

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
GRUPO DE PESQUISA SICON

THIAGO FERREIRA COSTA

**CALCRETE: uma ferramenta de auxílio à obtenção de traços, custos e indicadores de
ecoefficiência de concretos para dispositivos Android**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2024

THIAGO FERREIRA COSTA

**CALCRETE: uma ferramenta de auxílio à obtenção de traços, custos e indicadores de
ecoefficiência de concretos para dispositivos Android**

Relatório apresentado à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências da conclusão de Iniciação Científica em Engenharia Civil. Projeto APQ-02637-21 fomentado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

Orientador: José Maria Franco de Carvalho

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2024

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um aplicativo para dispositivos Android, denominado Calcrete, que é uma ferramenta inovadora para a análise de concretos e seus impactos ambientais. O aplicativo, desenvolvido em React Native, é capaz de calcular traços de concreto, utilizando os métodos ABCP e IPT, receber traços obtidos por outros métodos, calcular indicadores de ecoeficiência do concreto e os custos de cada material utilizado. A ferramenta visa facilitar a análise e promover o uso de soluções sustentáveis na produção de concretos e na indústria da construção civil. Assim, para cumprir com tal objetivo, o Calcrete foi desenvolvido buscando soluções de modelagem dos indicadores de ecoeficiência na literatura a fim de tornar os resultados mais acessíveis e inteligíveis aos usuários, ao mesmo tempo que permaneçam representativos.

Palavras-chaves: Aplicativo; Concreto; Dosagem; Ecoeficiência; Custos.

ABSTRACT

This work presents the development of an application for Android devices, named Calcrete, which is an innovative tool for the analysis of concrete and its environmental impacts. The application, developed in React Native, is capable of calculating the proportion of the constituents of the concretes using the ABCP and IPT methods, receiving proportions obtained by other methods, calculating eco-efficiency indicators of concrete and the costs of each material used. The tool aims to facilitate the analysis and promote the use of sustainable solutions in the production of concrete and in the civil construction industry. Thus, to fulfill this objective, Calcrete was developed seeking modeling solutions of eco-efficiency indicators in the literature, in order to make the results more accessible and understandable to users, while remaining representative.

Keywords: Application; Concrete; Dosage; Eco-efficiency; Costs.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho faz parte do Projeto APQ-02637-21 fomentado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), a qual presto agradecimento pelo suporte e incentivo fornecido. Agradeço, também, à Rede Mineira de Desenvolvimento Científico, Tecnológico e de Inovação ao Grupo de Pesquisa SICon, ao Laboratório de Materiais Compósitos (LCO), ao Departamento de Engenharia Civil (DEC) e à Universidade Federal de Viçosa (UFV) pelo apoio e suporte técnico prestado. Por fim, agradeço ao orientador deste trabalho, Prof. José Maria Franco de Carvalho, que proporcionou grandes aprendizados e forneceu todo o suporte necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

1	Introdução	8
2	Revisão Bibliográfica.....	10
2.1	Métodos de dosagem.....	10
2.2	Indicadores de ecoeficiência.....	10
3	Objetivos	12
4	Metodologia	13
4.1	React.....	13
4.2	ABCP	13
4.2.1	Determinação da resistência de dosagem	13
4.2.2	Relação água/cimento	14
4.2.3	Consumo de cimento.....	15
4.2.4	Consumo de agregados	15
4.2.5	Massa específica teórica do concreto	19
4.3	IPT.....	19
4.3.1	Determinação da resistência de dosagem	19
4.3.2	Relação água/cimento	19
4.3.3	Traço de agregados	19
4.3.4	Consumo de materiais	20
4.3.5	Massa específica teórica do concreto	21
4.4	Inserir traço.....	21
4.4.1	Consumos.....	21
4.4.2	Massa específica teórica do concreto	22
4.5	Custos.....	22
4.6	Indicadores de ecoeficiência.....	22
4.7	Base de dados	25
4.8	Navegação.....	32

5	Resultados e Discussão	33
5.1	Interface	33
5.2	Resultados gerados pelo app	37
6	Conclusão.....	41
6.1	Conclusão geral.....	41
6.2	Possíveis atualizações.....	41
	Referências Bibliográficas	42

1 Introdução

À medida que a humanidade progrediu, a indústria da construção civil teve que se ajustar ao crescimento acelerado das áreas urbanas e às demandas populacionais que surgiram, sobretudo nos últimos séculos. Isso resultou em um consumo elevado de recursos não renováveis, problemas ambientais, sociais, econômicos, entre outros desafios. O setor, além de responsável pelo esgotamento de 40% a 60% de recursos naturais (VIEIRA, 2016), é um dos principais responsáveis por grande parte dos impactos ambientais que estão em pauta atualmente.

Um dos materiais que possibilitou o avanço da construção civil foi o concreto. Além de resistente, durável e poder ser moldado em diversos tamanhos e formas, o material possui baixo custo e grande disponibilidade de mão de obra e insumos (MEHTA, 2008). Em contrapartida, o cimento Portland, principal e mais tradicional componente do concreto, é, sozinho, responsável por de 5% a 7% das emissões antropogênicas totais de CO₂, 3% das emissões totais de gases do efeito estufa (GEE) e de 12% a 15% do uso total de energia industrial no mundo (ÇANKAYA, 2019).

Por conta disso, a comunidade científica tem se mobilizado cada vez mais por soluções que reduzam os impactos ambientais e melhorem a eficiência da produção dos materiais da construção civil, principalmente do concreto. A reciclagem de materiais, por exemplo, tem grande potencial de redução da demanda de matéria prima e no descarte de resíduos sólidos. Além disso, uma ampla gama de materiais pode ser utilizada na produção de concretos mais sustentáveis na forma de *fillers*, *powders* e agregados graúdos e miúdos, como matéria orgânica, resíduos de construção e demolição (RCD), resíduos e subprodutos de diversos processos industriais, dentre outros (COSTA, 2022).

A redução do consumo de cimento também tem sido apontada como uma solução viável a aumentar a sustentabilidade no setor. Além da redução do CO₂ relacionado à fabricação do aglomerante, outras vantagens são notáveis, como menores custos, menor calor de hidratação e diminuição da retração do concreto. Apesar disso, a otimização de concretos para redução do uso de cimento é um processo complexo que envolve a seleção cuidadosa de materiais e a determinação das proporções corretas para alcançar as propriedades desejadas (COSTA, 2023). Isso se torna ainda mais complexo com o emprego de materiais que demandam algum tratamento adicional, como é o caso de agregados de RCD, que geralmente apresentam alto teor de absorção de água em comparação a agregados convencionais e podem prejudicar a hidratação do cimento se não tratados (TIBURCIO, 2022).

Outro aspecto bastante discutido são os indicadores das características do concreto e como trabalha-los. Segundo Souza (2021), “alguns indicadores foram propostos na indústria da construção para descrever aspectos ambientais do concreto, enquanto outros se concentram em suas propriedades mecânicas e durabilidade”. Ressalta-se, ainda, a possibilidade de combinar esses indicadores a fim de avaliar a ecoeficiência dos concretos. Entretanto, para evitar análises com grandes incertezas e desestruturadas, é necessário adotar metodologias que tenham maior potencial de aplicação prática e forneçam resultados sintéticos de fácil compreensão.

Com base no discorrido, portanto, fica evidente a necessidade do desenvolvimento de ferramentas que, além de facilitar e tornar prática a análise de concretos, incentivem e popularizem técnicas favoráveis ao meio ambiente na produção do mesmo. Ressalta-se, ainda, a importância de que os resultados e indicadores sejam modelados de forma a serem acessíveis e inteligíveis ao mesmo tempo que representativos e completos.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Métodos de dosagem

A dosagem dos materiais em concretos de cimento Portland é essencial para garantir que sejam atendidas suas especificações de aplicação, como resistência mecânica, trabalhabilidade, durabilidade e deformabilidade, com um bom aproveitamento dos materiais e baixo consumo de cimento (COSTA, 2023). Para isso, diversos métodos de dosagem foram desenvolvidos e se tornaram amplamente conhecidos, como o ABCP, IPT, Furnas, Cientec, INT, ITES, O'Reilly, dentre outros (TORALLES, 2018).

Apesar dos resultados dos diferentes métodos de dosagem atuais, de forma geral, serem próximos e consistentes, observa-se variações relevantes de alguns parâmetros, como o teor de argamassa, consumo de cimento, custo por m³, custo por m³/MPa, dentre outros (COSTA, 2023). Outra característica que distingue os métodos é a quantidade e tecnicidade dos dados de entrada necessários, muitas vezes sendo um fator determinante de rejeição de algum método. Além disso, a classe de resistência também é um critério muito importante, visto que alguns métodos só são aplicáveis ou recomendados em uma determinada classe (OLIVEIRA, 2012).

