

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Arquitetura**  
**Curso de Especialização em Cidades, Edificações e Produtos**

Karina da Silva Queiroz

**Concreto Sustentável: uma contribuição interdisciplinar para a  
Catedral Cristo Rei em Belo Horizonte - MG**

Belo Horizonte  
2021

Karina da Silva Queiroz

**Concreto Sustentável: uma contribuição interdisciplinar para a  
Catedral Cristo Rei em Belo Horizonte - MG**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Sustentabilidade em Cidades, Edificações e Produtos da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Sustentabilidade em Cidades, Edificações e Produtos.

Orientador: Prof. Felipe de Souza Abreu

Belo Horizonte  
2021

## FICHA CATALOGRÁFICA

Q3c

Queiroz, Karina da Silva.

Concreto sustentável [manuscrito] : uma contribuição interdisciplinar para a Catedral Cristo Rei em Belo Horizonte - MG / Felipe de Souza Abreu. - 2021.

109 f. : il.

Orientador: Felipe de Souza Abreu.

Monografia (especialização) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura.

1. Construção civil. 2. Construção de concreto. 3. Sustentabilidade. I. Abreu, Felipe de Souza. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Arquitetura. III. Título.

CDD 691.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ARQUITETURA - EAUFMG  
Rua Paraiba, 697 – Funcionários  
30130-140 – Belo Horizonte – MG - Brasil

Telefone: (031) 3409-8823

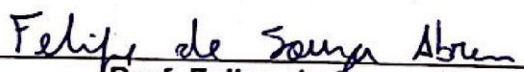
FAX (031) 3409-8822

**ATA DA REUNIÃO DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE MONOGRAFIA COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO CERTIFICADO DO CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SUSTENTABILIDADE EM CIDADES, EDIFICAÇÕES E PRODUTOS.**

Às 17:00 horas do dia 30 de junho de 2021, reuniu-se em teleconferência privada, devido ao COVID-19, a Comissão Examinadora composta pelo Prof. Felipe de Souza Abreu Orientador-Presidente, pela Profa. Cynara Fiedler Bremer, designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Sustentabilidade em Cidades, Edificações e Produtos, para avaliação da monografia intitulada **“Concreto Sustentável: uma contribuição interdisciplinar para a Catedral Cristo Rei em Belo Horizonte - MG”** de autoria da aluna **Karina Da Silva Queiroz**, como requisito final para obtenção do Certificado de Especialista em Sustentabilidade em Cidades, Edificações e Produtos. A citada Comissão examinou o trabalho e, por unanimidade, concluiu que a monografia atende às exigências para a obtenção do Certificado de Conclusão do Curso, atribuindo ao trabalho **(90 pontos/conceito A)**. A Comissão recomenda que sejam encaminhados: 01(hum) exemplar digital ao Repositório da UFMG, após as correções sugeridas.

A aluna até o prazo de até 30 dias para entregar o trabalho com as devidas correções.

Belo Horizonte, 30 de junho de 2021

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Felipe de Souza Abreu  
Orientador-Presidente



\_\_\_\_\_  
Cynara Fiedler Bremer  
Membro da Banca

## **AGRADECIMENTOS**

**Imensamente grata a Deus por tudo.**

Ao meu orientador, professor Felipe Abreu, sempre solícito, pelo apoio e incentivo em todo o desenvolvimento deste trabalho, ensinando e esclarecendo sobre um tema tão desafiador.

À minha família por todo amor, amparo e força, dedicados na minha jornada.

Aos meus amigos, em especial Isabelle Almeida e Ana Paula Emídio por abraçarem minhas decisões, pelo auxílio e por acreditarem no meu melhor.

Aos meus colegas da Especialização em Sustentabilidade em Cidades, Edificações e Produtos, pela convivência e conhecimento compartilhado.

Aos professores e todos os funcionários da Escola de Arquitetura, por proporcionarem a rica experiência de realizar este curso.

À banca examinadora por aceitarem participar da avaliação dessa pesquisa.

E a mim mesma por sonhar essa área de pesquisa, pela dedicação e por alcançar esse primeiro objetivo em busca de me tornar uma profissional mais consciente, e capaz de construir um futuro mais sustentável.



[...] à arquitetura uma intensidade de expressão até então ignorada [...] solto no espaço o edifício readquiriu, graças à nitidez das suas linhas e à limpidez dos seus volumes de pura geometria, aquela disciplina e “retenue” próprias da grande arquitetura; conseguindo mesmo um valor plástico nunca antes alcançado e que o aproxima – apesar de seu ponto de partida rigorosamente utilitário – da arte pura.

**Lúcio Costa, 1995**

## RESUMO

As influências de Arquitetura, Engenharia e também da indústria da construção civil, evidenciam o percurso de consolidação do concreto como um elemento intrinsecamente ligado à sua própria atemporalidade. Com frequência, o resultado é um ambiente construído ao qual atribui-se valor histórico-cultural e econômico, fortemente voltados à sua utilização em massa. Porém, quando visto sob a ótica ambiental, a degradação e a poluição em torno do processo de extração de sua matéria-prima, produção e transporte, refletem que o mesmo já não atende as necessidades projetuais atuais e futuras, dado o ciclo e expectativa de vida associados a ele. Com isso, o presente estudo tem como objetivo apresentar um arranjo de possibilidades, onde o uso do concreto de maneira sustentável apresenta um maior potencial em sua viabilização e, também, um forte incentivo ao estímulo de cadeias de produção mais limpas no setor da construção civil. Como metodologia de pesquisa, optou-se primeiramente por uma revisão bibliográfica, seguida da apresentação de um estudo de caso, finalizando com uma análise propositiva. O estudo em questão refere-se à implementação do “concreto sustentável” na obra da Catedral Cristo Rei, de autoria de Oscar Niemeyer e localizada em Belo Horizonte, MG. Trata-se de uma construção atual e bastante divulgada em veículos de comunicação, e cujas formas imponentes demandam o uso generalizado do concreto. Tal fato remete então a um elevado consumo do material e, conseqüentemente, a um alto gasto energético e alto volume de emissões de gás carbônico. O exercício de aplicação dos diferentes tipos de concreto mediante as características de cada elemento construtivo, se mostra aqui uma alternativa estratégica de maior adaptabilidade, diversidade e, até mesmo, de ressignificação. Juntamente com outras práticas sustentáveis, foi possível ilustrar o seu ciclo de vida, incluindo seu uso imediato e manutenção proposta, dispondo de uma edificação com maior desempenho energético, de seus materiais, e com menor impacto ambiental - o que favorece, também, a sua geração de valor na comunidade e no setor industrial.

**Palavras-chave:** concreto sustentável; ambiente construído; adaptabilidade; sustentabilidade.

## ABSTRACT

The influences of Architecture, Engineering and the Civil Construction industry, show the path of concrete's consolidation as an element intrinsically connected to its own timelessness. Often, the result is a built environment to which many historical, cultural and economic values are attributed, with a strong focus on its mass usage. However, when taken from an Environmental perspective, the degradation and pollution surrounding the process of extracting its raw materials, plus its production and transport, reflect that the concrete as we know no longer meets all the current and future design demands, given its cycle and the life's expectancy associated with it. The present study aims then to present an arrangement of possibilities, where the use of concrete in a sustainable way shows a great potential in its feasibility, and also a strong incentive to encourage cleaner production chains in the Civil Construction sector. The research methodology starts with a literature review, followed by the presentation of a case study and ends with a purposeful analysis. The study in question refers to the implementation of the concept of "sustainable concrete" in the construction of the "Catedral Cristo Rei", by architect Oscar Niemeyer, located in Belo Horizonte, Brazil. It is an ongoing construction, one that's been widely publicized in the media, and whose imposing structure demands general use of concrete. This necessarily means a high consumption of the material and, consequently, also a high energy expenditure and a high volume of carbon dioxide emissions. The exercise of applying different types of concrete through the characteristics of each constructive element, shows here a strategic alternative of great adaptability, diversity and even resignification. Alongside other sustainable practices, it was possible to illustrate its life cycle, including its immediate use and proposed maintenance, with a building of high energy performance, the materials applied, and less environmental impact - which also favors its value in the community and in the industrial sector.

**Keywords:** sustainable concrete; built environment; adaptability; sustainability.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 01</b> - Os 5 P's da Sustentabilidade	20
<b>Figura 02</b> - Esquema de ciclo de produção do espaço construído	22
<b>Figura 03</b> - Diagrama Sistêmico da Economia Circular	26
<b>Figura 04</b> - Fabricação do Ecobloco, Usina de Reciclagem do Estoril	30
<b>Figura 05</b> - Edifícios modernistas Sesc Pompéia, arquiteta Lina Bo Bardi e Fundação Iberê Camargo, arquiteto Álvaro Siza	40
<b>Figura 06</b> - Separação do resíduo em diferentes granulometrias	44
<b>Figura 07</b> - Resíduo beneficiamento do mármore e granito: (a) lama e (b) seco em pó	46
<b>Figura 08</b> - Esquema do processo de beneficiamento das rochas ornamentais e resíduos gerados em cada etapa	47
<b>Figura 09</b> - Corpo de prova compacto de concreto com cinza de casca de arroz	51
<b>Figura 10</b> - Exemplo corpo de prova concreto com resíduo de cinza de Cana-de-açúcar	52
<b>Figura 11</b> - Pó de pedra no pátio de uma pedreira ao ar livre	54
<b>Figura 12</b> - Processo de produção do aço	57
<b>Figura 13</b> - Modelo de concreto com resíduo de vidro moído	60
<b>Figura 14</b> - Corpos de prova de RCD em concreto	63
<b>Figura 15</b> - Perspectiva externa da Catedral Cristo Rei: Clemens Holzmeister, 1942	65
<b>Figura 16</b> - Fotoinserção da silhueta do projeto de Holzmeister no atual entorno da Praça Milton Campos	66
<b>Figura 17</b> - Localização das grandes obras do Vetor Norte	67
<b>Figura 18</b> - Fotoinserção da Catedral Cristo Rei em Belo Horizonte	69
<b>Figura 19</b> - Laboratório de testes e modelo de relatório	71
<b>Figura 20</b> - Implantação setorizada pavimento de acesso principal	72
<b>Figura 21</b> - Fotografia da setorização da obra de construção	73
<b>Figura 22</b> - Praça das Famílias. Destaque para a conta do rosário com marcação dos nomes dos doadores na paginação do piso	74
<b>Figura 23</b> - Vista de cima dos rosários em torno da Catedral	74
<b>Figura 24</b> - Acesso principal e vista externa	75

<b>Figura 25</b> - Vista Frontal da Praça e de Nossa Senhora da Piedade	76
<b>Figura 26</b> - Praça das Famílias, lugar de encontro	77
<b>Figura 27</b> - Construção altar externo	78
<b>Figura 28</b> - Construção setor F	78
<b>Figura 29</b> - Planta baixa de fundação	79
<b>Figura 30</b> - Corte evidenciando as espessuras de lajes e paredes	80
<b>Figura 31</b> - Parede dupla no prumo que inicia com 1,60m (à esquerda) e parede maciça de 1,0 quando começa a se curvar	81
<b>Figura 32</b> - Montagem de fôrmas e concretagem da parede curva	82
<b>Figura 33</b> - Marquise do couro musical em vão livre e modelo de construção da laje	83
<b>Figura 34</b> - Vista interna da Tenda da Paz	84
<b>Figura 35</b> - Vista do auditório inferior e local do auditório suspenso em construção	85
<b>Figura 36</b> - Cripta Jesus Ressuscitado	86
<b>Figura 37</b> - Memorial Arquidiocesano	86
<b>Figura 38</b> - Espaço expositivo da Rede Catedral de Cultura	88
<b>Figura 39</b> - Espaço de convivência da Rede Catedral Cultura	89
<b>Figura 40</b> - Sala da Rede Catedral Servidores	90
<b>Figura 41</b> - Esquema de aplicação concreto com resíduo de aciaria LD	98
<b>Figura 42</b> - Modelo de aplicação do concreto com resíduo reciclado	100
<b>Figura 43</b> - Esquema de aplicação concreto com pó de pedra	102
<b>Figura 44</b> - Esquema de aplicação concreto com resíduo de borracha de pneu	105
<b>Figura 45</b> - Esquema de aplicação concreto com cinza de casca de arroz	107
<b>Figura 46</b> - Esquema de aplicação concreto com resíduo de mármore e granito	110
<b>Figura 47</b> - Esquema de aplicação concreto com cinza do bagaço de Cana-de-açúcar	112
<b>Figura 48</b> - Esquema de aplicação concreto com resíduo de vidro	114
<b>Figura 49</b> - Corte esquemático com aplicações das tipologias de concreto sustentável	116
<b>Figura 50</b> - Proposição de práticas sustentáveis	119

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01</b> - Emissões de CO2 da extração/produção	93
<b>Tabela 02</b> - Síntese de aplicação dos tipos de concreto sustentável	96

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>CO<sup>2</sup></b>	Dióxido de Carbono
<b>CONAMA</b>	Conselho Nacional de Meio Ambiente
<b>COP</b>	Conferência das Partes (Conference Of the Parts)
<b>EMF</b>	Fundação Ellen MacArthur
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>ONU</b>	Organização das Nações Unidas
<b>ODM</b>	Objetivos de Desenvolvimento do Milênio
<b>ODS</b>	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
<b>PNUMA</b>	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
<b>PBH</b>	Prefeitura de Belo Horizonte
<b>RSCCs</b>	Resíduos Sólidos da Construção Civil
<b>SLU</b>	Superintendência de Limpeza Urbana
<b>URPVs</b>	Unidades de Recebimento de Pequenos Volumes

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA.....	16
3	METODOLOGIA .....	17
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
4.1	A produção do espaço e a expectativa de vida das cidades .....	20
4.2	Economia circular e a construção civil.....	24
4.3	Legislações, normativas e abordagens conjuntas .....	27
4.4	Tecnologia Construtiva .....	31
4.4.1	Cenário de produção brasileiro.....	31
4.4.2	O concreto do ponto de vista do projeto .....	35
4.5	Concreto Sustentável.....	41
4.5.1	Tipos de Concreto Sustentável.....	43
4.5.1.1	Concreto com resíduo de borracha de pneu.....	43
4.5.1.2	Concreto com resíduo do corte de mármore e granito.....	46
4.5.1.3	Concreto com cinzas volantes e pozolanas naturais .....	49
4.5.1.3.1	Concreto com cinza de casca de arroz.....	50
4.5.1.3.2	Concreto com cinza de bagaço de cana de açúcar .....	52
4.5.1.4	Concreto com resíduo pó de pedra .....	54
4.5.1.5	Concreto com agregado de escória de aciaria LD pós processada .....	56
4.5.1.6	Concreto com resíduo de vidro.....	59
4.5.1.7	Concreto com agregados reciclados da construção civil .....	61
5	ESTUDO DE CASO .....	64
5.1	Catedral Cristo Rei e a paisagem belorizontina.....	64
5.2	O projeto arquitetônico e a construção.....	70
5.2.1	Aspectos do gerenciamento e análise de impacto do concreto .....	90

5.3	Proposição do uso do concreto sustentável no projeto da Catedral Cristo Rei	94
5.3.1	Resíduo de aciaria LD no uso de fundações de concreto estrutural ....	97
5.3.2	Agregado reciclado no uso de concreto não estrutural .....	99
5.3.3	Resíduo de pó de pedra como concreto estrutural .....	100
5.3.4	Resíduo de borracha de pneus como concreto armado .....	103
5.3.5	Cinza de casca de arroz como concreto armado .....	106
5.3.6	Resíduo de mármore e granito como concreto de alto desempenho e autoadensável.....	108
5.3.7	Cinza do bagaço da cana de açúcar como concreto estrutural.....	111
5.3.8	Resíduo de vidro como concreto não estrutural.....	113
5.4	Proposta da viabilidade do concreto com práticas sustentáveis .....	115
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	122
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	124

## 1 INTRODUÇÃO

Considerar sempre o bem-estar humano mediante as diferentes funções do edifício, sua inserção no espaço, influência na paisagem, no sistema mercadológico e principalmente como incentivador da produção de um ambiente construído coerente, são posturas e atribuições confluentes ao processo de projetar na arquitetura. Um ambiente construído promissor é variado, e é através da preservação das diferentes camadas do tempo que se torna essencial a existência de um gerenciamento do que já produzimos e investimos, e do ponto de vista técnico-econômico, social e ambiental, no que se refere à administração e uso de nossos recursos (COUTO, 2011).

Aproximadamente, cerca de 90% das edificações existentes, ainda existirão daqui a 50 anos, e o potencial de eficiência energética nesse cenário imobiliário é evidente. A conservação contemporânea é caracterizada pelo conceito de sustentabilidade fundamentado por discussões, medidas e recomendações que acontecem periodicamente por meio de planos e acordos de responsabilidade, visando possibilitar estratégias para se trabalhar um desenvolvimento sustentável. Tanto a nível nacional como internacional, essas medidas de eficiência energética em específico, são definidas como ações-chave que buscam compreender e equilibrar os valores históricos e arquitetônicos em paralelo às novas necessidades do contexto de produção e expectativa de vida das cidades (NORRSTROM, 2013).

Sob as influências arquitetônicas de estilos passados, as demandas da construção civil para o uso de um material amplamente difundido na história, como o concreto, aconteceram segundo Santos (2008) de acordo com uma campanha baseada em novos princípios e soluções plástico-expressivas representada pelo desenho arquitetônico e pelo cálculo estrutural, e isso somente foi possível por meio do incentivo e utilização dos chamados novos materiais, os quais eram industrializados.

A racionalização da construção civil, e conseqüente industrialização generalizada se tornou ao longo do tempo o responsável por uma parte significativa da degradação

urbana e ambiental. Esse cenário de degradação representa um dos principais desafios enfrentados nas últimas décadas quanto a minimizar os impactos do ciclo de vida na produção industrial. A geração de resíduos da construção civil, o uso exponencial do concreto, representa uma contradição de velhas e novas práticas, e que por não serem mais suficientes às novas necessidades ambientais, incentiva um olhar de desconstrução, onde novas proposições de tecnologias construtivas devem ser pensadas e aliadas às necessidades presentes e futuras. E com isso, pode-se ter uma projeção de viabilidade para possibilitar a expectativa de vida do nosso ambiente construído de forma mais consciente (SANTOS, 2008).

Nesse sentido as técnicas tradicionais já não representam o momento atual, e a busca por novos materiais com potencial de uso, permitindo a conjunção de propriedades já consolidadas em propriedades reversíveis de consumo com outros setores de produção são necessárias, e sob essa lógica tem-se o concreto sustentável objeto de estudo neste trabalho. Ele garante uma nova perspectiva de usabilidade, atrelado a uma conjuntura de novas práticas inseridas em um material que já provou seu valor ao longo do tempo e que hoje demanda novas experiências, sendo o projeto arquitetônico palco para se viabilizar aplicações desse material em funções diferenciadas e, ao mesmo tempo, interligadas (DIAS, 2017).

Dito isso, quanto à possibilidade de se trabalhar a potencialidade de utilização que o concreto sustentável possui, mediante as necessidades atuais de produção arquitetônica, de engenharia, indústria e meio ambiente, levanta-se o seguinte questionamento: como e partir de que premissas pode-se reconhecer e estimular a diversidade de aplicação do concreto sustentável como forma de promover uma consequente melhoria no processo de se projetar edificações com níveis de emissões de CO<sup>2</sup> menores, reutilizando matéria prima, resíduos e conjuntamente à outras práticas sustentáveis?

Sabe-se que existe uma relatividade na produção da cidade e do uso do concreto, tanto na construção de edificações, quanto em obras de infraestrutura urbana, isso porque diz respeito à uma prática construtiva à muito tempo implementada, e que ainda atende às estratégias de mercado por ser um material facilmente manuseado,



barato, e que não dispõe de mão de obra especializada. Essas questões, são abordadas nessa pesquisa complementarmente sob as definições de diversos autores, principalmente no que se refere à expectativa de vida das cidades, desenvolvimento sustentável, economia circular, tecnologia construtiva, e conseqüentemente da aplicação do concreto sustentável nesse contexto.

Utiliza-se como estudo de caso a Catedral Cristo Rei localizada em Belo Horizonte, MG. Projetada no ano de 2006 por Oscar Niemeyer, atualmente se encontra em construção. A mesma foi escolhida para ser analisada como modelo de viabilidade de aplicação do concreto sustentável em edificações, e também em virtude da utilização generalizada e em grande quantidade do concreto.

O projeto da Catedral representa uma complexidade construtiva devido à sua volumetria diferenciada e desafiadora. Dessa forma, além da análise do partido arquitetônico, estrutural e do programa de necessidades da Catedral Cristo Rei, o presente estudo constrói um projeto de proposição dos diferentes tipos de concreto e práticas sustentáveis que poderiam ser implementadas na edificação, a fim de torná-la mais eficiente, e com melhor desempenho por meio dos materiais e técnicas empregadas.

## 2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

Compreender a temática vinculada ao concreto sustentável, seus processos, composições e tipologias, como forma de incentivar o seu uso em edificações a partir de um ciclo de vida mais benéfico à expectativa de vida das cidades e do meio ambiente, e assim embasar a autora a desenvolver um projeto adequado e coerente de implementação.

A pesquisa objetiva ainda de forma mais específica:

1. Compreender a influência do desenvolvimento sustentável, do conceito de economia circular na construção civil, das legislações específicas, e da tecnologia construtiva do concreto, a partir de autores que debatem o tema;
2. Analisar um projeto de uma edificação que utiliza o concreto como partido arquitetônico e estrutural, de forma generalizada e dispendendo de um alto consumo;
3. Identificar e analisar os aspectos de gerenciamento da obra da edificação em estudo e do consumo do concreto com os níveis de emissões geradas;
4. Propor e identificar uma interface sustentável, na utilização e aplicação do concreto sustentável, desenvolvido a partir dos resíduos de diferentes setores, juntamente à outras práticas sustentáveis, como meio de intervenção em edificações.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo inclui variáveis de diferentes áreas, como sociais, ambientais, legais, econômicas e tecnológicas, trazendo atores e diversas funções, que podem representar uma possível articulação para a implementação do material em análise, evidenciando as problemáticas em torno e os potenciais de uso.

Este trabalho busca analisar diferentes alternativas do concreto sustentável que estão sendo desenvolvidas e testadas no Brasil. Foram consideradas tipologias que dispõem de composições interessantes de aplicabilidade, perspectivas de mercado, como custo e produção, além das vantagens, desvantagens, e também dos desafios de viabilidade que se seguem. Utilizou-se de pesquisas bibliográficas que substituíram ou mesmo reduziram a porcentagem de utilização do cimento que é o maior poluidor, mas que também fizeram uso de propriedades variadas em substituição a outros compostos. Além disso, considerou-se também tipologias de uso prioritário em edificações e de facilidade de exploração e disseminação no estado de Minas Gerais e em especial, na cidade de Belo Horizonte.

Nesta análise não é incluída o ciclo de vida com relação ao transporte e extração de matérias-primas comuns, bem como as etapas voltadas a aplicação, como lançamento, compactação e cura. Isso porque estão presentes nos diferentes tipos de concreto, não sendo portanto relevantes para suas comparações. Para cada avaliação de desempenho e componente dos estudos a seguir, existe uma NBR que orienta e determina se as análises têm resultados positivos e negativos, utilizando corpos de prova para as experimentações.

A análise do projeto e obra da Catedral Cristo Rei, visa compreender os tipos de concreto convencionais utilizados, mediante às necessidades estruturais de cada elemento e do programa de necessidades do edifício.

Com isso, de maneira particularizada, analisa-se o volume de uso do concreto e a geração de emissões no processo de extração e fabricação, a fim de mensurar a carga de poluição que a edificação gera com o uso massivo do concreto e justificar a

iniciativa de se propor uma substituição do concreto convencional pelo sustentável. A análise sintetizada é realizada com base no estudo dos autores Santoro e Kripta (2016), que utiliza valores da indústria brasileira para mensuração de cada matéria prima, partindo da resistência à compressão do concreto.

Busca-se também compreender se existem práticas eficientes no projeto e no gerenciamento da construção, ou seja, se são reaproveitados materiais, recursos, se existem controles específicos de desperdício e organização, que evidenciem ações mais sustentáveis e que possam ser somadas ao projeto que será proposto neste estudo.

A criação de um projeto de proposição posterior à essa análise, onde o concreto utilizado na Catedral é substituído pelo concreto sustentável, estabelece o que a edificação poderia vir a ser, com materiais que dispõem de um ciclo de vida mais limpo, utilizando também outras práticas sustentáveis com estratégias de desempenho e geração de energia. Buscando assim enfatizar os benefícios que esse tipo de intervenção pode oferecer para as edificações de forma geral.

O estudo pretende alcançar seus objetivos por meio de quatro abordagens, uma primeira teórica, na qual serão apresentados os conceitos principais utilizados, cenário atual, e abordagens legislativas se tratando do que temos à disposição, mediante gestão e atores envolvidos. Uma segunda mais específica, explorando o uso do concreto sustentável a partir da construção de um arranjo diverso das suas tipologias. Uma terceira quanto à análise em si do projeto arquitetônico e sua relação com o concreto. E, por último, analisando a viabilidade de aplicação dos materiais estudados em intervenções arquitetônicas, utilizando a Catedral Cristo Rei como objeto de estudo. Após esse momento chega-se a uma proposição que alia o uso do concreto sustentável com outras práticas, evidenciando uma análise interdisciplinar do processo ao projeto.

Para isso, utilizou-se de pesquisa bibliográfica em bases recentes, e estudo de caso como método de procedimento. Nessa etapa, realizou-se a visita técnica à obra da Catedral Cristo Rei, gerenciada pela Arquidiocese de Belo Horizonte e escritório de

projetos de arquitetura do Oscar Niemeyer, localizado no Rio de Janeiro. O Engenheiro Felipe Paiva, responsável pela área técnica, fez o acompanhamento. Como material, foram recolhidas fotografias do projeto e da construção, possibilitando o uso na pesquisa de forma esquemática, além de gravações que permitiram o entendimento legítimo do objeto de estudo.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 A produção do espaço e a expectativa de vida das cidades

O advento de novas tecnologias, a crescente industrialização com diversificação de bens e serviços, e população das cidades, em paralelo à escassez de recursos e consequente geração de resíduos, transparece a problemática de um gerenciamento complexo e oneroso. Após décadas de isenção e negligência, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, realizada pela ONU em Estocolmo no ano de 1972, compilou resultados que puderam incitar uma preocupação no processo de produção industrial quanto à matérias-primas, recursos naturais e geração de resíduos (CASSA CARNEIRO et al., 2001 apud COUTO, p.10, 2011).

Reafirmando ao longo dos anos através de diversos encontros, as Conferências Ambientais realizadas pelas ONU, estabeleceram em setembro de 2015, uma nova política global, a criação da Agenda 2030. Com a intenção de promover um desenvolvimento sustentável, justo e inclusivo, foram definidos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), assim como 169 metas a serem alcançadas por meio de ações conjuntas dos diferentes níveis de governo, empresas, organizações e a sociedade no geral (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS, 2020). Os objetivos pautados em 5 áreas de importância são mostrados na Figura 01.

Figura 01: Os 5 P's da Sustentabilidade



Fonte: Movimento Nacional ODS

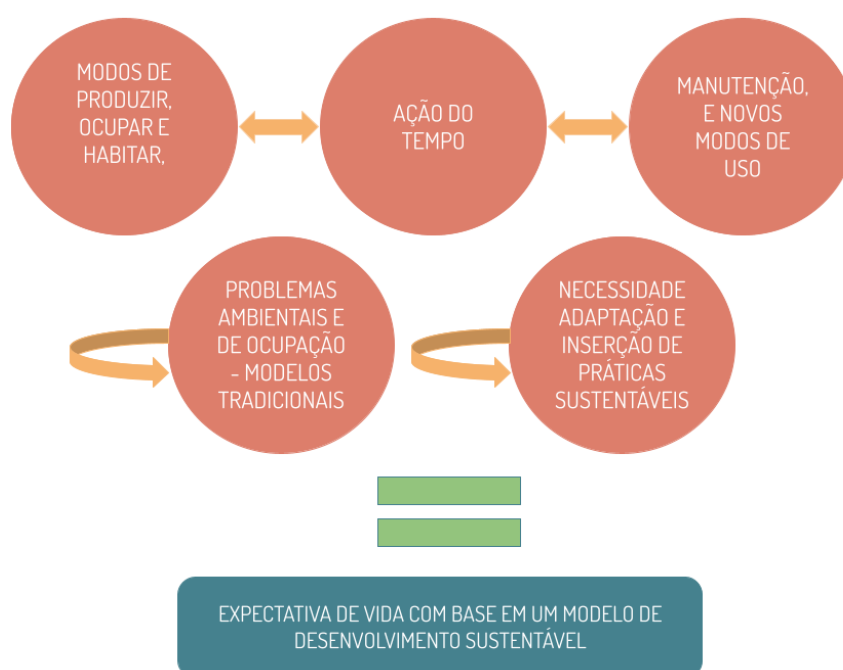
Esses objetivos de implementação locais fazem parte de modelos já definidos e praticados entre 2000 e 2015, os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM). A proposta central dos ODS é, portanto, a utilização de ações integradas para alcançar impactos reais na sociedade, e sendo os municípios os responsáveis por essa gestão, precisam atuar com acordos, articulações com outros agentes territoriais, com iniciativas focadas entre a sociedade civil e o setor privado também, conforme discutido pela Confederação Nacional de Municípios (2020).

Dessa forma, o Desenvolvimento Sustentável dispõe de orientações para realização de ações de curto, médio e longo prazo. Cabe neste momento evidenciar uma perspectiva mais estreita do contexto de gestão urbana para compreender a atuação e potencial do nosso ambiente construído, com o ordenamento da produção dos nossos espaços e das tecnologias construtivas que temos à disposição. Questões que envolvem a arquitetura fabricada hoje precisam ser suficientes para estender a expectativa de vida das cidades e do meio ambiente de forma a garantir a eficiência energética, acesso à energia limpa e barata, redução de emissões de CO<sub>2</sub>, e a proteção e reutilização dos nossos recursos naturais. Dentro dessa dinâmica se consubstancia o propósito de incorporar medidas capazes de gerar uma adaptação evolutiva consistente (MACIEL, 2020).

Nesse momento, utiliza-se como modelo de gestão e mesmo uma alusão sobre as posturas praticadas no nosso patrimônio construído para entender ciclos históricos, contemporâneos e futuros. Temos na cidade projetos de diferentes épocas com propostas que refletem os modos de ocupar, habitar, interagir e produzir de determinada geração (descendência) com o espaço. Dessa forma, reconhecidas as características projetuais e edificadas, busca-se uma adaptação para sua expectativa de vida, adotando práticas construtivas complementares, resguardando as marcas do tempo, e atribuindo novos usos, o que representa por fim sua devolução à vida na cidade. A ressignificação de sua existência acontece, portanto, através de um processo, ou seja, compreende-se qual tipo de intervenção é necessária e a partir daí se tem as condicionantes de valorização (COUTO, 2011).

