10	72,10	86,91	86,91	99,84	112,76	112,76	122,15	140,95	140,95	97,77	29,14%
rio de janeiro	61,07	61,07	61,07	61,07	61,40	61,40	61,24	63,42	65,77	65,77	70,47	73,57	63,94	6,59%
rio grande do norte	84,57	84,57	84,57	84,57	84,57	84,57	89,26	98,66	98,66	98,66	108,06	108,06	92,40	10,25%
rio grande do sul	47,35	47,35	47,45	48,81	52,24	52,24	52,24	52,24	55,56	55,56	55,56	57,69	52,02	6,97%
rondônia	124,50	121,92	127,51	145,37	148,97	148,91	137,47	125,11	125,35	127,90	127,32	127,32	132,30	7,60%
roraima	185,58	190,28	204,37	204,37	166,32	166,32	134,84	134,84	155,04	155,04	202,03	202,03	175,09	15,12%
santa catarina	62,01	62,01	62,01	63,42	63,42	63,42	66,71	66,71	66,71	75,17	77,05	77,05	67,14	8,78%
são paulo	53,73	55,19	55,19	56,38	56,38	57,58	51,32	51,32	60,53	65,77	65,77	61,55	57,56	8,55%
sergipe	73,10	73,10	75,30	78,96	78,96	78,96	78,96	84,80	89,39	91,58	91,58	89,19	81,99	8,53%
tocantins	58,48	58,48	58,48	58,48	65,79	65,79	73,10	73,10	73,10	82,39	82,39	82,39	69,33	14,09%

Areia - 2021 (SICRO)					R\$94,56	
M0082 - Areia média lavada						
REGIÃO	jan/21	abr/21	jul/21	out/21	MÉDIA REGIONAL GERAL	
					MÉDIA	Coef. Variação
Média Norte	89,23	87,92	91,64	96,10	91,22	7,53%
Média Nordeste	93,56	93,72	97,40	104,08	97,19	
Média Centro-Oeste	99,85	103,78	98,26	102,15	101,01	
Média Sudeste	99,20	96,73	101,92	100,74	99,65	
Média Sul	87,93	82,14	81,61	83,20	83,72	
					94,56	

	jan/21	abr/21	jul/21	out/21	MÉDIA	Coef. Variação
acre	35,67	33,70	37,77	42,86	37,50	10,51%
alagoas	97,05	99,63	102,73	109,74	102,29	5,36%
amazonas	91,82	87,57	90,65	94,61	91,16	3,20%
amapá	90,47	86,15	88,89	92,16	89,42	2,86%
bahia	101,03	103,78	108,30	109,73	105,71	3,80%
ceará	96,88	94,74	103,67	110,80	101,52	7,15%
distrito federal	154,87	162,83	141,20	138,09	149,25	7,79%
espírito santo	110,17	105,83	114,61	117,64	112,06	4,61%
goiás	75,09	80,42	83,88	86,78	81,54	6,16%
maranhão	59,71	49,59	54,44	62,05	56,45	9,87%
mato grosso	82,97	91,67	86,45	93,99	88,77	5,62%
mato grosso do sul	86,48	80,19	81,50	89,72	84,47	5,24%
minas gerais	103,41	98,79	106,77	108,42	104,35	4,07%
pará	87,71	83,31	85,28	88,85	86,29	2,88%
paraíba	106,99	109,97	115,66	123,97	114,15	6,55%
paraná	81,70	77,30	79,67	80,92	79,90	2,41%
pernambuco	97,91	100,54	103,49	110,65	103,15	5,33%
piauí	92,60	95,02	96,44	103,15	96,80	4,67%
rio de janeiro	83,73	81,99	83,39	85,52	83,66	1,74%
rio grande do norte	98,33	100,96	103,42	110,20	103,23	4,93%
rio grande do sul	69,65	67,08	69,22	69,88	68,96	1,86%
rondônia	99,15	100,73	106,85	111,59	104,58	5,48%
roraima	90,99	86,72	89,86	93,75	90,33	3,22%
santa catarina	112,44	102,05	95,93	98,79	102,30	7,04%
são paulo	99,47	100,31	102,89	91,38	98,51	5,05%
sergipe	91,50	89,29	88,41	96,39	91,40	3,91%
tocantins	67,44	71,32	77,24	81,99	74,50	8,61%

Pó de pedra/brita - 2021 (SICRO)					R\$66,60	
M1135 - Pó de pedra/brita						
REGIÃO	jan/21	abr/21	jul/21	out/21	MÉDIA REGIONAL GERAL	
					MÉDIA	Coef. Variação
Média Norte	66,99	68,65	73,15	76,94	71,43	14,12%
Média Nordeste	49,31	49,69	54,80	59,85	53,41	
Média Centro-Oeste	75,56	75,77	79,10	82,72	78,29	
Média Sudeste	61,02	64,35	69,09	75,98	67,61	
Média Sul	56,92	60,10	64,47	67,59	62,27	
					66,60	

	jan/21	abr/21	jul/21	out/21	MÉDIA	Coef. Variação
acre	76,48	83,72	88,06	90,21	84,62	7,16%
alagoas	56,54	57,82	65,19	71,94	62,87	11,37%
amazonas	70,34	70,90	77,98	81,26	75,12	7,15%
amapá	60,90	57,04	57,23	58,90	58,52	3,07%
bahia	62,00	63,87	68,93	73,26	67,02	7,59%
ceará	61,26	54,50	61,26	69,12	61,54	9,71%
distrito federal	80,33	77,63	78,84	83,22	80,01	3,01%
espírito santo	51,27	54,06	55,10	61,55	55,50	7,84%
goiás	59,12	61,51	65,15	66,45	63,06	5,32%
maranhão	30,48	32,94	38,28	43,70	36,35	16,18%
mato grosso	86,87	88,49	88,88	95,72	89,99	4,35%
mato grosso do sul	75,90	75,43	83,54	85,50	80,09	6,47%
minas gerais	58,27	63,57	71,96	80,20	68,50	14,05%
pará	69,17	69,51	76,04	81,55	74,07	7,97%
paraíba	62,93	68,73	77,87	85,91	73,86	13,70%
paraná	52,21	55,90	59,36	62,76	57,56	7,88%
pernambuco	40,30	39,65	40,30	45,03	41,32	6,03%
piauí	43,14	44,07	43,79	42,53	43,38	1,59%
rio de janeiro	60,73	66,70	72,23	80,18	69,96	11,83%
rio grande do norte	42,07	35,82	42,07	46,66	41,66	10,69%
rio grande do sul	56,25	58,78	64,26	66,89	61,55	7,94%
rondônia	79,32	86,70	91,76	97,66	88,86	8,75%
roraima	69,06	74,41	76,66	77,81	74,49	5,21%
santa catarina	62,31	65,61	69,78	73,13	67,71	6,99%
são paulo	73,80	73,07	77,08	81,98	76,48	5,31%
sergipe	45,10	49,83	55,50	60,50	52,73	12,71%
tocantins	63,57	64,19	67,19	69,44	66,10	4,13%