Para concretos do Grupo I (classes de resistência C20 a C50), mais comumente utilizados no Brasil, os métodos IPT e ABCP se mostram os mais eficientes, apresentando menor teor de argamassa, menor consumo de cimento, menor custo e menor custo por resistência mecânica (TORALLES, 2018). Dependendo da disponibilidade técnica regional, qualquer dos métodos pode ser mais adequado, visto que o ABCP demanda mais características experimentais dos agregados e o IPT, além de características dos agregados, requer a determinação do teor de argamassa, ensaio sem padronização de norma que pode levar a erros se mal executado (COSTA, 2023). Já para o Grupo II (classes de resistência C50 a C100), modelos teóricos de empacotamento de partículas são mais recomendados, como Furnas, Andreassen, dentre outros, sendo o ABCP e IPT não recomendados (OLIVEIRA, 2012).

2.2 Indicadores de ecoeficiência

A comunidade científica tem dedicado tempo e esforço para quantificar impactos ambientais e recomendar soluções para reduzi-los. A função de desejabilidade estatística tem sido apontada como uma ferramenta muito importante no processo de simplificação da visualização das respostas, pois, além de sua alta eficiência, possui grande poder de modelagem dos resultados e exploração dos sistemas estudados (NOVAES, 2017). Para Souza (2021), a

desejabilidade estatística, além de sua simples aplicação em ferramentas computacionais, pode traduzir a complexidade dos efeitos dos vários impactos ambientais em um único valor, tornando prática a análise desses.

Além disso, como citado anteriormente, diversos indicadores foram propostos com diferentes objetivos, o que torna a análise de concretos sustentáveis uma tarefa de difícil execução e interpretação. Por outro lado, segundo Souza (2021), a ecoeficiência de concretos pôde ser avaliada adequadamente por um conjunto de novos indicadores que combinam parâmetros já existentes em respostas de simples compreensão. A proposta do autor visa o uso prático, de fácil compreensão e diretamente alinhados com os objetivos de acordos regionais, nacionais e internacionais na área de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável global. São eles:

- a) Redução de Impactos Negativos de Energia (RIE), que se baseia no indicador individual de consumo primário de energia não renovável (TPE).
- b) Redução de Impactos dos Materiais (RIM), que consiste na média das desejabilidades associadas aos indicadores de matéria-prima primária (PRM), material reciclado total (RM) e consumo de água (WC).
- c) Redução de Gases do Efeito Estufa (RGE), que é obtido pela desejabilidade do indicador de dióxido de carbono, vapor d'água, metano e óxido nitroso (GWP).
- d) Redução do Potencial de Ecotoxicidade (RPE), que consiste em uma média das desejabilidades associadas aos indicadores de potencial ecotoxicológico de água doce (FAETP), potencial ecotoxicológico terrestre (TETP) e potencial ecotoxicológico marinho (MAETP).
- e) Redução da Acidificação, Eutrofização e Ozônio (AEO), que é composto pela média das desejabilidades individuais associadas aos indicadores de potencial de depleção do ozônio (ODP), eutrofização (EP) e acidificação (AP).
- f) Ecoeficiência Potencial (EEP), que consiste em uma média dos indicadores RIE, RIM, RGE, RPE e AEO, a fim de resumir todos os indicadores em um único que combina todos os aspectos ambientais avaliados, fornecendo uma visão simples e intuitiva da ecoeficiência dos concretos.

3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um aplicativo Android, nomeado como Calcrete, para análise prática, intuitiva e de fácil acesso da ecoeficiência de concretos, baseando-se na metodologia de desejabilidade estatística, proposta por Souza (2021). Para isso, os objetivos secundários são:

- a) Utilizar bibliotecas React Native para implementar as interfaces do aplicativo e JavaScript como linguagem de programação.
- b) Criar um banco de dados, com base na literatura, com caracterização, custo unitário e indicadores de sustentabilidade para cada material, o qual poderá ser expandido em atualizações futuras.
- c) Implementar três opções de obtenção dos consumos dos materiais, em kg por m³: inserir um traço mássico e obter um traço mássico pelos métodos ABCP ou IPT, mais eficientes para o Grupo I de classes de resistência de concretos estruturais.
- d) Implementar estimativa de custos totais e individuais com base no consumo de materiais.

Além disso, espera-se promover, por meio desta ferramenta, a divulgação e popularização de práticas sustentáveis no setor da construção civil e na sociedade como um todo.

4 Metodologia

4.1 React

O React Native é uma biblioteca desenvolvida pelo Facebook para facilitar a criação de componentes de interfaces interativas, reusáveis e com estados dinâmicos (FALCÃO, 2022). Nessa biblioteca, é utilizado o JSX, uma extensão para a linguagem JavaScript com estrutura semelhante à do HTML, possibilitando trabalhar JavaScript e HTML no mesmo arquivo e dividir a aplicação em componentes, o que se tornou uma das principais vantagens do React. Além disso, para estilização dos componentes utiliza-se uma sintaxe semelhante ao CSS.

Para o desenvolvimento do aplicativo, o Node.JS foi utilizado com ambiente de execução do código e o Expo como framework de apoio. Para visualização em tempo real do funcionamento do app, empregou-se o Android Studio, o qual permite, ainda, simular dispositivos Android com características diferentes. Vale ressaltar que, apesar do React gerar códigos nativos para Android e IOS, o presente trabalho limitou-se a testes em dispositivos Android.

O editor de códigos adotado foi o Visual Studio Code e a aplicação foi segmentada em componentes por telas com auxílio da biblioteca React Navigation. Diversas outras bibliotecas open source da comunidade e do próprio React também foram instaladas para economizar tempo de desenvolvimento. Por fim, para facilitar a atualização do app, criou-se um componente de base de dados, onde todas as informações sobre os materiais são armazenadas e exportadas para as telas necessárias durante a navegação.

4.2 ABCP

O método de dosagem ABCP foi publicado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) em 1984, intitulado “Parâmetros de Dosagem de Concreto” (RODRIGUES, 1998). O método utiliza tabelas e gráficos, elaborados a partir de análises experimentais, para que se obtenha o traço desejado (BOGGIO, 2000). A sequência de cálculo adotada no aplicativo é descrita nos itens a seguir.

4.2.1 Determinação da resistência de dosagem

A resistência de dosagem é determinada pela Equação 1, extraída da ABNT NBR 12655:2015.

$$f_{c28} = f_{ck} + 1,65 \times S_d \quad (1)$$

Em que:

f_{c28} é a resistência média do concreto à compressão em 28 dias, em MPa;

f_{ck} é a resistência característica do concreto em 28 dias, em MPa;

S_d é o desvio-padrão da dosagem, em MPa;

O desvio-padrão, entretanto, pode ser obtido, também, conforme a condição de preparo do concreto, sendo 4,0 MPa, para a condição A, 5,5 MPa, para a condição B, e 7,0 MPa, para a condição C. Abaixo, constam as descrições de cada condição de preparo, conforme a ABNT NBR 12655:2015:

- a) condição A (aplicável a todas as classes de concreto): o cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados;
- b) condição B (pode ser aplicada às classes C10 a C20): o cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados medidos em massa combinada com volume, de acordo com o exposto em 5.4;
- c) condição C (pode ser aplicada apenas aos concretos de classe C10 e C15): o cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume, a água de amassamento é medida em volume e a sua quantidade é corrigida em função da estimativa da umidade dos agregados da determinação da consistência do concreto, conforme disposto na ABNT NBR NM 67 ou outro método normalizado.

4.2.2 Relação água/cimento

A relação água/cimento é obtida através da Lei de Abrams, expressa na Equação 2.

$$a/c = \frac{\ln k_1 - \ln f_{c28}}{\ln k_2} \quad (2)$$

Em que:

a/c é a relação entre as quantidades de água e cimento;

k_1 e k_2 são coeficientes determinados experimentalmente que dependem do tipo de cimento.

Os coeficientes k_1 e k_2 foram adotados como, respectivamente, 115,88 e 13,37, para cimentos com resistência de 32 MPa, e 143,22 e 13,15, para cimentos de 40 MPa de resistência (EUZÉBIO, 2021). Ressalta-se que estes são parâmetros experimentais e os resultados podem variar.

4.2.3 Consumo de cimento

Para determinar o consumo de cimento, é necessário estimar o consumo de água, que depende das características e proporções dos materiais utilizados, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Consumo de água aproximado (l/m³).

Slump (mm)	Dimensão máxima característica do agregado gráudo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Rodrigues, 1998.

Desse modo, o consumo de cimento é obtido pela Equação 3.

$$C_{cimento} = \frac{C_{água}}{a/c} \quad (3)$$

4.2.4 Consumo de agregados

Uma vez obtidos os consumos de água e cimento, o consumo de agregados pode ser obtido pela diferença de volume necessária para compor 1 m³ de concreto. Entretanto, para se obter a proporção adequada de agregado gráudo e miúdo, determina-se um teor ótimo de agregado gráudo em função da sua dimensão máxima característica e do módulo de finura da areia, conforme a Tabela 2. Por fim, o consumo de agregado miúdo estará em função do de agregado gráudo.

Tabela 2 – Volume compactado seco de agregado graúdo por m³ de concreto.

MF	Dimensão máxima característica do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Rodrigues, 1998.

No caso de uso de dois agregados miúdos diferentes, o módulo de finura é determinado pela Equação 4 abaixo.

$$MF = (1 - M_{miúdo2}(\%)) \times MF_1 + M_{miúdo2}(\%) \times MF_{miúdo2} \quad (4)$$

Em que:

MF é o módulo de finura;

$M_{miúdo2}(\%)$ é a percentagem de uso em massa do segundo agregado miúdo escolhido;

MF_1 é o módulo de finura do agregado miúdo 1;

MF_2 é o módulo de finura do agregado miúdo 2.