Esse raciocínio ilustra o potencial do nosso ambiente construído que pode ser ainda maior daqui a 50 anos, uma vez que temos a oportunidade e a necessidade de prepará-lo para uma transição mais limpa, conforme o autor Maciel (2020) enfatiza. Desde a concepção de novos projetos, às adequações sustentáveis nos edifícios existentes, e produção industrial, se torna possível viabilizar uma gestão proativa, seja na administração de recursos, através de uma economia circular, processos de adaptação e de conservação do meio ambiente. A Figura 02 evidencia uma síntese do ciclo de produção do espaço construído.

Figura 02: Esquema de ciclo de produção do espaço construído



Fonte: Autor, 2021

Nesse sentido, as possibilidades de se compatibilizar ao desenvolvimento econômico acelerado que dispõe de objetivos capitalistas, alta produtividade, avanço tecnológico, e também a eficiência empresarial, somadas à ideia de sustentabilidade, ainda não garantem o seu pleno funcionamento, uma vez que o cenário capitalista possui diversos dilemas e conflitos. A autora Heloisa Couto (p.23 2011), traz questionamentos sobre a grande questão da contemporaneidade:

[...] como progredir utilizando, simultaneamente, padrões de crescimento industrial do século XX, vividos em países ricos do hemisfério norte e preservar o meio ambiente global? [...] como frear, combater e mitigar a



entropia, gerar sistemas industriais de regulação e produção mais limpos e múltiplos, em nível social-econômico, cultural, político e ecológico que sejam eficientes sem deixar de crescer?

A autora ainda completa que essas incertezas não se resolveriam com condições estacionárias e crescimento zero, isso porque o ônus ambiental continuaria a ser agravado, e ainda partindo-se do pressuposto que se cortassem custos no sistema econômico, poderia influenciar em um elevado número de desempregados, o que hoje já acontece.

Retoma-se nesse sentido a um termo que na Conferência Rio+12 em 2012 foi tratado como tema central: a economia verde. Posteriormente divulgado no relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - PNUMA (UNEP,2011), esse termo segundo Sawyer (2011) foi tratado como substituto ao “desenvolvimento sustentável”, porém o mesmo estaria voltado principalmente às mudanças climáticas, considerando baixo carbono, eficiência energética, energia renovável, padrões de consumo e entre outros, com o intuito de relativizar a forte ênfase no clima e biodiversidade promulgados após 2007. O autor ainda cita por outro lado, que "os impactos ambientais referentes à poluição industrial e aos resíduos urbanos (a “agenda marrom”) e à água superficial e subterrânea (a “agenda azul”) continuam sem a mesma atenção” (Salati, 2009; Arraut et al., 2011 apud SAWYER, 2011), no que diz respeito a reincorporação nos discursos e financiamento.

A economia verde, apesar de ser um conceito que busca atrelar melhoria do bem estar da humanidade, igualdade social, como também redução de riscos ambientais e escassez ecológica, a mesma corresponde às críticas quanto ao seu modelo de implementação. Contraditoriamente, ou mesmo insustentável em sua totalidade, esse conceito torna passível de apropriação e negociação por contrato a água, a biodiversidade, incluindo a aceitação de carbono, que passariam a constituir novas cadeias globais de *commodities*, ou seja, estaria atribuindo valores monetários a bens naturais (ECYCLE, 2016).

A sustentabilidade é, portanto, segundo Tioffi (2021 apud SCHRIJPE; RIBEIRO, 2019) uma das principais estratégias de aumento de valor para as empresas

industriais, e uma alternativa importante à economia liberal. E dito isso, conforme discutido fica mais evidente a necessidade de novas ações que contribuam realmente para o desenvolvimento sustentável considerando um desenvolvimento econômico, urbanização e a revolução tecnológica como atores que representam alterações no nosso estilo de vida, nos modos de produção e consumo, mas que podem ser atuantes de maneira consciente.

## **4.2 Economia circular e a construção civil**

Posteriormente às críticas de inviabilidade que se sucederam ao termo de Economia Verde, outro termo abriu caminho nos últimos anos e hoje funciona como eixo de contribuição ao desenvolvimento sustentável. Trabalhando a partir da inteligência da natureza, e divergindo ao processo produtivo da economia linear, visto que temos uma exploração excessiva de recursos naturais que conseqüentemente causa o grande acúmulo de resíduos durante todo o seu ciclo de produção, a Economia Circular é então uma ciência que mediante a obsolescência programada do modelo de produção atual, ela segue através de uma perspectiva de reutilização de recursos (ECYCLE, 2016).

Embora em suas raízes não tenha uma data específica ou autor de criação, pode-se encontrar premissas desse conceito na Teoria Geral de Sistemas, na Ecologia Industrial (TIOSSI, 2021 apud GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016), por exemplo. Nessa mesma linha buscando-se por alternativas conciliadoras para o desenvolvimento sustentável, junto a preservação do meio ambiente e prevenção de poluição, foi criado em 2010 por Ellen Patricia MacArthur, na Inglaterra, a Fundação Ellen MacArthur - EMF, com o propósito de estudar e estimular o uso da Economia Circular. Por meio da elaboração de relatórios, foi possível identificar pela Fundação que cerca de 82 bilhões de toneladas de matéria prima são injetadas no sistema produtivo mundial a cada ano, o que evidencia a preocupação focada no esgotamento que essa retirada vem causando (EMF, 2015). Dito isso, Korhonen (et al, 2018) afirma que,

[...] profissionais vêem a economia circular como uma maneira de adaptar processos de produção de forma a induzir a transformações industriais regenerativas que ao alcance de uma produção e consumo sustentáveis, contribuindo também para o crescimento econômico sustentável.

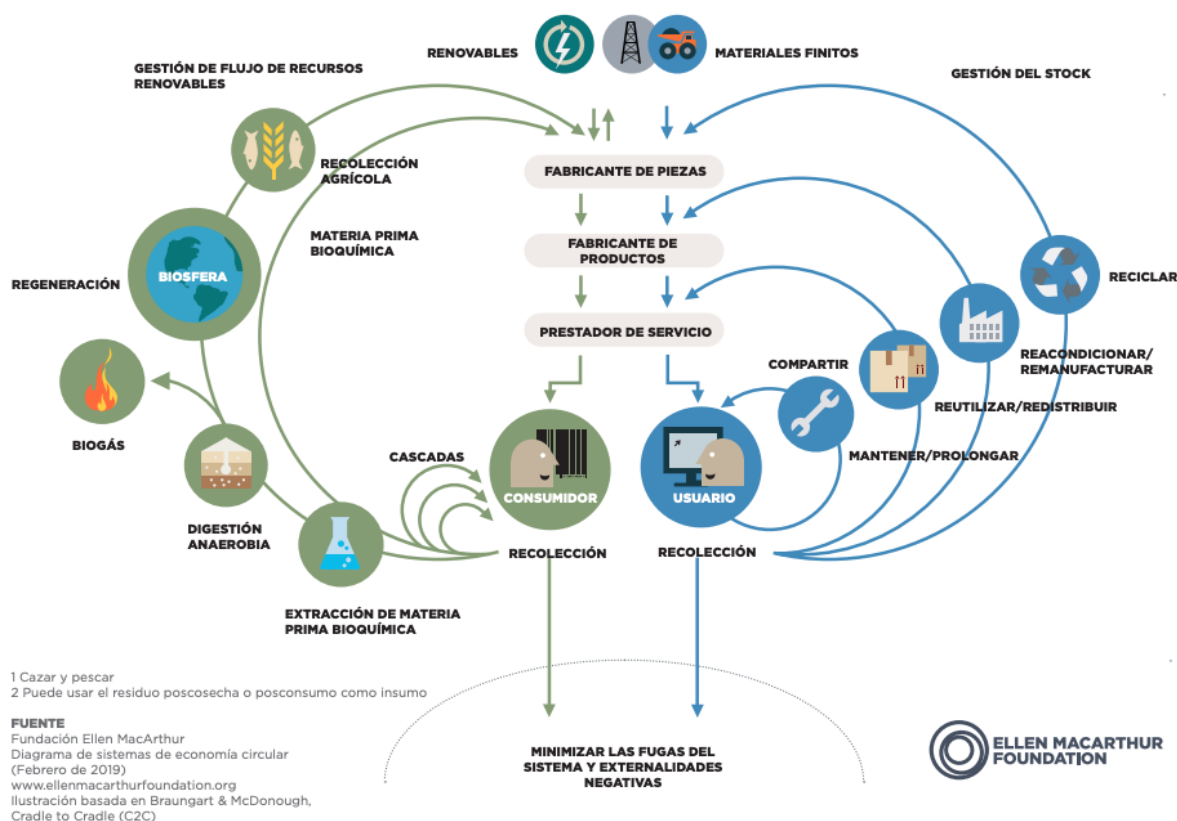
Nesse sentido, controlar os estoques finitos e equilibrar o uso dos recursos renováveis, são atribuições do desenvolvimento sustentável em consonância com a economia circular, pressupondo como primeiro passo a desmaterialização de produtos e serviços como forma de incentivar positivamente a economia. Funciona como uma alternativa de abordagem na cadeia produtiva, relativizando a ideia de desperdício, isto é, o que se descarta e muitas vezes é desperdiçado como resíduo pode ser reinserido ao ciclo de produção, e posteriormente obter seu valor agregado e consumo (MOTTA, 2018; EMF, 2013).

Esse ciclo segundo o EMF (2015) dispõe de uma divisão de tipos de produtos, sendo eles os biológicos e os técnicos. O primeiro é referente aos projetados e/ou tratados para reinserção na natureza, e o segundo requer investimentos em inovação para viabilizar sua recuperação e mesmo o seu desmonte.

A necessidade de aprimoramento da eficiência na criação de produtos e no reaproveitamento de resíduos sólidos se tornam vertentes que influenciam desde o processo de concepção, devendo ser utilizados além de materiais facilmente recicláveis, também incluindo os não perigosos, e considerando que existem sistemas de descontaminação por exemplo (ECYCLE, 2016).

No Brasil, de acordo com a EMF (2017), as oportunidades geradas pela economia circular estariam voltadas a mais inovação e criação de valor. As vantagens e princípios estão atrelados à preservação e aprimoramento do capital natural, buscando-se controlar os fluxos de recursos renováveis. Tem-se então uma otimização de rendimento que acontece no mais alto nível de utilidade em todo o ciclo, fazendo circular materiais, produtos, componentes, e não obstante, estimulando gradativamente a efetividade do sistema que passaria desde o início a revelar e excluir as externalidades negativas e perdas sistêmicas (BARBOZA et al., p. 07, 2019). A Figura 03 traz o diagrama sistêmico de funcionamento da Economia Circular.

Figura 03: Diagrama Sistêmico da Economia Circular



Fonte: Ellen MacArthur Foundation - EMF, 2017

Dessa forma, a economia circular garante a gestão de um ciclo que possibilita uma regeneração, para que o fluxo de bens renováveis possa se recuperar em tempo hábil e seguirem sendo trabalhados de maneira sustentável (EMF, 2017).

Conforme a alusão trabalhada neste estudo sobre o contexto do processo de intervenção do patrimônio construído, o mesmo acontece na economia circular que viabiliza uma evolução de projetos e processos, mas dentro de uma escala de impacto maior e se tornando viável em diversos atores e áreas de produção.

Segundo Roque & Pierri (2019 apud BARBOZA et al, p03, 2019), o alto nível de competitividade promulgado pelo mercado acaba por exigir cada vez mais uma abordagem sustentável de produção. Tendo em vista a construção civil como cenário deste estudo, sua produção sustentável estaria tanto voltada à redução de desperdício de materiais, como também ligados à diminuição de custos, insumos e poluição. As ações que se seguem nessa lógica do conceito de economia circular estaria

determinando parâmetros reais para se alcançar um desenvolvimento econômico, regional, ambiental e social também.

O protagonismo desse setor, de acordo com Couto (2011), faz necessário o uso de premissas aplicadas desde a concepção de projeto para que os objetivos intencionados sejam conclusivos e a economia circular na construção seja um caminho que orienta, intensifica o uso consciente, e conjuntamente às normativas que legalizam o processo para que possam também estimular pesquisas na composição de materiais e otimização dos processos.

A indústria da construção representa, por fim, um forte setor de desenvolvimento econômico e social. No Brasil seus lucros são responsáveis por 14% do Produto Interno Bruto (PIB), o que a torna responsável também por 20% a 50% do consumo total de recursos naturais e geração de resíduos. Juntamente a esse dado, existe a questão do descarte de resíduos também que muitas vezes são referentes aos finais de seus ciclos. Só a construção civil descarta o equivalente a US\$13.2 bilhões, e nesse contexto soma-se a destinação inapropriada de entulhos em lugares clandestinos. Essa problemática compromete o meio ambiente, polui muitos espaços públicos, periferias, causa a degradação da paisagem e acaba por encurtar a vida útil de aterros sanitários (SANTOS, 2020 apud PAZ; LAFAYETTE, 2016).

Chamados de RSCCs, os Resíduos Sólidos da Construção Civil, são provenientes de reformas, demolições, reparos, resultados de escavações de terreno, e de preparação, segundo afirma Couto (2011). Esses materiais possuem um potencial de reciclagem muitas vezes inexplorado, e como forma de viabilizar seu retorno aos processos de industrialização existem hoje diversos estudos e normas brasileiras que orientam sua ressignificação.

#### **4.3 Legislações, normativas e abordagens conjuntas**

Em síntese, conforme discutido, a Agenda 21 tem como objetivo uma atuação que introduz um novo paradigma produtivo e motivado por uma nova organização de

sociedade. Políticas públicas e coletividade devem dispor de uma gestão integrada, participativa, visando resultado, qualidade, além de racionalização consistente e redução de custos.

Dito isso, o Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA, trabalha dentro de diversos temas da Agenda 21, e isso partiu da reflexão sobre algumas dificuldades enfrentadas pelas cidades contemporâneas, como por exemplo e em específico os problemas de urbanização desordenada, e de desperdícios de produção por falta de planejamento na Construção Civil. Dessa forma, sentiu-se a necessidade de buscar propostas para se efetivar diretrizes voltadas à redução de impactos ambientais gerados pelos resíduos da construção civil (COUTO, 2011).

O Conselho foi criado mediante a política urbana de desenvolvimento da função social da cidade, em 2001 sob a Lei nº10.257, de 10 de julho, e tem como princípio trabalhar a reparabilidade ambiental. As diretrizes, critérios e recomendações a respeito da disciplinarização da gestão de resíduos da construção civil, foram estabelecidas por meio da Resolução CONAMA 307, de 5 de julho de 2002. Couto (2011), afirma que somente através dessa resolução foi possível ter a classificação de resíduos sólidos urbanos, tanto inertes como não inertes, e também o favorecimento da gestão de coleta, tratamento e destinação dos mesmos.

Em conformidade com a Resolução CONAMA nº307, a Associação das Normas Brasileiras (ABNT-NBR 10004) estabelece os procedimentos para disciplinar as ações de uso, reorientação e redução dos impactos gerados pelos resíduos sólidos. A norma ABNT-NBR 10009: Resíduos - Classificação (2004, p.71) dispõe de cinco classificações para os resíduos sólidos da construção civil (RSCCs), sendo elas:

- Classe A: Trata dos resíduos reutilizáveis ou reciclados, como agregados, provenientes de construção, demolição e reparos, e também produzidos no próprio canteiro de obras;
- Classe B: Resíduos para outras destinações, como reciclagem de plásticos, papéis, papelão, metais, vidros, madeiras, etc;
- Classe C: Resíduos que ainda demandam o desenvolvimento de tecnologias e aplicações viáveis para sua reciclagem/recuperação, por exemplo produtos de gesso;

- Classe D: Resíduos perigosos do processo de construção, que usam substâncias químicas e que estão sujeitos a contaminação.

Os resíduos da construção civil apresentam uma grande variedade e apesar de serem responsáveis grandemente pelos impactos urbanos, ambientais e econômicos (geração de gargalos) que temos no ambiente construído, os mesmos podem ser reintroduzidos no próprio setor e ainda ter a implementação de resíduos de outros segmentos industriais, o que será abordado no capítulo seguinte (COUTO, 2011).

A cidade de Belo Horizonte se tornou referência nacional no gerenciamento de resíduos de construção civil, através do Programa de gestão da Superintendência de Limpeza Urbana (SLU), da Prefeitura Municipal em parceria com o Programa de Reciclagem de Entulhos da Construção Civil implantados na década de 90, buscando promover correções quanto aos transbordos gerados pelos resíduos da construção civil, sua destinação clandestina, a degradação ambiental. Um dos modelos efetivados nesse projeto foi a criação Usinas de Reciclagem de Entulho, que hoje contam com três unidades, sendo respectivamente no Bairro Estoril a primeira estação, em virtude de ser uma área que gerava uma grande quantidade de deposições clandestinas na BR-040, que já se encontra com a capacidade alta, e na Pampulha (COUTO, 2011).

De acordo com PBH (2021) os resíduos de construção coletados por pequenos geradores são entregues nas Unidades de Recebimento de Pequenos Volumes (URPVs), que após devidamente desagregados são encaminhados para as usinas. As Usinas seguem as classificações de materiais da Resolução CONAMA nº307, porém voltadas aos entulhos de construção civil da cidade, referentes à categoria A, sendo compostos de concreto, blocos de cimento, misturas e pedras. Já os materiais de categoria B dispõem de misturas de cerâmicas, como bica corrida, restos de reboco, tijolos, telhas, e blocos cerâmicos. Os materiais são separados e tratados, com a intenção de receber gratuitamente esses materiais.

Ainda segundo dados fornecidos pela PBH (2021), foram cerca de 31 mil toneladas

de agregado reciclado processados pelas Estações de Reciclagem de Entulho da Superintendência de Limpeza Urbana. Por ano, esse valor é superior à 147 mil toneladas de resíduos recebidos nas URPVs. Só a construção civil produz cerca de 700 toneladas de resíduos por dia. Esses valores evidenciam a capacidade de reciclagem que temos nos sistemas de tratamento e o quanto esse setor precisa de uma transformação na sua base de utilização.

Outro ponto de destaque é sobre o foco que se deu à reciclagem do concreto. A Prefeitura de Belo Horizonte, conforme práticas de gestão com resíduos de construção civil, instaurou a chamada ECOBLOCO, uma fábrica de produção de artefatos de concreto que utiliza agregados reciclados como matéria prima. A autora Heloisa Couto (2011) ilustra a produção da Usina de Reciclagem no bairro Estoril conforme Figura 04.

Figura 04: Fabricação do Ecobloco, Usina de Reciclagem do Estoril



Fonte: COUTO, 2011

Os produtos desenvolvidos têm a matéria prima a partir das receptoras, sua produção passa por controle de qualidade de parceiros especializados, e pela Escola de Engenharia da UFMG, responsável por elaborar pesquisas e ensaios, e que posteriormente possibilita que esses artefatos sejam revendidos para o mercado no entorno das estações. O trabalho é desenvolvido em uniformidade à ABNT-NBR 12118 2014, garantindo os níveis de resistência à compressão, com a unidade de medida, o Mega Pascal – mpa, como sendo o ideal 2,5 mpa-Newton kg/força (COUTO, 2011).



Dito isso, percebe-se que Belo Horizonte dispõe de um incentivo prático atrelado ao desenvolvimento sustentável, e ao eixo de contribuição do processo de uma economia circular voltada aos resíduos de construção civil. São introduzidos materiais com grande potencial de reutilização no mercado, amparo e desenvolvimento para as comunidades envolvidas, além de incentivar o empreendedorismo e diversificar a economia regional. O crescimento desse mercado está diretamente associado a uma inclusão produtiva e a aliança entre parcerias públicas, educacionais e privadas que podem estender cada vez mais sua atuação.

#### **4.4 Tecnologia Construtiva**

##### **4.4.1 Cenário de produção brasileiro**

Sistemas construtivos advêm de uma definição quanto aos conjuntos de organizações que se seguem na execução de estruturas portantes, aberturas, coberturas, vedações, e instalações básicas, isso no âmbito das edificações. São vários os sistemas construtivos utilizados em cada país, sejam difundidos por influências culturais, como as técnicas desenvolvidas, tecnologias disponíveis, necessidades e mesmo de prioridades quanto ao clima (COUTO, 2011).

No Brasil, esse conceito se abre para diversos materiais e técnicas. Os mesmos são utilizados ao transpasse das épocas, tanto se aperfeiçoando, como apenas sendo mantidos em comunidades como forma de resguardá-lo às próximas gerações, ou ainda os que hoje são criados com base em inovações tecnológicas específicas. Dito isso, apesar da existência de um aparato considerável para diversos tipos de demanda de cada região brasileira, com habilidades particulares da nossa cultura e clima, uma tecnologia construtiva se consolidou no mundo e se sobressaiu na sua utilização desde a introdução no Brasil, que é o concreto. Segundo Santos (2008),

O concreto está no cerne da consolidação de um dos poucos sistemas tecnológicos genuinamente desenvolvidos no Brasil e é peça chave na

estruturação do campo da arquitetura e da engenharia e de todas práticas que ele põe em jogo. A construção civil brasileira está estruturada em torno do sistema construtivo do concreto armado.

E ainda segundo o autor, além de obras de infraestrutura, a maioria das edificações construídas em zonas urbanas brasileiras são feitas em concreto, valendo-se para construções formais e informais. Sob esse aspecto, compara-se seu consumo com o cimento, que é um dos ingredientes do concreto e que também é altamente consumido no Brasil.

Silva (2003 apud SANTOS, 2008) discorre que a inserção do concreto no Brasil se deu precipuamente como produto patenteado por filiais de empresas estrangeiras quando estabelecidas no país, no início do século XX. Mais especificamente em 1920 com a instalação das cimenteiras, tem-se a instituição da tecnologia e cultura de produção do concreto, o que o autor afirma ser o início de um período crítico de difusão desse processo na industrialização e urbanização ao longo e após a década de 30. Na década seguinte, em 1940, o mesmo já está estabilizado, isso porque seu uso já estava normalizado pela ABNT, e já se fazia necessário nos currículos das escolas de arquitetura e engenharia, ou seja, ele já estava regulamentado pelas atribuições profissionais do sistema CONFEA-CREAs - Conselho Federal e Conselhos Regionais de Engenharia, Arquitetura e Agronomia (SANTOS, 2008).

O concreto então tendo seu acesso facilitado e motivado por movimentos importantes de arquitetura como o Movimento Moderno, presentes também em obras de destaque da engenharia como pontes e viadutos, e até mesmo em edificações simples, evidenciou que, com o seu uso formal, legalizado e normalizado, passou a ser o elemento chave em todas as etapas de produção de edificações, desde a concepção do projeto, organização de canteiro e de mão de obra, além do comércio de materiais de construção. Apesar desse grande salto de grandes contribuições na indústria do Brasil, Silva (2003, p.46 apud SANTOS, 2008), afirmou que foram também muitos os aspectos negativos, entre eles:

a inibição de outros sistemas construtivos, desequilíbrio na distribuição do conhecimento técnico, desqualificação dos trabalhadores, poluição, degradação ambiental. Entre as desvantagens do sistema do concreto está

também o consumo de matérias-primas naturais, com impactos negativos nos locais de extração, nos percursos de transporte e nos canteiros de obra. A indústria da construção civil é a maior geradora de resíduos de toda a sociedade.

Dito isso, o autor chama de hegemonia do concreto o alto nível de influência que ele ordenou no sistema construtivo, de pesquisa e ensino e que atua fortemente até os dias de hoje. Segundo uma matéria realizada em 2018 pelo jornal BBC News, o instituto de pesquisa britânico Chatham House discute que, apesar do concreto ser econômico, facilmente produzido em qualquer lugar e ser sinônimo de qualidade estrutural alta e durável, o Departamento de Energia, Meio Ambiente e Recursos contabilizou os níveis de emissões no seu principal componente, o cimento.

Sendo responsável por cerca de 8% das emissões de CO<sup>2</sup>, em comparação com outros setores de alta emissão como de combustível de aviação, que equivale a 2,5% e pelo agronegócio que dispõe de 12%, o cimento supera esses índices e traz discussões mundiais para redução.

Conforme tratado sobre os acordos realizados pela ONU, a COP24 - pacote de medidas climáticas em prol do atendimento aos requisitos definidos no Acordo de Paris (2015), que foi um compromisso focado na redução das emissões de gases no prazo de até 2030. Nesse contexto, as emissões geradas na produção de cimento demandam uma redução de pelo menos 16% até essa data, sendo que os níveis foram avaliados desde 2010. Dito isso, para entender quais as alternativas serão debatidas no capítulo para melhorar esse processo, é imprescindível entender como acontece a produção de cimento hoje, sendo as etapas:

- a extração e tratamento, inicialmente a partir do esmagamento de matérias primas como calcário e argila principalmente;
- logo, na trituração e mistura utiliza-se minérios de ferro e cinzas volantes (minerais produzidos a partir da queima de carvão mineral);
- a etapa seguinte diz respeito a sua queima, que acontece em fornos cilíndricos que são aquecidos a uma temperatura de 1.450°C;

- o processo de calcinação como sendo uma reação química de decomposição térmica que consegue dividir o material em dióxido de cálcio e CO<sub>2</sub> a partir da transformação do calcário em cal virgem, gera uma nova substância, o clínquer.

Esse material além de ser o principal componente do cimento, é também o material cuja produção emite a maior quantidade de CO<sub>2</sub> nessa indústria. Mais especificamente o clínquer é a formação de pequenos grãos cinzentos, que resfriado, moído e misturado com gesso e calcário, é posteriormente transportado para as fabricantes de concreto (BBC, 2018).

O concreto dispõe de diferentes tipologias usuais, entretanto, no Brasil são mais utilizadas a do concreto armado (primeira e mais comum), que dispõe da junção do concreto com armaduras de aço, garantindo maior eficiência mediante à esforços de tração. Sua evolução gerou também o concreto protendido, neste “[...] são aplicadas tensões prévias de compressão nas regiões das peças que serão tracionadas com o intuito de redução das tensões por tração” (PORTAL DO CONCRETO, 2017).

Já o concreto auto adensável possui elevada trabalhabilidade, abatimento e fluidez. Isso se deve à adição de superplastificantes na sua composição. O concreto de alto desempenho, no entanto, utiliza de adições minerais para agir com a cal que é o resultado de hidratação do cimento, e entre essas adições estão a sílica e o metacaulim, que juntos conseguem elevar a durabilidade, resistência e impermeabilidade.

Apesar desses modelos, o potencial do concreto tem sido cada vez mais estudado, e nos últimos anos apareceram também os concretos especiais, desenvolvidos para uma atuação específica, como o concreto com adições de fibras de aço, buscando a redução de fissuras; e o concreto sustentável, criado a partir da necessidade de redução dos recursos naturais, mitigar as emissões de carbono no processo de produção e buscando o maior aproveitamento de subprodutos de vários setores industriais (DIAS et al, 2017).

#### 4.4.2 O concreto do ponto de vista do projeto

É interessante compreender nesse momento um outro lado da racionalidade da construção com o concreto, sendo ele sob o ponto de vista do projeto em seu caráter teórico-constutivo e expressivo-estético, mediante suas relações recíprocas. O autor Morabito (1990, p.40 apud GIANNECCHINI, 2009, P.12) entende que aconteceu uma revolução da noção do espaço no momento em que se permitiu uma autonomia da estrutura como característica importante da arquitetura do século XX.

Isso foi possível em virtude do progresso das pesquisas científicas quanto à resistência dos materiais, inicialmente com o uso do ferro e posteriormente do concreto armado. Como contribuição do uso estrutural desses materiais teve-se a tendência da redução das seções portantes, ou seja, passou-se a trabalhar o domínio do comportamento estrutural, sua individualização, que convergia aos modelos de se projetar daquele período e passava a incentivar a exploração da forma. Segundo Giannecchini (2009, P.02):

Inevitavelmente estas duas polaridades - técnico-constutiva e expressivo-estética - permearam aspectos espaciais dessas obras, uma vez que nelas a ousadia estrutural alcançada está intimamente ligada à proposição de espaços de grandes vãos livres, donde decorrem seções portantes robustas, balanços arrojados e amplas coberturas. Uma intenção a monumentalidade acaba por ficar clara nesse sentido, corroborada pelo uso rústico e exposto dos materiais.

Complementarmente, Couto (2011) trás a ideia desses processos funcionalistas, e da inevitabilidade da indústria, que eram questionados por muitos movimentos. Por mais que a racionalização da construção como consequência da revolução industrial vinha se incorporando ao pensamento produtivo desde o século XIX, algumas mudanças já eram expressivas como a exploração de materiais tradicionais, início da padronização de peças, redução do custo e aumento de produção. Em função disso, apesar das inquietações quanto aos novos modelos, foi um século marcado pela possibilidade de uso inovador na construção civil. É importante considerar a perspectiva de evolução,

e como as escolas de arquitetura e engenharia foram precípuas para sua expansão e diversificação de uso.

O concreto antes somente utilizado em obras como viadutos, pontes, túneis, construções verdadeiramente dotadas da função estrutural como prioridade, era tido como uma pedra artificial. Foi em meados do século XIX que surgiram diversas experimentações, e entre elas houve a substituição em paredes maciças, atuando de forma monolítica, por exemplo, mas sabendo-se que ainda não se tinha um entendimento suficiente sobre sua funcionalidade juntamente a outros materiais como o cimento e a armadura de ferro. Ele se tornou passível de conhecimento e uso apenas no final do século, com a implementação da estrutura esqueleto do tipo pilar-viga, que começou a se popularizar a pequenos passos (SANTOS 2008).

Dessa forma, Silva (2003, p.46 apud SANTOS, 2008) retrata que o século XIX teve uma preponderância em sua análise estética, onde se pôde construir edifícios com altura de quinze pavimentos e estrutura metálica no interior, existindo portanto uma linguagem complementar ao uso estrutural com o ferro. Essas estruturas de ferro eram revestidas de alvenarias portantes externas, e incentivadas pela Escola de Chicago que aderiu projetos com fachadas limpas e grandes vãos. Vale ressaltar que a construção de edifícios mais altos já era possível devido aos equipamentos de instalação predial e elevadores. Entretanto, as sobrecargas das áreas projetadas nas paredes ainda representavam riscos e impasses, o que incentivou posteriormente o uso da estrutura metálica como esqueleto.