Areia - 2022 (SINAPI)											MÉDIA TOTAL		R\$97,40	
0000370 - AREIA MÉDIA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)													MÉDIA REGIONAL GERAL	
REGIÃO	jan/22	fev/22	mar/22	abr/22	mai/22	jun/22	jul/22	ago/22	set/22	out/22	nov/22	dez/22	MÉDIA	Coef. Variação
Média Norte	78,50	80,07	82,00	86,04	85,42	84,92	88,06	88,55	93,02	94,80	95,70	96,00	87,76	16,81%
Média Nordeste	86,39	88,61	88,33	90,56	98,85	95,00	100,71	99,76	103,06	103,61	103,56	103,33	96,81	
Média Centro-Oeste	107,48	106,86	112,49	119,79	78,21	127,75	138,75	132,88	132,98	139,75	140,99	142,24	123,35	
Média Sudeste	67,27	69,44	70,17	72,71	104,38	79,00	81,09	83,43	83,43	82,18	82,43	84,41	79,99	
Média Sul	81,92	88,92	89,83	96,51	94,15	99,83	101,88	104,67	107,17	107,00	107,25	109,92	99,09	
													97,40	
	jan/22	fev/22	mar/22	abr/22	mai/22	jun/22	jul/22	ago/22	set/22	out/22	nov/22	dez/22	MÉDIA	Coef. Variação
acre	42,00	42,00	48,00	51,00	54,00	55,00	67,50	67,50	67,50	68,00	68,00	68,00	58,21	18,36%
alagoas	90,00	90,00	90,00	82,50	82,50	75,00	75,00	75,00	90,00	90,00	90,00	90,00	85,00	7,83%
amazonas	56,00	55,50	65,00	72,50	72,50	70,00	70,00	70,00	84,50	94,00	95,50	92,50	74,83	18,49%
amapá	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00%
bahia	95,00	97,52	97,50	100,00	100,00	110,01	115,01	115,00	115,01	110,00	110,00	110,00	106,25	7,20%
ceará	80,00	80,00	90,00	100,00	110,00	120,00	130,00	130,00	130,00	140,00	135,00	135,00	115,00	19,36%
distrito federal	150,00	150,00	150,00	164,95	160,00	168,98	195,96	195,44	197,93	207,93	207,93	212,93	180,17	13,91%
espírito santo	60,84	65,84	65,84	70,00	75,00	82,50	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	72,50	8,05%
goiás	129,90	129,95	139,50	140,17	150,00	150,00	156,04	142,07	140,00	142,07	142,07	142,07	141,99	5,33%
maranhão	57,50	65,00	65,00	70,00	70,00	65,00	67,50	67,50	65,00	65,00	70,00	70,00	66,46	5,43%
mato grosso	82,00	83,50	94,45	105,05	114,00	114,00	119,00	110,00	110,00	125,00	129,95	129,95	109,74	14,76%
mato grosso do sul	68,00	64,00	66,00	69,00	72,00	78,00	84,00	84,00	84,00	84,00	84,00	84,00	76,75	10,79%
minas gerais	81,25	81,25	84,17	89,17	95,84	95,84	101,67	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	94,10	8,42%
pará	80,00	82,50	82,50	82,50	82,50	82,50	90,00	90,00	90,00	90,00	85,00	90,00	85,63	4,68%
paraíba	90,00	90,00	90,00	90,00	100,00	100,00	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00	101,67	9,22%
paraná	76,75	76,75	80,00	80,02	81,00	85,00	81,65	80,02	82,51	87,00	86,75	86,75	82,02	4,46%
pernambuco	105,00	110,00	110,00	115,00	120,00	120,00	129,00	120,00	130,00	130,00	129,00	130,00	120,67	7,52%
piauí	57,50	65,00	65,00	75,00	80,00	80,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	80,21	14,95%
rio de janeiro	80,00	81,65	81,65	81,65	81,65	81,65	89,00	100,00	100,00	95,00	95,00	102,95	89,18	9,91%
rio grande do norte	90,00	87,50	90,00	90,00	90,00	90,00	97,00	97,50	97,50	97,50	98,00	95,00	93,33	4,33%
rio grande do sul	69,00	85,00	79,50	89,50	89,50	89,50	84,00	84,00	89,00	84,00	85,00	93,00	85,08	7,35%
rondônia	88,50	95,00	96,50	110,00	110,00	110,00	123,75	126,25	137,50	129,75	128,07	128,15	115,29	13,81%
roraima	45,00	47,50	45,00	46,55	49,41	51,67	52,14	53,33	54,17	53,33	53,33	53,33	50,40	6,97%
santa catarina	100,00	105,00	110,00	120,00	125,00	125,00	140,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	131,25	14,81%
são paulo	47,00	49,00	49,00	50,00	52,45	56,00	58,70	58,70	58,70	58,70	59,70	59,70	54,80	8,99%
sergipe	112,50	112,50	97,50	92,50	95,00	95,00	92,86	92,86	100,00	100,00	100,00	100,00	99,23	6,93%
tocantins	90,00	90,00	95,00	108,25	101,00	105,26	105,50	105,27	95,00	106,50	118,00	118,00	103,15	9,13%

Pó de pedra/brita - 2022 (SINAPI)											MÉDIA TOTAL		R\$89,06	
00004741 - Pó de pedra/brita (POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE)													MÉDIA REGIONAL GERAL	
REGIÃO	jan/22	fev/22	mar/22	abr/22	mai/22	jun/22	jul/22	ago/22	set/22	out/22	nov/22	dez/22	MÉDIA	Coef. Variação
Média Norte	139,61	140,31	138,95	143,21	146,42	148,41	151,04	151,69	155,03	154,72	154,29	158,31	148,50	17,59%
Média Nordeste	87,56	90,05	90,49	96,33	95,45	99,56	107,72	108,62	109,31	109,74	106,15	110,87	100,99	
Média Centro-Oeste	88,18	88,93	90,03	91,71	93,17	98,91	105,34	106,09	109,38	114,48	112,14	112,14	100,88	
Média Sudeste	80,21	79,18	79,03	83,47	83,51	85,23	88,54	89,12	91,10	92,33	93,05	93,05	86,48	
Média Sul	61,96	62,95	62,95	65,07	65,07	65,38	68,35	68,35	71,03	70,99	77,83	74,80	67,90	
													89,06	