Desse modo, o consumo total de agregado graúdo é obtido a partir da Equação 5.

$$C_{graúdo} = V_{graúdo}(\%) \times \gamma_{ugraúdo} \quad (5)$$

Em que:

$C_{graúdo}$ é o consumo de agregado graúdo total;

$V_{graúdo}(\%)$ é o volume compactado seco de agregado graúdo por m³ de concreto;

$\gamma_{graúdo}$ é a massa específica unitária do agregado graúdo ou da mistura de dois agregados graúdos diferentes, conforme a Equação 6.

$$\gamma_{ugraúdo} = (1 - M_{graúdo2}(\%)) \times \gamma_{ugraúdo1} + M_{graúdo2}(\%) \times \gamma_{ugraúdo2} \quad (6)$$

Em que:

$M_{graúdo2}(\%)$ é a porcentagem de uso em massa do segundo agregado graúdo escolhido;

$\gamma_{ugraúdo1}$ é a massa específica unitária do agregado graúdo 1;

$\gamma_{ugraúdo2}$ é a massa específica unitária do agregado graúdo 2.

No caso do uso de dois agregados graúdos diferentes, os consumos de cada um destes são determinados pelas Equações 7 e 8, bem como a massa específica média é expressa pela Equação 9.

$$C_{graúdo1} = C_{graúdo} \times \frac{(1 - M_{graúdo2}(\%)) \times \gamma_{graúdo1}}{\gamma_{graúdo}} \quad (7)$$

$$C_{graúdo2} = C_{graúdo} \times \frac{M_{graúdo2}(\%) \times \gamma_{graúdo2}}{\gamma_{graúdo}} \quad (8)$$

$$\gamma_{graúdo} = (1 - M_{graúdo2}(\%)) \times \gamma_{graúdo1} + M_{graúdo2}(\%) \times \gamma_{graúdo2} \quad (9)$$

Em que:

$C_{graúdo1}$ é o consumo de agregado graúdo 1;

$C_{graúdo2}$ é o consumo de agregado graúdo 2;

$\gamma_{graúdo1}$ é a massa específica do agregado graúdo 1;

$\gamma_{\text{gráudo2}}$ é a massa específica do agregado gráudo 2.

Assim, para compor 1 m³ de concreto, o volume de agregado miúdo total necessário, em porcentagem, é obtido pela Equação 10.

$$V_{\text{miúdo}}(\%) = 1 - \left(\frac{C_{\text{cimento}}}{\gamma_{\text{cimento}}} + \frac{C_{\text{gráudo}}}{\gamma_{\text{gráudo}}} + \frac{C_{\text{água}}}{\gamma_{\text{água}}} \right) \quad (10)$$

Em que:

γ_{cimento} é a massa específica do cimento;

$\gamma_{\text{água}}$ é a massa específica da água, 1000 kg/m³.

O consumo de agregado miúdo total, portanto, é obtido pela Equação 11 e, no caso do uso de dois agregados miúdos, seus consumos são obtidos pelas Equações 12 e 13.

$$C_{\text{miúdo}} = V_{\text{miúdo}}(\%) \times \gamma_{\text{miúdo}} \quad (11)$$

$$C_{\text{miúdo1}} = C_{\text{miúdo}} \times \frac{(1 - M_{\text{miúdo2}}(\%)) \times \gamma_{\text{miúdo1}}}{\gamma_{\text{miúdo}}} \quad (12)$$

$$C_{\text{miúdo2}} = C_{\text{miúdo}} \times \frac{M_{\text{miúdo2}}(\%) \times \gamma_{\text{miúdo2}}}{\gamma_{\text{miúdo}}} \quad (13)$$

Em que:

$\gamma_{\text{miúdo}}$ é a massa específica unitária do agregado miúdo ou da mistura de dois agregados miúdos diferentes, conforme a Equação 14;

$C_{\text{miúdo1}}$ é o consumo de agregado miúdo 1;

$C_{\text{miúdo2}}$ é o consumo de agregado miúdo 2;

$\gamma_{\text{miúdo1}}$ é a massa específica do agregado miúdo 1;

$\gamma_{\text{miúdo2}}$ é a massa específica do agregado miúdo 2.

$$\gamma_{miúdo} = (1 - M_{miúdo2}(\%)) \times \gamma_{miúdo1} + M_{miúdo2}(\%) \times \gamma_{miúdo2} \quad (14)$$

4.2.5 Massa específica teórica do concreto

Por fim, a massa específica teórica do concreto é obtida pelo somatório de todos os consumos, de acordo com a Equação 15.

$$\gamma_{teórica} = \sum_{i=1}^n C_i \quad (15)$$

4.3 IPT

O método de dosagem IPT trata-se de uma metodologia essencialmente experimental idealizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (FREITAS, 2018). Para executar o método, são necessárias análises do comportamento do concreto no estado fresco e endurecido. Para simplificar a entrada de dados do usuário, tais análises foram feitas com base em valores da literatura, conforme será descrito a seguir. Ressalta-se que devido à natureza experimental do método, os resultados finais podem variar.

4.3.1 Determinação da resistência de dosagem

Para a determinação da resistência de dosagem, utilizou-se a mesma metodologia adotada no método ABCP, pela Equação 1.

4.3.2 Relação água/cimento

A relação água/cimento é obtida através da Lei de Abrams, expressa na Equação 2, mesma metodologia do método ABCP.

4.3.3 Traço de agregados

O traço de agregados é proporcional à relação água cimento, conforme a Lei de Lyse (RICCI, 2017), expressa pela Equação 16.

$$m = k_3 + k_4 \times a/c \quad (16)$$

Em que:

m é o traço em massa de agregados;

k_2 e k_4 coeficientes determinados experimentalmente.

Os coeficientes k_3 e k_4 foram estimados por meio de regressão linear considerando três traços de referência com relações água/cimento fixadas. São estes: traço pobre, com traço de agregados igual a 6,5 e relação água/cimento 0,6, traço médio, com traço de agregados igual a 5,0 e relação água/cimento 0,5 e traço rico, com traço de agregados igual a 3,5 e relação água/cimento 0,4. Com isso, obteve-se -2,5, para o k_3 , e 15, para o k_4 .

Para obter o traço de cada tipo de agregado, utiliza-se as Equações 17 e 18.

$$T_{miúdo} = \alpha \times (1 + m) - 1 \quad (17)$$

$$T_{graúdo} = m - T_{miúdo} \quad (18)$$

Em que:

$T_{miúdo}$ é o traço de agregado miúdo total;

$T_{graúdo}$ é o traço de agregado graúdo total;

α é o teor de argamassa em porcentagem.

4.3.4 Consumo de materiais

Obtidos os traços de agregados e a relação água cimento, os consumos de cada tipo de material depende do consumo de cimento, expresso pela Equação 19.

$$C_{cimento} = \frac{1000 - ar}{\frac{1}{\gamma_{cimento}} + \frac{T_{miúdo}}{\gamma_{miúdo}} + \frac{T_{graúdo}}{\gamma_{graúdo}} + a/c} \quad (19)$$

Em que:

ar é o percentual de ar incorporado ao concreto, adotado como 15% (RICCI, 2017).

Desse modo, os consumos totais de materiais são obtidos pelas Equações 20, 21 e 22. No caso de uso de dois agregados graúdos ou dois agregados miúdos, os consumos individuais

são obtidos de forma análoga ao feito no método ABCP, conforme Equações 7 e 8, para agregados graúdos, e Equações 12 e 13, para agregados miúdos.

$$C_{graúdo} = C_{cimento} \times T_{graúdo} \quad (20)$$

$$C_{miúdo} = C_{cimento} \times T_{miúdo} \quad (21)$$

$$C_{água} = C_{cimento} \times a/c \quad (22)$$

4.3.5 Massa específica teórica do concreto

Por fim, a massa específica teórica do concreto é obtida pelo somatório de todos os consumos, de acordo com a Equação 15, mesma metodologia abordada no método ABCP.

4.4 Inserir traço

4.4.1 Consumos

Caso o usuário opte por obter um traço com outro método, externamente ao app, ou deseja fazer alterações nos traços implementados, o consumo de cada material é obtido pelo traço de cada material dividido pela soma dos traços de cada material por suas respectivas massas específicas, conforme a Equação 23.

$$C_x = \frac{T_x}{\sum \frac{T_i}{\gamma_i}} \quad (23)$$

Em que:

C_x é o consumo do material x estudado;

T_x é o traço do material x estudado;

T_i é o traço do material i, sendo i cada um dos materiais que compõem o traço;

γ_i é a massa específica do material i, sendo i cada um dos materiais que compõem o traço.

Por fim, a resistência de dosagem é obtida pela lei de Abrams, conforme a Equação 24.

$$f_{c28} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (24)$$

4.4.2 Massa específica teórica do concreto

Por fim, a massa específica teórica do concreto é obtida pelo somatório de todos os consumos, de acordo com a Equação 15, mesma metodologia abordada no método ABCP.