Em síntese, houve a criação de uma identidade entre estrutura e arquitetura a partir da evidência estrutural, da simplificação das formas que permitiu novos caminhos para se projetar. A popularização do concreto teve diversos problemas de aceitação, isso porque sua aparência de aspecto cinzento, suas superfícies irregulares e dúvidas quanto a resistência, eficácia e durabilidade mediante o projeto de arquitetura, o tornavam totalmente diferentes dos padrões estéticos que prevaleciam nos estilos anteriores, e ao mesmo tempo incitava discussões em periódicos técnicos a todo momento. Giannicchini (2009, p.11) retrata que

[...] as características estáticas do material acabaram por não se revelar adequadas ao gosto pelo detalhe, porquanto requeriam formas mais simples e retas, no sentido de uma colocação mais racional da armadura, até porque, até esse momento, a teoria da resistência havia se desenvolvido exclusivamente para as estruturas elementares de pilares e vigas.

O autor ainda completa que o desenvolvimento da técnica do concreto armado, depois de novas e diferentes abordagens que foram introduzidas, representou um novo modelo de se projetar, tirando partido arquitetônico do próprio material. Essas expressões arquitetônicas surgem de formas simples no momento em que movimentos artísticos reivindicam por liberdade e incentivam novas perspectivas de produção. No Brasil, o interesse pela sua estrutura, plasticidade e uso aparente propôs ao século XX compreender quais seriam as condições tecnológicas, solicitações de tempo e dessas relações recíprocas com o material.

Sob essa perspectiva, Santos (2008) acrescenta que além do concreto como técnica e expressão da arquitetura principalmente durante o movimento moderno, utilizado em pisos, paredes, tetos, em mobiliários e até em objetos de decoração até hoje, sua consolidação abrangeu todas as tipologias construtivas. Em razão da sua versatilidade, foi amplamente aplicado na Europa, Estados Unidos, e Brasil, o que demonstrou também a sua adaptabilidade quanto ao clima.

A diversidade climática é um dos principais fatores de influência no projeto. Ela acontece em toda a extensão territorial e pode ser caracterizada pelo clima de cada região, consoante o seu zoneamento que considera variáveis como temperaturas, vegetação e relevo. Assim, embora o Brasil tenha seguido os modelos e preceitos internacionais de arquitetura e engenharia, o clima brasileiro foi um fator que influenciou em soluções estéticas e de projeto específicas, uma vez que os arquitetos entenderam a necessidade de aderir soluções climáticas locais e com isso dispor de uma melhor adaptação e apropriação das obras utilizando o concreto no Brasil. Um exemplo dessa adequação foi a criação e introdução de elementos de proteção e de ventilação como brise-soleils, sheds de ventilação natural, beirais, cobogós, lanternim, e que todos eles pudessem ser desenvolvidos com concreto e outros materiais (RURIZ, 2013).

A simbiose entre projeto climático e arquitetônico, chamado de projeto bioclimático, utiliza de uma estratégia que influencia no uso do concreto como isolamento, que é a massa térmica. Ela é uma propriedade presente em algum dos elementos construtivos e significa a “capacidade dos materiais em absorver e armazenar calor nas horas quentes, e de liberar posteriormente, de forma lenta, no período mais frio” (ÁLVARES, p.54, 2018).

É evidente então que a utilização de materiais com bons níveis de desempenho térmico, atrelado a uma correta implantação do edifício no terreno, considerando a orientação solar e da ventilação predominante, é que vai atender e tornar o seu programa de necessidades eficiente. Esse primeiro passo no processo de projetar também acaba valorizando fachadas, permitindo o bom funcionamento das atividades realizadas interna e externamente, e principalmente porque irá reduzir significativamente a incidência da radiação solar nas superfícies externas, e assim dispor de maior sensação de conforto térmico ambiental, incidindo sobre o consumo de energia, e nas oscilações de temperatura.

Com isso, o concreto como parte crucial nas elucidadas manifestações arquitetônicas traz em suas propriedades, além das características já vistas, uma ótima resistência à ação da água e do ar, em função da sua capacidade de moldagem e conformação de elementos estruturais (UTIMAYMA, 2011).

Quanto a sua resistência e desempenho térmico conforme afirma Mehta e Monteiro (2014 apud CINTRA, 2017), o concreto depende dos materiais que vão compor a sua estrutura, como exemplo, o cimento que tem as partículas aglutinadas ou fragmentos de agregados e aditivos, e essas características físicas, químicas e dimensionais é quem influenciam as propriedades térmicas do concreto.

Além disso, a Resistência Térmica dos materiais é uma variante a ser considerada pois ela dispõe da razão entre espessura e condutividade térmica. O autor Ruriz (2013) trata que como o ar possui uma condutividade muito baixa, materiais que são mais porosos apresentam geralmente uma condutividade mais baixa do que os mais



densos, característica atribuída pela Transmitância Térmica. Ela é uma propriedade de um corpo inverso a sua resistência, presente também nas normas técnicas.

De acordo com Utiyama (2011), para se existir essas recomendações projetuais, muitos parâmetros eram utilizados a partir de legislações locais, como código de obras que apenas consideravam a área e uso de ambientes internos, se tornando irrelevantes materiais, influência de orientação solar e os contextos climáticos. Motivado então pela crise energética que acontecia no Brasil em 2001, que se instituiu a promoção da eficiência energética com a criação da Lei nº10.295 de 17 de outubro de 2001. Normas técnicas, regulamentações e selos além de programas de desempenho térmico também foram impulsionados.

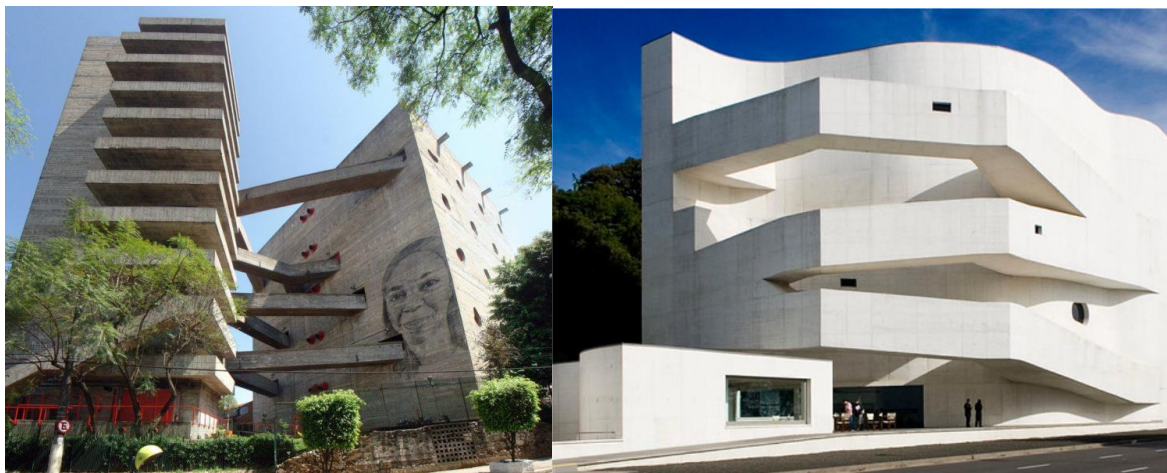
Uma variável que vai demonstrar o funcionamento dos materiais, é a absorvância solar das superfícies opacas ao sol. Sendo a absorvância uma propriedade física, ela indica a porcentagem da radiação solar que é absorvida pelo material de vedação. Segundo Roriz (2013), correspondendo à 48% aproximadamente a parcela visível de radiação solar do total emitido pelo sol, sua absorção é diretamente proporcional à cor da superfície, sendo menores em superfícies claras e maiores nas escuras, assim como superfícies mais rugosas que também tem níveis mais altos de absorvância. Os outros 52% dizem respeito ao espectro solar que é variável quanto às propriedades químicas de cada substância do material.

Com isso, os edifícios que utilizam concreto aparente, por exemplo, já utilizam de uma baixa absorção de radiação solar visível, isso é possível em virtude do seu acabamento que dispõe de uma superfície clara e lisa, que conseqüentemente aquece menos, favorecendo seu conforto ambiental. Entretanto, a superfície rugosa e a cor cinza mais escura também fazem parte das características de alguns tipos de concreto e tratamento estético (RORIZ, 2013).

A Figura 05 destaca dois exemplos de projetos arquitetônicos modernistas que trazem uma linguagem de composição diferente utilizando o concreto. O primeiro é o Sesc Pompéia, projeto da arquiteta Lina Bo Bardi que traz um acabamento cinza mais escuro e uma textura mais representativa. O segundo é a Fundação Iberê Camargo,

do arquiteto Álvaro Siza que já dispõe de uma linguagem estética de material claro e com superfícies lisas.

Figura 05: Edifícios modernistas Sesc Pompéia, arquiteta Lina Bo Bardi e Fundação Iberê Camargo, arquiteto Álvaro Siza



Fonte: Sesc Pompéia e ArchDaily

As formas de ambos os edifícios proporcionam a criação de visuais, sombras, e pontos de valorização de iluminação e ventilação. Em alguns momentos da história o concreto aparente tinha uma manutenção constante dada o incentivo da pintura na cor branca. Esses dois modelos evidenciam referências estéticas que esse material pode ter dependendo das suas intenções quanto à forma, função e estética, a partir de suas propriedades.

Por fim, o comportamento estrutural elencado às novas experimentações de arquitetura, impulsionados por pesquisas científicas e escolas de engenharia e arquitetura tornaram o concreto viável na sua utilização do projeto arquitetônico. A interação entre pisos, coberturas, vedações, escadas, e elementos proteção solar, conjuntamente investidos a partir de estilos que até hoje permuta porém dentro de padrões construtivos mercadológicas, evidencia a expectativa de vida consumada do ambiente construído pelo concreto e de fato suas influências em todos o processo (COUTO, 2011).

## 4.5 Concreto Sustentável

O contexto de ascensão, o ambiente construído resultante, a padronização dos novos projetos, e a degradação de seu ciclo de vida, trouxe à superfície problematizações recentes sobre o modelo de produção do concreto convencional. Santos (2008), discute a existência de uma hegemonia do concreto, e questiona o atraso tecnológico da construção civil, de produção, e ausência de investimentos em inovações tecnológicas no setor. Além disso, por mais que seja reconhecida sua facilidade operacional, difusão e expressividade plástica, essas vantagens não são proporcionais ao grau de sua disseminação, nem são mais suficientes hoje. Sob essa perspectiva, cabe nesse momento a construção civil utilizar de novas tecnologias construtivas integradas.

Conforme discutido, praticamente todos os setores da construção civil são propícios à utilização e reaproveitamento dos resíduos sólidos urbanos, de construção e demolição (RCD), e também de alguns resíduos industriais que podem ser reciclados e reutilizados. Esse cenário levou pesquisadores a desenvolverem alternativas sustentáveis de concreto, a fim de gerar resultados potenciais e com qualidades suficientes para utilização. Muitas delas com incentivo a atuação regional no país, realizando ensaios sobre a substituição de componentes, agregados e aglomerantes no processo produtivo do concreto.

O Concreto Sustentável, conforme discute Helene (2012) é um conceito evolutivo que funciona como um mediador de novas possibilidades, propondo alterações e combinações na composição da mistura, tornando o processo de produção com menos impacto ambiental, incentivando nichos econômicos e de integração das cadeias produtivas. Busca-se gerar um material melhor adaptado às necessidades, às expectativas futuras, compatibilizando menos emissões, menos desperdício e mantendo suas características adequadas para atender aos requisitos normativos, e no que se refere por exemplo ao grau de resistência, desempenho, durabilidade, e plasticidade, tão boas e/ou superiores ao concreto convencional.

Com relação a sua viabilidade econômica, existe uma proposta de valor mediante esse benefício, isso devido o custo financeiro de alguns resíduos recentemente serem inferior ao custo do material retirado da natureza, por exemplo (FERNANDES et al. 2011 apud DIAS et al. 2017).

Sendo um material homogêneo, as propriedades do concreto convencional são: a mistura de cimento; água; aglomerantes; agregados miúdos e graúdos, referentes à sua fase dispersa como areia, brita, seixos, pedregulhos e escória; e também os componentes minoritários, como os aditivos químicos ou minerais. Vale lembrar o alto consumo de água. Essas propriedades estão relacionadas principalmente ao desempenho químico, físico e mecânico na mistura (BATTAGIN, 2009 apud DIAS et al, 2017, p.85).

No entanto, Helene (2012) discute que a produção do concreto já atingiu resultados expressivos no que concerne às condições melhores de desempenho da indústria. Entre elas, a redução do consumo de matéria-prima, água e energia não renovável, principalmente por parte da indústria cimenteira brasileira que nos últimos anos alcançou uma significativa redução das emissões de CO<sup>2</sup>, se tornando uma referência mundial na produção de cimentos e também pela emissão de relatórios de sustentabilidade, permitindo um acompanhamento das motivações e resultados do setor.

De acordo com Metha (2008 apud DIAS et al, 2017) cerca de 60% da massa de clínquer encontrado no cimento pode ser substituída por outros materiais, o que demonstra um alto potencial de redução na poluição gerada pela sua queima no processo de fabricação do cimento, resultando em um índice mais satisfatório na sustentabilidade do material. Esse dado, juntamente à utilização de resíduos para substituição de componentes, também é bastante factível e promissor na constituição do concreto. As pesquisas desenvolvidas, portanto, enfatizam a redução da pegada de carbono e consumo de energia atrelados aos processos de produção dos materiais necessários, extração de recursos naturais, e da geração ou mesmo reinserção de resíduos durante a fabricação e construção utilizando o concreto.

Uma avaliação real de sustentabilidade na cadeia da construção civil demanda avaliar os impactos ambientais gerados e absorvidos ao longo de todo o ciclo de vida, desde a fase de extração, produção e execução da obra, de uso e pós uso. O professor Bruno Luís Daminieli (2020), do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, trata de forma mais específica as considerações que devem ser feitas quanto o desenvolvimento da construção civil para se garantir a possibilidade de larga utilização do concreto sustentável, sendo elas:

Para que um material seja sustentável, na extração, ele precisa ter menor impacto na retirada de materiais da natureza. Na fabricação, deve ter menor teor de CO<sub>2</sub> emitido. Na execução, menores impactos de transporte, no canteiro de obras e menor quantidade de perdas. Na fase de uso, maior durabilidade, facilidade de manutenção e melhor desempenho térmico. E, no pós-uso, possibilidade de reuso ou reciclagem de materiais.

O Concreto Sustentável dispõe então de um panorama diversificado para sua composição conforme os tipos de concreto, e o mesmo precisa ser implementado de forma eficiente e com controle de ciclo (DIAS et al, 2017).

#### 4.5.1 Tipos de Concreto Sustentável

##### 4.5.1.1 Concreto com resíduo de borracha de pneu

Diante do aumento constante de pneus inservíveis descartados a cada ano, seu acúmulo remete à fragilidade legislativa de destinação, de incentivo à reutilização através da reciclagem, e isso vem acarretando problemas ambientais de saúde pública e de superlotação de aterros sanitários (FAZZAN, 2016).

Como forma de atenuar esses impactos, as pesquisas relacionadas à incorporação de resíduos de borrachas de pneus em misturas de concretos predisõem uma alternativa fundamentada e viável. A maioria trata de concretos sem função estrutural, no entanto será abordado nesse momento a viabilidade desse resíduo na tipologia de concreto armado.

Para isso, reconhece-se que o concreto com adição de borracha dispõe de uma resistência mecânica inferior ao concreto convencional, e que segundo Siddique e Naik (2004 apud FAZZAN, 2016), isso se deve à baixa aderência entre a borracha e a matriz de cimento. Em contrapartida, Marques et al. (2005) e Lopes et al. (2005) salientam que a resistência constante pode ser mantida com a adição do elastômero e a diminuição do fator água/cimento, isto é, aumentando o consumo de cimento. Os aditivos superplastificantes também influenciam no ganho de resistência e podem ser adicionados.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), o concreto armado estrutural exige uma resistência mínima de 20 MPa aos 28 dias de cura, no que se refere a casos menos agressivos. As partículas consideradas foram trabalhadas nas proporções de 0,5 e 1% de borracha de pneu mediante ao peso total de agregados para se alcançar concretos com resistência à compressão de 24 e 28 MPa (FAZZAN et al. 2016). A Figura 06 mostra a separação do resíduo de borracha por granulometria grossa, média e fina.

Figura 06: Separação do resíduo em diferentes granulometrias



a) Borracha grossa



b) Borracha média



c) Borracha fina

Fonte: FAZZAN et al, 2016

Foram identificadas reduções na resistência à compressão nos traços do resíduo, de 12 a 22%. E como resultado dos módulos de elasticidade também houve uma redução de 10 a 15% nos valores. Apesar dessas reduções os autores Holmes, Dunne e O'Donnel (2014 apud FAZZAN, et al. 2016) identificaram um aumento expressivo da adição desses resíduos quanto à resistência à flexão de vigas também. Segundo os autores, esse comportamento evidenciou um tipo de ruptura com uma ductilidade maior, o que conseqüentemente aumentou a capacidade de absorção de energia. No uso do concreto armado estrutural, o resíduo de borracha de pneu, juntamente com o

aço, elemento imprescindível nessa modalidade, se mostrou adequado como agregado, visto que apresentou um aumento de 17% nos valores de resistência à tração aos 28 dias de cura. Isso remete, então, sua viabilidade na absorção de uma parcela dos esforços de tração junto com o aço.

Quanto à absorção de água, houve uma redução devido a borracha atuar como poros fechados, tendo a sua taxa de absorção nula no concreto, e isso funciona como uma maneira de elevar a durabilidade no material. Foi constatado também um aumento do teor de ar incorporado em função do formato do resíduo ser alongado e do tipo fibra. Já no que diz respeito à massa específica das misturas de concreto com os resíduos, foi observada uma redução de valores, ou seja, identificou-se que a adição de borracha pode diminuir o próprio peso das estruturas devido à sua baixa massa, e isso implica diretamente na redução dos custos com fundações, por exemplo (FAZZAN et al. 2016).

De forma geral, essa mistura apresentou na pesquisa de Fazzan (2016), vantagens técnicas quanto ao concreto convencional, sua possibilidade de implementação e eficácia, colaborando como uma alternativa a preservação dos recursos naturais, emissões de CO<sup>2</sup>, e destinação desse resíduo tão poluente.

A produção seria viável em Belo Horizonte por já existir um local de destinação desses pneus inservíveis. Como forma de prevenir a poluição dos mesmos em lotes vagos, cursos d'água, beira de estradas e devido à sua possibilidade de acumular água, o que incentiva a propagação do mosquito *Aedes aegypti*, transmissor da dengue. A Superintendência de Limpeza Urbana da Prefeitura de Belo Horizonte já dispõe de uma Unidade de Recebimento de Pneus (URP) acessível à população, para evitar seu descarte incorreto. Ela funciona na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR-040, bairro Jardim Filadélfia, e conta com uma área de 200m<sup>2</sup>, recebendo mensalmente cerca de 19 mil pneus. Ele é recolhido pela Reciclanip, transportado para as empresas de trituração e posteriormente são encaminhados para destinação final. Essa iniciativa funciona desde 2007 e em pequena escala contribui para o reaproveitamento de pneus nas indústrias de cimento, o que já funciona como uma

rede de incentivo à uma aplicação maior e consistente das indústrias de concreto (PREFEITURA BELO HORIZONTE, 2020).

#### 4.5.1.2 Concreto com resíduo do corte de mármore e granito

Um resíduo presente na maior parte das cidades brasileiras e que vem gerando uma grande quantidade de descarte incorreto sem tratamento prévio devido à falta de fiscalização, é o resíduo de beneficiamento de mármore e granito. O corte, polimento e acabamento dessas matérias primas geram poeira e lama como resíduo. No fim do processo de extração e beneficiamento do material rochoso, estima-se que 30 a 40% seja descartado, o que acaba por gerar ao ano cerca de 3 milhões de toneladas de resíduos (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014; MELLO, 2018 apud FIGUEIREDO, 2018). A Figura 07 aponta os dois tipos de resíduos gerados pelo beneficiamento, a lama e o seco em pó.

Figura 07: Resíduo do beneficiamento do mármore e granito: (a) lama e (b) seco em pó



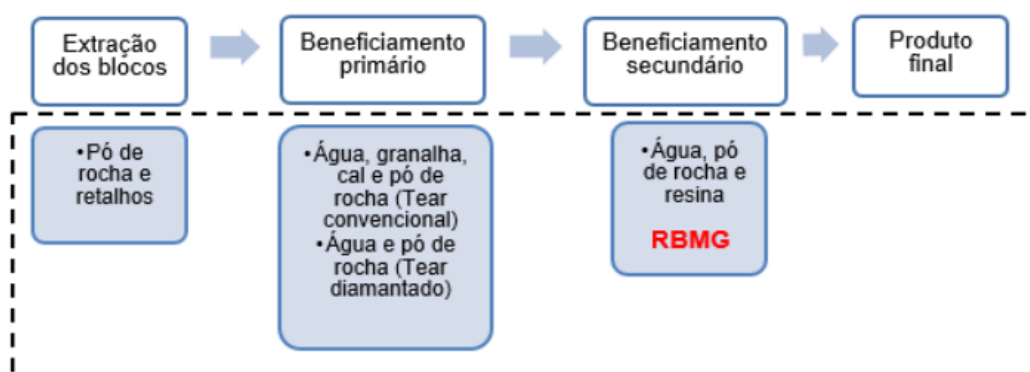
Fonte: Figueiredo et al. (2019)

Chamadas de rochas ornamentais, essas pedras naturais têm classificações diferentes, onde o mármore é uma rocha carbonática, e o granito uma rocha silicática, e dessa forma, seus principais componentes são minerais como quartzo, feldspato e minerais do grupo das micas (CHIODI FILHO; CHIODI, 2009 apud FIGUEIREDO et al. 2019)



Esse resíduo de corte de mármore e granito segundo a NBR 10004:2004 é classificado como inerte, e isso significa que ele não é capaz de reagir e gerar junção com outros materiais componentes, e também não apresenta atividade pozzolânica de acordo com alguns autores (MARQUES et al. 2021). O seu processo de desdobramento dos blocos de rochas acontece em quatro etapas, onde todas geram resíduos, conforme Figura 08. Inicialmente tem-se a lavra que é a extração da matéria prima, em seguida tem-se o beneficiamento dividido em primário e secundário quando necessário, e que tem por objetivo tornar os blocos de rocha em chapas e produtos semiacabados (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014 apud FIGUEIREDO et al. 2019).

Figura 08: Esquema do processo de beneficiamento das rochas ornamentais e resíduos gerados em cada etapa



Fonte: Figueiredo et al. (2019)

Dito isso, o reaproveitamento e incorporação desse resíduo no concreto surge como uma outra alternativa de uso desse material na construção civil, uma vez que ele também é utilizado como subproduto em lajotas de piso e vidro, e também como porcelanas (FIGUEIREDO, et al, 2018).

De acordo com Degen et al. (2013 apud MARQUES et al. 2021), tem-se uma redução da trabalhabilidade do concreto a partir do aumento da porcentagem de substituição do cimento por resíduos de mármore e granito. Isso foi constatado quando analisado que a relação água/cimento de 0,45 resultou em um concreto com maior resistência à compressão para substituição em 5%. Aumentando para 15% de substituição a resistência diminuiu. As taxas então de 5 e 10% foram as que apresentaram um melhor resultado nessa proporção de água/cimento, e também foi possível identificar que a incorporação do resíduo não influencia no consumo de cimento para resistências de

25 e 30 MPa. Com relação à absorção de água, o concreto com 10% de adição dos resíduos tem uma redução, enquanto os com 20% de adição tem-se um aumento. Complementarmente Lopes et al. (2006 apud MARQUES, et al. 2021) avaliaram que outras possibilidades, onde,

[...] com substituição de 10% em relação à referência e utilizando fator água/cimento de 0,5 houve redução média de 10,78% na resistência do concreto. Para 20% de substituição houve redução de 27,97%. Alterando o fator para 0,65 e utilizando taxas de 10% e 20%, a redução da resistência foi, respectivamente, de 10,71% e 25,24%.

Outra característica do resíduo de mármore e granito é a sua atuação como fíler, responsável por promover o preenchimento da maior parte dos poros e assim produzir concretos mais resistentes. A resistência mecânica do concreto foi observada após a idade de 7 dias, e aos 28 dias, e segundo Bicini et al. (2008 apud MARQUES et al. 2021), a utilização de mármore e granito como adições melhora as propriedades do concreto, dificulta a entrada de cloretos na idade de 28 dias, em cerca de 70%. Além disso, tem-se o aumento da taxa de adição por produzir uma redução do abatimento do concreto (MARQUES et al. 2021).

Em virtude dessa característica como fíler, Xavier (2019), em sua pesquisa, analisou de forma mais específica a performance de implementação do resíduo quanto à sua utilização em concretos com grande resistência, de alto desempenho e como auto adensável, nas proporções de 20, 40 e até 50% de substituição.

De forma geral o reuso dos resíduos de mármore e granito na produção de concreto, tem como vantagem as melhorias promovidas no desempenho físico e químico do material, e por ser um grande colaborador à mitigação dos impactos ambientais que se seguem no seu descarte e extração (FIGUEIREDO, et al, 2018).

Sua viabilidade de implementação na cidade de Belo Horizonte se deve pela quantidade de estabelecimentos na capital e região metropolitana, que dispõem de uma alta produção e que conseqüentemente tem a geração de resíduos sem um destino específico. Que conforme afirma Marques (et al. 2021) a adequação e preparo

do concreto estaria diretamente ligado à motivação das provedoras em ter uma destinação final dos resíduos para tratamento e assim deixá-lo pronto para utilização na produção do concreto sustentável. Quanto à pegada de carbono, a mesma ainda estaria diretamente ligada ao transporte também, visto que por mais que as produtoras estejam em Belo Horizonte, a extração das rochas ainda ocorre em outros locais do estado, o que ainda geraria uma poluição pelas viagens, mas que também poderia ser trabalhada próximos à esses lugares de extração e em todo o estado de Minas Gerais.

#### 4.5.1.3 Concreto com cinzas volantes e pozolanas naturais

Segundo Santos (2006), o concreto produzido convencionalmente com o cimento Portland tem algumas deficiências com relação principalmente a sua durabilidade. Dessa forma, o uso de materiais pozolânicos na produção de concreto e argamassa pode suprir essas deficiências, contribuir para uma economia energética, e também de custo na indústria cimenteira. Dentre as mais utilizadas está a sílica ativa, que na incorporação do concreto, ela representa para os materiais pozolânicos uma significativa importância sobre o desenvolvimento da tecnologia. Outro material que pode ser usado similar à sílica ativa, são as cinzas volantes, bastante aplicadas em compostos à base de cimento Portland para melhorar o desempenho da sua microestrutura de interface com os agregados (DIAS et al, 2017).

O presente estudo utiliza então dois modelos, a utilização de cinza de casca de arroz e a cinza de bagaço de cana de açúcar também, isso porque, segundo Santos (2006) as pesquisas provam que sua reatividade é similar às propriedades da sílica ativa.

#### 4.5.1.3.1 *Concreto com cinza de casca de arroz*

Para substituição parcial do cimento, os resíduos agroindustriais estão entre os mais estudados. As principais vantagens de utilização dessas adições são referentes aos ganhos de resistência mesmo com a redução da quantidade de cimento, possibilitando uma contribuição maior na sua microestrutura, uma vez que se desenvolve uma matriz mais definida e uma estrutura com menos porosidade, que acaba por deixar mais resistentes à ataques de agentes agressivos e mesmo seu condicionamento quanto a durabilidade e maior resistência mecânica (PEREIRA et. al, 2015).

Conforme pesquisa de Isaia (2017), as cinzas de casca de arroz equivalem a 20% em massa da quantidade total de arroz colhida, e partindo do seu processo de queima, tanto a casca de arroz, quanto as cinzas são altamente poluentes e contaminantes. Dessa forma, seu uso como aditivo na composição do concreto é viável e também uma forma de valorizar uma destinação final ao resíduo.

É necessário determinar a morfologia da cinza de casca de arroz, e para isso, a temperatura de queima da cinza é o fator principal, isso porque a atividade pozolânica da cinza de casca de arroz está diretamente ligada à composição morfológica e ao tempo de moagem da cinza. É de precípua importância entender que a ela tem em sua morfologia a presença de sílica em estado amorfo, o que aumenta a reatividade com o cimento e a cal e quando queimada em temperaturas muito elevadas, se torna inviável para utilização no concreto pois começam a surgir fases cristalinas na estrutura morfológica, conseqüentemente diminuindo sua reatividade com outros componentes (PEREIRA, et. al., 2015).

Muitas pesquisas trazem utilização das cinzas de casca de arroz em proporções diferentes de substituição, entretanto, a pesquisa de Cordeiro (2009 apud DIAS et al, 2017) utiliza cinzas ultrafinas de casca de arroz em substituição ao cimento nas proporções de 10%, 15% e 20%, que no 180º dia foi possível observar melhorias consideráveis nas propriedades do concreto, em especial na resistência à compressão. Já utilizando-se de cinzas de casca de arroz resultantes da queima não

controlada, em proporções de 5%, 10% (em massa), Pereira (2015 apud DIAS et al, 2017) constatou um ganho de resistência à compressão de 24% aos 28 dias mediante traços convencionais e concretos convencionais.

Reforçando ainda mais esses ensaios, Isaia (2010 apud DIAS et al, 2017) observou trabalhando o comportamento do concreto com resistência a compressão entre 25 MPa e 40 MPa, que na proporção de 15% de substituição de cimento, é exequível a utilização das cinzas de casca de arroz naturais em concretos estruturais.

Silva (et al. 2009 apud PEREIRA et al, 2015) afirma que o “[...] módulo de elasticidade de concretos com adições minerais não sofre aumentos significativos quando comparados com os aumentos observados para a resistência à compressão”. A Figura 09 exemplifica seu modelo de composição em um corpo de prova

Figura 09: Corpo de prova compacto de concreto com cinza de casca de arroz



Fonte: FAPERJ, 2008

Dessa forma, as pesquisas analisadas concluem que as variações de utilização da cinza de casca de arroz, embora apresente tendências de redução de resistência, esse desafio ainda é passível de melhoramento e adaptação, uma vez que funciona, mas a sua expectativa de vida ainda sofre de mutações.

Quanto a viabilidade de implantação dessa produção na cidade de Belo Horizonte, sabe-se que os cultivos de arroz têm um investimento mais localizado no sul do estado de Minas Gerais, e da zona da Mata, ou seja, a sua escala de atuação seria possível para todo o estado, uma vez que existem produtores que vendem as cinzas de casca de arroz, e a casca carbonizada em diversas cidades.