	jan/22	fev/22	mar/22	abr/22	mai/22	jun/22	jul/22	ago/22	set/22	out/22	nov/22	dez/22	MÉDIA	Coef. Variação
acre	230,69	230,69	223,56	234,44	241,49	281,90	281,90	281,90	263,10	263,10	263,10	263,10	254,91	8,54%
alagoas	67,26	67,60	67,66	72,78	72,78	76,30	86,82	86,82	76,30	76,11	65,77	65,77	73,50	10,10%
amazonas	157,39	173,83	173,83	192,63	201,77	201,77	202,03	202,03	202,03	202,03	202,03	220,82	194,35	8,93%
amapá	234,91	234,91	234,91	234,91	234,91	234,91	239,61	249,01	249,01	249,01	249,01	249,01	241,18	2,92%
bahia	73,10	76,76	82,61	86,99	89,19	91,38	92,11	92,84	93,58	95,77	95,77	95,77	88,82	8,56%
ceará	75,03	77,85	76,95	84,81	84,81	84,81	88,51	88,51	98,29	88,51	44,48	87,38	81,66	16,27%
distrito federal	135,07	138,90	140,95	146,21	146,21	146,21	150,34	150,34	159,74	175,45	159,74	159,74	150,74	7,48%
espírito santo	95,23	95,23	95,23	102,28	107,16	107,16	114,02	113,98	116,10	116,07	118,92	118,92	108,36	8,64%
goiás	73,10	76,01	76,02	77,49	81,88	87,22	95,03	92,26	92,26	92,26	92,26	92,26	85,67	9,53%
maranhão	65,79	65,79	65,79	65,79	65,79	70,18	70,18	70,18	73,10	70,18	70,18	70,18	68,59	3,80%
mato grosso	79,73	79,73	79,73	79,73	81,18	90,58	94,60	96,95	96,95	101,65	104,94	104,94	90,89	11,44%
mato grosso do sul	64,83	61,07	63,42	63,42	63,42	71,64	81,40	84,80	88,56	88,56	91,61	91,61	76,20	16,56%
minas gerais	86,26	89,45	93,57	90,65	90,65	97,52	99,21	99,21	105,27	105,27	105,27	105,27	96,80	6,86%
pará	102,34	95,03	95,03	108,19	108,19	109,66	112,58	108,19	138,66	148,06	169,14	178,53	122,80	23,32%
paraíba	82,22	82,22	82,22	91,61	91,61	91,61	91,61	93,96	98,66	112,76	112,76	112,76	95,33	12,23%
paraná	51,15	53,56	53,56	53,56	53,56	54,50	52,62	52,62	57,01	56,70	66,70	57,63	55,26	7,41%
pernambuco	72,37	67,98	71,65	78,96	76,02	78,96	83,33	84,07	84,07	84,07	84,07	84,07	79,14	7,38%
piauí	155,04	169,14	164,44	169,14	178,53	186,05	204,84	205,31	204,84	205,31	211,42	209,54	188,63	10,86%
rio de janeiro	73,57	70,47	65,77	75,17	70,47	70,47	75,17	77,52	75,17	82,22	82,22	82,22	75,04	7,09%
rio grande do norte	108,06	108,06	108,06	117,45	119,80	136,25	160,68	160,68	159,74	159,74	159,74	159,74	138,17	17,41%
rio grande do sul	57,69	58,25	58,25	58,48	58,48	58,48	58,48	58,48	59,78	59,95	70,47	70,47	60,61	7,67%
rondônia	127,32	122,76	103,56	101,01	103,36	109,23	109,23	120,29	120,09	103,53	103,25	103,25	110,57	8,48%
roraima	202,03	202,03	202,03	197,33	197,33	197,33	197,33	178,53	178,53	178,53	173,83	173,83	189,89	6,28%
santa catarina	77,05	77,05	77,05	83,16	83,16	83,16	93,96	93,96	96,31	96,31	96,31	96,31	87,82	9,57%
são paulo	65,77	61,55	61,55	65,77	65,77	65,77	65,77	65,77	73,91	65,77	65,77	65,77	65,75	4,63%
sergipe	89,19	95,03	95,03	99,42	80,54	80,54	91,44	95,23	95,23	95,23	111,12	112,58	95,05	10,29%
tocantins	86,04	86,04	95,65	95,65	106,62	109,66	109,66	116,97	120,62	125,74	116,97	116,97	107,22	12,53%

Areia - 2022 (SICRO)					R\$137,93	
M0082 - Areia média lavada						
REGIÃO	jan/22	abr/22	jul/22	out/22	MÉDIA REGIONAL GERAL	
					MÉDIA	Coef. Variação
Média Norte	121,96	131,82	139,12	141,64	133,64	6,00%
Média Nordeste	129,80	139,26	145,60	136,01	137,67	
Média Centro-Oeste	118,86	134,51	139,71	144,81	134,47	
Média Sudeste	135,78	151,80	160,27	161,04	152,22	
Média Sul	118,83	131,85	140,48	135,56	131,68	
					137,93	

	jan/22	abr/22	jul/22	out/22	MÉDIA	Coef. Variação
acre	57,13	66,42	70,13	72,45	66,53	10,13%
alagoas	131,89	131,24	135,13	128,47	131,68	2,08%
amazonas	138,10	152,25	158,81	161,61	152,69	6,87%
amapá	137,21	154,50	167,73	170,13	157,39	9,60%
bahia	149,80	164,78	175,21	160,31	162,53	6,48%
ceará	139,27	151,97	158,13	143,50	148,22	5,71%
distrito federal	138,92	141,84	149,15	154,74	146,16	4,90%
espírito santo	147,74	161,62	173,25	175,59	164,55	7,76%
goiás	144,60	169,46	176,37	180,42	167,71	9,58%
maranhão	80,78	88,33	94,26	92,61	89,00	6,76%
mato grosso	97,27	114,55	118,45	123,85	113,53	10,12%
mato grosso do sul	94,63	112,20	114,85	120,21	110,47	10,02%
minas gerais	158,39	175,58	188,32	189,28	177,89	8,11%
pará	145,57	163,52	174,66	179,02	165,69	9,00%
paraíba	141,75	152,71	158,17	145,81	149,61	4,87%
paraná	107,25	120,72	124,80	126,44	119,80	7,27%
pernambuco	140,63	151,09	158,43	144,19	148,59	5,30%
piauí	114,39	120,43	126,03	119,50	120,09	3,97%
rio de janeiro	115,72	134,09	138,42	139,13	131,84	8,32%
rio grande do norte	142,17	157,38	160,94	148,26	152,19	5,62%
rio grande do sul	110,03	123,25	133,00	123,55	122,46	7,71%
rondônia	114,82	124,03	130,20	133,71	125,69	6,59%
roraima	91,82	94,33	98,61	106,67	97,86	6,65%
santa catarina	139,21	151,59	163,64	156,69	152,78	6,75%
são paulo	121,27	135,89	141,07	140,16	134,60	6,81%
sergipe	127,52	135,39	144,11	141,43	137,11	5,37%
tocantins	94,29	102,88	108,69	111,89	104,44	7,40%