4.5 Custos

Os custos são estimados por meio dos custos unitários fornecidos pelo Sicro. Para o cimento, faz-se o cálculo pela Equação 25. Para os demais materiais, adota-se a Equação 26. Vale ressaltar que o custo da água não é levado em conta nas análises e, para agregados reciclados, adotou-se 50% do preço unitário do agregado natural na mesma zona granulométrica (SALBEGO, 2018).

$$P_{cimento} = C_{cimento} \times P_{ucimento} \quad (25)$$

Em que:

$P_{cimento}$ é o preço de cimento, por m³;

$P_{ucimento}$ é o preço unitário de cimento, em R\$/kg.

$$P_x = \frac{C_x}{\gamma_{ux}} \times P_{ux} \quad (26)$$

Em que:

P_x é o preço do material x estudado;

C_x é o consumo do material x estudado;

γ_{ux} é a massa específica unitária do material x estudado;

P_{ux} é o preço unitário do material x estudado, em R\$/m³.

4.6 Indicadores de ecoeficiência

Para os indicadores de ecoeficiência, adotou-se a metodologia proposta por Souza (2021) que utiliza a função de desejabilidade (Equações 27 e 28) e outros indicadores

individuais para compor os indicadores idealizados em respostas que variam de 0 a 1, sendo 1 o resultado mais favorável. Os indicadores adotados são:

- g) Redução de Impactos Negativos de Energia (RIE), que se baseia no indicador individual de consumo primário de energia não renovável (TPE). O indicador “visa facilitar a tomada de decisão relacionados à necessidade de uma transformação de baixo carbono no setor de energia e no desenvolvimento de políticas energéticas eficientes” (SOUZA, 2021). O RIE é obtido pela Equação 29, sendo a Equação 27 a função de desejabilidade adotada.
- h) Redução de Impactos dos Materiais (RIM), que consiste na média das desejabilidades associadas aos indicadores de matéria-prima primária (PRM), material reciclado total (RM) e consumo de água (WC), de acordo com a Equação 30. Segundo Souza (2021), “este indicador pode ser usado para avaliar a contribuição da produção de concreto para os impactos nos recursos naturais”. Nos indicadores PRM e WC, aplica-se a função de desejabilidade da Equação 27. Para o indicador RM, entretanto, utiliza-se a Equação 28.
- i) Redução de Gases do Efeito Estufa (RGE), que é obtido pela desejabilidade do indicador de dióxido de carbono, vapor d’água, metano e óxido nitroso (GWP), conforme Equação 31, sendo aplicada a Equação 27. O indicador demonstra grande importância, uma vez que visa mitigar os impactos associados ao aquecimento global tem sido um dos principais focos da cooperação internacional na área de sustentabilidade (SOUZA, 2021).
- j) Redução do Potencial de Ecotoxicidade (RPE), que, segundo Souza (2021), identifica concretos menos agressivos ao meio ambiente e consiste em uma média das desejabilidades associadas aos indicadores de potencial ecotoxicológico de água doce (FAETP), potencial ecotoxicológico terrestre (TETP) e potencial ecotoxicológico marinho (MAETP), conforme a Equação 31, utilizando a Equação 27 como função de desejabilidade estatística.
- k) Redução da Acidificação, Eutrofização e Ozônio (AEO), que é composto pela média das desejabilidades individuais associadas aos indicadores de potencial de depleção do ozônio (ODP), eutrofização (EP) e acidificação (AP), conforme a Equação 33, utilizando a função de desejabilidade da Equação 27. O indicador está relacionado a

processos que geram as menores emissões de substâncias associadas à acidificação, eutrofização e depleção da camada de ozônio, como a redução das emissões de óxidos de enxofre, nitrogênio, potássio, compostos orgânicos voláteis e amônia (SOUZA, 2021).

- 1) Ecoeficiência Potencial (EEP), que consiste em uma média dos indicadores RIE, RIM, RGE, RPE e AEO, a fim de resumir todos os indicadores em um único que combina todos os aspectos ambientais avaliados, fornecendo uma visão simples e intuitiva da ecoeficiência dos concretos. Para isso, utiliza-se a Equação 34, que é uma abordagem diferente da proposta por Souza (2021). Enquanto o autor sugere ponderar os indicadores por meio dos coeficientes s e t das equações de desejabilidade, o presente trabalho considera tais parâmetros como 1 e propõe que os usuários atribuam pesos em uma média aritmética, uma abordagem mais simplista que visa tornar mais intuitiva a análise do usuário.

$$d_i(y_i(x)) = \begin{cases} 1, se y_i(x) < L_i \\ \left[\frac{U_i - y_i(x)}{U_i - L_i} \right]^t, se L_i \leq y_i(x) \leq U_i \\ 0, se y_i(x) > U_i \end{cases} \quad (27)$$

$$d_i(y_i(x)) = \begin{cases} 0, se y_i(x) < L_i \\ \left[\frac{y_i(x) - L_i}{U_i - L_i} \right]^s, se L_i \leq y_i(x) \leq U_i \\ 1, se y_i(x) > U_i \end{cases} \quad (28)$$

Em que:

$Y_i(x)$ é a soma do parâmetro utilizado no indicador individual de cada material analisado multiplicado pelo seu respectivo consumo

L_i é o menor valor obtido nos concretos estudados na literatura;

U_i é o maior valor obtido nos concretos estudados na literatura;

s e t são coeficientes relacionados com a importância dos indicadores, variando nos valores 0,1, 1 e 10, sendo adotados como 1 neste estudo.

$$RIE = d_i \left(\frac{TPE}{f_{c28}} \right) \quad (29)$$

$$RIM = \frac{1}{3} \left[d_i \left(\frac{PRM}{f_{c28}} \right) + d_i \left(\frac{RM}{f_{c28}} \right) + d_i \left(\frac{WC}{f_{c28}} \right) \right] \quad (30)$$

$$RGE = \left[d_i \left(\frac{GWP}{f_{c28}} \right) \right] \quad (31)$$

$$RPE = \frac{1}{3} \left[d_i \left(\frac{FAETP}{f_{c28}} \right) + d_i \left(\frac{TETP}{f_{c28}} \right) + d_i \left(\frac{MAETP}{f_{c28}} \right) \right] \quad (32)$$

$$AEO = \frac{1}{3} \left[d_i \left(\frac{ODP}{f_{c28}} \right) + d_i \left(\frac{EP}{f_{c28}} \right) + d_i \left(\frac{AP}{f_{c28}} \right) \right] \quad (33)$$

$$EEP = \frac{1}{\sum_{i=1}^5 n_i} [n_1 \times RIE + n_2 \times RIM + n_3 \times RGE + n_4 \times RPE + n_5 \times AEO] \quad (34)$$

Em que:

TPE , PRM , RM , WC , GWP , $FAETP$, $TETP$, $MAETP$, ODP , EP e AP , representam os indicadores individuais já multiplicados pelos consumos de material;

n_1 , n_2 , n_3 , n_4 e n_5 são os pesos de cada indicador.

4.7 Base de dados

Para concretização dos cálculos, adotou-se uma base de dados baseada nos estudos de Souza (2021). Algumas modificações foram propostas e, além disso, espera-se que, conforme a disponibilidade de mais dados, a mesma seja atualizada posteriormente com novos materiais. Apesar de fazer com que o usuário utilize valores algumas vezes aproximados para os parâmetros dos materiais, utilizar um catálogo de materiais pré-estabelecidos garante que todos os dados necessários estejam disponíveis, sobretudo para os indicadores de ecoeficiência.

Os dados relacionados com os indicadores de ecoeficiência podem ser encontrados a seguir nas Tabelas 3 a 5.

Tabela 3 – Dados dos indicadores de ecoeficiência para aglomerantes e água.

Material	TPE (MJ/kgf)	PRM (%)	RM (%)	WC (m³/kgf)	GWP (kgf CO2 eq./kgf)	FAETP (kg 1,4-DB eq./kgf)	TETP (kg 1,4-DB eq./kgf)	MAETP (kg 1,4-DB eq./kgf)	EP (kg PO4/kgf)	AP (kgf SO2/kgf)	ODP (kg CFC- 11/kgf)
CP II-E-32	2,52E+00	66	34	3,43E-03	6,94E-01	1,08E-02	8,40E-04	2,86E+01	1,60E-04	9,40E-04	1,22E-08
CP II-F-32	2,67E+00	100	0	5,03E-03	7,40E-01	4,14E-03	1,17E-03	1,94E+01	3,45E-04	1,40E-03	1,76E-08
CP II-Z-32	2,68E+00	86	14	5,03E-03	7,47E-01	1,35E-02	1,05E-03	3,58E+01	2,18E-04	1,25E-03	1,10E-08
CP III-32	2,54E+00	25	75	2,88E-03	5,67E-01	7,51E-03	2,95E-04	1,87E+01	1,53E-04	1,09E-03	2,36E-08
CP II-E-40	2,52E+00	66	34	3,43E-03	6,94E-01	1,08E-02	8,40E-04	2,86E+01	1,60E-04	9,40E-04	1,22E-08
CP II-F-40	2,67E+00	100	0	5,03E-03	7,40E-01	4,14E-03	1,17E-03	1,94E+01	3,45E-04	1,40E-03	1,76E-08
CP II-Z-40	2,68E+00	86	14	5,03E-03	7,47E-01	1,35E-02	1,05E-03	3,58E+01	2,18E-04	1,25E-03	1,10E-08
CP III-40	2,54E+00	25	75	2,88E-03	5,67E-01	7,51E-03	2,95E-04	1,87E+01	1,53E-04	1,09E-03	2,36E-08
Água	1,93E-03	100	0	1,00E-03	2,22E-04	5,16E-05	2,03E-06	7,62E-02	7,48E-08	1,04E-11	1,04E-11

Fonte: Souza (2021).