#### 4.5.1.3.2 Concreto com cinza de bagaço de cana de açúcar

Ainda fazendo uso de resíduos da agroindústria, a indústria canavieira teve um elevado crescimento no Brasil, uma vez que o país é o segundo maior produtor de etanol e açúcar no momento. Essa produção em larga escala é proporcional ao volume de rejeitos que também é gerado. O bagaço proveniente da produção, é o resíduo que geralmente é utilizado em energia elétrica através da sua queima, e que posteriormente gera as cinzas (GONÇALVES et al 2019). Mais especificadamente segundo Cordeiro (2010 apud GONÇALVES et al, 2019) esse processo acontece da seguinte forma:

[...] durante a extração do caldo da cana-de-açúcar é gerada grande quantidade de bagaço, sendo uma biomassa de grande quantidade energética. Cerca de 95% de todo bagaço produzido no Brasil são queimados em caldeiras para produção de vapor, resultando como resíduo cinza de bagaço, material muito pouco reutilizado, gerando graves problemas ambientais devido ao descarte inadequado. As cinzas provenientes da queima do bagaço da cana-de-açúcar possuem grandes quantidades de sílica em sua composição, tornando-as aptas a serem utilizadas na produção de concretos ou aditivos para os mesmos. Tais características promovem aumentos de resistência e durabilidade em comparação com concretos convencionais (MARTIRENA HERNÁNDEZ et al., 1998).

Figura 10: Exemplo corpo de prova concreto com resíduo de cinza de cana de açúcar



Fonte: UFSC apud Servidores JT, 2011

Assim como o material utilizado anteriormente, da cinza de casca de arroz, a de bagaço de cana de açúcar também predispõe de boas possibilidades de uso. E ainda sobre a composição auxiliar, Filho (2016 apud GONÇALVES et al, 2019) discute a substituição da areia pelo bagaço na construção de pavers de concreto, colaborando

para redução das emissões de carbono em 6,7% e paralelamente na utilização de areia, que também incentiva o não esgotamento de matéria prima, por exemplo, com a extração irregular, e de assoreamento de rios.

Teodoro (2013) então realizou pesquisas quanto ao uso das cinzas de bagaço de cana de açúcar com a proporção de 5%, 10% e 15% em substituição ao cimento. O resultado final garantiu uma resistência à compressão na proporção de 5%, semelhante ao traço convencional de concreto. Outro autor, Delabera (2014 apud DIAS et al, 2017) já trabalha nas proporções de 10%, 20% e 30% de substituição do cimento pelas cinzas de bagaço de cana de açúcar, para uma análise de resistência à compressão. Obteve-se então uma resistência dos concretos com proporção de 10% aos 28 dias, esses se mantiveram aproximados à resistência do concreto sem adição de cinzas.

Sob essa lógica, alguns autores também analisaram a atuação de resíduos de Construção e Demolição (RCD) junto com as cinzas de bagaço de cana de açúcar. Os traços dessa junção apresentaram maior absorção de água, ocasionado provavelmente em razão das cerâmicas presentes nos RCD, e pelas cinzas que absorvem mais água comparado à areia. Gonçalves (et al. 2019) expôs que, enquanto o traço com 35% de RCD apresenta uma absorção de vazios e índices menor do que um traço com 15% de RCD, em função da diferença de granulometria referente à brita, isso faz com que se tenha um aumento da graduação dos grãos e um melhor preenchimento dos vazios. Os resultados de índices físicos dessa conjunção são bastante satisfatórios, assim como quanto à análise de resistência à compressão, onde a substituição dos agregados gera um aumento gradual de resistência.

De forma geral, como vantagem desses métodos, os autores citados puderam comprovar que a resistência mecânica medida do concreto com adição de cinza de bagaço de cana de açúcar, equivale aos concretos convencionais usados como referência. Outra vantagem está na redução de custos, uma vez que os agregados são rejeitos, podendo considerar para o processo apenas o valor de transporte dos mesmos, e apesar desse transporte ainda resultar em emissões, considera-se que o

contexto favorece a preservação dos recursos naturais, e das boas práticas de manejo.

Segundo dados da Associação das Indústrias Sucroenergéticas de Minas Gerais (SIAMIG, 2021), o estado tem tido uma crescente produção de açúcar, onde as unidades pioneiras de CRV Industrial em Capinópolis e a Usina de Canápolis, foram uma das fábricas que uniram o potencial de produção e a flexibilização para suprir as demandas de exportação internacional. Dito isso, o estado dispõe de base de utilização desse resíduo para incentivo de produção do concreto em larga escala, podendo atender diversas cidades do estado e motivar a existência de um mercado empenhado em direcionar essas cinzas e utilizá-las como nova tecnologia construtiva.

#### 4.5.1.4 Concreto com resíduo pó de pedra

O pó de pedra é um rejeito que segundo Salles (et al. 2010 apud DIAS et al. 2017), é resultado da extração de britas, agregado largamente utilizado na indústria da construção civil, que causa relativos impactos ambientais principalmente por ficar muitas vezes exposto, subutilizado nos pátios das pedreiras, não tendo uma destinação correta específica. A Figura 11 evidencia as suas condições de exposição em uma pedreira.

Figura 11: Pó de pedra no pátio de uma pedreira ao ar livre



Fonte: Menossi (2004)



Sua possibilidade de uso em substituição à areia natural se torna uma vantagem considerável de utilização no concreto, devido esse recurso natural já se encontrar escasso em alguns locais do país. Outra vantagem de utilização é quanto a sua economia relacionada ao seu valor unitário, sendo ele bem menor que o do concreto convencional (SILVA et al. 2015 apud DIAS et al. 2017).

Os efeitos da utilização do pó de pedra em substituição a areia natural segundo análise de Salles et al. (2010 apud DIAS et. al, 2017) foram nas proporções de 25%, 50%, 75% e até 100% em massa, sendo a relação água/cimento considerada de 0,70. A resistência à compressão foi obtida com 7, 28 e 91 dias. Como resultados encontrados, a resistência mecânica teve um aumento significativo em relação ao concreto convencional, entretanto, houve uma redução significativa da trabalhabilidade. Uma ressalva quanto a trabalhabilidade foi que aos 50% de substituição, ela não se inferiorizou. No que diz respeito à durabilidade do material, identificou-se que o pó de pedra por ter materiais pulverulentos, elevou a compacidade da mistura e reduziu a permeabilidade, tornando o concreto mais seco.

A pesquisa desenvolvida por Dias (et. al, 2017), que explora o tema mediante outros autores, constata ainda que essa mistura é fortemente viável para produção de concretos sustentáveis, desde que se tenha um controle tecnológico. Considera-se também que o pó de brita dispõe de características físicas propícias à produção consistente do material até pela sua resistência à compressão simples, que apresenta resultados satisfatórios. Para se atingir a trabalhabilidade desejável foi necessário aumentar o volume de água na relação água/cimento, porém em compensação, o autor ressalta a utilização de aditivos superplastificantes.

Dessa forma, os estudos realizados até o momento garantem a possibilidade de atuação de concretos fabricados com areia britada, e ressaltam o seu valor ambiental, uma vez que esse material é um subproduto da exploração de pedras que causam extração indiscriminada de areia dos leitos dos rios, e que seu reuso é o maior responsável pela redução desses danos ambientais. Ele tem propriedades físicas e químicas suficientes para ser utilizado como agregado miúdo no concreto, a sua fração fina também é uma boa influência na trabalhabilidade. E no que tange aos

valores de resistência à compressão simples, obteve-se um acréscimo, chegando a 66% aos 28 dias (DIAS et al. 2017).

Quanto a substituição total, com proporção de 100% de substituição, o aumento da resistência compensou as condições desfavoráveis do processo de cura, e em paralelo, sobre a trabalhabilidade teve-se a mesma necessidade de aumentar o volume de água para atingir o abatimento do concreto de referência, o que realmente tornou essencial o uso de superplastificantes. Essa tipologia de concreto demonstrou uma menor permeabilidade, mas também uma maior compacidade e durabilidade (DIAS et al. 2017).

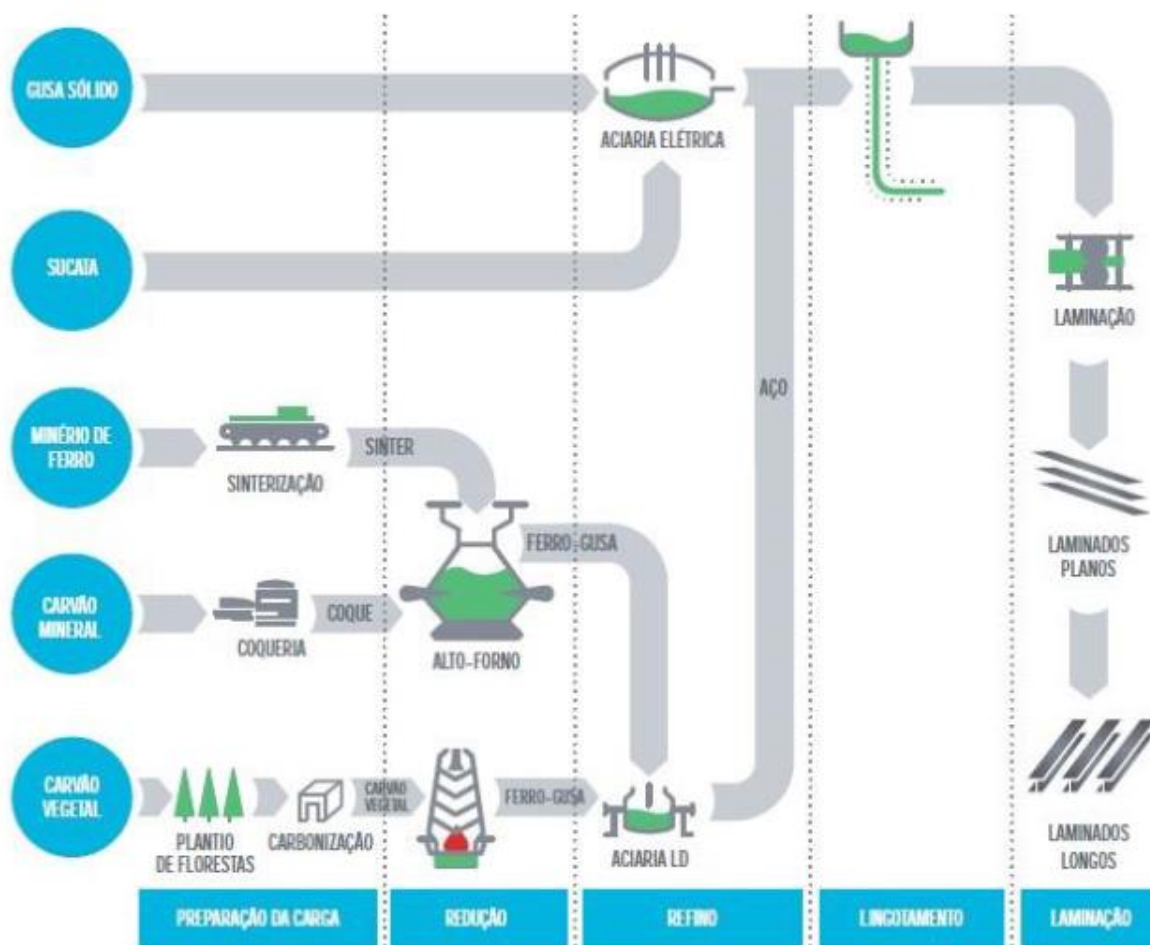
Por fim, o pó de pedra atende aos requisitos normativos de agregados miúdos, melhora as propriedades químicas, físicas e mecânicas do concreto, e também contribui para minimizar os impactos ambientais. Seu uso em Belo Horizonte é viável em razão de existirem pedreiras próximas e por existir um mercado dentro da cidade que favorece a sua implementação de uso nas misturas de concreto.

#### 4.5.1.5 Concreto com agregado de escória de aciaria LD pós processada

Assim como a indústria da construção civil, a de siderurgia também dispõe de um alto consumo de bens naturais, e gera em torno de 700 kg de resíduos por tonelada de aço fabricado. O alto forno, usado no processo é capaz de produzir 49% de todos os resíduos de uma usina siderúrgica, e as aciarias produzem 26%, contribuindo substancialmente para o alto nível de rejeitos (MARINO, 2016). A Figura 12 trata por meio de um esquema, o processo de fabricação do aço.

Figura 12: Processo de produção do aço.

## PROCESSO DE PRODUÇÃO DO AÇO



Fonte: Instituto Aço Brasil

Durante o processo de refino do gusa dentro dos fornos de elaboração do aço é gerado o resíduo da escória de aciaria. De forma mais específica, Marino (2016) trata do processo onde:

O ferro gusa proveniente da etapa de redução, do alto forno, é enviado aos conversores LD (iniciais das cidades austríacas Linz e Donawitz). Neles o oxigênio de alta pureza queima o carbono e o silício presentes no gusa líquido, gerando uma elevação da temperatura. A escória é formada pela adição de fundentes e de  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaO.MgO}$  e  $\text{CaF}_2$ . Ela é responsável pela remoção das impurezas presentes na massa líquida. Por fim são adicionados os ferros-liga com o objetivo de atingir determinadas características no produto final. A escória ao ser retirada do conversor é resfriada ao ar livre para sua solidificação. Ela é submetida a uma separação magnética, já que ainda carrega consigo uma quantidade de material metálico, possibilitando seu posterior aproveitamento no próprio conversor.

Dessa forma, mediante seu processo de formação ela pode assumir diversas variações consideráveis em suas propriedades mineralógicas, químicas e físicas, de acordo com o tipo de aciaria, da produção do aço, e posteriormente seu resfriamento e estocagem. O autor ressalta a importância de conhecer sua origem para utilização no concreto. O estudo realizado por Marino (2016) dispõe da utilização da escória de aciaria pós-processada como agregado artificial, caracterizado conforme normatização da ABNT, para substituição dos agregados naturais na produção do concreto armado.

Em comparação aos agregados naturais, os agregados miúdos de escória de aciaria devido seu material fino, em relação a areia, apresentam um teor de umidade bastante variável. Quanto aos agregados graúdos de escória a variação é bem menor em relação à brita, mas ainda sendo um valor maior, principalmente em virtude da maior porosidade que a escória possui. Outro fator analisado foi a porcentagem de material pulverulento da mistura, que quanto maior a adição, maior o consumo de água para atingir a trabalhabilidade necessária no concreto, e que conseqüentemente acaba diminuindo a resistência mecânica do concreto em virtude da retração hidráulica e do aparecimento de poros no interior da matriz. O teor de ar incorporado também revelou um valor maior, mesmo de forma sutil (SOUZA, 2015 apud MARINO, 2016).

Já os índices de vazios e absorção de água são maiores nessa mistura devido à porosidade do resíduo e pela necessidade de um maior consumo de água. Quanto à resistência à compressão, mecânica e tração diametral, o concreto produzido com escória de aciaria apresentou um valor mais elevado que o concreto armado convencional. Foi possível atingir os valores de 20 e 40 MPa (MARINO, 2016).

A utilização desse resíduo para produção de concreto armado, incentiva uma perspectiva de atuação promissora, visto que a presença fortemente concentrada de usinas siderúrgicas no estado, facilitaria a sua promoção, tratamento e respectivo uso na indústria de concreto. Indústrias como ArcelorMittal, Aperam, Gerdau, Usiminas e Vallourec, que operam em Minas Gerais, poderiam dispor desse resíduo, como forma de viabilizar um mercado e mais uma tipologia de concreto sustentável.

#### 4.5.1.6 Concreto com resíduo de vidro

Sendo o Brasil produtor de cerca de 980 mil toneladas de embalagens de vidros por ano, este material dispõe de características que o tornam um resíduo com alto potencial de utilização. Em sua forma pura, o vidro é um óxido metálico transparente super esfriado, que possui elevada dureza e é biologicamente inativo. Além dessas propriedades físicas tornarem o vidro um material amplamente utilizado, suas propriedades químicas é que fazem o diferencial, por serem compostas de baixa absorvidade, condutibilidade térmica, baixa porosidade, dilatação, suportando também altas pressões (FERRARI, 2010 apud MENDES et al. 2019).

Embora o vidro seja um dos materiais no Brasil que ocorre uma reciclagem, a mesma ainda é insuficiente, pois o nível de descarte incorreto ainda é muito alto. Essa problemática, conjuntamente ao impacto ambiental gerado pela extração de recursos na produção do cimento, motivou pesquisas para sua aplicação no concreto, como substituto à areia (MENDES et al. 2019).

Pesquisas desenvolvidas comprovam que adição do vidro para temperatura ambiente no concreto revela uma redução na resistência de até 15%, entretanto, quando a substituição ao agregado miúdo, tem um percentual de 100%, a resistência se torna superior ao concreto convencional (BARBOSO apud MENDES et al. 2019). Righi et al (2012) nesse sentido enfatizam que a substituição adequada de vidro moído no concreto é de 20%, porque, embora com 100% de substituição a resistência seja superior, a sua funcionalidade passa a ser prejudicada.

Complementarmente, é necessário ressaltar que o traço de concreto com 75% de substituição da areia média por resíduo de vidro, com granulometria equivalente, apresenta uma resistência à compressão média inferior a 30 MPa aos 28 dias. No entanto, esse resultado continuou dentro do desvio padrão definido em 3 MPa. Dessa forma, a utilização do vidro moído na produção de concreto é viável, uma vez que dispõe de um declínio de 20,8% aos 28 dias, com substituição de 50% (MENDES et

al. 2019). A Figura 13 mostra um exemplo da constituição do concreto com vidro moído.

Figura 13: Modelo de concreto com resíduo de vidro moído



Fonte: Cimento Itambé, 2019

Para seu uso em grande escala, e com diversidade de tipos de vidro, é necessário análises sobre seu comportamento físico e químico combinados aos componentes da argamassa e concreto. E como vantagem econômica, a aquisição de vidro descartado como resíduo de contribuição à indústria de concreto tem um enorme potencial de redução de custo como matéria prima para produção, conforme Mendes (2019).

Quanto a sua viabilidade de produção em Belo Horizonte, o comércio e serviço desse tipo de material ocupa boa parte da cidade, com presença de fábricas e vidraçarias, o que permitiria um recolhimento do mercado com criação de nicho econômico. A Prefeitura de Belo Horizonte já dispõe de coleta seletiva, que faz o recolhimento dos materiais descartados inadequadamente e os destina às associações e cooperativas de catadores e trabalhadores de materiais recicláveis. Ou seja, a partir do incentivo público pertinente que já funcionam, novas formas de organização poderiam surgir para redirecionar resíduos de vidro às indústrias de concreto.

#### 4.5.1.7 Concreto com agregados reciclados da construção civil

A reciclagem dos resíduos de construção civil assume diretamente uma das principais vertentes dentro da sustentabilidade do setor, tanto pela contribuição à não extração de matérias primas, quanto para conservação de um ambiente construído saudável.

O entulho dentre os resíduos gerados na construção civil, é o que possui maior taxa de contribuição, visto que ele representa 50% dos resíduos gerados. O resíduo da construção e demolição (RCD) abrange pedaços e sobras de materiais de concreto, cerâmico, metálico, argamassa, blocos, telhas, gesso, madeiras e essas perdas acontecem em todas as fases da construção, reforma ou mesmo demolição (CAMPOS, et al., 2018; MELLO et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2011; MORAES et al., 2011; SOUZA, et al., 2020 apud SANTOS et al., 2020).

Conforme mencionado no capítulo anterior, são classificados como resíduo do tipo A pela Resolução Conama nº 307 de 2002, responsável por permitir sua utilização como agregado. Eles podem ser adicionados à água e ao cimento em razão de serem inertes, ou seja, não podem gerar reações, e são essenciais para aumentar o volume da mistura. Para se tornarem aptos de uso, passa-se por uma seleção dos materiais, em seguida ocorre a britagem, que resulta em frações granulométricas diferenciadas para assim, parte desse material serem reintroduzidos no mercado, destinados às usinas de reciclagem, e de produção de concreto, o que acaba por movimentar sua economia (FROTTÉ et al., 2017; VELOSO et. al., 2020; ULSEN et al., 2014 apud SANTOS et al., 2020).

A utilização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) na fabricação de concreto tem como vantagem um viés técnico, econômico e sustentável, além de atuar como uma melhoria no desempenho das propriedades mecânicas, físicas e químicas do concreto, tanto no seu tipo estrutural como não estrutural. Outro ponto a se considerar, é a absorção de água na mistura, isso porque o RCD tem um índice de vazios maior se comparado ao agregado natural, o que depende também de uma redução de parâmetros, entre eles a massa específica da

mistura, proporção água/cimento e a permeabilidade. De antemão, a substituição superior a 50% para agregado miúdo, e 50% para graúdo, significa uma habilidade passante nesses teores, tendo também um aumento da fluidez, e no que se trata da propriedade mecânica, existe um decréscimo nas resistências de tração, compressão e no módulo de elasticidade (SANTOS et al. 2020).

A incorporação desses resíduos reciclados com percentuais de substituição de 50 e 100%, mediante uma relação de água/cimento de 0,60 e 0,80, evidenciaram nas pesquisas que o resultado da utilização da mistura com RCD não afetaram a resistência à compressão do concreto, nem sua durabilidade. Entretanto, um fator que faz a diferença para possibilitar a sua implementação no concreto, é o beneficiamento do resíduo. Foi necessário criar um padrão de separação para que não existissem variações no modelo fresco ou endurecido, devido os agregados reciclados serem muito heterogêneos. Para isso, o autor Carrijo (2005 apud MELO et al. 2020),

[...] adotou a metodologia de separação dos agregados por inspeção visual, agregados reciclados vermelhos ou agregados reciclados cinza, e após esta separação, classificou-os por faixas de densidade, buscando parametrizar a tipologia do material reciclado.

Essa conclusão foi essencial para que o método de mistura pudesse ter uma confiabilidade maior, principalmente após os resultados dos corpos de prova. Com relação à diferença da massa específica, os autores identificam que os concretos produzidos com agregados reciclados são mais leves, fato bastante relevante quanto ao manuseio e construção. De acordo com NBR 15116 de 2004, o alcance de 25 MPa de resistência mecânica média, expressa uma sutil redução quando comparada aos 30 MPa de amostras convencionais, entretanto já viabiliza seu emprego em obras de pavimentação e não estruturais (SANTOS et al. 2020). A Figura 14 trata dos corpos de prova do concreto com essa mistura.



Figura 14: Corpos de prova de RCD em concreto



Fonte: Ugioni et al. (2017)

À vista disso, por ser um resíduo que dentre os estudos é o que dispõe de uma rede organizada e mais consistente de reciclagem dentro da cidade, cabe ao setor de produção de concreto utilizar como prioridade esses resíduos. Com relação à sua viabilidade de implementação, a Superintendência de Limpeza Urbana responsável pelo recolhimento e pelas unidades e usinas de reciclagem de Belo Horizonte já incentivam essa modalidade conforme discutido anteriormente. E com relação aos resíduos inertes do beneficiamento, a SLU licenciou uma área no bairro Capitão Eduardo, zona nordeste para implantação de um aterro só para recebimento desses resíduos, como forma de suprir uma demanda de 18 anos, conforme o Plano Municipal de Saneamento de Belo Horizonte (2015).

Dado o exposto, são diversas as possibilidades de se trabalhar resíduos no processo de fabricação do concreto. Com estruturas internas favoráveis, conforme análises dos autores citados, foi possível identificar a grande habilidade de incorporação, evidenciando vantagens, e incentivando novas pesquisas para suprir as demandas que ainda não foram atendidas no funcionamento total do material. São estudos capazes de viabilizar a reciclagem com a produção de novos produtos, novas tecnologias construtivas, redução de custos, e que resultam em um comprometimento maior com o nosso ambiente futuro. E sob essa lógica, interpreta-se que as indústrias podem investir no reaproveitamento, reintrodução, ou mesmo na venda desses resíduos, criando um nicho de mercado entre os setores, e buscando amenizar, portanto, a problemática ambiental em torno.

## 5 ESTUDO DE CASO

### 5.1 Catedral Cristo Rei e a paisagem belorizontina

A ideia de se construir uma Catedral Mineira, como uma nova igreja para Belo Horizonte, com proporções monumentais e com um projeto mais ousado, foi proposta pelo Arcebispo Dom Cabral. Ele achava pertinente o projeto por ser o fundador da Diocese e o primeiro Bispo, o tendo como uma tarefa religiosa. Sua intenção era edificar a maior igreja da América Latina, que se chamaria Catedral Cristo Rei (ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE).

Na primeira década de 1940, surgiu a intenção de se conceber realmente a Catedral em Belo Horizonte. Foi instaurada uma Comissão Construtora da Catedral Cristo Rei para organizar reuniões de planejamento, sendo a primeira em 26 de junho de 1941. Estavam presentes o Arcebispo Dom Cabral, o prefeito Juscelino Kubitscheck, o Governador de Minas Gerais Benedito Valadares, e alguns oficiais e secretários. A primeira decisão foi a contratação do arquiteto austríaco Clemens Holzmeister (1886 - 1983), para desenvolver o projeto arquitetônico (CENTENÁRIO ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE, 2021).

O projeto tinha como partido uma estratégia de localização, visibilidade na paisagem, forma e aparência diferenciada, além de sua grande escala. Segundo uma descrição de Francisco de Assis Magalhães Gomes, representante da Comissão Efetiva das obras da Catedral:

A nossa Catedral será o primeiro monumento da cidade e o primeiro grande monumento do Estado. Serão, de fato, grandiosas as suas proporções. Terá uma altura de 150 metros, da base à Cruz da Torre. Os arcos de cimento armado que formam o arcabouço externo se utilizam das grandes possibilidades que este material [o concreto armado] oferece ao artista moderno. Internamente terá uma enorme abóbada circular, com 70 metros de diâmetro [sic] interno e cerca de 40 metros de altura.

Comportará mais de 10 mil pessoas. O diâmetro externo do monumento, com suas colunas, atingirá 90 metros (BRITO, 2017).

Embora o concreto já fosse uma premissa fortemente utilizada desde o movimento moderno no Brasil na década de 30, e posteriormente até 1945 com o pós-moderno, o projeto de Holzmeister não possuía características desse movimento. Ele buscava um partido arquitetônico voltado à composições religiosas passadas fortemente trabalhadas na Europa Ocidental, como o estilo gótico, neoclássico e romântico. Esses estilos foram trabalhados em Belo Horizonte até o século XIX e influenciaram no traçado urbano da cidade, no plano da Comissão Construtora chefiada por Reis. A figura abaixo evidencia, portanto, o primeiro projeto da Catedral Cristo Rei desenvolvido por Holzmeister (BRITO, 2017).

Figura 15: Perspectiva externa da Catedral Cristo Rei: Clemens Holzmeister, 1942



Fonte: CENTENÁRIO ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE, 2021

O projeto seria localizado na Praça do Cruzeiro, região da Praça Milton Campos hoje, em razão da expansão da malha urbana naquele período. Como exercício analítico a

Figura 16 representa como ficaria o projeto de Holzmeister na paisagem se tivesse sido construído.

Figura 16: Fotoinserção da silhueta do projeto de Holzmeister no atual entorno da Praça Milton Campos

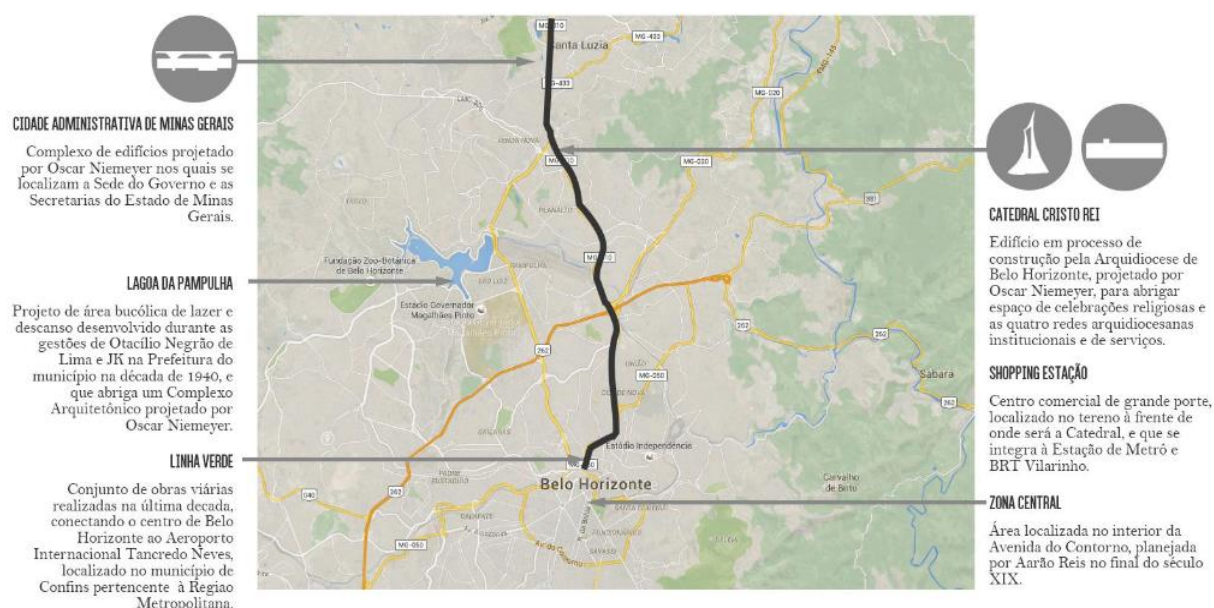


Fonte: Brito, 2017

Apesar do projeto e forte intenção para sua construção, o mesmo não foi concretizado, e só voltou a ser desejado com a chegada do Arcebispo Dom Walmor Oliveira de Azevedo em 2004. Nesse intervalo até as primeiras décadas do século XXI, a cidade de Belo Horizonte teve uma forte consolidação e expansão da sua Região Metropolitana, tanto em questões demográficas, geográficas e econômicas. Esse processo motivou a implementação de planejamento estratégico como forma de se trabalhar uma cidade mercado, e assim viabilizar acessos e valorizar zonas. A expansão em direção ao chamado Vetor Norte, com iniciativas de grandes obras ao longo da Linha Verde promovida durante a gestão do governador Aécio Neves, levou a um ponto que fazia sentido novamente a construção da Catedral Cristo Rei sob a premissa de ser o centro do encontro, e dessa vez ela alinharia os interesses da Igreja e do Estado (BRITO, 2017). A Figura 17 pontua as obras de valorização dos trechos do Vetor Nort



Figura 17: Localização das grandes obras do Vetor Norte



Fonte: Brito, 2017

Essa definição aconteceu apenas quando o Arcebispo buscou entender a necessidade que a população fiel tinha em se edificar uma Catedral de Belo Horizonte, o que o levou a pesquisar maneiras de torná-lo realidade. Para isso ele estipulou dois critérios: que a Catedral fosse o epicentro da Arquidiocese, e que sua localização considerasse a cidade com esse novo modelo de expansão, isto é, em uma realidade urbana, espacial e social que englobasse não só Belo Horizonte, mas a Região Metropolitana também, atuando como uma força de convergência (CENTENÁRIO ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE, 2021). A intenção do Arcebispo Dom Walmor era, portanto, que,

[...] a catedral como lugar da espiritualidade, da celebração, da fé, mas a catedral como lugar do cuidado social, da cultura, da arte, da formação, da educação e, nesse tempo, da comunicação e também da tecnologia da informação. Então, é nessa perspectiva que pensamos esse projeto (AZEVEDO, 2015 apud BRITO, 2017).