Pó de pedra/brita - 2022 (SICRO)					R\$111,21	
M1135 - Pó de pedra/brita						
REGIÃO	jan/22	abr/22	jul/22	out/22	MÉDIA REGIONAL GERAL	
					MÉDIA	Coef. Variação
Média Norte	123,34	144,54	155,07	156,14	144,77	17,79%
Média Nordeste	81,15	95,61	101,18	101,66	94,90	
Média Centro-Oeste	95,84	110,73	116,54	117,73	110,21	
Média Sudeste	92,05	107,85	114,51	115,63	107,51	
Média Sul	86,52	98,64	105,56	103,83	98,64	
					111,21	

	jan/22	abr/22	jul/22	out/22	MÉDIA	Coef. Variação
acre	214,22	255,70	278,85	283,21	258,00	12,24%
alagoas	92,78	107,94	115,98	119,17	108,97	10,81%
amazonas	139,66	178,18	199,55	198,31	178,93	15,62%
amapá	118,54	143,68	160,56	161,41	146,05	13,74%
bahia	86,85	102,02	107,94	106,67	100,87	9,60%
ceará	75,52	85,41	92,68	93,41	86,76	9,58%
distrito federal	95,30	106,22	113,31	115,29	107,53	8,40%
espírito santo	68,70	78,00	84,33	87,40	79,61	10,37%
goiás	101,68	119,39	125,62	125,78	118,12	9,61%
maranhão	96,20	118,02	126,40	122,76	115,85	11,69%
mato grosso	108,94	132,45	138,96	142,03	130,60	11,47%
mato grosso do sul	77,44	84,86	88,25	87,81	84,59	5,91%
minas gerais	104,69	124,07	133,71	132,90	123,84	10,90%
pará	154,43	181,29	199,00	200,75	183,87	11,70%
paraíba	94,38	109,45	116,39	119,03	109,81	10,07%
paraná	78,00	86,46	92,25	93,79	87,63	8,16%
pernambuco	64,21	74,53	80,77	83,54	75,76	11,32%
piauí	83,05	99,48	99,95	98,93	95,35	8,61%
rio de janeiro	96,27	116,73	121,97	123,71	114,67	11,01%
rio grande do norte	65,39	78,67	81,17	82,23	76,87	10,14%
rio grande do sul	90,02	103,11	110,18	103,17	101,62	8,28%
rondônia	121,79	131,32	136,52	142,34	132,99	6,56%
roraima	167,46	187,12	191,25	189,63	183,87	6,02%
santa catarina	91,53	106,35	114,26	114,52	106,67	10,11%
são paulo	98,55	112,61	118,04	118,50	111,93	8,32%
sergipe	71,95	84,94	89,36	89,23	83,87	9,79%
tocantins	68,70	82,27	82,65	81,36	78,75	8,53%

Areia - 2023 (SINAPI)												MÉDIA TOTAL		R\$105,81	
0000370 - AREIA MÉDIA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)															
REGIÃO	jan/23	fev/23	mar/23	abr/23	mai/23	jun/23	jul/23	ago/23	set/23	out/23	nov/23	dez/23	MÉDIA REGIONAL GERAL		
													MÉDIA	Coef. Variação	
Média Norte	95,16	98,76	99,52	100,86	99,94	-	-	-	-	-	-	-	98,85	14,05%	
Média Nordeste	103,78	102,22	103,61	103,61	117,19	-	-	-	-	-	-	-	106,08		
Média Centro-Oeste	141,74	140,70	141,33	138,73	83,34	-	-	-	-	-	-	-	129,17		
Média Sudeste	84,79	85,00	87,43	83,06	103,62	-	-	-	-	-	-	-	88,78		
Média Sul	107,25	107,25	107,83	98,33	110,33	-	-	-	-	-	-	-	106,20		
													105,81		
	jan/23	fev/23	mar/23	abr/23	mai/23	jun/23	jul/23	ago/23	set/23	out/23	nov/23	dez/23	MÉDIA	Coef. Variação	
acre	68,00	68,00	68,00	68,00	68,00	-	-	-	-	-	-	-	68,00	51,49%	
alagoas	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	-	-	-	-	-	-	-	90,00	51,49%	
amazonas	87,50	95,00	99,50	97,50	97,75	-	-	-	-	-	-	-	95,45	51,58%	
amapá	100,00	107,50	110,00	107,50	107,50	-	-	-	-	-	-	-	106,50	51,54%	
bahia	110,00	110,00	110,00	110,00	116,12	-	-	-	-	-	-	-	111,22	51,51%	
ceará	135,00	125,00	135,00	135,00	130,00	-	-	-	-	-	-	-	132,00	51,53%	
distrito federal	212,93	212,98	217,93	207,93	214,98	-	-	-	-	-	-	-	213,35	51,50%	
espírito santo	75,00	75,84	82,50	75,84	80,84	-	-	-	-	-	-	-	78,00	51,56%	
goiás	142,07	137,87	129,42	126,97	124,47	-	-	-	-	-	-	-	132,16	51,61%	
maranhão	70,00	65,00	65,00	65,00	65,00	-	-	-	-	-	-	-	66,00	51,53%	
mato grosso	127,96	127,95	127,96	130,00	130,00	-	-	-	-	-	-	-	128,77	51,50%	
mato grosso do sul	84,00	84,00	90,00	90,00	90,00	-	-	-	-	-	-	-	87,60	51,54%	
minas gerais	100,00	100,00	97,50	97,50	97,50	-	-	-	-	-	-	-	98,50	51,50%	
pará	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	-	-	-	-	-	-	-	90,00	51,49%	
paraíba	115,00	115,00	115,00	115,00	115,00	-	-	-	-	-	-	-	115,00	51,49%	
paraná	86,75	86,75	88,50	85,00	100,00	-	-	-	-	-	-	-	89,40	51,65%	
pernambuco	129,00	130,00	130,00	130,00	130,00	-	-	-	-	-	-	-	129,80	51,49%	
piauí	90,00	90,00	87,50	87,45	87,50	-	-	-	-	-	-	-	88,49	51,50%	
rio de janeiro	104,45	104,45	110,00	98,90	94,45	-	-	-	-	-	-	-	102,45	51,61%	
rio grande do norte	95,00	95,00	100,00	100,00	100,00	-	-	-	-	-	-	-	98,00	51,52%	
rio grande do sul	85,00	85,00	85,00	85,00	80,00	-	-	-	-	-	-	-	84,00	51,52%	
rondônia	128,15	137,50	128,90	134,32	141,00	-	-	-	-	-	-	-	133,97	51,55%	
roraima	52,50	53,33	53,33	56,67	53,33	-	-	-	-	-	-	-	53,83	51,53%	
santa catarina	150,00	150,00	150,00	125,00	125,00	-	-	-	-	-	-	-	140,00	51,83%	
são paulo	59,70	59,70	59,70	60,00	60,00	-	-	-	-	-	-	-	59,82	51,49%	
sergipe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	-	-	-	-	-	-	-	100,00	51,49%	
tocantins	118,00	118,00	124,89	130,00	120,00	-	-	-	-	-	-	-	122,18	51,56%	