Tabela 4 - Dados dos indicadores de ecoeficiência para agregados graúdos.

Material	TPE (MJ/kgf)	PRM (%)	RM (%)	WC (m³/kgf)	GWP (kgf CO2 eq./kgf)	FAETP (kg 1,4- DB eq./kgf)	TETP (kg 1,4- DB eq./kgf)	MAETP (kg 1,4- DB eq./kgf)	EP (kg PO4/kgf)	AP (kgf SO2/kgf)	ODP (kg CFC- 11/kgf)
Granito - zona gran. 4,75/12,5	6,75E-02	100	0	3,44E-05	6,03E-03	5,41E-06	2,49E-06	1,15E-01	2,18E-06	1,59E-05	3,13E-10
Granito - zona gran. 12,5/19,0	6,75E-02	100	0	3,44E-05	6,03E-03	5,41E-06	2,49E-06	1,15E-01	2,18E-06	1,59E-05	3,13E-10
Granito - zona gran. 19,0/25,0	6,75E-02	100	0	3,44E-05	6,03E-03	5,41E-06	2,49E-06	1,15E-01	2,18E-06	1,59E-05	3,13E-10
Gnaisse - zona gran. 4,75/12,5	6,75E-02	100	0	3,44E-05	6,03E-03	5,41E-06	2,49E-06	1,15E-01	2,18E-06	1,59E-05	3,13E-10
Gnaisse - zona gran. 12,5/19,0	6,75E-02	100	0	3,44E-05	6,03E-03	5,41E-06	2,49E-06	1,15E-01	2,18E-06	1,59E-05	3,13E-10
Gnaisse - zona gran. 19,0/25,0	6,75E-02	100	0	3,44E-05	6,03E-03	5,41E-06	2,49E-06	1,15E-01	2,18E-06	1,59E-05	3,13E-10
Basalto - zona gran. 4,75/12,5	6,75E-02	100	0	3,44E-05	4,59E-02	5,41E-06	2,49E-06	1,15E-01	2,18E-06	1,59E-05	3,13E-10
Basalto - zona gran. 12,5/19,0	6,75E-02	100	0	3,44E-05	4,59E-02	5,41E-06	2,49E-06	1,15E-01	2,18E-06	1,59E-05	3,13E-10
Basalto - zona gran. 19,0/25,0	6,75E-02	100	0	3,44E-05	4,59E-02	5,41E-06	2,49E-06	1,15E-01	2,18E-06	1,59E-05	3,13E-10
Calcário - zona gran. 4,75/12,5	6,75E-02	100	0	3,44E-05	2,87E-02	5,41E-06	2,49E-06	1,15E-01	2,18E-06	1,59E-05	3,13E-10
Calcário - zona gran. 12,5/19,0	6,75E-02	100	0	3,44E-05	2,87E-02	5,41E-06	2,49E-06	1,15E-01	2,18E-06	1,59E-05	3,13E-10
Calcário - zona gran. 19,0/25,0	6,75E-02	100	0	3,44E-05	2,87E-02	5,41E-06	2,49E-06	1,15E-01	2,18E-06	1,59E-05	3,13E-10
Concreto rec. - zona gran. 4,75/12,5	4,14E-02	0	100	0	7,95E-03	1,57E-03	2,00E-05	3,53E+00	9,99E-06	3,00E-05	1,04E-09
Concreto rec. - zona gran. 12,5/19,0	4,14E-02	0	100	0	7,95E-03	1,57E-03	2,00E-05	3,53E+00	9,99E-06	3,00E-05	1,04E-09
Concreto rec. - zona gran. 19,0/25,0	4,14E-02	0	100	0	7,95E-03	1,57E-03	2,00E-05	3,53E+00	9,99E-06	3,00E-05	1,04E-09

Fonte: Souza (2021).

Tabela 5 - Dados dos indicadores de ecoeficiência para agregados miúdos.

Material	TPE (MJ/kgf)	PRM (%)	RM (%)	WC (m³/kgf)	GWP (kgf CO2 eq./kgf)	FAETP (kg 1,4-DB eq./kgf)	TETP (kg 1,4-DB eq./kgf)	MAETP (kg 1,4-DB eq./kgf)	EP (kg PO4/kgf)	AP (kgf SO2/kgf)	ODP (kg CFC- 11/kgf)
Areia fina	8,45E-02	100	0	2,20E-06	7,48E-03	5,87E-04	6,31E-06	1,72E+00	5,84E-06	6,26E-05	1,60E-09
Areia média fina	8,45E-02	100	0	2,20E-06	7,48E-03	5,87E-04	6,31E-06	1,72E+00	5,84E-06	6,26E-05	1,60E-09
Areia média grossa	8,45E-02	100	0	2,20E-06	7,48E-03	5,87E-04	6,31E-06	1,72E+00	5,84E-06	6,26E-05	1,60E-09
Areia grossa	8,45E-02	100	0	2,20E-06	7,48E-03	5,87E-04	6,31E-06	1,72E+00	5,84E-06	6,26E-05	1,60E-09

Fonte: Souza (2021).

Diferente da proposta de Souza (2021), considerou-se os valores mínimos dos indicadores como 0 ao invés do menor valor observado em concretos. A proposta visa evitar que pequenas estratégias de melhora de ecoeficiência sejam suficientes para considerar um concreto muito ecoeficiente. No caso de uso de materiais reciclados, considerou-se o limite inferior sugerido pelo autor, mas optou-se por utilizar o limite superior como 100%, com a mesma intenção. Os valores são descritos na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores máximos e mínimos de cada parâmetro.

Parâmetro	TPE	PRM	RM	WC	GWP	FAETP	TETP	MAETP	EP	AP	ODP
Li	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ui	79,21	120,5	100	77,64	15,72	0,21	0,021	777,19	0,0043	0,0304	4,6E-07

Fonte: Adaptado de Souza (2021).

Nas Tabelas de 7 a 9 a seguir, são descritos as propriedades e características dos materiais utilizados no app. Os valores de k1 e k2 foram obtidos de Euzébio (2021) e os preços unitários do Sistema de Custos Referenciados de Obras – SICRO (DNIT, 2023) do mês de outubro para Minas Gerais. No caso de agregados reciclados, considerou-se, como já citado o preço unitário como 50% do agregado natural de mesma zona granulométrica, conforme análise de Salbego (2018). O app deverá atualizar os valores conforme a disponibilidade de dados mais atualizados.

Tabela 7 – Dados do cimento.

Material	γ (kg/m ³)	k1	k2	k3	k4	Preço unitário (R\$/kg)
CP II-E-32	3000	115,878	13,366	-2,5	15	0,5935
CP II-F-32	3000	115,878	13,366	-2,5	15	0,5935
CP II-Z-32	3000	115,878	13,366	-2,5	15	0,5935
CP III-32	3000	115,878	13,366	-2,5	15	0,5935
CP II-E-40	3010	143,219	13,149	-2,5	15	0,5935
CP II-F-40	3010	143,219	13,149	-2,5	15	0,5935
CP II-Z-40	3010	143,219	13,149	-2,5	15	0,5935
CP III-40	3010	143,219	13,149	-2,5	15	0,5935

Fonte: Autor.

Tabela 8 – Dados dos agregados graúdos.

Material	γ (kg/m ³)	δ (kg/m ³)	D _{máx} (mm)	Preço unitário R\$/m ³
Granito - zona gran. 4,75/12,5	2700	1500	9.5	154,1699
Granito - zona gran. 12,5/19,0	2700	1500	19	151,9079
Granito - zona gran. 19,0/25,0	2700	1500	25	150,9079
Gnaiss - zona gran. 4,75/12,5	2800	1500	9.5	154,1699
Gnaiss - zona gran. 12,5/19,0	2800	1500	19	151,9079
Gnaiss - zona gran. 19,0/25,0	2800	1500	25	150,9079
Basalto - zona gran. 4,75/12,5	2900	1500	9.5	154,1699
Basalto - zona gran. 12,5/19,0	2900	1500	19	151,9079
Basalto - zona gran. 19,0/25,0	2900	1500	25	150,9079
Calcário - zona gran. 4,75/12,5	2800	1400	9.5	154,1699
Calcário - zona gran. 12,5/19,0	2800	1400	19	151,9079
Calcário - zona gran. 19,0/25,0	2800	1400	25	150,9079
Concreto rec. - zona gran. 4,75/12,5	2627	1405	9.5	77,0850
Concreto rec. - zona gran. 12,5/19,0	2627	1405	19	75,9540
Concreto rec. - zona gran. 19,0/25,0	2627	1405	25	75,4540

Fonte: Autor.