Embora a escala de atuação prevista pelo Arcebispo significasse realmente um equipamento social, cultural e religioso, a nova Catedral é interpretada também como um projeto de concepção política, devido à sua magnitude e localização estratégica, assim como pela escolha de um ícone arquitetônico.

Segundo Hazan (2003) “a própria escolha do nome do arquiteto antecede todo o processo e funciona como catalisador do projeto, criando um *frisson* antes mesmo da sua concepção”. Isso se traduz com a escolha de um arquiteto de renome mundial, o que estaria agregando ainda mais valor à obra da Catedral. E dito isso, buscou-se dar continuidade às obras de Oscar Niemeyer (1907-2012) na capital mineira, sendo ele o escolhido como autor do projeto.

Oscar Niemeyer, nascido em uma família patriarcal no Rio de Janeiro, ingressou em 1930 na Escola Nacional de Belas-Artes em um momento que a arquitetura no Brasil era considerada apenas um viés artístico e não uma profissão, visto que os engenheiros e construtores que desenvolviam projetos e métodos construtivos. Ele se tornou precursor e expoente da arquitetura modernista brasileira, e teve seu primeiro reconhecimento quando na década de 1940, Niemeyer foi contratado pelo então prefeito Juscelino Kubitschek. A intenção era se projetar em prol da classe ascendente da cidade, um bairro de lazer com edificações em torno da lagoa da Pampulha, e o resultado foi a criação do Complexo Moderno da Pampulha. Ele é composto pelo,

late Tênis Clube, da Casa do Baile, do Cassino – que futuramente transformou-se no Museu de Arte da Pampulha –, de uma casa de férias para o prefeito –atual Casa Kubitschek, que funciona também como museu –, um hotel não executado no projeto e a Igreja de São Francisco de Assis (UNDERWOOD, 2010 apud BRITO, 2017).

Segundo o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), esse projeto foi o primeiro bem cultural a ganhar o título de Paisagem Cultural do Patrimônio Moderno pela UNESCO, e foi tombado todo o Conjunto pelo IPHAN em 1997. O prestígio nacional aconteceu então após a construção do Complexo da Pampulha, onde posteriormente o levou ao projeto de grande porte das edificações do Plano Piloto de Brasília, desenvolvido por Lúcio Costa ao final da década de 50. O destaque em obras internacionais veio, portanto, em cidades como Milão, Paris, Caracas, Constantine.

A reivindicação por um arquiteto que pertencia à paisagem belorizontina, que teve o início de sua carreira promulgado com sucesso, que atingiu um patamar de

reconhecimento mundial, parecia certo que o mesmo pudesse encerrar sua trajetória de forma identitária. E foi por isso que Dom Walmor solicitou o projeto da Catedral Cristo Rei, à Oscar Niemeyer (HAZAN, 2003).

Sob uma linha do tempo de concepção entre 2004 e 2011, Dom Walmor discutiu em 2004 as viabilidades de se construir o projeto, já no ano seguinte foi definido sua localização no bairro Juliana, em frente à Estação de Metrô Vilarinho, com acesso na MG-010, nas franjas da Avenida Cristiano Machado, Linha Verde. Ainda em 2005, Oscar Niemeyer foi contratado e desenvolveu o projeto, que só foi apresentado para a sociedade Belorizontina apenas em 2011, cinco anos depois (ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE, 2020). A fotoinsersão da Figura 18 permite ao imaginário entender como acontecerá o projeto na paisagem.

Figura 18: Fotoinsersão da Catedral Cristo Rei em Belo Horizonte



Fonte: ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE, 2020

Dessa forma, a composição da paisagem belorizontina com o desenvolvimento do projeto de Holzmeister inicialmente, por mais que o mesmo não tenha sido concretizado, o processo contemporâneo de idealização da Catedral Cristo Rei, foi alcançado a partir de estilos arquitetônicos, contextos, épocas e interesses diferentes,

mas com suas volumetrias dispondo de sistemas semelhantes, como o uso do concreto (BRITO, 2017).

Essa comparação por fim enfatiza os marcos e intenções quanto à construção da Catedral Cristo Rei que passará a representar um símbolo da paisagem de Belo Horizonte e da Região Metropolitana. Nesse momento será disposto as características projetuais.

## **5.2 O projeto arquitetônico e a construção**

As premissas e intenções projetuais arquitetônicas, quanto à forma, função, estética e setorização do projeto, foram construídas mediante um programa de necessidades vasto e diversificado para a atuação de um pólo espiritual, cultural e de comunicação, conforme retrata Brito (2017). Quanto à caracterização do projeto estrutural e do uso privilegiado do concreto, as informações que se seguem foram conseguidas e disponibilizadas pelo engenheiro civil Felipe Paiva, responsável pela área técnica do projeto, através de uma visita técnica realizada na obra em abril deste ano.

A obra teve início no dia 04 de novembro de 2013, com seu canteiro construído até fevereiro de 2014. A primeira etapa consistiu na mobilização, definição das estruturas de contenção e da viabilidade da terraplenagem, hoje tem-se o equivalente a 40% da obra construída. E segundo Paiva (2021), por ser uma obra que utiliza em sua totalidade de concreto aparente, o cuidado com relação à sua superfície e a existência de uma padronização de tipos de concreto, reflete o seu partido tanto arquitetônico quanto estrutural.

O uso do concreto armado estrutural, protendido e também de quase um auto adensável, com resistência padronizada de 35MPa e 50MPa em apenas dois pilares, retrata que diversas técnicas, formatos e definições de pilares, lajes e paredes foram trabalhadas atendendo cada função específica do programa de necessidades do projeto. E, a fim de se ter um controle exato e um gerenciamento qualitativo, a obra



possui um laboratório que realiza testes, como o desempenho na cura de 7, 14 e 28 dias e posterior ruptura dos corpos de prova, conforme mostra a Figura 19. A intenção é realizar mudanças de traço para viabilizar particularidades de algumas peças quanto a sua função estrutural, e mesmo de aferição do concreto entregue, com a elaboração de relatórios das especificidades. Somente após esse processo, o caminhão é liberado para a concretagem (PAIVA, 2021).

Figura 19: Laboratório de testes



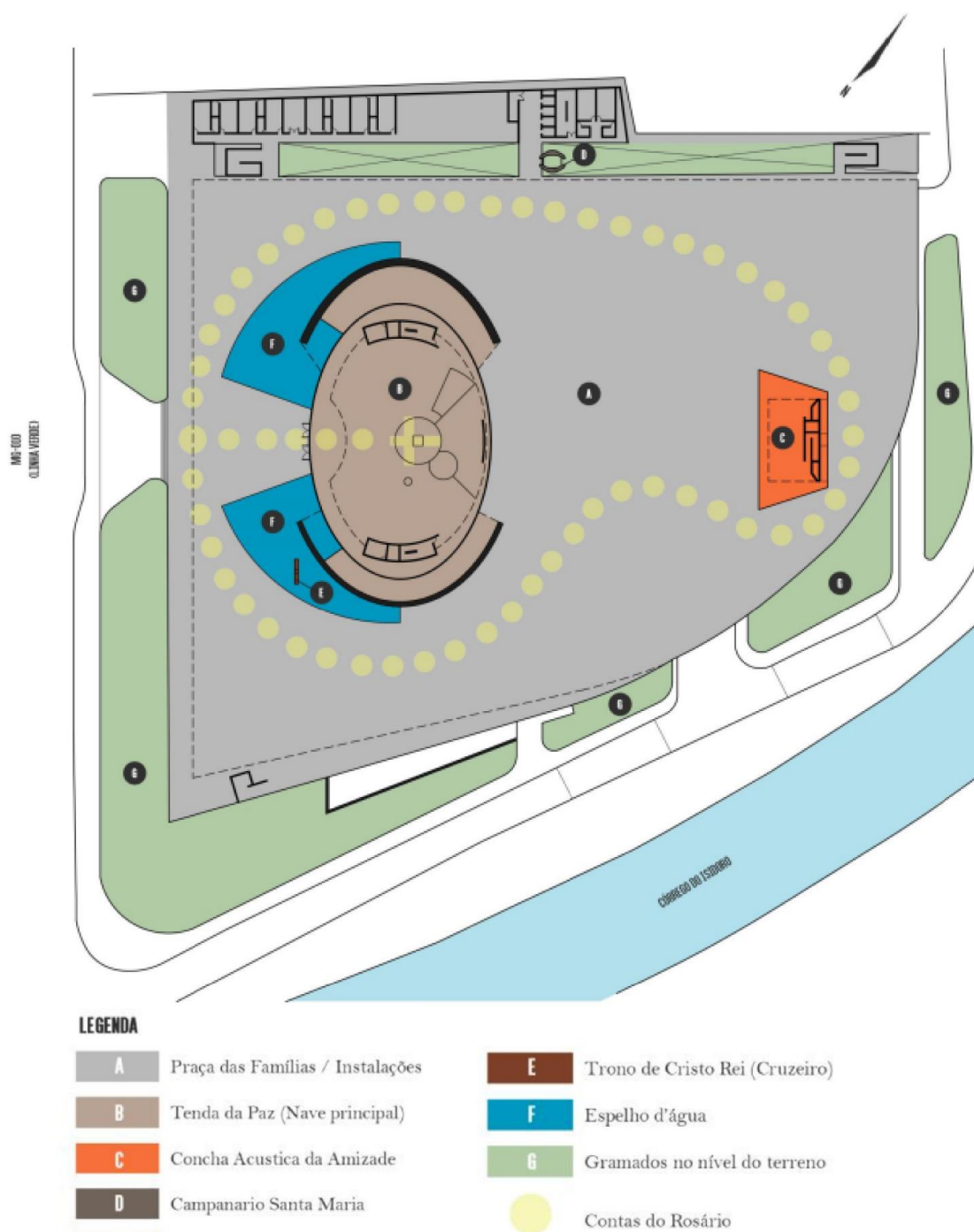
Autor, 2021

Então, pode-se dizer que desde o projeto, ao canteiro de obras e à atual construção, existe um sistema integrado que possibilita esse processo acontecer condizentemente aos padrões estabelecidos, de planejamento, gerenciamento e segurança.

Dito isso, o projeto arquitetônico da Catedral Cristo Rei possui uma composição volumétrica conceitual própria das obras de Niemeyer. São diferentes níveis que recebem um programa diversos, e o nível principal de acesso é pela Linha Verde, da Avenida Cristiano Machado, equivalente ao 4º pavimento da edificação. Esse espaço de acesso é formado como um grande platô concretado, local que recebe as principais volumetrias do projeto, sendo elas: ao fundo a concha acústica, no canto esquerdo a torre sineira de seção retangular, e o volume substancial composto por uma concha convexa que forma a cúpula de 60 metros de diâmetro, tendo sobre ela a nave principal do templo com um formato elipsoidal e o altar no centro (BRITO, 2017).

A Figura 20 ilustra a implantação do 4º pavimento de forma setorizada, com a organização dos elementos que compõem esse piso de acesso principal..

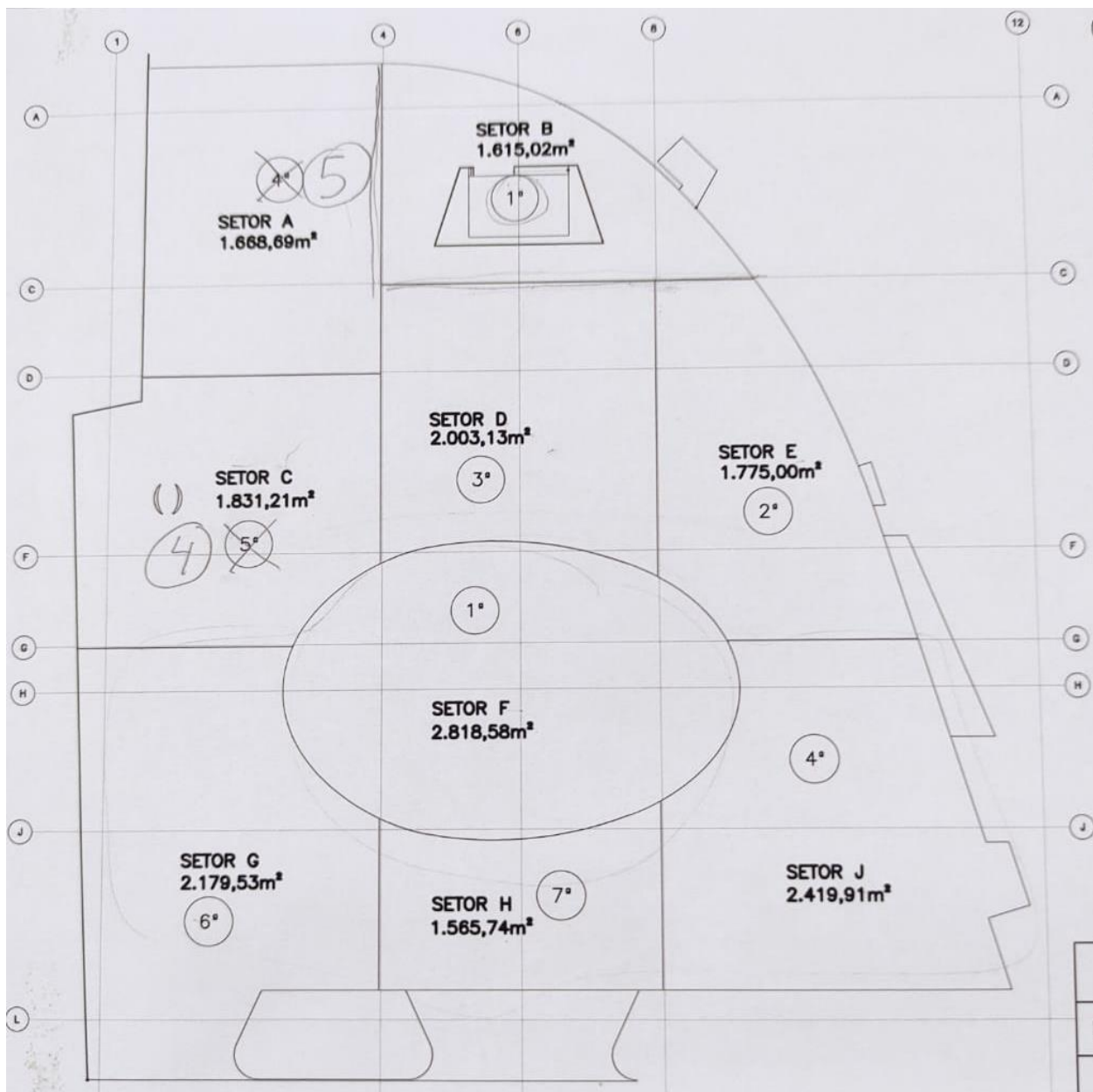
Figura 20: Implantação setorizada pavimento de acesso principal



Fonte: Autor (2021 apud BRITO, 2017).

É importante ressaltar que a obra acontece seguindo uma sequência de execução realizada pelo calculista através da definição de setores para se apoiarem uns aos outros (PAIVA, 2021). Nesse caso, a Figura 21 traz a setorização construtiva da obra, com suas respectivas áreas.

Figura 21: Fotografia da setorização para ordem de construção, e as áreas



Autor, 2021

Sabendo-se que a produção desse pólo é de responsabilidade da interação de diversos atores sociais, públicos e econômicos para sua idealização, foi criada a

campanha publicitária “Faço Parte”. A ideia é homenagear todos que contribuíram com doações e arrecadação de verbas para a edificação da Catedral Cristo Rei, através do nome gravado na paginação de piso com o desenho de um Rosário, onde cada conta terá a gravação, de acordo com a Figura 22. Já a Figura 23 mostra uma perspectiva geral do 4º pavimento com a conformação geral da marcação no piso.

Figura 22: Praça das Famílias. Destaque para a conta do rosário com marcação dos nomes dos doadores na paginação do piso.



Fonte: ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE, 2020

Figura 23: Vista de cima dos rosários em torno da Catedral



Fonte: ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE, 2020



A volumetria principal além da sua complexidade construtiva, reafirma o caráter grandioso da edificação, onde a nave atribui o conceito espiritual do projeto. A casca gerada por segmentos parabólicos com 100 metros de altura representa “[...] mãos postadas em posição de oração que se elevam para os céus” (BRITO, 2017). Na Figura 24 é possível identificar a volumetria principal e a escala do projeto.

Figura 24: Acesso principal e vista externa



Fonte: ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE, 2020

De forma escalonada, compreende-se que o projeto se entende por todo o terreno aproveitando seus desníveis, e gerando platôs que recebem suas respectivas atividades. Uma premissa do partido estrutural motivou a melhoria do partido arquitetônico e custo do projeto, através da criação de um espaço verde para os ambientes do 3º pavimento. No projeto arquitetônico, era previsto que o acesso pela avenida Cristiano Machado fosse uma laje estendida, dessa forma o custo inicial seria de 170 milhões de reais. Com a criação desses vazios na laje ao lado do acesso principal, conforme imagem acima, o custo da obra ficou em 133 milhões na época, e essa mudança além de reduzir o custo de concretagem, e de moção de terra,

beneficiou o conforto ambiental nessas áreas do projeto, com a presença de taludes ajardinados, e permitindo uma composição volumétrica mais solta e integrada à paisagem do córrego (PAIVA, 2021).

Ainda com relação à parte externa do projeto, a imagem da padroeira de Minas Gerais, Nossa Senhora da Piedade, ganha destaque na entrada do templo juntamente com São José, importante por representar a guarda da Sagrada Família e como patrono da Catedral (Figura 25). Nessa praça ainda ficarão a Concha Acústica da Amizade, o Trono de Cristo Rei, o Campanário Santa Maria e a Cruz com 40 metros de altura (ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE, 2016d).

Figura 25: Vista Frontal da Praça e de Nossa Senhora da Piedade



Fonte: ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE, 2020

Esse espaço, chamado de Praça das Famílias, conforme Figura 26, conta com uma área de 12.527m<sup>2</sup> e busca reunir milhares de pessoas para grandes encontros, como a Torcida de Deus, Missa da Unidade, e outras missas campais. E ainda, eventos culturais ao ar livre, exposições, concertos, feiras, procissões, shows, encenações bíblicas, circuitos sociais, entre outras atividades também farão parte da apropriação do espaço (ARQUIDIOCESE, 2020).

Figura 26: Praça das Famílias, lugar de encontro



Fonte: ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE, 2020

O altar externo com um formato curvo em balanço presente na Praça das Famílias, retrata um dos principais desafios construtivos, e o primeiro elemento a ser construído devido a sua dificuldade, levando 1 ano para sua construção. Localizado no setor B, ele é formado por duas paredes verticais perpendiculares em concreto maciço armado, que vêm desde o primeiro pavimento, promovendo a caixa de escada e elevador exclusivamente para o seu acesso. Segundo Paiva (2021), quando chega no 4º pavimento, após o fosso do elevador, ambas as paredes se unem passando a utilizar uma estrutura de casca de concreto com 25cm de espessura, preenchida com isopor no seu interior para viabilizar o seu formato arqueado com nervuras.

Esse formato inicia com 11 metros e vai abrindo até 21 metros para criação de uma laje em balanço com cobertura de 8 metros de comprimento. Para tanto, é imprescindível o uso de um concreto quase auto adensável, e nessa parte, visto que a sua fluidez que permite a forma diferenciada, foi necessário que o tecnólogo fizesse a mudança de traço e do slump com a diminuição do uso da brita no concreto estrutural. A Figura 27 mostra esse elemento construído, apenas com suas reparações finais sendo feitas.



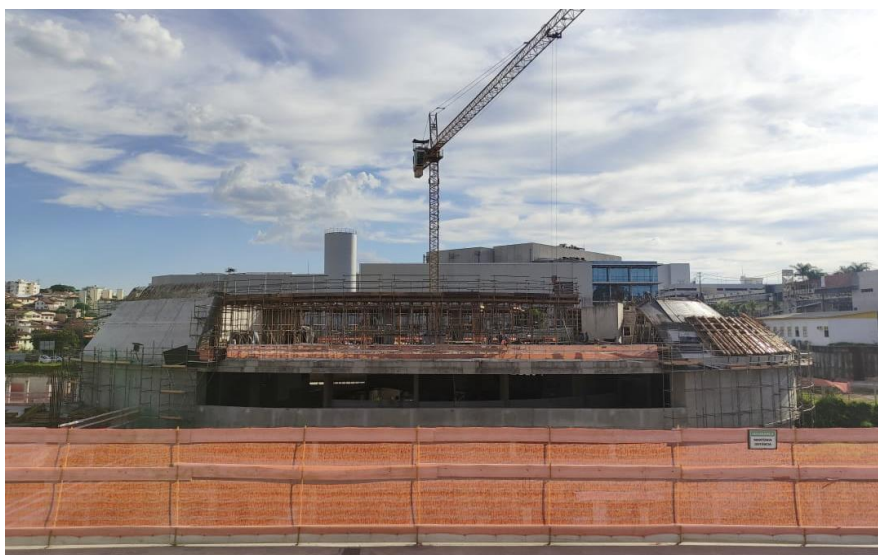
Figura 27: Construção altar externo



Autor, 2021

Ressalta-se ainda que em todos os 9 prédios são feitas padronizações de lajes também, sendo lajes duplas em todos os andares, com exceção apenas da laje do 4º pavimento, da Praça das Famílias, que é nervurada. Somente o setor F tem o formato circular, e ele não tem o 1º pavimento porque já chega ao terreno natural, tendo, portanto, uma laje de apenas 15cm. A Figura 28 ilustra o setor F em construção atualmente e com seu formato circular.

Figura 28: Construção setor F



Autor, 2021



O nível mais alto do terreno vem no sentido da Avenida Cristiano Machado e desce até o nível mais baixo já na rua Campo Verde. Constatou-se que na fundação foram mais de 620 estacas de fundação hélice contínuas, e que devido ao córrego ao lado, foi preciso 20 metros de profundidade para achar um solo adequado. A contenção chegou a ter mais 220 estacas (PAIVA, 2021). A Figura 29 mostra na cor verde, a planta baixa de fundação do projeto.

Figura 29: Planta baixa de fundação



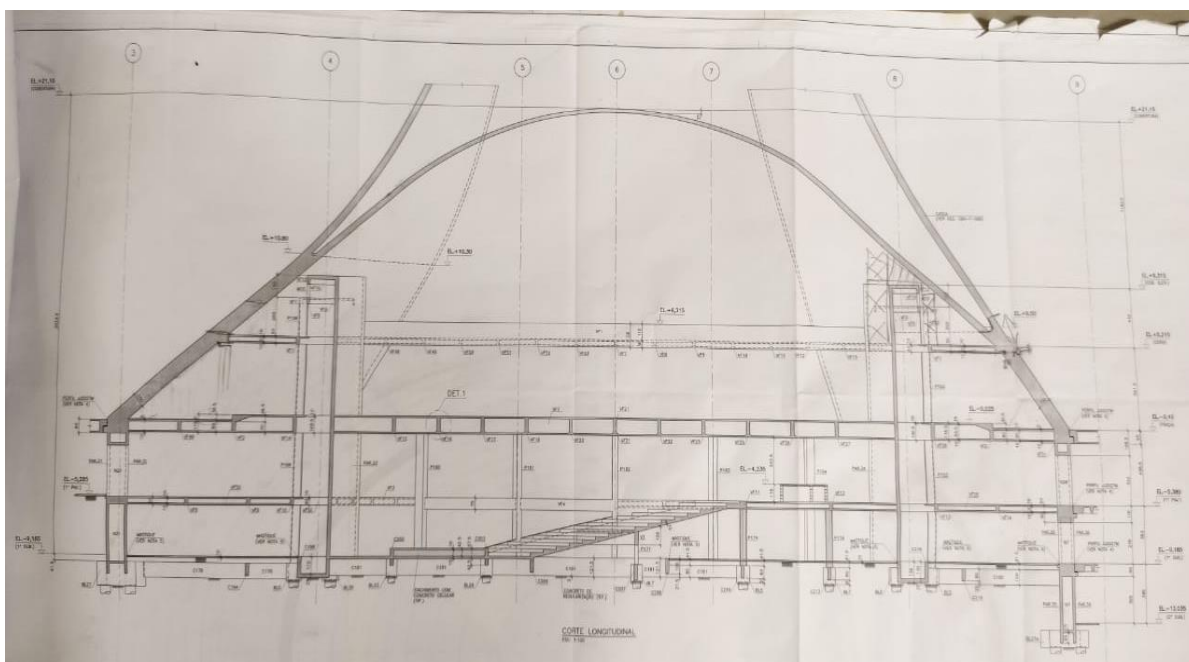
Autor, 2021

A via ao lado do córrego terá um elevado aterro para viabilizar o acesso ao 2º pavimento de estacionamento. E no nível mais baixo do 1º pavimento, o estacionamento conta com uma pista de desaceleração para não fazer filas de carros na rua Campo Belo. Essa medida é necessária devido o edifício ser um pólo gerador de tráfego, fazendo com que o projeto preveja uma forma de não acometer o fluxo

existente na rua Campo Belo, conforme tratado pelo escritório de projetos assinado por Oscar Niemeyer.

De acordo com o engenheiro Paiva (2021), o setor F, composto pela nave, a cúpula de concha acústica, com formato circular, teve cada peça das fôrmas desenhadas separadamente, isso porque as paredes curvas são assimétricas à medida que sobem até os 100 metros de altura da nave. As paredes da nave iniciam no 2º pavimento e sobem no prumo como parede dupla. Quando chega no 4º pavimento em que elas se tornam curvas, passam a ser de concreto armado maciço, com ferros de polegada extensa. Com 1 metro de espessura, à medida que elas vão subindo e se curvando, quando atinge a altura da cobertura da cúpula, as mesmas se separam, 50 cm inicia a cobertura da cúpula, e 50 cm continua subindo para formar a torre. Ao final dos 100 metros de altura, o concreto é uma casca de 25cm. A Figura 30 traz um corte transversal do projeto que evidencia essas características e a espessura das paredes e lajes de concreto, conjuntamente à Figura 31 que mostra a espessura em construção.

Figura 30: Corte evidenciando as espessuras de lajes e paredes



Autor, 2021

Figura 31: Parede dupla no prumo que inicia com 1,60m (à esquerda), e parede maciça de 1,0 quando começa a se curvar



Autor, 2021

Para esse feito, também utilizou-se de um concreto quase auto adensável, o slump foi alterado para deixá-lo mais fluido, porque como ela é uma parede inclinada, para não travar a armação e nem dar vazios na mistura, reduziram tudo para brita zero. Essa modificação é necessária visto que a dificuldade de vibrar o concreto pela quantidade de armação e não segregar a mistura demandava técnicas diferenciadas. Foi criado uma armação soldada para passar o vibrador dentro (PAIVA, 2021). A Figura 32 ilustra o processo de fôrmas para construção da parede curva, seguindo a lógica: montagem de fôrma interna, montagem da armação, montagem da fôrma externa, concretagem, aplicação de produto desmoldante, desforma, tratamento da cura química e posteriormente da junta de concretagem.



Figura 32: Montagem de fôrmas e concretagem da parede curva



Autor, 2021

Até o momento a obra utilizou de 20 caminhões de 8 metros cúbicos de concreto usinado. A laje conta com quase 3 mil metros quadrados, construída em várias etapas, tendo sido utilizado cerca de 900 metros cúbicos de concreto. Paiva (2021) destaca que a superfície do concreto, por ser aparente, demanda o uso de fôrmas de madeirites novas, que são folhas de madeira utilizadas para forrar o concreto e que após a desforma, a superfície já se apresenta lisa, carecendo de menos acabamento.

Ainda neste pavimento, a construção da marquise para o couro musical da concha acústica também utilizou de uma técnica de uso do isopor para alcançar uma leveza maior em um vão de quase 40 metros sem apoios (Figura 33). A escada e o elevador de acesso com paredes estruturais chegam até esse espaço, apoiando uma laje de 50cm de espessura, onde 10cm da laje inferior e superior é de concreto, e entre elas, num espaço de 30cm tem a armação e o preenchimento de isopor.

Figura 33: Marquise do couro musical em vão livre e modelo de construção da laje



Autor, 2021

O espelho d'água também é um elemento que já tem sua construção iniciada. Ele conta apenas com um desnível de 30cm com relação a laje principal do 4º pavimento, e o mesmo será tratado com impermeabilizante.

Levando em consideração às decisões de conforto ambiental do projeto, Paiva (2021) discorre que além da criação de jardins pelos desníveis, e viabilidade estrutural, a influência da problemática atual de distanciamento e necessidade de espaços abertos, com acesso à ventilação natural promulgados pela pandemia da Covid 19, vem sendo analisada a possibilidade de criação de uma abertura na laje do 4º e 3º pavimento, para beneficiamento da qualidade ambiental dos espaços em torno da abertura. Em virtude da quantidade de salas em um espaço extenso, muitos ambientes não podem

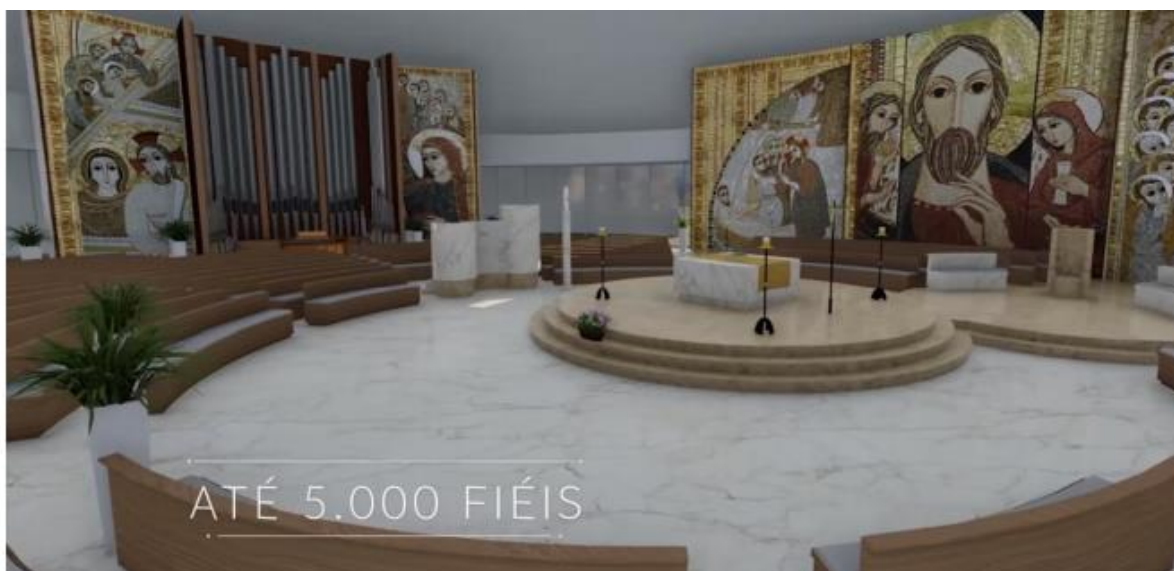


ter acesso ao lado externo do edifício, utilizando-se apenas de iluminação artificial e ar condicionado, elevando o consumo de energia fortemente. Essa mudança reduziria esse consumo e melhoraria substancialmente as condições bioclimáticas do edifício como um todo.