Pó de pedra/brita - 2023 (SINAPI)											MÉDIA TOTAL		R\$100,53	
00004741 - Pó de pedra/brita (POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE)													MÉDIA REGIONAL GERAL	
REGIÃO	jan/23	fev/23	mar/23	abr/23	mai/23	jun/23	jul/23	ago/23	set/23	out/23	nov/23	dez/23	MÉDIA	Coef. Variação
Média Norte	156,67	161,70	167,52	171,86	178,04	-	-	-	-	-	-	-	167,16	18,44%
Média Nordeste	112,53	112,83	113,04	111,27	112,05	-	-	-	-	-	-	-	112,34	
Média Centro-Oeste	112,09	116,43	116,43	116,02	119,96	-	-	-	-	-	-	-	116,19	
Média Sudeste	97,26	99,65	98,41	98,95	97,61	-	-	-	-	-	-	-	98,37	
Média Sul	73,29	74,02	76,97	75,48	76,27	-	-	-	-	-	-	-	75,21	
													100,53	

	jan/23	fev/23	mar/23	abr/23	mai/23	jun/23	jul/23	ago/23	set/23	out/23	nov/23	dez/23	MÉDIA	Coef. Variação
acre	263,10	218,47	223,17	223,17	223,17	-	-	-	-	-	-	-	230,22	51,72%
alagoas	65,77	65,77	77,99	73,29	73,29	-	-	-	-	-	-	-	71,22	51,69%
amazonas	220,82	220,82	220,82	220,82	220,82	-	-	-	-	-	-	-	220,82	51,49%
amapá	244,31	244,31	244,31	244,31	244,31	-	-	-	-	-	-	-	244,31	51,49%
bahia	95,77	95,77	97,23	100,15	100,15	-	-	-	-	-	-	-	97,23	51,50%
ceará	99,42	99,04	99,42	99,42	99,42	-	-	-	-	-	-	-	99,34	51,49%
distrito federal	159,74	175,45	175,45	169,14	169,14	-	-	-	-	-	-	-	169,78	51,54%
espírito santo	129,67	129,67	129,67	129,67	129,67	-	-	-	-	-	-	-	129,67	51,49%
goiás	92,07	92,26	92,26	96,94	96,94	-	-	-	-	-	-	-	94,09	51,52%
maranhão	70,91	73,10	73,10	73,10	73,10	-	-	-	-	-	-	-	72,66	51,50%
mato grosso	104,94	106,40	106,40	106,40	122,15	-	-	-	-	-	-	-	109,26	51,65%
mato grosso do sul	91,61	91,61	91,61	91,61	91,61	-	-	-	-	-	-	-	91,61	51,49%
minas gerais	105,27	102,34	102,34	102,34	102,34	-	-	-	-	-	-	-	102,93	51,50%
pará	178,53	187,93	187,93	197,33	187,93	-	-	-	-	-	-	-	187,93	51,54%
paraíba	112,76	112,76	122,16	105,71	105,71	-	-	-	-	-	-	-	111,82	51,62%
paraná	57,63	57,63	66,48	62,01	62,01	-	-	-	-	-	-	-	61,15	51,62%
pernambuco	84,07	84,07	85,53	84,07	84,07	-	-	-	-	-	-	-	84,36	51,49%
piauí	209,54	210,48	210,48	214,24	216,12	-	-	-	-	-	-	-	212,17	51,50%
rio de janeiro	88,32	100,82	95,87	98,00	92,65	-	-	-	-	-	-	-	95,13	51,58%
rio grande do norte	159,74	159,74	131,55	131,55	131,55	-	-	-	-	-	-	-	142,83	51,90%
rio grande do sul	65,94	68,13	68,13	68,13	68,13	-	-	-	-	-	-	-	67,69	51,50%
rondônia	106,77	108,19	113,20	124,78	139,87	-	-	-	-	-	-	-	118,56	51,97%
roraima	163,50	187,93	211,42	225,52	263,10	-	-	-	-	-	-	-	210,29	52,62%
santa catarina	96,31	96,31	96,31	96,31	98,66	-	-	-	-	-	-	-	96,78	51,50%
são paulo	65,77	65,77	65,77	65,77	65,77	-	-	-	-	-	-	-	65,77	51,49%
sergipe	114,78	114,78	119,89	122,81	125,01	-	-	-	-	-	-	-	119,45	51,55%
tocantins	116,97	116,97	116,97	116,97	116,97	-	-	-	-	-	-	-	116,97	51,49%