Tabela 9 – Dados dos agregados miúdos.

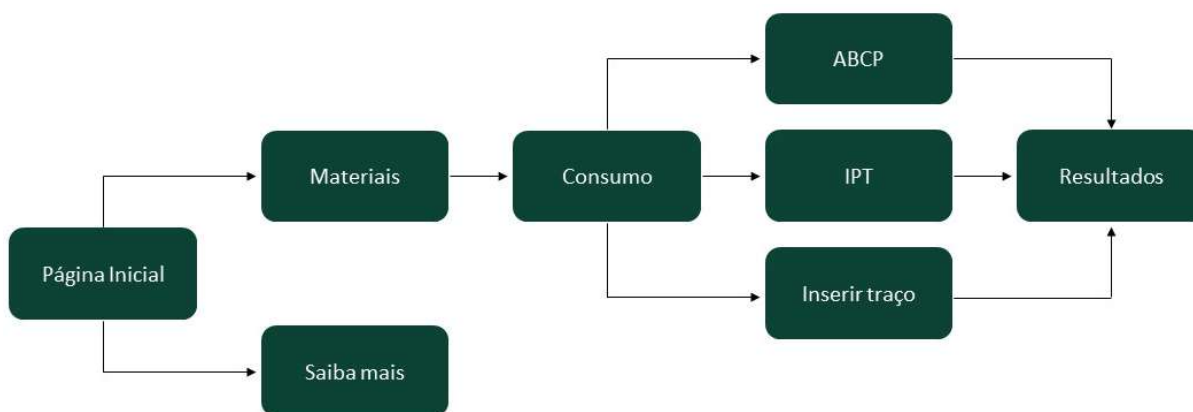
Material	γ (kg/m ³)	δ (kg/m ³)	MF	Preço unitário R\$/m ³
Areia fina	2640	1530	1,55	145,1041
Areia média fina	2900	1500	2,20	144,5808
Areia média grossa	2900	1500	2,90	144,5808
Areia grossa	2940	1640	3,50	137,4589

Fonte: Autor.

4.8 Navegação

Optou-se por uma navegação linear a fim de facilitar a compreensão do usuário. Conforme a Figura 1, para obter os resultados, é necessário escolher os materiais dentre os disponíveis no catálogo do app. Nesta tela, o usuário poderá escolher uma opção de aglomerante, até duas opções de agregado miúdo e até duas opções de agregado graúdo. Além disso, caso o usuário opte por utilizar mais de um agregado graúdo ou miúdo, poderá inserir a porcentagem em massa de uso do segundo agregado selecionado, informação necessária para os métodos ABCP e IPT. No caso de o usuário inserir um traço, esse dado pode ser desprezado. Todas essas informações estarão disponíveis em um botão informativo.

Figura 1 – Esquema de navegação do app.



Fonte: Autor.

Ainda conforme a Figura 1, o próximo passo do usuário é escolher como obter o consumo dos materiais escolhidos. Caso escolha obter através do método ABCP, o mesmo deve inserir a resistência característica do concreto (f_{ck}) desejado, entre 20 MPa e 50 MPa, o intervalo de slump desejado, em mm, e a condição de preparo, conforme a ABNT NBR 12655:2015. Caso opte pelo método IPT, deverá ser inserido o f_{ck} desejado, nas mesmas condições do método ABCP, o teor de argamassa, em porcentagem, e a condição de preparo. Na opção de inserir um traço, deve ser inserido o traço em massa dos agregados e da água, além da condição de preparo e o f_{ck} , dados necessários para o cálculo dos indicadores de ecoeficiência. Neste último caso, o Calcrete fornece uma estimativa do f_{ck} como sugestão ao usuário.

Vale ressaltar que o app foi desenvolvido de forma que os dados da tela anterior sempre ficam salvos, ou seja, o usuário pode, por exemplo, após ter selecionado uma lista de materiais, navegar até os resultados utilizando o método ABCP e, em seguida, voltar e mudar para o método IPT. Isso permitirá uma comparação entre as formas de obtenção dos consumos

enquanto uma funcionalidade de comparação de traços não for implementada no app. Além disso, para facilitar esse processo de comparação, caso o usuário não digite o f_{ck} desejado, nos métodos ABCP e IPT, ou o teor de argamassa, no método IPT, será atribuído, respectivamente, 25 MPa e 47%, valores comumente utilizados.

Na tela de resultados, as informações serão divididas tópicos, da seguinte maneira:

- a) Traço em massa, em que é apresentado o traço, o f_{ck} , a resistência do concreto à compressão em 28 dias (f_{c28}), a massa específica teórica e o custo do concreto por m^3 .
- b) Indicadores de ecoeficiência, que é apresentado o Potencial de Ecoeficiência, Redução de Impactos Negativos de Energia, Redução de Impactos dos Materiais, Redução de Gases do Efeito Estufa, Redução do Potencial de Ecotoxicidade e Redução da Acidificação, Eutrofização e Ozônio. Além disso, nesta seção o usuário também pode optar por atribuir pesos de 1 a 5 para os indicadores, exceto para o Potencial de Ecoeficiência.
- c) Consumo de materiais, em que, para o aglomerante, é informado o consumo, a massa específica e o custo, para o agregado miúdo, o consumo, massa específica, massa específica unitária, módulo de finura e custo, para o agregado graúdo, o consumo, massa específica, massa específica unitária, diâmetro máximo característico e custo, e, para a água, o consumo e a massa específica.

Além de poder voltar para as telas anteriores, após os resultados, o usuário pode retornar para a tela inicial através de um botão. Por fim, a partir da tela inicial, o usuário poderá navegar para a tela “Saiba mais”, onde se encontram algumas informações sobre o Calcrete.

5 Resultados e Discussão

5.1 Interface

As telas do app foram feitas conforme o esquema de navegação adotado, descrito anteriormente. Na Figura 2, é possível ver a tela Início, que contém os botões que levam o usuário para a tela de escolha dos materiais ou e para a Saiba mais, na qual que se comenta sobre o aplicativo, as instituições de fomento e apoio ao desenvolvimento do mesmo e a equipe de desenvolvimento e envolvidos, também apresentada na figura.

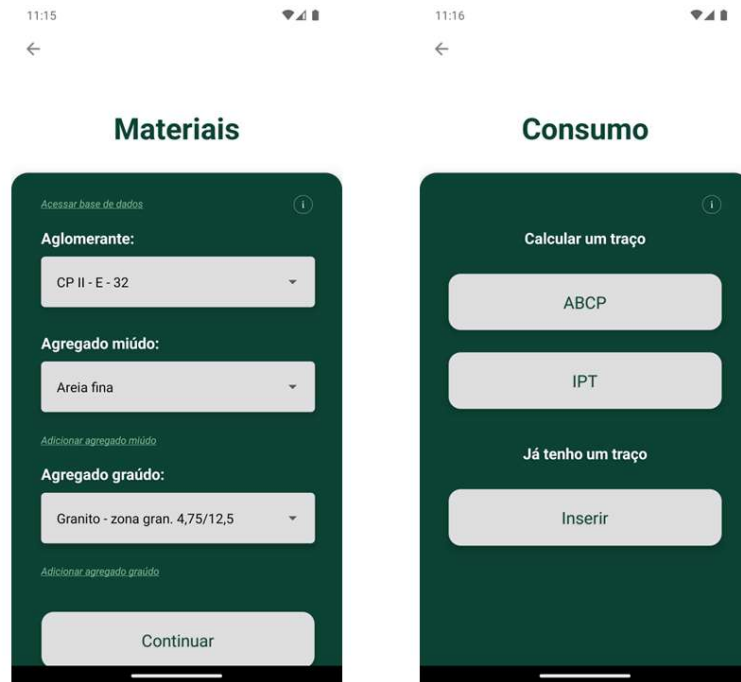
Figura 2 – Telas Início e Saiba mais.



Fonte: Autor.

Em seguida, na Figura 3, são apresentadas as telas Materiais e Consumo. Na tela Materiais, o usuário pode, além de escolher o aglomerante, agregado miúdo e graúdo, adicionar outros agregados por meio dos botões “Adicionar agregado miúdo” e “Adicionar agregado graúdo”. Além disso, é possível consultar todos os dados relacionados aos materiais no botão “Acessar base de dados” e, também, abrir um alerta comentando sobre a tela, no botão “i”, o qual está presente em todas as telas seguintes. Por fim, na tela Consumo, deve-se optar por obter os consumos dos materiais por meio do cálculo, pelos métodos ABCP e IPT, ou inserir um traço obtido de outra maneira.

Figura 3 – Telas Materiais e Consumo.



Fonte: Autor.

Abaixo, na Figura 4, são apresentadas as telas dos dois métodos implementados e de inserção do traço. É possível observar que, além do botão de informação sobre a tela, utilizou-se botões semelhantes para explicar o que representa cada condição de preparo, como já comentado anteriormente. Vale ressaltar que as três formas de obtenção dos consumos resultam na mesma tela de resultados.

Figura 4 – Telas Método ABCP, Método IPT e Inserir traço.