Com relação à parte interna do projeto, tem-se uma composição que faz parte do imaginário do que seja uma catedral para as pessoas. Um desses elementos é a inspiração advinda das características do estilo gótico, que retratava em suas paredes de forma artística, ensinamentos bíblicos através de vitrais coloridos (BRITO, 2017). Em alguns momentos, encontra-se paredes de vidro, utilizando de pilares metálicos como forma de criar ambientes diferentes do restante do projeto, e integrados à paisagem externa dos jardins. A utilização de revestimentos nobres como o mármore, e detalhes de decoração, juntamente à painéis e murais, também fazem parte dessa composição.

Dentro do programa de necessidades tem-se a Tenda da Paz (Figura 34), que segundo a Arquidiocese (2016d), ela é o corpo da nave principal, com capacidade de abrigar até cinco mil pessoas, e suas parietais internas serão revestidas também com ensinamentos do Evangelho através de mosaicos coloridos.

Figura 34: Vista interna da Tenda da Paz



Como forma de viabilizar o vão livre desse espaço, a laje construída é em concreto protendido com 1,16cm de espessura. Esse vão permanece livre no pavimento inferior, que será um auditório com plateias suspensas, até então não construídas (PAIVA, 2021). Por serem espaços de celebração fechados, dispõem também de alguns painéis de madeira e paredes internas em drywall com lã de rocha, necessários para o tratamento acústico (BRITO, 2017). A Figura 35 traz esse espaço em construção e que já funciona com pequenas celebrações.

Figura 35: Vista do auditório inferior e local do auditório suspenso em construção



Autor, 2021

Quanto aos espaços que acontecem nos três pavimentos inferiores à esplanada, onde acontecerão cerimônias eucarísticas e orações dos fiéis, é composto pela Capela Santa Terezinha, da Reconciliação, do Santíssimo Sacramento, além da Cripta Jesus Ressuscitado também com revestimento de mosaicos bizantinos e que irá abrigar o Memorial Arquidiocesano, espaço destinado aos restos mortais de sacerdotes, arcebispos e bispos, e que também terá painéis interativos sobre a história da Arquidiocese. A Figura 36 e 37 trazem cenas internas desse ambiente, mostrando sua composição, evidenciando também o tratamento dos restos mortais que serão organizados em gavetas nas paredes e colunas da Cripta (BRITO, 2017).

Figura 36: Cripta Jesus Ressuscitado



Fonte: ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE, 2020

Figura 37: Memorial Arquidiocesano



Fonte: ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE, 2020

Para abrigar os embalsamados, dentro dos próprios armários no interior das paredes da cripta, já existe uma rede específica de drenagem e de esgoto, requerida pelo programa desse tipo de ambiente. Uma parte dessa cripta se encontra no nível natural do terreno, não sendo construída sua laje ainda, principalmente porque no projeto era previsto um espaço entre a cinta e a laje de 30cm para a viabilidade do esgoto à vácuo.



Em razão da obra ser muito extensa e o sistema comum demandar uma inclinação maior e conseqüentemente que fosse necessário escavar mais, a proposta do esgoto à vácuo seria ideal. Ao lado do córrego ficarão localizadas toda a área técnica, responsável pelo tratamento de esgoto e aproveitamento de água pluvial e servidas (PAIVA, 2021).

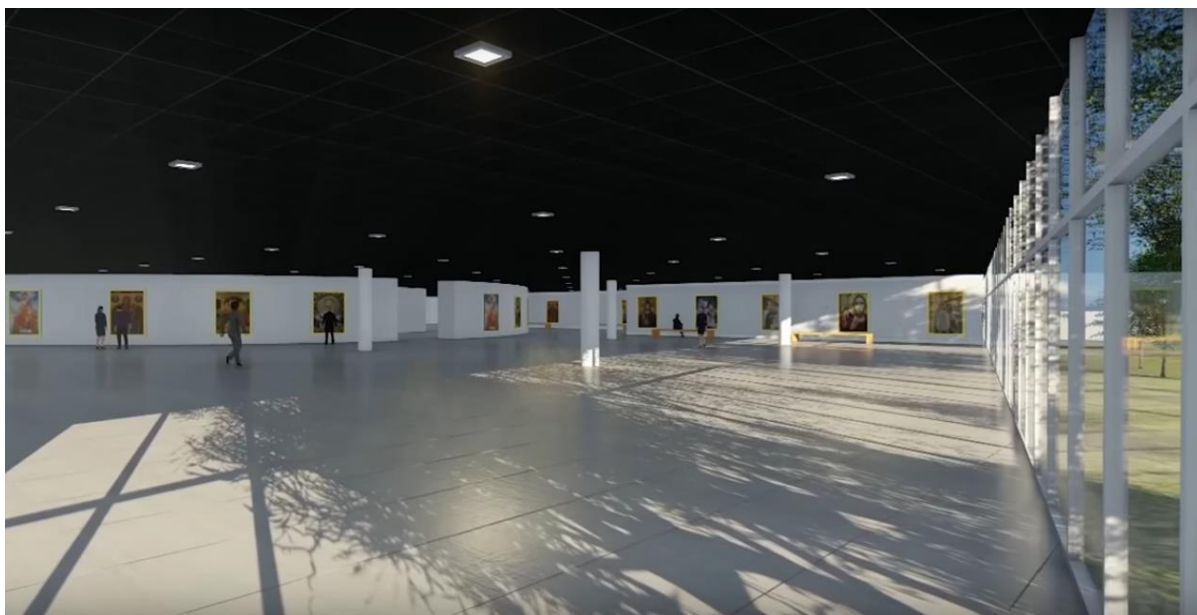
Com relação aos serviços prestados pela Arquidiocese, e instituições parceiras, o programa dispõe de uma setorização específica com quatro redes, sendo elas: Rede Catedral Solidariedade, de Comunicação, Cultura Catedral e Rede de Servidores. A primeira trata de diversas frentes, ocupando uma parte do primeiro e terceiro pavimento. Para abrigar pessoas vindas de outras regiões do estado, a Acolhida Solidária Dom Luciano que funciona no primeiro andar dispõe de infraestrutura necessária para dar suporte de alimentação, higiene pessoal e descanso. Para realização de cursos, oficinas, atendimento psicossocial tem-se a Cidade da Gente no terceiro pavimento, espaço de serviço social e comunitário dividido em cinco frentes, sendo elas: Casa da Juventude, da Criança, do Idoso, da Inclusão e a Praça da Amizade. As pastorais também estarão presentes nesse pavimento como parte da setorização social, como a Pastoral da Saúde, da Criança, do Menor, do Idoso, da Sobriedade, da AIDS, além de outros serviços comunitários (BRITO, 2017).

Paiva (2017) afirma que para atender as dimensões mínimas de cada ambiente do programa de necessidades, a obra dispõe de mais de 400 pilares com uma padronização de 7,5 metros de distância entre um pilar e outro no 1º e 2º pavimento. Já no 3º pavimento, que têm ambientes maiores para abrigar um programa mais robusto, os pilares acontecem a cada 15 metros, isso porque só tem mais uma laje acima, porém a resistência permanece a mesma. Os pilares variam entre seção circular e retangulares disformes, mediante influência da fundação.

Ainda sobre a Rede Catedral de Cultura, o terceiro pavimento dispõe de espaços para prática artística e cultural como: oficinas de arte, cursos, apresentações, e para essas funções tem-se como setorização cursos de ensino de música na Santa Maria Escola de Música, para formação de regentes, corais, organistas e orquestras, tendo um auditório com oitocentos lugares; como escola de qualificação de artesãos com cursos

de restauro e técnicas de mosaico tem-se a Santa Maria Ars Pulchra. Para abrigar suas obras e exposições, a Rede de Museus conta com o Museu da Construção da Catedral Cristo Rei, da Arte Sacra, Liturgia, Música Sacra, e do Museu Minas Negra Brasil, e a Figura 38 mostra uma cena de um dos espaços dedicados às exposições (BRITO, 2017).

Figura 38: Espaço expositivo da Rede Catedral de Cultura



Fonte: ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE, 2020

Segundo Paiva (2021), para desenvolvimento desse programa fica instituído no projeto a Lei Rouanet (8.313/1991), que é um mecanismo do Programa Nacional de Apoio à Cultura, como forma de estimular a iniciativa privada a investir as parcelas do Imposto sobre Renda, em títulos de doações ou patrocínios, para contribuir e incentivar projetos culturais (SECULT).

As áreas de convivência voltadas à alimentação serão localizadas próximas ao campanário, com espaços internos e pátios abertos no 3º pavimento, de acordo com o autor Brito (2017). A Figura 39 mostra a disposição desse espaço que acontece interna e externamente, ao ar livre, com jardins.

Figura 39: Espaço de convivência da Rede Catedral Cultura



Fonte: ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE, 2020

Além disso, para o pleno funcionamento das redes, a Rede Catedral de Comunicação abrange a Rádio América, TV Horizonte, como também sites e publicações da própria Arquidiocese e Vicariato Episcopal. Para isso terão salas preparadas e estúdios de rádio e TV para o pleno funcionamento dessa rede de comunicação e cultura (BRITO, 2017). Na obra esse setor já se encontra construído.

Com quatro frentes, por fim tem-se a Rede Catedral de Servidores, composta pela Cúria Episcopal Nossa Senhora da Conceição, a Metropolitana de Belo Horizonte e o Vicariato para Ação Pastoral. Também funcionará como sede da Mitra Arquidiocesana, da Central de Tecnologia da Informação, da Sociedade Mineira de Cultura e da Fundação Mariana Resende Costa, ou seja, sede das instituições ligadas à arquidiocese (ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE, 2016d).

A Figura 40, ilustra o formato de uma das salas desse setor, que conta com mobiliário de escritório integrado, e contato com ambiente externo.

Figura 40: Sala da Rede Catedral Servidores



Fonte: ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE, 2020

Dito isso, o projeto da Catedral Cristo Rei segundo o Arcebispo, realmente seria completo, onde “além de ser a casa da espiritualidade, que alimenta o sentido da vida, a Catedral também será o local do encontro, da prestação de serviços para a comunidade e dos diálogos” funcionando como um pólo centralizador para agregar todas as ramificações da Arquidiocese em um único espaço. (ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE, 2020).

#### 5.2.1 Aspectos do gerenciamento e análise de impacto do concreto

Segundo o engenheiro Felipe (2021), a obra desenvolveu um planejamento interno que consegue viabilizar um círculo de reuso simples. São praticadas algumas ações voltadas ao armazenamento e uso de água de chuva, redução de desperdício dos materiais, acidentes de trabalho, incômodo à vizinhança, e de reutilização do concreto.

Essas iniciativas partem de um gerenciamento que prioriza a organização e limpeza do canteiro de obras.

Uma dessas iniciativas é o uso de águas pluviais na cura das lajes de concreto e na limpeza da obra, como forma também de não gerar poeira. Elas são coletadas nos períodos de chuvas e armazenadas no fosso dos elevadores. Associadamente, conforme citado no projeto arquitetônico, são previstas a construção de tanques de reaproveitamento e tratamento das águas pluviais, servidas e do próprio esgoto, de forma a elevar a responsabilidade de uso até a fase de vida útil da edificação, o que ilustra um cenário que já atende à práticas sustentáveis.

Outra medida gerenciada foi a armazenagem de toda a terra retirada na etapa de corte da terraplenagem em um lote alugado. Essa terra será em breve utilizada para aterrar a via ao lado do córrego, e viabilizar o acesso ao 2º pavimento de estacionamento. Essa intervenção não implicará negativamente no córrego, uma vez que terá sua margem resguardada com jardins e árvores existentes.

Outra questão que pode ser citada é o aluguel de peças metálicas e instrumentos de auxílio das fôrmas, com exceção das peças de madeira, compradas pela obra. As peças de madeira são reflorestadas e são reutilizadas diversas vezes. Quando gastas, têm a sua união com demais peças para formar outras placas de madeirite, e mesmo pilares de madeira, usadas também nos barracos do canteiro de obras.

Os materiais como pó de pedra, brita e areia, alocados no pátio central da construção, não utilizam de nenhum equipamento para combater a poeira gerada, e para os mesmos são espalhados e se encontram longe da vizinhança.

No que diz respeito à reutilização do concreto, ela acontece quando ele não atinge a resistência requerida aos 28 dias, ou a peça desenvolve alguma fissura e precisa ser refeita, tornando-se necessária a demolição das peças, e utilizando também restos de concretagem e de apicoamento das superfícies prontas. O resíduo então gerado é utilizado na execução de peças não estruturais e pré moldadas, como escadas, pisos intertravados, criação de coberturas para o fosso do elevador.

Juntamente aos materiais doados, como tijolos cerâmicos e blocos de concreto, que não são necessários à estrutura da edificação, são construídos guarda corpos para lajes de forma a prezar pela segurança na etapa de execução, e sendo criados bases de totens e corrimão das escadas com os restos de ferragens.

Essas ações evidenciam que o gerenciamento existente atua de forma convencional, ou seja, não compete ao uso de modelos de gerenciamento eficientes, com preceitos fundamentados de organização, funcionamento, controle, e medidas específicas à adoção de práticas sustentáveis, servindo apenas para explicar as iniciativas que se sobressaem e que podem ser aliadas ao projeto de proposição.

Sob essa perspectiva, centraliza-se a análise ao uso do concreto como principal componente do projeto diante do seu ciclo de vida até a etapa da construção, como maneira de enfatizar os níveis de emissões em torno dele.

Faz-se necessário compreender que além dos níveis de emissões de gás carbônico (CO<sup>2</sup>) gerados no processo de produção, tem-se os níveis gerados também pelo transporte, que de forma superficial abrange desde os trajetos de retirada de matéria prima, para as respectivas indústrias e até o trajeto para a concretagem da obra (SANTORO; KRIPTA, 2016).

Sendo necessários mais de 20 caminhões de 8 metros cúbicos cada até o momento para a construção da Catedral Cristo Rei, a quantidade de emissão de CO<sup>2</sup> pelo trajeto de transporte já transparece um valor considerável, embora não seja o foco deste trabalho contabilizar as emissões de transporte.

Com uma estimativa de 7.500 mil metros cúbicos de concreto previstos para a construção busca-se ilustrar de forma geral qual seria o valor das emissões geradas na produção e extração dessa quantidade de concreto até então prevista para a construção da Catedral, fazendo uso de suas estimativas e considerando a resistência à compressão padronizada de 35 MPa.

Os autores Santoro e Kripta (2016), trazem a composição das matérias primas e geração de CO<sup>2</sup> por metro cúbico de concreto utilizando valores da indústria brasileira. A Tabela 01 apresenta a sequência de resultados que mostra as contribuições nas emissões de CO<sup>2</sup> de cada matéria prima durante o processo de extração e produção do concreto, com traço de 40 MPa (valor próximo ao padrão utilizado na Catedral de 35 MPa).

Tabela 01: Emissões de CO<sub>2</sub> da extração/produção

<b>MATÉRIA PRIMA</b>	<b>QUANTIDADE Kg/m<sup>3</sup></b>	<b>EXTRAÇÃO/ PRODUÇÃO KgCO<sub>2</sub>/Kg</b>	<b>EMISSIONES TOTAIS Kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup></b>	<b>EXTRAÇÃO/ PRODUÇÃO %</b>
Agregado Graúdo	997,61	0,004007	3,99742327	87,36
Agregado Miúdo Natural	451,92	0,003550	1,604316	12,96
Agregado Miúdo Britagem	370,52	0,004007	1,48467364	86,30
Aglomerante (cimento)	333,00	0,371000	123,543	88,46
<b>EMISSIONE TOTAL</b>	<b>2.153,05</b>	<b>0,381564</b>	<b>130,629413</b>	<b>275,08</b>

\*CONCRETO TRAÇO 40MPa

Fonte: Autor, 2021 com base em Santoro e Kripta (2016)

Dessa forma, sabendo-se que 1m<sup>3</sup> de concreto gera cerca de 130,629413 KgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, com porcentagem de 275,08% para o traço de 40 MPa, a Catedral Cristo Rei que já utilizou mais de 3 mil metros cúbicos de concreto, correspondente a 40% da sua construção tem uma previsão de uso de 7.500m<sup>3</sup> como seu volume total, conforme apresentado pelo engenheiro Felipe. Esse valor total resulta no equivalente a 979.720,60 KgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> das emissões de dióxido de carbono das matérias primas do concreto, e 2.063.100%.

Santoro e Kripta (2016) concluem que quanto maior a resistência característica do concreto, mais ele vai estar emitindo uma quantidade de CO<sup>2</sup> exorbitante no meio ambiente, e isso se deve ao cimento, principal poluidor e por ser o material em maior quantidade na mistura. Além disso, é importante salientar que concretos de maior resistência serão utilizados em volumes menores, e com isso “[...] conclusões definitivas só podem ser obtidas após o dimensionamento de cada estrutura ou

elemento, considerando também a quantidade de aço e suas correspondentes emissões (SANTORO E KRIPTA, 2016).

Dessa forma, essa estimativa de apenas uma fase do ciclo de vida do concreto, já evidenciou que a grande escala da construção em paralelo ao uso generalizado do concreto com maior resistência, influenciam num alto nível de poluição. E sob essa lógica, retratando a falta de um gerenciamento eficiente também discutido, reflete que a construção da Catedral deveria dispor de estratégias fundamentadas em atingir uma meta de redução da poluição do início do ciclo de vida, com a implementação de outras técnicas mais focadas em ações sustentáveis, o que não é previsto no projeto e na construção existentes.

### **5.3 Proposição do uso do concreto sustentável no projeto da Catedral Cristo Rei**

O presente estudo inicia nesse momento a proposição de uma perspectiva sustentável do que poderia ser o projeto da Catedral Cristo Rei. Para isso será utilizado o concreto sustentável, em substituição aos tipos de concreto convencionais utilizados no projeto real, devido suas composições pautadas na redução do consumo de recursos naturais, de emissões de gás carbônico e reaproveitamento de resíduos de diferentes cenários da indústria.

Evidenciado a necessidade da edificação dispor de um gerenciamento e gestão pautadas na redução de impactos ambientais, prioritariamente, propõe-se também a inserção de outras práticas e dispositivos sustentáveis para complementação e viabilidade de um projeto mais responsável, limpo e com melhor desempenho no seu ciclo de vida. Integradamente serão abordados os potenciais incentivos sociais e econômicos que essas iniciativas podem gerar.

O caráter simplista e limitador do uso padronizado do concreto na Catedral, dada a grandiosidade do projeto e a diversidade de peças estruturais diferenciadas, traduz uma incipiente utilização. Isso pode ser entendido como um padrão de construção ainda voltado ao uso massivo de materiais que já dispõem de opções sustentáveis



que atendem às perspectivas e necessidades atuais de um ciclo de vida mais do nosso ambiente construído.

O potencial de adaptação do concreto sustentável por meio de diferentes composições residuais, permite que o mesmo disponha de funções estruturais suficientes e variadas para atender as demandas dentro do projeto. Essa adequação pode acontecer desde a sua fundação, às paredes e lajes duplas, nervuradas, protendidas, no uso da casca de concreto, dos pisos internos, externos e de estacionamento, além de outros elementos. Isso significa que para cada função pode-se ter um determinado tipo de concreto sustentável, colaborando-se para o desenvolvimento de uma conjuntura de possibilidades, de diversificação, com benefício ambiental, social e em sequência, de contribuição à uma economia circular.

Com isso, sabendo-se que a composição do concreto convencional parte das proporções de cimento, agregados e água, cujas características de aplicação desses materiais são trabalhadas substancialmente a partir das suas demandas, o concreto sustentável nesse sentido, traz diversas alternativas de composição e de aplicação. A mistura realizada por diferentes autores, tratados nos capítulos passados, será utilizada de maneira propositiva no projeto da Catedral Cristo Rei conforme suas características, como: concreto estrutural, armado, protendido, de alto desempenho e auto adensável (funções trabalhadas no projeto real). A Tabela 02 sintetiza quais os tipos abordados, suas respectivas funções, e aplicações nas peças e estruturas do projeto, consoante a necessidade estrutural de cada elemento construtivo.

Tabela 02: Síntese de aplicação dos tipos de concreto sustentável

TIPO CONCRETO	COMPOSIÇÃO	FUNÇÃO	CARACTERÍSTICAS	UTILIZAÇÃO
CONCRETO COM RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU	SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS	ESTRUTURAL - CONCRETO ARMADO	REDUÇÃO DO PESO DAS ESTRUTURAS, FUNCIONA COM O AÇO	LAJES NERVURADAS DO 2º E 3º PAVIMENTO, LAJE PROTENDIDA BLOCO F
CONCRETO COM RESÍDUO DE MÁRMORE E GRANITO	SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO	ALTO DESEMPENHO E AUTO-ADENSÁVEL	MATERIAL INERTE, ATUA COMO FILLER, E TEM MAIOR PREENCHIMENTO DOS POROS	PAREDES ESTRUTURAIS CURVAS DA NAVE, LAJE ALTAR EXTERNO   CASCA DE CONCRETO NAVE E LAJE EM BALANÇO ALTAR EXTERNO
CONCRETO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ	SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO	ESTRUTURAL - CONCRETO ARMADO	ATIVIDADE POZOLÂNICA, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MAIOR	LAJE DUPLA DE 4º PAVIMENTO, CAIXAS DE ESCADAS E ELEVADORES
CONCRETO COM CINZA DO BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR	SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO E DA AREIA	ESTRUTURAL	BOA RESISTÊNCIA MECÂNICA	LAJE COURO, LAJE MACIÇA 2º PAVIMENTO E CASA DOS PADRES, PALCOS, E PAREDES INTERNAS
CONCRETO COM RESÍDUO DE ACIARIA LD	SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS MIÚDOS	ESTRUTURAL - CONCRETO ARMADO	MELHOR RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO, MECÂNICA E DIAMETRAL	FUNDAÇÕES
CONCRETO COM RESÍDUO DE VIDRO	SUBSTITUIÇÃO DE AREIA MÉDIA NATURAL	NÃO ESTRUTURAL	PROPRIEDADES QUÍMICAS DIFERENCIADAS	CAMPANÁRIO, A CRUZ, E LAJE EM TERRENO NATURAL 3º PAV. GUARDA CORPO 4º PAVIMENTO
CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO	SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS GRAÚDOS/MIÚDOS	NÃO ESTRUTURAL	BOA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E DURABILIDADE	MEIO FIO DE JARDINS, E VIA DO CÔRREGO.
CONCRETO COM PÓ DE PEDRA	SUBSTITUIÇÃO DE AREIA	ESTRUTURAL	MENOR PERMEABILIDADE, ALTA DURABILIDADE E COMPACIDADE	PILARES E VIGAS, LAJE MACIÇA 1º PAV.

Fonte: Autor, 2021

Para essa definição são consideradas as propriedades mecânicas como resistência à compressão, tração, módulo de elasticidade e as condições de cada material quanto à estados de tensão e deformação. Além disso, são consideradas também propriedades em estado fresco, como trabalhabilidade, consistência, massa específica, retenção de água e plasticidade.

Juntamente às propriedades do concreto, essa sistematização foi construída de forma particularizada às tipologias estruturais existentes, dando ênfase nas funções e necessidades específicas conjuntas. As demonstrações serão visualizadas em um corte esquemático do projeto que expõe como acontece a aplicação, a junção com os outros materiais e peças, a fim de se compreender como o modelo propositivo se consubstancia.

### 5.3.1 Resíduo de aciaria LD no uso de fundações de concreto estrutural

O concreto sustentável para o uso nas fundações do projeto, precisa ser um material que melhor se adapte às necessidades estruturais e às influências do local. Devido à proximidade com o córrego Arrudas, o solo propício foi encontrado apenas profundamente, com uma resistência e rigidez adequadas para receber o peso da construção, e não gerar rupturas e deformações. Conforme projeto real, mantém-se a utilização de estacas de concreto por hélice contínua em razão de alcançarem essa profundidade requerida e serem o ideal quanto ao porte da construção.

Com relação ao arcabouço estrutural, a correta absorção das cargas da edificação e a distribuição no solo demandou um concreto sustentável com alta resistência às tensões, solidez e respectivamente com um desempenho mecânico suficiente e boa aderência às barras metálicas. O tipo de concreto com resíduos de escórias de aciaria, Linz-Donawitz (LD), em substituição aos agregados naturais de areia e brita, e descendente de uma usina siderúrgica do sudeste do Brasil, foi o escolhido.

Mediante revisão bibliográfica vista anteriormente, a performance alcançada por Marino (2016) com o uso desse resíduo, possibilita sua atuação como concreto armado estrutural. Seu desempenho mecânico, resistência à tração e a compressão de 20 a 40MPa, similar aos concretos estruturais convencionais, viabiliza seu uso nas fundações do projeto. O esquema abaixo mostra como acontece sua implementação na obra da Catedral Cristo Rei, que dado o seu porte, dispõe de fundações profundas e com grande resistência.

Figura 41: Esquema de aplicação concreto com resíduo de aciaria LD



Fonte: Autor (2021)

### 5.3.2 Agregado reciclado no uso de concreto não estrutural

O concreto sustentável com agregado reciclado de RCD, com função não estrutural, é aplicado no projeto desde os meios fios dos jardins existentes, como na pavimentação das vias de acesso do 1º pavimento e do 2º pavimento de estacionamento.

Apesar de diversos percentuais de substituição do agregado convencional pelo reciclado, muitas vezes chegando a 100% de substituição, o autor Santos (2020) traduziu um bom desempenho nas propriedades mecânicas e físicas do concreto para seu uso como pavimentação prioritariamente. Utilizando o agregado reciclado nas proporções de 30% do percentual de agregado miúdo, com a substituição da areia, e 32% para o agregado graúdo em substituição à brita, esse percentual é definido para o alcance da resistência à compressão de 25MPa, e com tensão média de 24,83MPa, como concreto não estrutural.

Em virtude de a massa específica ser composta por materiais mais porosos, o que permite uma expansão do volume ou dos vazios maiores, tem-se em contrapartida uma redução da mesma, ou seja, o concreto se torna mais leve, facilitando seu manuseio em grande quantidade e não sobrecarregando o terreno natural.

Sua implementação no projeto parte tanto da tipologia como blocos para composição do meio fio de jardins e das vias, como blocos de piso intertravados na via de acesso. Essa porosidade citada, sob às condições externas pode se tornar um facilitador do aumento da permeabilidade nas peças. Com isso, considera-se que essa predisposição pode influenciar na redução da resistência à compressão, tração e no módulo de elasticidade.

Dito isso, neste ensaio será utilizado os blocos de intertravados vazados com o uso da grama, sendo, portanto, uma forma de garantir a permeabilidade do solo, não estando diretamente voltada à permeabilidade das peças. As imagens abaixo exemplificam as funções.

Figura 42: Modelo de aplicação do concreto com resíduo reciclado

Concregrama

Meio fio jardins



Fonte: AECWEB e projeto da Catedral

### 5.3.3 Resíduo de pó de pedra como concreto estrutural

Sendo as lajes responsáveis por receberem as cargas permanentes e variáveis, elas as distribuem para as vigas que além do seu peso recebem as cargas de outras lajes, vigas, e de paredes, que acabam por direcionar aos pilares. Estes recebem as cargas dos pavimentos superiores e acumulam as reações das vigas de cada andar, transmitindo esses esforços até as fundações (PINHEIRO, 2005).

A utilização do concreto sustentável com resíduo de pó de pedra é introduzida então nessas três tipologias como forma de manter uma padronização e por ter características apropriadas às variações desses elementos.

O 1º pavimento do projeto, por suportar o peso dos outros andares e por ter um programa voltado à um tráfego considerado pesado, em virtude do seu uso prioritário de estacionamento e de acesso, é formado por uma laje maciça de piso, e por pilares e vigas que se iniciam nele e se seguem padronizados em toda a obra. Com função

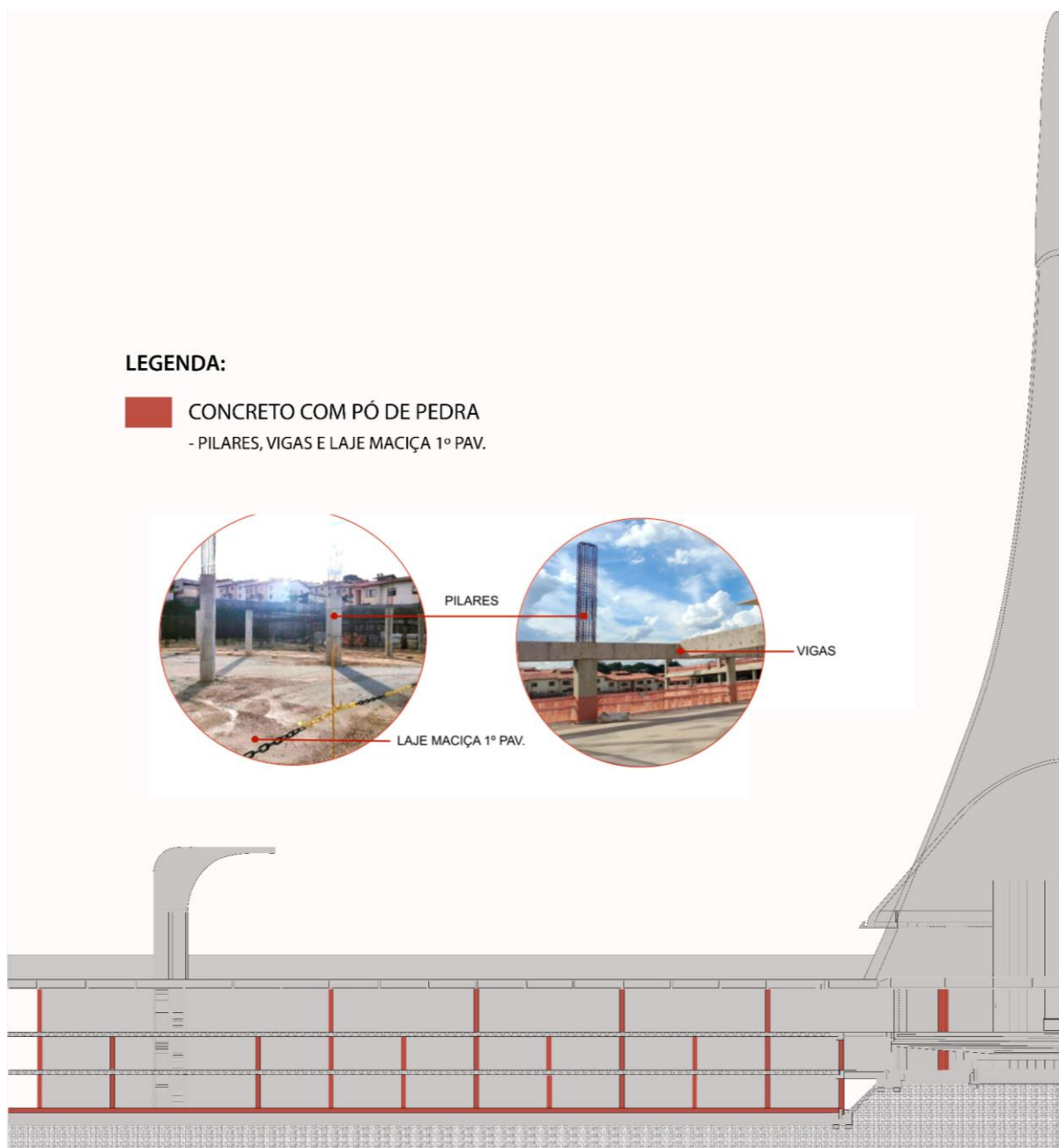
estrutural, o concreto com resíduo de pó de pedra é então utilizado nesses elementos como concreto armado.