Areia - 2023 (SICRO)					R\$144,30	
M0082 - Areia média lavada						
REGIÃO	jan/23	abr/23	jul/23	out/23	MÉDIA REGIONAL GERAL	
					MÉDIA	Coef. Variação
Média Norte	145,42	-	-	-	145,42	6,78%
Média Nordeste	135,22	-	-	-	135,22	
Média Centro-Oeste	144,51	-	-	-	144,51	
Média Sudeste	159,77	-	-	-	159,77	
Média Sul	136,56	-	-	-	136,56	
					144,30	

	jan/23	abr/23	jul/23	out/23	MÉDIA	Coef. Variação
acre	75,90	-	-	-	75,90	50,00%
alagoas	126,68	-	-	-	126,68	50,00%
amazonas	167,64	-	-	-	167,64	50,00%
amapá	172,81	-	-	-	172,81	50,00%
bahia	158,33	-	-	-	158,33	50,00%
ceará	142,50	-	-	-	142,50	50,00%
distrito federal	149,54	-	-	-	149,54	50,00%
espírito santo	176,59	-	-	-	176,59	50,00%
goiás	179,97	-	-	-	179,97	50,00%
maranhão	95,17	-	-	-	95,17	50,00%
mato grosso	125,02	-	-	-	125,02	50,00%
mato grosso do sul	123,50	-	-	-	123,50	50,00%
minas gerais	190,58	-	-	-	190,58	50,00%
pará	183,01	-	-	-	183,01	50,00%
paraíba	143,11	-	-	-	143,11	50,00%
paraná	127,19	-	-	-	127,19	50,00%
pernambuco	139,42	-	-	-	139,42	50,00%
piauí	121,74	-	-	-	121,74	50,00%
rio de janeiro	133,84	-	-	-	133,84	50,00%
rio grande do norte	145,60	-	-	-	145,60	50,00%
rio grande do sul	128,50	-	-	-	128,50	50,00%
rondônia	140,20	-	-	-	140,20	50,00%
roraima	110,71	-	-	-	110,71	50,00%
santa catarina	154,00	-	-	-	154,00	50,00%
são paulo	138,08	-	-	-	138,08	50,00%
sergipe	144,42	-	-	-	144,42	50,00%
tocantins	116,89	-	-	-	116,89	50,00%

Pó de pedra/brita - 2023 (SICRO)					R\$120,28	
M1135 - Pó de pedra/brita						
REGIÃO	jan/23	abr/23	jul/23	out/23	MÉDIA REGIONAL GERAL	
					MÉDIA	Coef. Variação
Média Norte	153,90	-	-	-	153,90	16,71%
Média Nordeste	103,36	-	-	-	103,36	
Média Centro-Oeste	120,01	-	-	-	120,01	
Média Sudeste	117,75	-	-	-	117,75	
Média Sul	106,37	-	-	-	106,37	
					120,28	

	jan/23	abr/23	jul/23	out/23	MÉDIA	Coef. Variação
acre	281,80	-	-	-	281,80	50,00%
alagoas	119,02	-	-	-	119,02	50,00%
amazonas	195,55	-	-	-	195,55	50,00%
amapá	160,60	-	-	-	160,60	50,00%
bahia	109,23	-	-	-	109,23	50,00%
ceará	94,94	-	-	-	94,94	50,00%
distrito federal	116,48	-	-	-	116,48	50,00%
espírito santo	89,30	-	-	-	89,30	50,00%
goiás	127,56	-	-	-	127,56	50,00%
maranhão	123,86	-	-	-	123,86	50,00%
mato grosso	145,49	-	-	-	145,49	50,00%
mato grosso do sul	90,51	-	-	-	90,51	50,00%
minas gerais	135,89	-	-	-	135,89	50,00%
pará	188,30	-	-	-	188,30	50,00%
paraíba	119,77	-	-	-	119,77	50,00%
paraná	95,37	-	-	-	95,37	50,00%
pernambuco	84,38	-	-	-	84,38	50,00%
piauí	101,89	-	-	-	101,89	50,00%
rio de janeiro	125,02	-	-	-	125,02	50,00%
rio grande do norte	83,48	-	-	-	83,48	50,00%
rio grande do sul	107,16	-	-	-	107,16	50,00%
rondônia	151,80	-	-	-	151,80	50,00%
roraima	177,25	-	-	-	177,25	50,00%
santa catarina	116,59	-	-	-	116,59	50,00%
são paulo	120,80	-	-	-	120,80	50,00%
sergipe	93,69	-	-	-	93,69	50,00%
tocantins	84,75	-	-	-	84,75	50,00%

ANEXO A – CÁLCULOS DO OPENLCA (COM PÓ DE PEDRA/BRITA)

Análise de impactos: ReCiPe 2016 Midpoint (H)