The figure displays three mobile application screens for concrete mix design, each with a dark green background and white text. Each screen has a status bar at the top showing the time 11:17 and signal strength icons. A back arrow is visible in the top left of each screen.

- Método ABCP:** Features a form with three input fields: 'fck desejado (MPa):' with a text input 'Digite aqui'; 'Slump desejado (mm):' with a dropdown menu showing 'entre 40 e 60'; and 'Condição de preparo:' with a dropdown menu showing 'A'. A 'Continuar' button is at the bottom.
- Método IPT:** Features a form with three input fields: 'fck desejado (MPa):' with a text input 'Digite aqui'; 'Teor de argamassa (%):' with a text input 'Digite aqui'; and 'Condição de preparo:' with a dropdown menu showing 'A'. A 'Continuar' button is at the bottom.
- Inserir traço:** Features a form with four input fields: 'CP II - E - 32:' with a text input '1'; 'Areia fina:' with a text input 'Digite aqui'; 'Granito - zona gran. 4,75/12,5:' with a text input 'Digite aqui'; and 'Água:' with a text input 'Digite aqui'. A 'Condição de preparo:' dropdown menu is partially visible at the bottom.

Fonte: Autor.

Por fim, na Figura 5, é apresentada uma prévia da tela Resultados, que apresenta o traço, indicadores de ecoeficiência e consumo individual de cada material, além dos custos totais e de cada material. Todas as seções, exceto a de consumo de água, mostram versões resumidas dos resultados e contam com o botão **Mostrar mais**, que as expande e exibe mais informações sobre a análise do concreto. No caso dos indicadores de ecoeficiência, além de apresentar todos os indicadores, estão presentes botões para atribuir pesos, de 1 a 5, para cada indicador que compõe a Ecoeficiência Potencial, de acordo com a importância que o usuário julgar relevante a cada um para seu estudo específico. Desse modo, o indicador citado é alterado em tempo real. Além disso, o usuário pode voltar para as telas anteriores ou à tela inicial pelo botão “Início”.

Figura 5 – Tela Resultados e detalhe da seção Indicadores de Ecoeficiência.



Fonte: Autor.

5.2 Resultados gerados pelo app

Os métodos ABCP e IPT, apesar de apresentarem resultados semelhantes, podem gerar respostas que variam entre 5% e 20% nos consumos de cada material. Isso se dá pois os métodos consideram variáveis distintas para gerar traços. Um fator que tem grande impacto nessa distinção, por exemplo, é o consumo de água, que no método ABCP, além de ser fixado antes da obtenção do consumo de cimento, depende do diâmetro máximo característico do agregado graúdo. No método IPT, entretanto, a alteração dessa variável, desde que as outras características do agregado graúdo sejam mantidas, não tem nenhum efeito no resultado final, que pode ser muito distinto do obtido pelo ABCP.

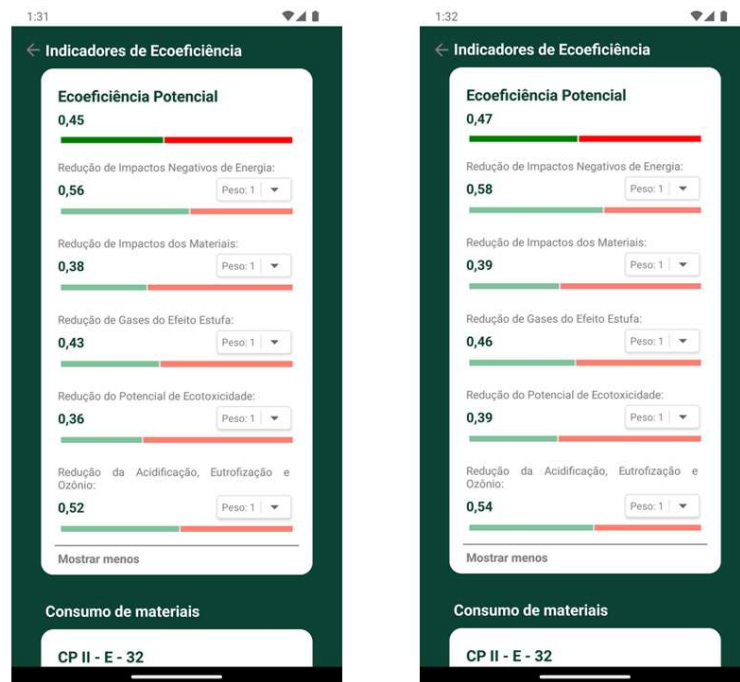
Nas Figuras 6 a 10, são apresentados os resultados para ambos os métodos, utilizando os seguintes materiais: CP II – E – 32, areia fina, areia média fina em 50% de uso, granito - zona granulométrica 4,75/12,5 e concreto reciclado - zona granulométrica 12,5/19,0 em 50% de uso. Além disso, adotou-se o f_{ck} requerido como 25 MPa, slump entre 40 mm e 60 mm, no método ABCP, e teor de argamassa = 47%, no método IPT. Vale ressaltar que, como já citado, os resultados podem variar conforme a escolha de materiais e demais característica atribuídas, sendo necessária uma análise para cada situação para definir qual método apresenta melhores resultados, sobretudo nos indicadores de ecoeficiência.

Figura 6 – Seção Traço em massa dos resultados do método ABCP (esquerda) e IPT (direita) para os dados informados.



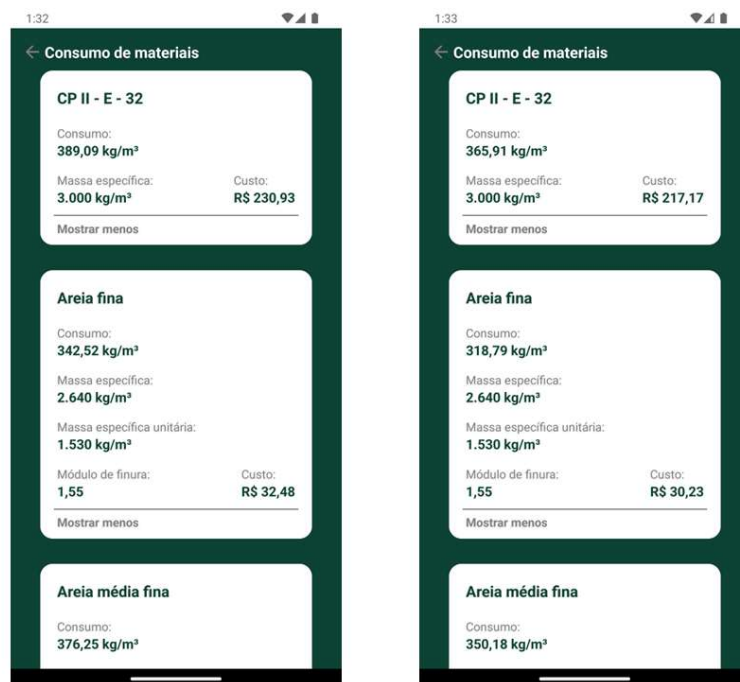
Fonte: Autor.

Figura 7 – Seção Indicadores de Ecoeficiência dos resultados do método ABCP (esquerda) e IPT (direita) para os dados informados.



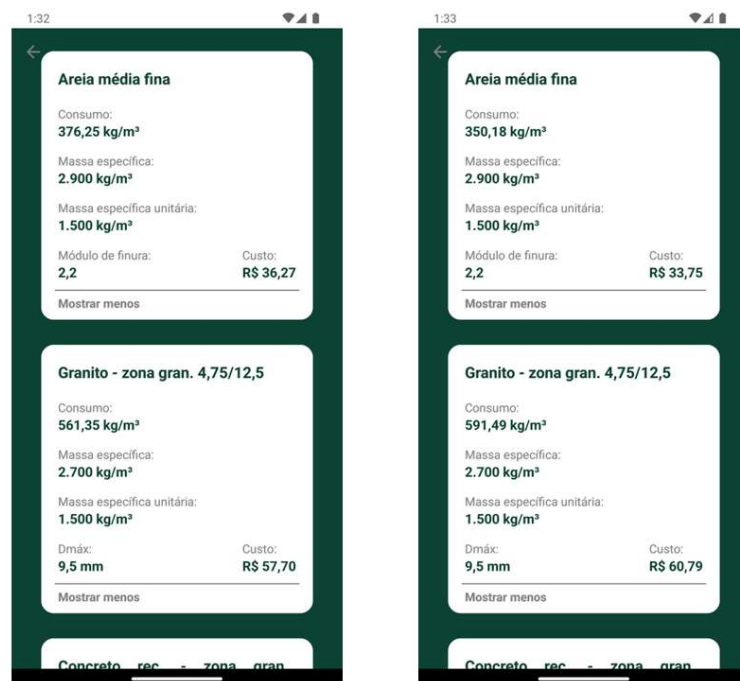
Fonte: Autor.

Figura 8 – Seção Consumo de materiais dos resultados do método ABCP (esquerda) e IPT (direita) para os dados informados – parte 1.