A performance desse material trabalhada por Dias (et al. 2017) e Menossi (2005) conforme visto nos ensaios de caracterização, evidenciou que ele dispõe de propriedades físicas e químicas, até melhores, em substituição ao agregado miúdo, sendo classificado como areia média. De forma mais específica, ele possui um acréscimo de resistência à compressão axial, fato que está ligado à evolução da resistência à compressão com o aumento de sua idade. A substituição de cerca de 100% alcança aproximadamente entre 30 e 40MPa, sendo, portanto, suficiente às estruturas de lajes, pilares e vigas em concreto armado.

Outro fator que valoriza sua função estrutural é a durabilidade. Os concretos produzidos com pó de pedra apontam uma maior compacidade, ou seja, menor permeabilidade, que segundo os autores, estando relacionado à sua fração fina, exibem uma potencialidade pozolânica que resulta nessa maior durabilidade. Aliado a essas características, o uso de aditivos é imprescindível, tanto para garantir o aumento de resistência, combater a perda de abatimento com o tempo, e também colaborar na redução de aproximadamente 14% de consumo de água para o amassamento do concreto.

Dito isso, as padronizações quanto aos pilares e vigas permanecem, sendo no 1º pavimento e 2º pavimento com distâncias de 7,5 metros, dada a necessidade de uma transmissão de carga maior, e no 3º pavimento com espaçamento de 15,0 metros. Utiliza-se da mesma tipologia de concreto como forma de proporcionar uma adaptação equivalente entre as peças, mediante absorção de energia e suporte de carga. O esquema a seguir traz as implementações do concreto com resíduo de pó de pedra.

Figura 43: Esquema de aplicação concreto com pó de pedra



Fonte: Autor, 2021



#### 5.3.4 Resíduo de borracha de pneus como concreto armado

O concreto sustentável com resíduo de borracha de pneu será aplicado no projeto em duas tipologias de lajes, sendo elas: nervurada e protendida. Com relação às lajes nervuradas, as mesmas se encontram no 2º e 3º pavimento, com exceção do Bloco F. Já a laje protendida fica na nave, localizada no 3º pavimento do Bloco F.

São três tipos de programa trabalhados nesses pavimentos. O 2º nível ainda é voltado em sua totalidade ao estacionamento, que demanda um fluxo mais pesado, dispendo também de algumas áreas de serviço e de transmissão. O 3º pavimento, que tem ambientes maiores preferencialmente voltados ao programa cultural, o que conseqüentemente tem um fluxo mais dinâmico e apenas de pessoas. E ainda no 3º pavimento, mas na nave, tem-se seu uso como auditório. Essas tipologias, embora com uso, peso e cargas diferentes, apresentam características semelhantes e que podem ser compartilhadas pelo mesmo material.

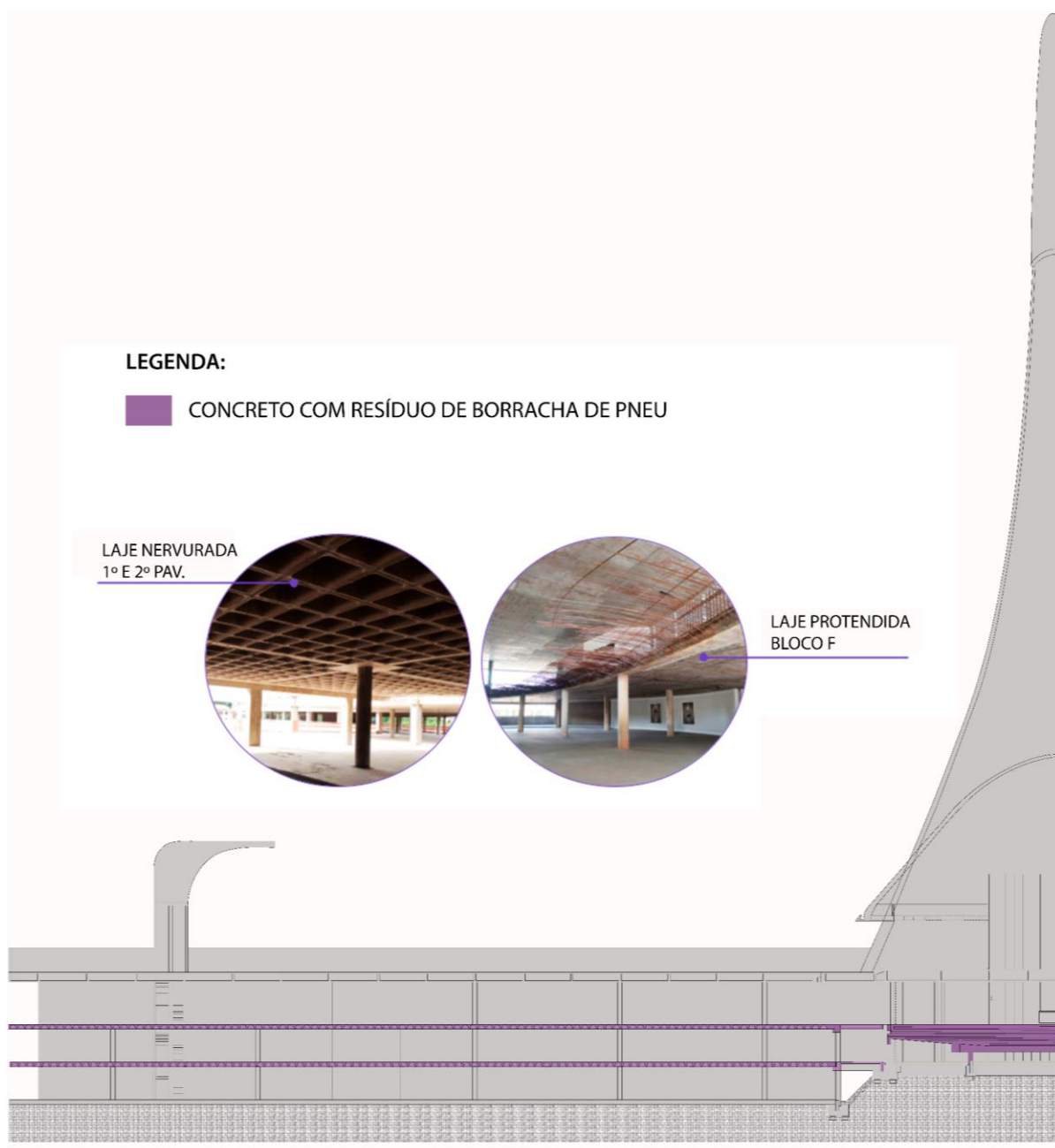
Nesse sentido, as lajes nervuradas apresentam as condições ideais para o programa, tendo como principais características: a alta capacidade para cargas elevadas sem sofrer deformações e flechas, utilizando menos material e conseguindo vencer grandes vãos. Além disso, outro fator que pode ser citado, é a sua aparência, isso porque lajes de estacionamento geralmente não carecem de um acabamento específico, e no pavimento de uso cultural, quando não ficarem a vista, as mesmas receberão tratamento acústico de outros materiais, não sendo visíveis.

Se tratando da laje protendida, a mesma dispõe das mesmas condições das lajes nervuradas quanto à vencer grandes vãos, e ter seu peso reduzido, entretanto a armadura utilizada possui cabos e cordoalhas que garantem os esforços de tração permanentes ao aço, e conseqüentemente maior compressão do concreto, aumentando também sua durabilidade. O auditório por acontecer sem apoios em um grande vão na nave demanda desse tipo de concreto para viabilizar o seu formato suspenso.

Dessa maneira, o concreto sustentável estrutural com resíduo de borracha de pneu cumpre essas definições a partir da substituição de agregados miúdos na porcentagem de 10%. Conforme discutido por Fazzan (et. al. 2016), ele dispõe de um módulo de elasticidade relativamente maior, resultante do aumento da resistência à compressão que chega à 30MPa, porém contando com a inserção de aditivos superplastificantes na mistura. No que diz respeito a absorção de água, a mesma é reduzida devido aos poros do material, e conseqüentemente tendo uma taxa de absorção nula, o que aumenta sua durabilidade. A leveza do concreto é alcançada devido a sua baixa massa específica, isso porque a adição das fibras de borracha pode reduzir o peso próprio da estrutura.

Entretanto, a sua utilização estrutural sozinha não garante a resistência à tração. Para viabilizar seu uso estrutural é necessário associá-lo a um material que preencha esse fator, dispondo de boa resistência à tração, e mais deformável. O aço é então associado à mistura, assegurando a sua performance como concreto armado em lajes nervuradas, com boa compressão e tração. Abaixo segue o esquema de tratamento do concreto sustentável com fibras de borracha de pneu tanto em sua tipologia de concreto armado, como em concreto protendido.

Figura 44: Esquema de aplicação concreto com resíduo de borracha de pneu



Fonte: Autor, 2021

### 5.3.5 Cinza de casca de arroz como concreto armado

O concreto sustentável com cinza de casca de arroz será empregado na tipologia de concreto armado em laje dupla, nas escadas e caixas de elevadores do projeto e no campanário.

Conforme programa de necessidades, a 4<sup>o</sup> laje do complexo, responsável por abranger toda a extensão da edificação e atuar como praça principal do projeto, precisa ser capaz de aguentar o peso de milhares de pessoas para os eventos da Catedral. Apesar dessa demanda, foram considerados um espaçamento maior dos pilares no terceiro pavimento, isso porque na maior parte do tempo a laje não precisará atingir suas condições de carga máxima.

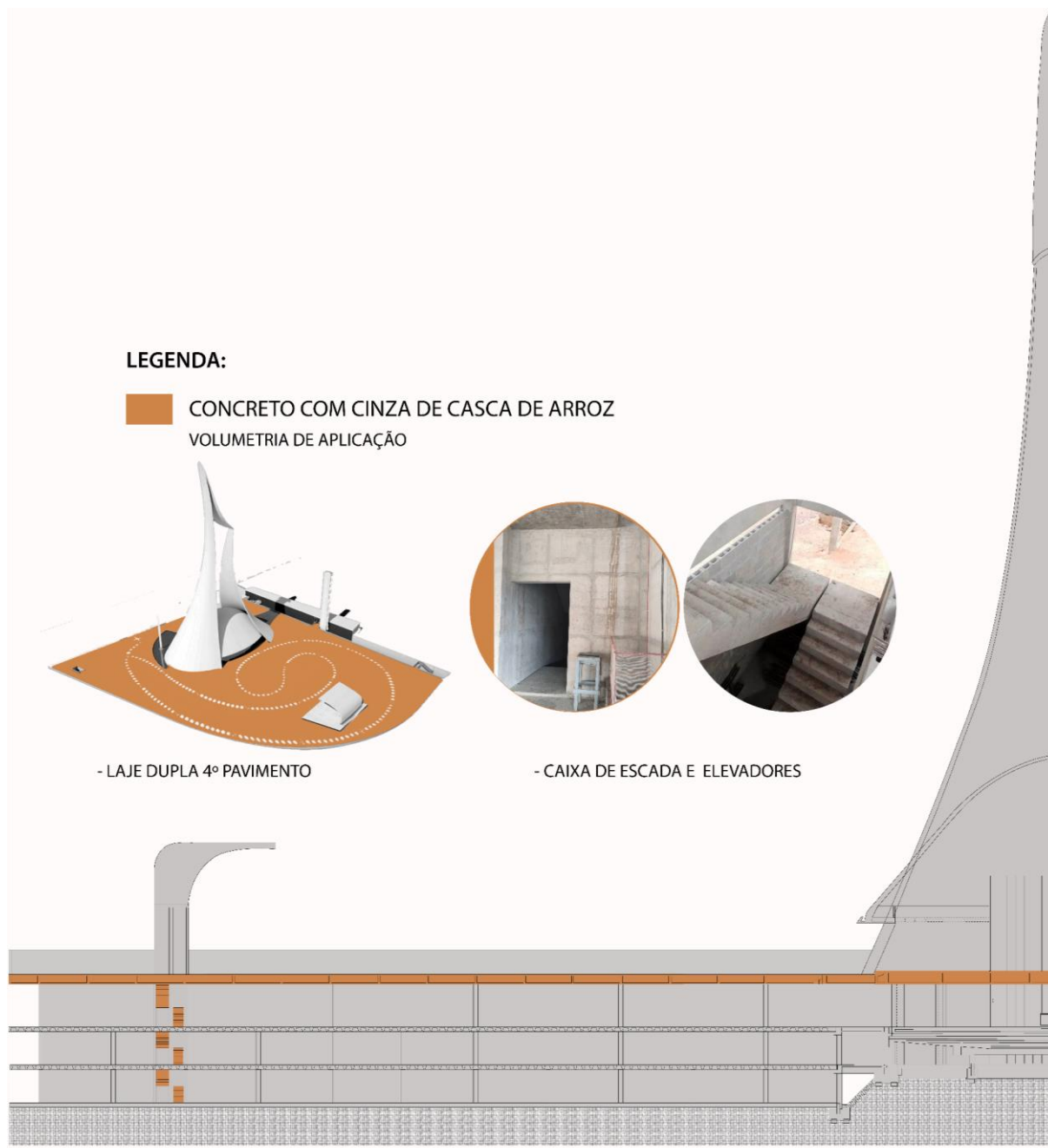
Já o seu emprego nas escadas e caixas de elevadores do projeto, que são em sua maioria de acesso ao público, também requerem um material que tenha bom desempenho na sobrecarga acidental e peso da escada. Ela é apoiada no nível superior, inferior, e em um nível intermediário por uma viga do patamar. O concreto armado é um dos mais indicados em termos de proteção a incêndios, isso porque devido às suas características térmicas, apresenta boa resistência quando submetidos à altas temperaturas.

No que se refere ao campanário dos sinos, sua altura com mais de 40 metros, e sua forma esbelta, que tende a sofrer com ações significativas provocadas pelos ventos, exige ser trabalhado também com o concreto estrutural.

A partir dessas premissas, utiliza-se a proporção de 15% da cinza de casca de arroz natural em substituição ao cimento, dada a sua atividade pozolânica e de fechamento dos poros do concreto. Segundo base bibliográfica discutida, os autores Cordeiro (2009), Isaia (2010) e Pereira (2015), avaliaram o seu uso como concreto sustentável estrutural mediante um ganho de resistência à compressão até os 28 dias, de 25 MPa e 40MPa. Quanto à resistência à tração não se tem resultados díspares dos que os pré determinados para uso, e o módulo de elasticidade também se mostra coerente.

Ressalta-se ainda que a utilização desse resíduo dispõe além de um desempenho físico e químico satisfatórios, a sua microestrutura de interface com os agregados se torna o seu grande diferencial.

Figura 45: Esquema de aplicação concreto com cinza de casca de arroz



Fonte: Autor, 2021

As imagens que compõem o esquema foram retiradas em visita técnica, se tratando do contexto externo e interno desse elemento.

### 5.3.6 Resíduo de mármore e granito como concreto de alto desempenho e autoadensável

Para as paredes estruturais da nave e do altar externo, assim como lajes suspensas e cascas de concreto, nesse momento será beneficiado o uso do concreto sustentável com resíduo de mármore e granito. Como material viável à complexidade dessas peças e sua função estrutural sua implementação será trabalhada nas tipologias de concreto de alto desempenho e autoadensável.

Na nave, as paredes duplas estruturais iniciam no 2º pavimento, subindo no prumo até o 4º pavimento. Embora robustas mantendo sua espessura de 1,60m, o seu interior com duas paredes de 20cm que possuem 1,20m entre elas de forma oca, permitem a função estrutural com o travamento através da laje. Já o altar externo, têm suas paredes maciças estruturais, que sobem pelos quatro pavimentos e conjuntamente à sua caixa de escada e elevador formam um bloco estrutural para suportar a laje de balanço em seguida.

No que diz respeito às paredes curvas da nave, elas se iniciam no 4º pavimento sendo maciças, e à medida que sobem para conformar a cobertura curva da cúpula e a torre com formato diferenciado em 100 metros de altura, o concreto se torna uma casca de 25cm de espessura. Essa modalidade de uso de um mesmo material estrutural, mas com essa fluidez de modelagem também acontece no altar externo. A laje suspensa apoiada pelo bloco estrutural de concreto, para atingir a sua forma arqueada em balanço de 8 metros, também dispõe de um concreto como casca.

Segundo Pereira (2018), as cascas são estruturas propícias para coberturas de grandes vãos sem apoios intermediários. Suas características estruturais demonstram eficiência em resistir aos esforços de compressão, e em alguns pontos da sua

superfície pode-se ter próximos aos apoios uma absorção de pequenos momentos de flexão.

O concreto se torna então o material ideal para resistir a esses esforços, e as cascas conseguem distribuir as cargas de compressão de maneira uniforme sobre a superfície em virtude da sua pouca espessura, e resistência à tração, não devendo receber cargas concentradas. Para isso, podem ocorrer solicitações de flexão significativas nas regiões de apoio.

Para as estruturas suspensas e com formas complexas é imprescindível o uso de um concreto mais fluido, leve e ainda com função estrutural, dada a dificuldade construtiva e de manuseio para vibração, por exemplo. E conforme necessidades acima, é indicado o concreto autoadensável para esse fim. Já as paredes estruturais, como atuantes de apoio, requerem propriedades com uma performance superior de recebimento e de compressão, sendo, dessa forma, trabalhado o concreto de alto desempenho.

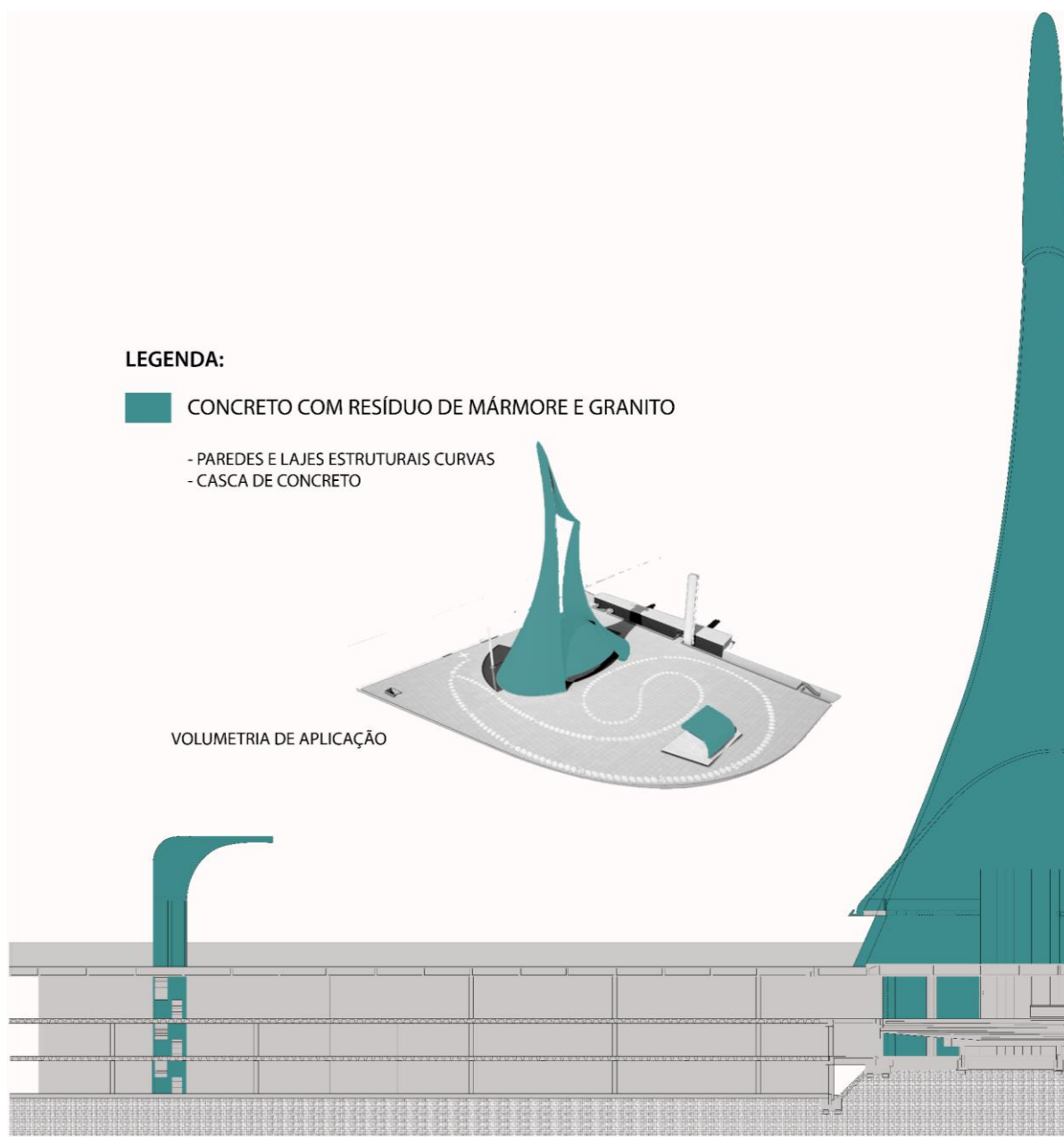
Com isso, mediante as necessidades desses elementos, o concreto com beneficiamento do resíduo de mármore e granito, na proporção de 12,5% em substituição ao cimento, em análise específica evidenciada por Xavier (2019), discorre que seu uso como fíler apresenta as propriedades necessárias para sua utilização como concreto autoadensável e de alto desempenho

Características como resistência à segregação, habilidade passante e fluidez apresentadas no estudo do autor, atendem os requisitos normativos do concreto autoadensável. Além disso, quanto às propriedades mecânicas, conforme as dosagens do material, têm pequenas variações na resistência à tração e compressão. Quanto ao seu uso como concreto de alto desempenho, o mesmo tem as características alcançadas principalmente por obter uma resistência à compressão acima de 55MPa, dispondo de baixa relação água/cimento e alta trabalhabilidade. Para as duas tipologias, os módulos de elasticidade são superiores aos convencionais, e quanto à leveza do material, ela está associada à leve redução da

sua massa específica, também resultado dos valores constantes de absorção de água e índices de vazios, não tendo a porosidade afetada.

Dito isso, o esquema abaixo ilustra as aplicações de duas funções do concreto sustentável, nos diferentes elementos construtivos.

Figura 46: Esquema de aplicação concreto com resíduo de mármore e granito



Fonte: Autor, 2021



### 5.3.7 Cinza do bagaço da cana de açúcar como concreto estrutural

Com função estrutural, o concreto com cinza de bagaço de cana de açúcar será utilizado no projeto em diversas tipologias de elementos, sendo elas: na laje maciça do 2º pavimento da nave, na laje dupla de couro da marquise também da nave, como paredes e laje maciça da casa dos padres, bispos e freiras, nas lajes de palcos e paredes internas. A diversidade de seu uso se dá por ser um concreto estrutural mais adaptável, que não necessita de grandes esforços e alto desempenho, ou seja, que pode ser submetido a ações abrasivas superficiais e também de intensidade mais leve.

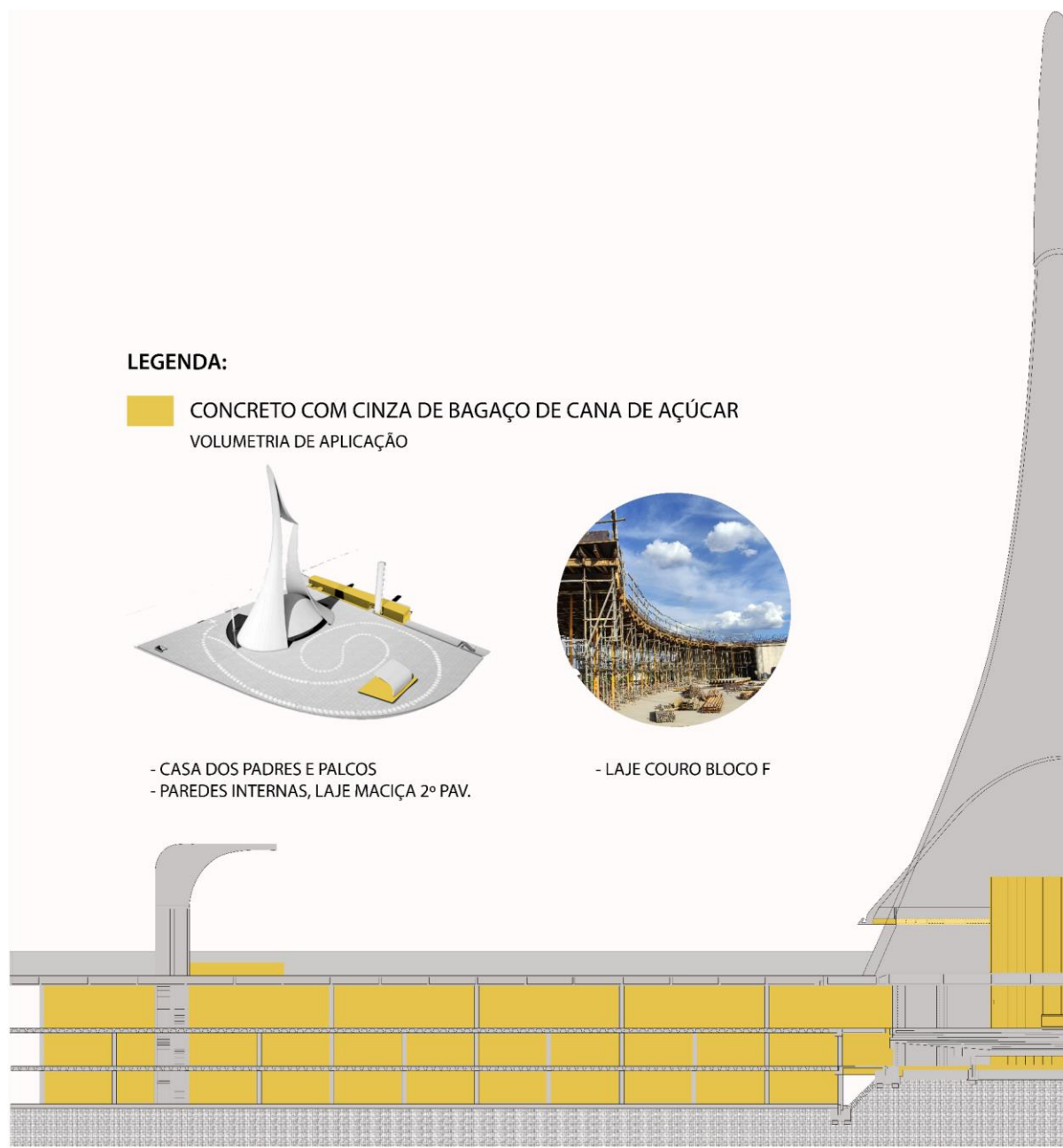
Leva-se em consideração que a laje do couro apesar de vencer um vão considerável, dispõe de dimensões reduzidas, estando apoiadas nas caixas de escada e elevadores basicamente. Já a casa de padres por terem estruturas simples convencionais de laje e paredes com uma área menor também apresenta uma redução do uso desse tipo de concreto. Quanto à laje maciça do 2º pavimento, por estar no terreno natural e ter um fluxo melhor distribuído com a laje protendida do auditório, o seu funcionamento é mais integrado, não demandando receber cargas intensas. Os palcos por fim representam lajes que também demandam de condições de desempenho boas.

Para isso, o uso da cinza do bagaço de cana de açúcar, conforme discutido por Lima (2011), na proporção de 50% de substituição do agregado miúdo na mistura, possui características voltadas principalmente à uma melhor resistência à compressão, chegando à 25MPa, e à abrasão. Um fator que justifica seu bom funcionamento na laje de piso maciço em contato com o terreno natural, é o aumento da proteção contra ação de sulfatos, gerada pela barreira da própria carbonatação, sendo características importantes para as outras tipologias.

Para o uso da casa dos padres é imprescindível o uso de impermeabilizantes, uma vez que o concreto estará aparente e exposto às intempéries, o que tem uma maior propensão à carbonatação. O esquema a seguir mostra suas respectivas aplicações e a variação gerada no projeto, conjuntamente aos outros materiais.

Dessa forma, a busca por diversificar o uso de concretos estruturais e integrá-los sob condições e necessidades diferenciadas, evidencia o potencial de aplicação dos modelos com melhores índices de desempenho que vêm sendo estudados.