Sub-group by: Fluxos Processos | Don't show < 1 %

Nome	Categoria	Resultado do inventário	Resultado do impacto
▼ <input checked="" type="checkbox"/> Fine particulate matter formation	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		81.51353 kg PM2.5 eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Nitrogen oxides	Elementary flows/Emission to air/high population density	707.42000 kg ■	77.81620 kg PM2.5 eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Sulfur dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	6.16770 kg	1.78863 kg PM2.5 eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Nitrogen oxides	Elementary flows/Emission to air/unspecified	14.69412 kg	1.61635 kg PM2.5 eq
▼ <input checked="" type="checkbox"/> Fossil resource scarcity	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		32.85061 kg oil eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Energy, from gas, natural	Elementary flows/Resource/unspecified	911.61841 MJ ■	19.96444 kg oil eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Energy, from oil	Elementary flows/Resource/unspecified	451.87812 MJ ■	9.85094 kg oil eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Energy, from coal	Elementary flows/Resource/unspecified	117.66638 MJ	2.58866 kg oil eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Energy, from oil	Elementary flows/Resource/in ground	19.02453 MJ	0.41473 kg oil eq
▼ <input checked="" type="checkbox"/> Freshwater ecotoxicity	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		0.20419 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Clay	Elementary flows/Emission to air/high population density	65.20000 kg ■	0.09584 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Zinc	Elementary flows/Emission to water/river	0.00039 kg	0.08327 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Zinc	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00366 kg	0.02173 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Nickel	Elementary flows/Emission to water/river	5.87906E-5 kg	0.00270 kg 1,4-DCB
▼ <input checked="" type="checkbox"/> Freshwater eutrophication	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		0.00178 kg P eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Phosphate	Elementary flows/Emission to water/river	0.00540 kg ■	0.00178 kg P eq
▼ <input checked="" type="checkbox"/> Global warming	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		213.49752 kg CO2 eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to air/high population density	174.73600 kg ■	174.73600 kg CO2 eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	25.09242 kg	25.09242 kg CO2 eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Methane	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.25427 kg	8.64520 kg CO2 eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Dinitrogen monoxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.01666 kg	4.96398 kg CO2 eq
▼ <input checked="" type="checkbox"/> Human carcinogenic toxicity	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		0.54722 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachl	Elementary flows/Emission to air/unspecified	5.61893E-9 kg ■	0.51863 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Lead	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00103 kg	0.01922 kg 1,4-DCB
▼ <input checked="" type="checkbox"/> Human non-carcinogenic toxicity	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		58.97338 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Zinc	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00366 kg ■	30.23345 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Lead	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00103 kg ■	23.04102 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Zinc	Elementary flows/Emission to water/river	0.00039 kg	3.25184 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Zinc	Elementary flows/Emission to soil/agricultural	2.31400E-5 kg	0.87238 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Cadmium	Elementary flows/Emission to air/unspecified	2.23461E-5 kg	0.79999 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Mercury	Elementary flows/Emission to air/unspecified	2.91817E-5 kg	0.72371 kg 1,4-DCB
▼ <input checked="" type="checkbox"/> Ionizing radiation	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		0.00347 kBq Co-60 eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Carbon-14	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00120 kBq ■	0.00138 kBq Co-60 eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Radon-222	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.72162 kBq ■	0.00105 kBq Co-60 eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Cesium-137	Elementary flows/Emission to water/river	5.20004E-5 kBq	0.00052 kBq Co-60 eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Cesium-137	Elementary flows/Emission to water/fresh water	2.52640E-5 kBq	0.00025 kBq Co-60 eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Cobalt-60	Elementary flows/Emission to water/river	2.58310E-5 kBq	6.81939E-5 kBq Co-60 eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Krypton-85	Elementary flows/Emission to air/unspecified	6.08585 kBq	5.16080E-5 kBq Co-60 eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Cesium-134	Elementary flows/Emission to water/river	5.82796E-6 kBq	5.03535E-5 kBq Co-60 eq
▼ <input checked="" type="checkbox"/> Land use	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		0.72354 m2a crop eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Occupation, arable land, unspecified	Elementary flows/Resource/unspecified	0.31040 m2*a ■	0.31040 m2a crop eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Occupation, unknown	Elementary flows/Resource/unspecified	0.31008 m2*a ■	0.31008 m2a crop eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Occupation, arable	Elementary flows/Resource/land	0.05156 m2*a	0.05156 m2a crop eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Occupation, unknown	Elementary flows/Resource/land	0.05150 m2*a	0.05150 m2a crop eq
▼ <input checked="" type="checkbox"/> Marine ecotoxicity	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		0.58652 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Zinc	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00366 kg ■	0.42510 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Zinc	Elementary flows/Emission to water/river	0.00039 kg	0.11800 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Clay	Elementary flows/Emission to air/high population density	65.20000 kg	0.02080 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Mercury	Elementary flows/Emission to air/unspecified	2.91817E-5 kg	0.00700 kg 1,4-DCB
▼ <input checked="" type="checkbox"/> Marine eutrophication	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		0.00300 kg N eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Ammonia	Elementary flows/Emission to water/river	0.01006 kg ■	0.00246 kg N eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Nitrogen	Elementary flows/Emission to water/river	0.00142 kg	0.00042 kg N eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Nitrate	Elementary flows/Emission to water/river	0.00154 kg	0.00010 kg N eq
▼ <input checked="" type="checkbox"/> Mineral resource scarcity	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		9.27236 kg Cu eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Limestone	Elementary flows/Resource/in ground	456.40000 kg ■	9.21928 kg Cu eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Iron ore	Elementary flows/Resource/in ground	9.78000 kg	0.17115 kg Cu eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Zinc	Elementary flows/Resource/unspecified	-1.12329 kg	-0.17186 kg Cu eq
▼ <input checked="" type="checkbox"/> Ozone formation, Human health	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		722.17346 kg NOx eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Nitrogen oxides	Elementary flows/Emission to air/high population density	707.42000 kg ■	707.42000 kg NOx eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Nitrogen oxides	Elementary flows/Emission to air/unspecified	14.69412 kg	14.69412 kg NOx eq
▼ <input checked="" type="checkbox"/> Ozone formation, Terrestrial ecosystems	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		722.17376 kg NOx eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Nitrogen oxides	Elementary flows/Emission to air/high population density	707.42000 kg ■	707.42000 kg NOx eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Nitrogen oxides	Elementary flows/Emission to air/unspecified	14.69412 kg	14.69412 kg NOx eq
▼ <input checked="" type="checkbox"/> Stratospheric ozone depletion	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		0.00018 kg CFC11 eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Dinitrogen monoxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.01666 kg ■	0.00018 kg CFC11 eq
▼ <input checked="" type="checkbox"/> Terrestrial acidification	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		267.09141 kg SO2 eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Nitrogen oxides	Elementary flows/Emission to air/high population density	707.42000 kg ■	254.67120 kg SO2 eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Sulfur dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	6.16770 kg	6.16770 kg SO2 eq
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Nitrogen oxides	Elementary flows/Emission to air/unspecified	14.69412 kg	5.28988 kg SO2 eq
▼ <input checked="" type="checkbox"/> Terrestrial ecotoxicity	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		690.88061 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Zinc	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00366 kg ■	498.39384 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Clay	Elementary flows/Emission to air/high population density	65.20000 kg	103.01600 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Lead	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00103 kg	44.63552 kg 1,4-DCB
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Mercury	Elementary flows/Emission to air/unspecified	2.91817E-5 kg	40.27079 kg 1,4-DCB
▼ <input checked="" type="checkbox"/> Water consumption	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		3.13494 m3
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Water, unspecified natural origin/m3	Elementary flows/Resource/in water	3.12207 m3 ■	3.12207 m3
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Water, river	Elementary flows/Resource/in water	0.03785 m3	0.03785 m3
▶ <input checked="" type="checkbox"/> Water (river water from technosphere	Elementary flows/Emission to water/fresh water	40.14042 kg	-0.04014 m3

Extraído do espelho de resultados de inventário Recipe Midpoint 2016 software Open LCA 2.0.1 (2023)

ANEXO B – CÁLCULOS DO OPENLCA (SEM PÓ DE PEDRA/BRITA)

• Análise de impactos: ReCiPe 2016 Midpoint (H)