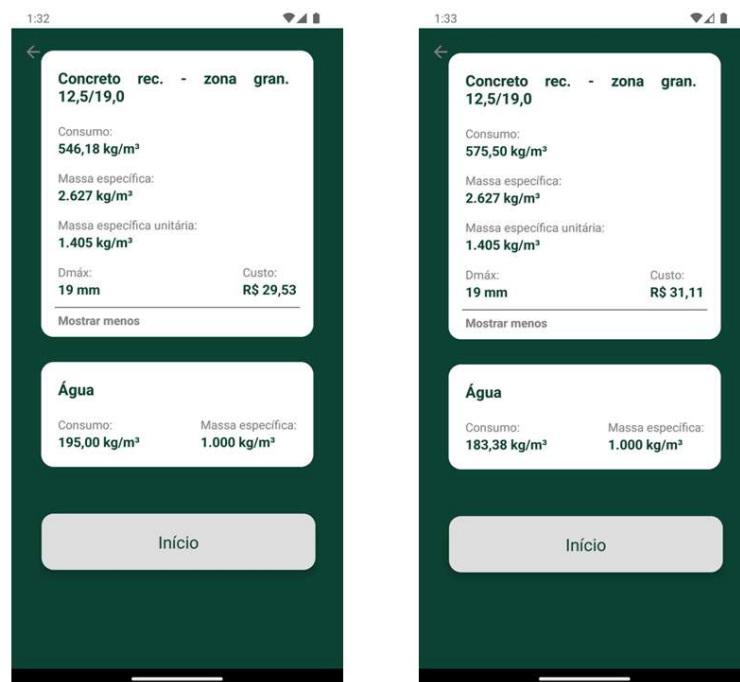
Fonte: Autor.

Figura 9 – Seção Consumo de materiais dos resultados do método ABCP (esquerda) e IPT (direita) para os dados informados – parte 2.



Fonte: Autor.

Figura 10 – Seção Consumo de materiais dos resultados do método ABCP (esquerda) e IPT (direita) para os dados informados – parte 3.



Fonte: Autor.

Por fim, vale ressaltar que, inserindo os traços calculados por ambos os métodos no app, os resultados finais são os mesmos ou muito próximos, visto que os resultados são arredondados em duas casas decimais antes de serem exibidos na tela.

6 Conclusão

6.1 Conclusão geral

Com base nos resultados apresentados, os objetivos propostos foram cumpridos e o aplicativo Calcrete se encontra em uma versão apta à distribuição ao público por meio da Google Play Store, serviço de distribuição digital oficial do sistema operacional Android de conteúdos digitais. Todas as implementações foram baseadas em estudos que visam resultados ótimos e sustentáveis para o concreto. Espera-se, portanto, que a ferramenta contribua significativamente na divulgação e popularização de práticas sustentáveis no setor da construção civil e na sociedade como um todo e na diminuição dos impactos ambientais provocados por essa indústria.

6.2 Possíveis atualizações

Espera-se que a base de dados do aplicativo seja atualizada constantemente, conforme a disponibilidade dos dados. Além disso, outras funcionalidades estão listadas e podem ser desenvolvidas após o lançamento oficial do aplicativo. São elas:

- a) Alteração dos custos pelo usuário – na versão atual, os custos unitários são obtidos do SICRO e não podem ser alterados pelo usuário, podendo o resultado final distinguir do praticado pelo mercado em certas regiões do país.
- b) Salvar resultados – acredita-se que a opção de o usuário salvar os resultados obtidos ao final da análise para poder visualizá-los a qualquer momento tornaria o Calcrete uma ferramenta mais alinhada e útil à rotina dos profissionais da área.
- c) Comparar resultados salvos – uma forma de comparar traços poderia facilitar ainda mais o processo de otimização de concretos sustentáveis.
- d) Adição de outros métodos de dosagem – mais métodos de dosagem representam mais possibilidades de soluções otimizadas.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9776**: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6467**: Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Procedimentos Para Moldagem E Cura De Corpos De Prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

BOGGIO, Aldo J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland**. 2000. 182 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BOLINA, Cecília; et al. Estudo de dosagem de concretos pelo método IPT/EPUSP. *Revista Linkania*. v. 2, n. 2. mar. 2012. Disponível em: <https://linkania.org/master/article/view/40/31>. Acesso em: 16 nov. 2023.

SINGE, Çankaya; BEYHAN, Pekey. A comparative life cycle assessment for sustainable cement production in Turkey. *Journal of Environmental Management*, v. 249 nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109362>. Acesso em: 8 fev. 2024.

COSTA, Thiago Ferreira. et al. **Utilização de Resíduo de Construção e Demolição (RCD) na produção de concretos sustentáveis: revisão da literatura e contribuição da Universidade Federal de Viçosa**. XIII Simpósio de Integração Acadêmica UFV. 2022, Viçosa – Minas Gerais.

COSTA, Thiago Ferreira. et al. **Revisão bibliográfica comparativa entre métodos de dosagem de concreto para uso em ferramenta de apoio à obtenção de traços e indicadores de ecoeficiência**. XIV Simpósio de Integração Acadêmica UFV. 2023, Viçosa – Minas Gerais.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES (DNIT). **Relatório SICRO** – Sudeste: Minas Gerais. Out. 2023

EUZÉBIO, Larissa Evangelista; PEREIRA, Wesley Fonseca. **TraçoFácil: um sistema web para dosagem de concreto convencional utilizando a metodologia da ABCP**. Orientador: Bruno R. S. Moraes. 2021. 59. Graduação – Curso de ciência e Tecnologia. Coordenação do curso bacharelado interdisciplinas, Universidade Federal do Maranhão, Balsas, 2021. Disponível em: <https://monografias.ufma.br/jspui/handle/123456789/5235>. Acesso em: 07 de dez. de 2023.FALCÃO, 2022

FREITAS, Paulo N. L.. **Estudo Comparativo de Métodos de Dosagem de Concreto**. Orientador: Francisco J. N. de Lima. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Centro de Engenharias, Universidade Federal Rural do Semiárido, 2018.

LIMA, Pedro H. A.. Análise Teórica e Comparativa entre Diferentes Métodos de Dosagem do Concreto: ABCP, IPT, INT e ITES. *Revista Vozes do Vale*, Juiz de Fora, Nº 23, maio de 2023.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Ibracon, 2008. p 85-120. NATO, 2023.

NATO, Chrystian Tavares. **Dosagem de Concretos pela Teoria do Empacotamento de Partículas e Método IPT-EPUSP**. Orientador: Robson A. dos Santos. 2023. 23. Graduação – Engenharia Civil. Coordenação do curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba Campus Cajazeiras. Cajazeiras-PB, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/jspui/handle/177683/3120>. Acesso em: 07 de dez. de 2023.

NOVAES, C. G.; et al. **Otimização de Métodos Analíticos Usando Metodologia de Superfícies De Resposta - Parte I: Variáveis de Processo**. Revista Virtual de Química. v. 9, n. 3. 5, abr. de 2017.

OLIVEIRA, Luís A. R.. **Verificação do Método de Dosagem Mais Eficiente Para o Parâmetro e Categoria Analisados**. Orientador: Denise D. M.. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

RICCI, Bruna O. L.; PEREIRA, Adriana. M.; AKASAKI, Jorge L.. Estudo de Dosagens Visando Obter Concretos para Obras de Pequeno Porte. **Revista Fórum Ambiental**, v. 13, n. 1. 2017.

RODRIGUES, Públio P. F.. **Parâmetros de dosagem do concreto (ET-67)**. 3ª ed. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1988.

RODRIGUES, Philipe A. M. et al. **Concretos ecoeficientes: ferramenta de apoio à obtenção de traços e indicadores**. 64º Congresso Brasileiro do Concreto. 2023.

SALBEGO, Ricardo I.; GIRARDI, Ricardo. Análise de concretos para peças de pavimentação preparados com agregado reciclado e natural. **Revista Inovação e Tecnologia**, Porto Alegre, v. 9, n 23, dez. 2018.

SOUZA, Ariel M.; et al. Application of the desirability function for the development of new composite eco-efficiency indicators for concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 40, ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102374>. Acesso em: 20 mar. 2024.

TIBURCIO, Camila M.; KINOSHITA, Eriisa M.; AMARAL, Lorena L.. **Caracterização e Utilização de Resíduo de Construção e Demolição das Obras da Universidade Federal de Viçosa como Agregado para Concreto**. Orientador: José Maria F. Carvalho. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2022.

TORALLES, Berenice Martins et al. **Estudo Comparativo de Diferentes Métodos de Dosagem de Concretos Convencionais**. Revista de Engenharia e Tecnologia, Ponta Grossa, V. 10, Nº1, abril de 2018.

VERLY, Pedro M. Monteiro. et al. **Concretos ecoeficientes: ferramenta de apoio à obtenção de traços e indicadores..** XIII Simpósio de Integração Acadêmica UFV. 2022, Viçosa – Minas Gerais.

VIEIRA, Darli R.; CALMON, João L.; COELHO, Felipe Z.. Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 124, n. 15, out. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125>. Acesso em: 20 mar. 2024.

Sustentabilidade na Construção. **Conselho Brasileiro De Construção Sustentável**, 2007. Disponível em: <http://www.cbcs.org.br/website/noticia/show.asp?npgCode=DBC0153A-072A-4A43-BB0C-2BA2E88BEBAE>. Acesso em: 21 jan. 2024.