Sub-group by: Fluxos Processos | Don't show < 1 %

Nome	Categoria	Resultado do inventário	Resultado do impacto
∨ Fine particulate matter formation	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		81.67466 kg PM2.5 eq
> Nitrogen oxides	Elementary flows/Emission to air/high population density	707.42000 kg	77.81620 kg PM2.5 eq
> Sulfur dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	6.54083 kg	1.89684 kg PM2.5 eq
> Nitrogen oxides	Elementary flows/Emission to air/unspecified	14.69413 kg	1.61635 kg PM2.5 eq
∨ Fossil resource scarcity	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		59.84265 kg oil eq
> Energy, from gas, natural	Elementary flows/Resource/unspecified	1771.35174 MJ	38.79260 kg oil eq
> Energy, from oil	Elementary flows/Resource/unspecified	826.32137 MJ	18.01381 kg oil eq
> Energy, from coal	Elementary flows/Resource/unspecified	117.71167 MJ	2.58966 kg oil eq
∨ Freshwater ecotoxicity	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		0.31211 kg 1,4-DCB
> Zinc	Elementary flows/Emission to water/river	0.00079 kg	0.16649 kg 1,4-DCB
> Clay	Elementary flows/Emission to air/high population density	65.20000 kg	0.09584 kg 1,4-DCB
> Zinc	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00733 kg	0.04346 kg 1,4-DCB
> Nickel	Elementary flows/Emission to water/river	0.00012 kg	0.00539 kg 1,4-DCB
∨ Freshwater eutrophication	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		0.00356 kg P eq
> Phosphate	Elementary flows/Emission to water/river	0.01079 kg	0.00356 kg P eq
∨ Global warming	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		227.85936 kg CO2 eq
> Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to air/high population density	174.73600 kg	174.73600 kg CO2 eq
> Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	26.13103 kg	26.13103 kg CO2 eq
> Methane	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.50127 kg	17.04306 kg CO2 eq
> Dinitrogen monoxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.03319 kg	9.88924 kg CO2 eq
∨ Human carcinogenic toxicity	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		1.09366 kg 1,4-DCB
> Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachl	Elementary flows/Emission to air/unspecified	1.12378E-8 kg	1.03725 kg 1,4-DCB
> Lead	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00207 kg	0.03843 kg 1,4-DCB
∨ Human non-carcinogenic toxicity	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		117.11460 kg 1,4-DCB
> Zinc	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00733 kg	60.46575 kg 1,4-DCB
> Lead	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00207 kg	46.07837 kg 1,4-DCB
> Zinc	Elementary flows/Emission to water/river	0.00079 kg	6.50180 kg 1,4-DCB
> Cadmium	Elementary flows/Emission to air/unspecified	4.46834E-5 kg	1.59966 kg 1,4-DCB
> Mercury	Elementary flows/Emission to air/unspecified	5.82684E-5 kg	1.44506 kg 1,4-DCB
∨ Ionizing radiation	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		0.00376 kBq Co-60 eq
> Carbon-14	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00134 kBq	0.00154 kBq Co-60 eq
> Radon-222	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.80845 kBq	0.00117 kBq Co-60 eq
> Cesium-137	Elementary flows/Emission to water/river	5.21634E-5 kBq	0.00052 kBq Co-60 eq
> Cesium-137	Elementary flows/Emission to water/fresh water	2.52640E-5 kBq	0.00025 kBq Co-60 eq
> Cobalt-60	Elementary flows/Emission to water/river	2.61817E-5 kBq	6.91196E-5 kBq Co-60 eq
> Krypton-85	Elementary flows/Emission to air/unspecified	6.09017 kBq	5.16446E-5 kBq Co-60 eq
> Cesium-134	Elementary flows/Emission to water/river	5.85912E-6 kBq	5.06228E-5 kBq Co-60 eq
∨ Land use	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		0.82267 m2a crop eq
> Occupation, arable land, unspecified	Elementary flows/Resource/unspecified	0.35999 m2*a	0.35999 m2a crop eq
> Occupation, unknown	Elementary flows/Resource/unspecified	0.35962 m2*a	0.35962 m2a crop eq
> Occupation, arable	Elementary flows/Resource/land	0.05156 m2*a	0.05156 m2a crop eq
> Occupation, unknown	Elementary flows/Resource/land	0.05150 m2*a	0.05150 m2a crop eq
∨ Marine ecotoxicity	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		1.14574 kg 1,4-DCB
> Zinc	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00733 kg	0.85019 kg 1,4-DCB
> Zinc	Elementary flows/Emission to water/river	0.00079 kg	0.23593 kg 1,4-DCB
> Clay	Elementary flows/Emission to air/high population density	65.20000 kg	0.02080 kg 1,4-DCB
> Mercury	Elementary flows/Emission to air/unspecified	5.82684E-5 kg	0.01398 kg 1,4-DCB
∨ Marine eutrophication	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		0.00589 kg N eq
> Ammonia	Elementary flows/Emission to water/river	0.02011 kg	0.00491 kg N eq
> Nitrogen	Elementary flows/Emission to water/river	0.00283 kg	0.00084 kg N eq
> Nitrate	Elementary flows/Emission to water/river	0.00178 kg	0.00012 kg N eq
∨ Mineral resource scarcity	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		9.10056 kg Cu eq
> Limestone	Elementary flows/Resource/in ground	456.40000 kg	9.21928 kg Cu eq
> Iron ore	Elementary flows/Resource/in ground	9.78000 kg	0.17115 kg Cu eq
> Zinc	Elementary flows/Resource/unspecified	-2.24659 kg	-0.34373 kg Cu eq
∨ Ozone formation, Human health	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		722.17943 kg NOx eq
> Nitrogen oxides	Elementary flows/Emission to air/high population density	707.42000 kg	707.42000 kg NOx eq
> Nitrogen oxides	Elementary flows/Emission to air/unspecified	14.69413 kg	14.69413 kg NOx eq
∨ Ozone formation, Terrestrial ecosystems	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		722.17974 kg NOx eq
> Nitrogen oxides	Elementary flows/Emission to air/high population density	707.42000 kg	707.42000 kg NOx eq
> Nitrogen oxides	Elementary flows/Emission to air/unspecified	14.69413 kg	14.69413 kg NOx eq
∨ Stratospheric ozone depletion	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		0.00037 kg CFC11 eq
> Dinitrogen monoxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.03319 kg	0.00037 kg CFC11 eq
∨ Terrestrial acidification	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		267.63782 kg SO2 eq
> Nitrogen oxides	Elementary flows/Emission to air/high population density	707.42000 kg	254.67120 kg SO2 eq
> Sulfur dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	6.54083 kg	6.54083 kg SO2 eq
> Nitrogen oxides	Elementary flows/Emission to air/unspecified	14.69413 kg	5.28989 kg SO2 eq
∨ Terrestrial ecotoxicity	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		1278.34783 kg 1,4-DCB
> Zinc	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00733 kg	996.76867 kg 1,4-DCB
> Clay	Elementary flows/Emission to air/high population density	65.20000 kg	103.01600 kg 1,4-DCB
> Lead	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00207 kg	89.26392 kg 1,4-DCB
> Mercury	Elementary flows/Emission to air/unspecified	5.82684E-5 kg	80.41037 kg 1,4-DCB
∨ Water consumption	ReCiPe 2016 Midpoint (H)		6.21720 m3
> Water, unspecified natural origin/m3	Elementary flows/Resource/in water	6.20432 m3	6.20432 m3

Extraído do espelho de resultados de inventário Recipe Midpoint 2016 software Open LCA 2.0.1 (2023)