Figura 47: Esquema de aplicação concreto com cinza do bagaço de cana de açúcar



Fonte: Autor, 2021

### 5.3.8 Resíduo de vidro como concreto não estrutural

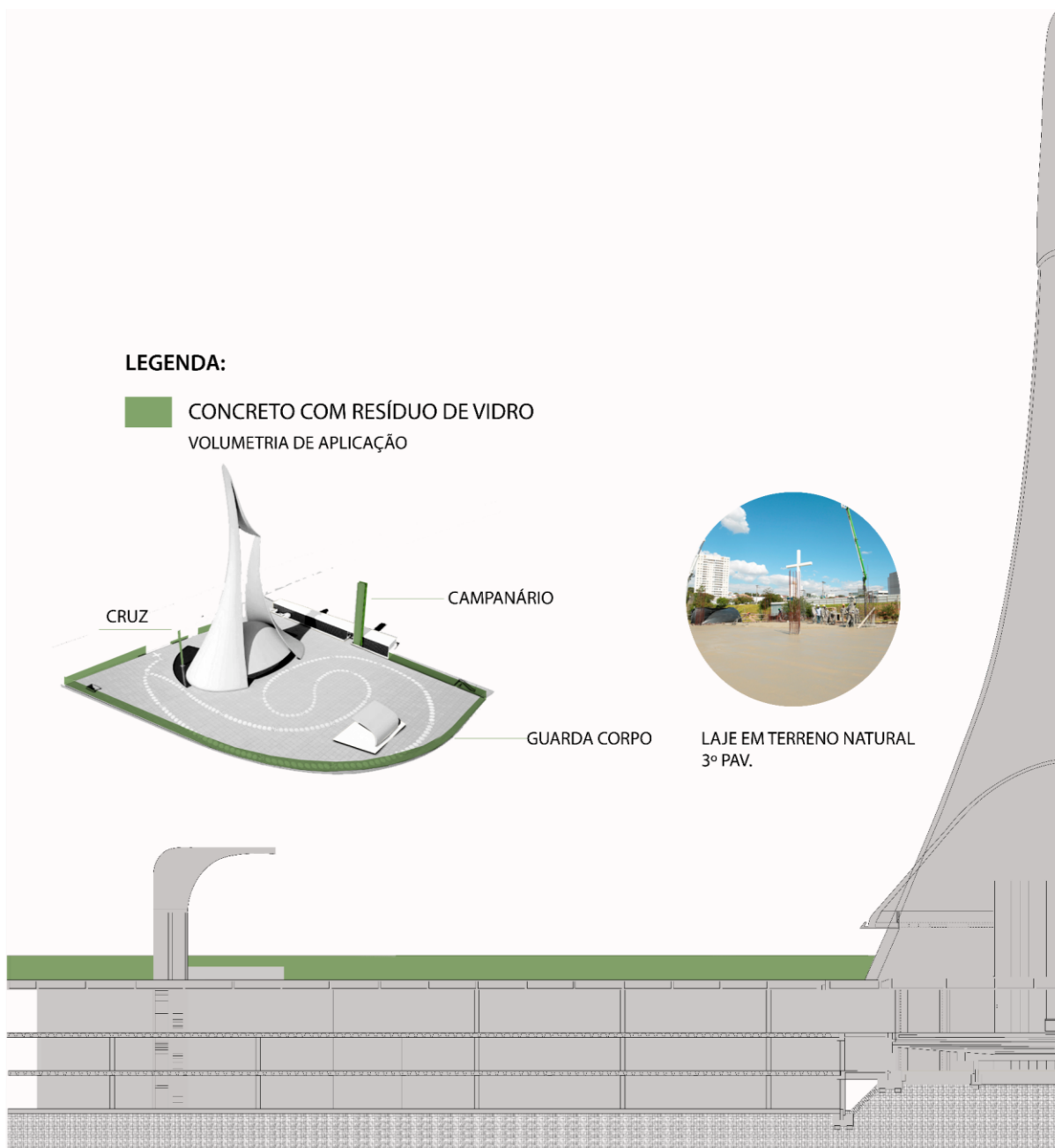
O segundo tipo de concreto sustentável não estrutural tratado no estudo, é a aplicação do concreto com resíduo de vidro. Ele será utilizado também em elementos diversos por todo o projeto, sendo eles: a cruz, a laje maciça de estacionamento em terreno natural do 2º pavimento, e como guarda corpo do 4º pavimento.

Por serem elementos que demandam intensidade leve, mantendo a predefinição do concreto aparente, sua utilização mantém a padronização visual, garante a boa adaptação de peças simples ao restante da obra, e viabiliza sua exposição.

Conforme visto pelo autor Mendes (et al. 2019), a substituição de areia por vidro moído, com teores de 20%, apresenta resultados significativos. Propriedades como trabalhabilidade e resistência à compressão não expressam efeitos consideráveis com a substituição, alcançando um desempenho melhor com aumento de 11,5% aos 7 dias, e conseqüentemente chegando a 25 MPa, mas dentro do desvio padrão de 3,0 MPa, e sob efeito de grandes temperaturas, sua resistência cai.

Apesar de dispor de características como durabilidade, sabendo-se que por não ser um concreto estrutural, quando exposto a condições de alta temperatura, como incêndios, o concreto não estrutural tende a romper mais facilmente, isso porque, assim como o concreto armado (se exposto por muito tempo), tem-se a redução da resistência à tração e compressão, e a peça pode sofrer um colapso de instabilidade. Essa característica incentivou a aplicação desse concreto somente em zonas externas. E para isso, é necessário o uso de impermeabilizantes em suas superfícies, como forma de prevenir o desgaste quanto às intempéries, e também dado o contato com o terreno natural.

Figura 48: Esquema de aplicação concreto com resíduo de vidro



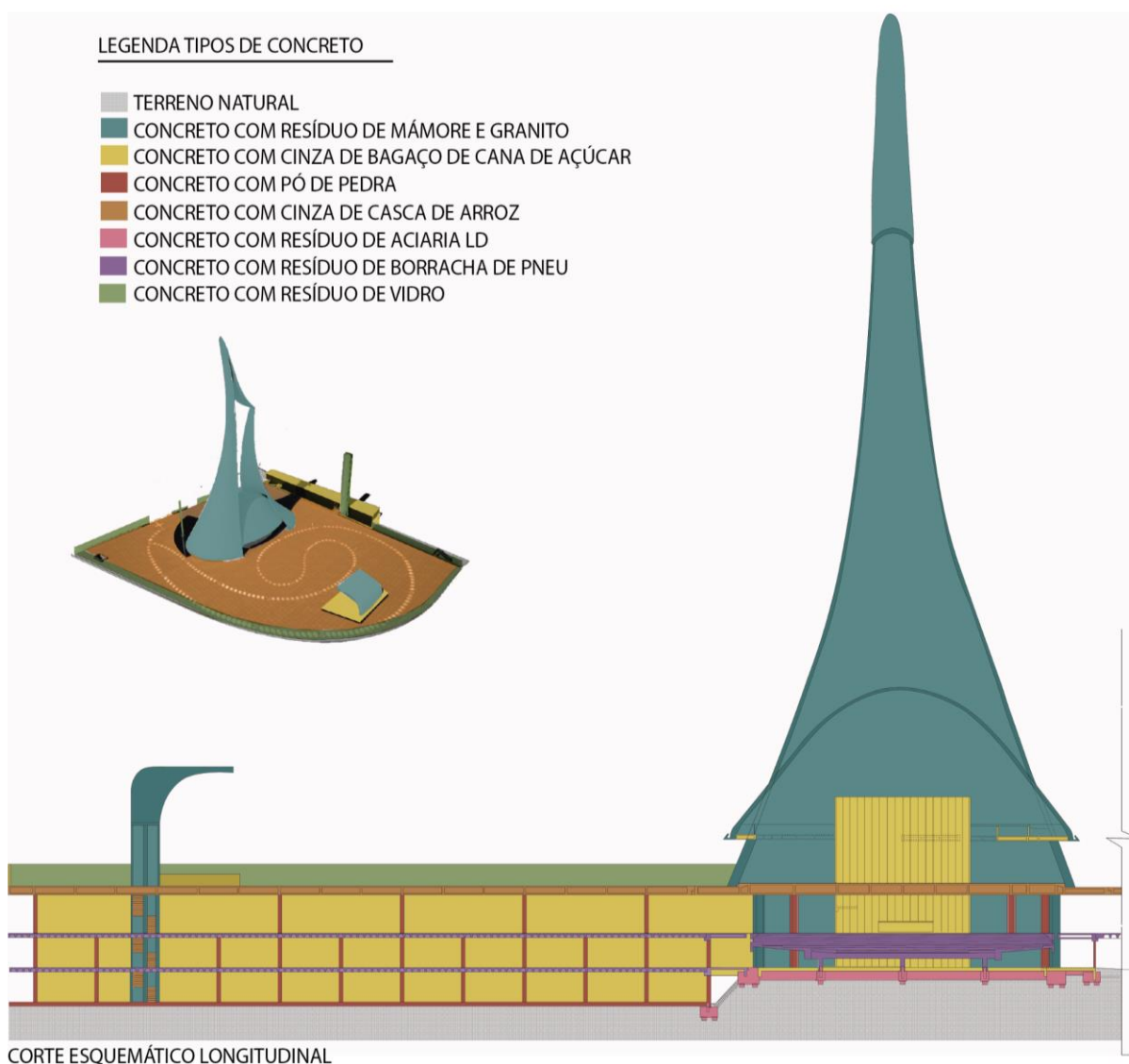
Fonte: Autor, 2021

#### **5.4 Proposta da viabilidade do concreto com práticas sustentáveis**

O exercício de aplicações do concreto sustentável nos elementos específicos do projeto, mediante suas necessidades e funções, revela sua viabilidade através de uma perspectiva interdisciplinar. São diversos setores, atores, e condições, envolvidas na proposta de criar e processar alternativas sobre um material atemporal, que é capaz de se adaptar e cumprir funções específicas.

O arcabouço estrutural sustentável proposto para a Catedral é uma forma de contribuir à integração de processos e sistemas industriais e científicos, de ressignificar o próprio concreto como possibilitador de melhores condições ambientais e de incentivo à uma economia circular, com modelos de integração social e construção cultural de apoio e incentivo. O corte esquemático a seguir traduz de forma conjunta a aplicação dos diferentes tipos de concreto sustentável sob as tipologias construtivas e suas respectivas peças na Catedral Cristo Rei.

Figura 49: Corte esquemático com aplicações das tipologias de concreto sustentável



Fonte: Autor, 2021

Embora não seja abrangente para este estudo explorar o custo de implantação desses materiais, e nem a redução das emissões de dióxido de carbono geradas no seu ciclo de vida, essa aplicação permitiu ilustrar, mesmo que superficialmente, que os impactos positivos nas emissões já ocorrem na substituição dos agregados por resíduos, principalmente o cimento, com o uso de resistências diferentes, e com a fabricação e comercialização local. E assim representando potencialmente uma melhora na contribuição desses materiais, dentro de um portfólio que oferece oportunidades.

Com isso, propõe-se que outras práticas possam ser aliadas ao uso do concreto sustentável para tornar uma a edificação ainda mais limpa e eficiente, também na fase de uso e manutenção do ciclo de vida. Como analisado no capítulo anterior, algumas medidas como o reaproveitamento de água, de esgoto, e a possibilidade de se assumir a abertura na última laje como forma de proporcionar acesso à luz e ventilação natural, já são previstas no projeto existente da Catedral.

Se tratando do conforto térmico ambiental em paralelo à eficiência energética, sugere-se que além dessas medidas, poderia ser introduzida a abertura na laje em todos os pavimentos do projeto. Essa medida proporcionaria o acesso à luz e ventilação natural por meio de um pátio central, gerando um espaço de respiro em um edifício que é externo e fechado, o que conseqüentemente também reduziria o consumo de energia por aparelhos de ar condicionado e iluminação artificial. Estes seriam substituídos por lâmpadas de LED e sistemas de climatização com Selo PROCEL de economia de energia, que pode ser utilizado em todos os equipamentos.

A utilização de painéis fotovoltaicos nas paredes da fachada norte do projeto (orientação necessária para geração de energia) em consonância com as janelas de vidro que permitem o contato externo e interno, seria outra forma de aumentar a eficiência energética e garantir uma fonte de energia limpa. O funcionamento dos painéis voltados ao córrego, predispõe de uma distância suficiente das futuras construções do entorno, o que possibilita o acesso à insolação diretamente nessas paredes.

A cor clara do concreto sustentável em toda a edificação, também colabora no conforto térmico dada a reflexão da luz e a não absorção direta de calor no edifício, conforme visto anteriormente.

Quanto à casa dos padres, bispos e freiras é proposto uma cobertura verde. A adoção de vegetação na laje de cobertura melhora a qualidade do ar, minimiza o calor da região por estar exposta à insolação direta, proporcionando conforto ambiental à habitação e ajudando na captação de água de chuva.

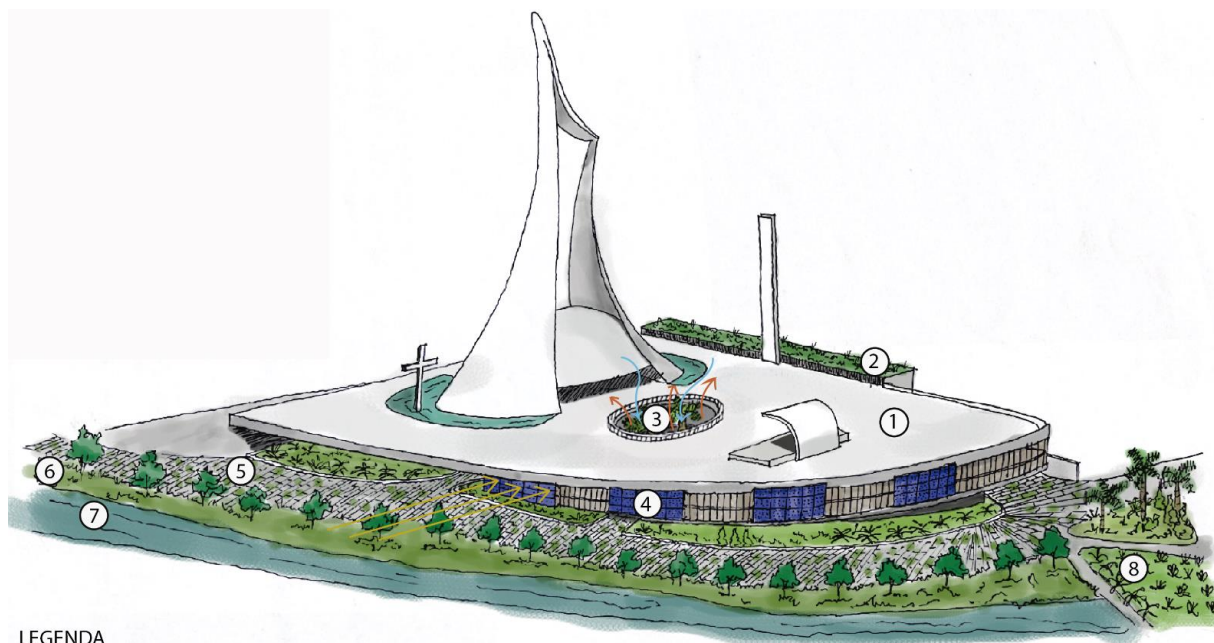
No que diz respeito ao uso dos materiais de acabamento, revestimentos internos e equipamentos de forma geral, recomenda-se o uso dos que possuem selos de sustentabilidade, e são fabricados e comercializados na cidade de Belo Horizonte e no estado, com o intuito de não incentivar as emissões por transporte, e favorecer a sustentabilidade socioeconômica.

Além disso, embora a Catedral já realiza trabalhos voltados à sustentabilidade social, propõe-se a recuperação do córrego Arrudas a fim de torná-lo propício ao uso de lazer passivo e ativo da comunidade. O plantio de espécies nativas, assim como a implantação de hortas, estaria associado à ideia de melhorar e mesmo devolver um ecossistema saudável e acessível às proximidades.

Dito isso, o cenário de proposição criado pode ser interpretado com o croqui desenvolvido pelo autor desta pesquisa, na Figura 50. Com o intuito de identificar as potenciais práticas que a Catedral Cristo Rei poderia receber junto ao uso do concreto sustentável, o exercício de atribuir mais conforto, bem estar para os usuários, pensar nas contribuições ambientais, e dispor de uma relação melhor do edifício com o seu entorno e comunidade, resulta no incentivo de conceber projetos mais ativos e eficientes de maneira geral, utilizando de vários atores e setores para sua viabilidade.



Figura 50: Proposição de práticas sustentáveis



## LEGENDA

- ① CONCRETO SUSTENTÁVEL APARENTE
- ② COBERTURA VERDE
- ③ ABERTURA PISO - VENTILAÇÃO E ILUMINAÇÃO NATURAL
- ④ PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS
- ⑤ CONCREGRAMA
- ⑥ PAISAGISMO CÓRREGO - LAZER CULTIVO
- ⑦ RECUPERAÇÃO CÓRREGO
- ⑧ HORTA

## BENEFÍCIOS:

- APROVEITAMENTO DE ILUMINAÇÃO E VENTILAÇÃO NATURAL (AR QUENTE SOBE E AR FRIO DESCE);
- PERMEABILIDADE PARA RETENÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA;
- GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA;
- RECUPERAÇÃO E DEVOLUÇÃO DO CÓRREGO À COMUNIDADE.

Autor, 2021

Utilizados diferentes tipos de concreto sustentável conforme a necessidade de cada elemento construtivo existente no projeto, como também a disponibilidade e incentivo de produção na região, o exercício revelou o seu potencial de aplicabilidade e diversidade construtiva de menor impacto. E conjuntamente a outras práticas sustentáveis propostas, foi possível gerar como resultado uma edificação sustentável em todo o seu ciclo de vida, desde a fase de projeto até a fase de manutenção e uso.

O potencial de atuação do concreto sustentável exemplificado neste estudo, mostra a sua viabilidade, mas também abre uma discussão sobre o seu constante melhoramento. A ausência de legislações mais específicas, de estímulo à produção e comercialização, ou seja, a necessidade de difundir um mercado consistente por região, assim como a existência de uma variabilidade dos resíduos e o uso de cimento (mesmo em menores quantidades) em todas as misturas, compõem os desafios e as

desvantagens da sua implementação. Entretanto, as vantagens e soluções oferecidas nos diversos segmentos da sociedade seriam ainda maiores.

A grande contribuição do presente estudo é mostrar que o uso do concreto sustentável pode ser um meio de produção interdisciplinar e de criação de edificações ambientalmente mais responsáveis e dentro de um cenário convergente ao desenvolvimento sustentável versátil na construção civil.

Os benefícios ambientais partem do reuso de resíduos industriais, o que conseqüentemente reduz a extração de matéria prima, as emissões de gases de efeito estufa na produção e consumo de energia.

Das soluções de implantação pode ser citado o investimento concentrado em pesquisas, profissionais, e tecnologia integrada aos processos de fabricação industriais. Isso criaria uma rede de possibilidades para viabilizar a migração de uso do concreto convencional para o concreto sustentável.

Quanto à matriz de produção, o concreto sustentável pode valorizar e diversificar cadeias e técnicas regionais. E sendo um material personalizado, passa a aderir à cultura de cada lugar, possibilitando espaço, influência e autonomia de mercado. Dessa forma, evoluir na visão comum e ter a capacidade de gerar valor, com o crescimento econômico de grandes e pequenos produtores, se tornam uma de suas premissas mais importantes.

A própria comunidade, juntamente com cooperativas, *startups*, e indústrias comprometidas com um modelo mais sustentável, por exemplo, poderiam de forma colaborativa atuar na coleta, tratamento, destinação de resíduos, e na fabricação de produtos. O resultado seria a geração de renda, investimentos financeiros, mão de obra especializada, empreendedorismo e pesquisa, além de tornar atrativo e acessível créditos de carbono e moedas de valor sustentável.

Junto a esse engajamento socioeconômico, o cultural entra com a divulgação de informações para acesso e popularização do material. A mudança de *mindset* para

migrar do concreto tradicional para o sustentável, trazendo confiança aos consumidores e indo de contra ao conservadorismo da cadeia de produção, se torna assim o primeiro passo da sua repercussão fundamentada.

Esse arranjo de possibilidades e processos para se construir utilizando o concreto sustentável seria, portanto, alcançável, pela parceria público - privada e institucional. Estes como principais atores que podem mitigar impactos, e promover uma reorganização, investimento e implantação em grande escala de atuação, passam a englobar a gestão necessária a um desenvolvimento contínuo e integrado.

E essa proposição na Catedral Cristo Rei poderia ser ainda maior, denotando a importância de se comprometer com o desenvolvimento sustentável, dada a sua grande influência como edificação e como pólo de atividades. Sugere-se por fim que todas essas práticas e materiais sustentáveis poderiam ser contempladas dentro de uma certificação ambiental.

Por ser um sistema de gestão que atende às leis ambientais, normas vigentes, desenvolve um planejamento afim com metas e critérios sustentáveis em todos os seus processos, e dentro de um ciclo de vida que pode acontecer desde a concepção projetual à sua adaptação, a certificação ambiental oferece soluções pautadas na qualidade e controle material, bem-estar ambiental, resguardando recursos e reduzindo diferentes tipos de poluição.

De maneira mais específica tem-se ainda como benefícios diretos à economia de gastos, ganhos financeiros, redução e controle da geração de resíduos, de energia e principalmente por tornar uma edificação autossuficiente. E sendo a Catedral Cristo Rei marco na paisagem belorizontina, a mesma também seria uma referência sustentável.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por fim, o presente estudo buscou pautar as principais demandas e oportunidades para evolução da produção e uso do concreto, material fortemente consolidado na indústria da construção civil, e responsável pela geração massiva de emissões, de consumo energético e de recursos durante seu ciclo de vida.

Sob a perspectiva de se projetar um ambiente construído com uma expectativa de vida maior, discutiu-se sobre as estratégias de desenvolvimento sustentável e de economia circular como alternativas e mesmo soluções urgentes à gestão dos nossos recursos. Foi possível compreender quais são as necessidades, o que temos em mãos e que vem sendo desenvolvido, a fim de se construir e atender às demandas insurgentes com novas possibilidades de atuação.

Com isso, a tecnologia construtiva do concreto sustentável se mostrou um potencial de diversidade e adaptação para implementar projetos eficientes. Os benefícios do seu uso vão desde o reuso de resíduos industriais, o que conseqüentemente reduz a extração de matéria prima, as emissões de gases de efeito estufa na produção e consumo de energia, até o incentivo de pesquisas científicas quanto às suas melhorias contínuas, inovação tecnológica, novos processos, e de diversificação do mercado.

Embora suas experimentações sejam em suma teóricas, fica evidente o grande aparato técnico-científico que vem sendo desenvolvido, e a sua disponibilidade de aplicação por regiões. Isso porque cada região do país dispõe de indústrias e geração de resíduos específicos, o que contribuiria ainda mais para o seu uso local e suficiência para uma cadeia de produção mais sustentável.

Dito isso, a ascendência do concreto sustentável implica na multidisciplinaridade, tanto profissional, onde a arquitetura e a engenharia estariam mais do que nunca juntas, promovendo qualidade de vida, quanto da indústria e comunidade, que estariam revendo valores para viabilizar um ecossistema integrado com base em

mudanças positivas. A grande diferença, portanto, é na projeção futura, em que os atores dessa multidisciplinaridade deverão estar exercendo sua função e comprometimento para um desenvolvimento limpo.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁLVARES, Simone Mesquita. **Desempenho térmico de habitações do PMCMV em paredes de concreto: estudo de caso em São Carlos-SP e diretrizes de projeto para a Zona Bioclimática 4.** 2018. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102131/tde-26072018-160121/publico/DissCorrigidaSimoneMesquitaAlvares.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2021.

ANDRÉIA VITAL. Jornalcana. **Minas Gerais terá a maior produção de açúcar de sua história.** 2020. Disponível em: <https://jornalcana.com.br/minas-gerais-tera-a-maior-producao-de-acucar-de-sua-historia/>. Acesso em: 25 abr. 2021.

ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE. **Catedral Cristo Rei.** 2020. Disponível em: <https://catedralcristorei.arquidiocesebh.org.br/>. Acesso em: 07 maio 2021.

ARCWEB. **CONCREGRAMA.** Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/produto/concregrama-oterprem/37924>. Acesso em: 05 jun. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004: Resíduos Sólidos –Classificação. Rio de Janeiro-RJ, 2004.

BBC NEWS. **Aquecimento global: a gigantesca fonte de CO2 que está por toda parte, mas você talvez não saiba.** 2018. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-46591753>. Acesso em: 02 abr. 2021.

BELO HORIZONTE. PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. **ALTERNATIVAS PARA O TRATAMENTO DO LIXO.** 2020. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/slu/informacoes/alternativas-tratamento-lixo>. Acesso em: 03 jan. 2021.

BARBOZA, Douglas Vieira *et al.* **Aplicação da Economia Circular na Construção Civil.** 2019. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/1102/918>. Acesso em: 21 mar. 2021.

BORGES, Paulo Henrique Ribeiro *et al.* **Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II).** 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/xVQkySsxyBRGR8BZZS4zYyq/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 17 mar. 2021.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. (2002) Resolução CONAMA nº. 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão

de resíduos da construção civil. Ministério do Meio Ambiente: CONAMA, 2002. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Imprensa Oficial.

BRITO, Luiz Felipe César Martins de. **PAISAGEM IMAGINADA E PODER RELIGIOSO A CATEDRAL COMO ESPELHO**. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MMMD-AMLLJ3>. Acesso em: 29 abr. 2021.

COUTO, Heloisa Helena. **REVITALIZAÇÃO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO COM A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE DEMOLIÇÃO: Um estudo de caso**. 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MMMD-94DPUB>. Acesso em: 10 dez. 2020.

CIMENTO ITAMBÉ. **Pesquisa usa vidro reciclado como agregado do concreto**. 2019. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/pesquisa-usa-vidro-reciclado-como-agregado-do-concreto/>. Acesso em: 12 maio 2021.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS (org.). **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2020. Disponível em: <https://ods.cnm.org.br/agenda-2030>. Acesso em: 14 fev. 2021.

CINTRA, Laura Borges. **AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE CONCRETOS COM AR INCORPORADO**. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/20167/3/Avalia%C3%A7%C3%A3oPropriedadesT%C3%A9rmicas.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2021.

**CONCRETO AUTOADENSÁVEL CONVENCIONAL**. 2019. Disponível em: [http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/333957/1/Xavier\\_BeatrizCorrea\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/333957/1/Xavier_BeatrizCorrea_M.pdf). Acesso em: 18 maio 2021.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS. **Guia para Integração dos ODS nos Municípios Brasileiros**. 2017. Disponível em: <https://www.cnm.org.br/biblioteca/exibe/2855>. Acesso em: 12 fev. 2021.

CENTENÁRIO ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE. **A sonhada Cathedral de Cristo Rei**. 2021. Disponível em: [https://centenario.arquidiocesebh.org.br/memoria/a-sonhada-cathedral-de-christo-rei/#\\_ftn1](https://centenario.arquidiocesebh.org.br/memoria/a-sonhada-cathedral-de-christo-rei/#_ftn1). Acesso em: 12 maio 2021.

DIAS, Aniel de Melo *et al.* **O CONCRETO SUSTENTÁVEL BRASILEIRO**. 2017. Disponível em: <https://www.bing.com/search?q=O+CONCRETO+SUSTENT%C3%81VEL+BRASILEIRO&cvid=48fe5fb28b7545eab0277d217bfa4867&aqs=edge..69i57.919j0j1&pgl=2083&FORM=ANNTA1&PC=ACTS>. Acesso em: 16 mar. 2021.

DONALD SAWYER. Revista Eco21. **Economia Verde e/ou Desenvolvimento Sustentável?** Disponível em: <http://www.eco21.com.br/textos/textos.asp?ID=2507>. Acesso em: 17 mar. 2021.

ECYCLE. **O que é economia verde?** Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/economia-verde/>. Acesso em: 12 mar. 2021.

ECYCLE. **O que é Economia Circular?** Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/economia-circular/>. Acesso em: 07 abr. 2021.

EMF, Ellen Macarthur Foundation. **Economia circular.** Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/economia-circular/conceito>. Acesso em: 12 mar. 2021.

FERNANDES, Antônio Vitor Barbosa. **CONCRETO SUSTENTÁVEL APLICADO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.** Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/view/1093>. Acesso em: 11 dez. 2020.

FAZZAN, João Victor. **Estudo da viabilidade de utilização do Resíduo de Borracha de Pneu em Concretos Estruturais.** 2016. Disponível em: [https://amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum\\_ambiental/article/view/1484](https://amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/view/1484). Acesso em: 02 maio 2021.

GONÇALVES, Bruno Aparecido Moreira. **Análise da substituição parcial de agregados naturais do concreto por cinzas do bagaço da cana-de-açúcar e resíduos da construção civil.** 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/2324>. Acesso em: 27 dez. 2020.

GIANNECCHINI, Ana Clara. **Técnica e estética no concreto armado Um estudo sobre os edifícios do MASP e da FAUUSP.** 2009. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16133/tde-12032010-163544/publico/Dissertacao\\_ACGianneccchini.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16133/tde-12032010-163544/publico/Dissertacao_ACGianneccchini.pdf). Acesso em: 08 abr. 2021.

HELENE, Paulo. **Concreto sustentável: as conquistas do setor da construção civil rumo à responsabilidade socioambiental.** 2012. Disponível em: <https://ideiasustentavel.com.br/sustentabilidade-das-estruturas-de-concreto/>. Acesso em: 18 mar. 2021.

Harrouk, Christele. "Palácio do Itamaraty de Oscar Niemeyer, pelas lentes de Paul Clemence" [Oscar Niemeyer's Itamaraty Palace Captured by Paul Clemence] 21 Dez 2020. ArchDaily Brasil. (Trad. Baratto, Romullo) Acessado 7 Jun 2021. <<https://www.archdaily.com.br/br/953656/palacio-do-itamaraty-de-oscar-niemeyer-pelas-lentes-de-paul-clemence>> ISSN 0719-8906

HAZAN, Vera Magiano. **O papel dos ícones da contemporaneidade na revitalização dos grandes centros urbanos.** Arquitectos, São Paulo, ano 04, n. 041.02, Vitruvius, out. 2003. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitectos/04.041/645>>. Acesso em: 12 fev. 2021

IPHAN. **Conjunto Moderno da Pampulha - Belo Horizonte (MG).** 2014. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/820/>. Acesso em: 04 mar. 2021.



ISAIA, Geraldo Cechella *et al.* **Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (parte II): durabilidade.** 2017. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1678-86212017000200233](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212017000200233). Acesso em: 27 dez. 2020.

MINAS GERAIS. PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. . **PLANO MUNICIPAL DE SANEAMENTO DE BELO HORIZONTE.** 2015. Disponível em: [https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/obras-e-infraestrutura/2018/documentos/volumei\\_texto\\_2012.pdf](https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/obras-e-infraestrutura/2018/documentos/volumei_texto_2012.pdf). Acesso em: 27 abr. 2021.

MARQUES, Marcos Vinícius Dias *et al.* **O Panorama dos Resíduos de Corte de Mármore e Granito no Cenário Atual da Construção Civil.** 2021. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/26454>. Acesso em: 05 maio 2021.

MARINO, Vitor Ferração. **Coeficiente de conformação superficial de armaduras em concreto sustentável –Escória de aciaria.** 2016. Disponível em: [https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/178/1/MONOGRAFIA\\_CoeficienteConformacaoSuperficial.pdf](https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/178/1/MONOGRAFIA_CoeficienteConformacaoSuperficial.pdf). Acesso em: 11 maio 2021.

MOTTA, Débora. **Pesquisa transforma cinzas do bagaço de cana e de arroz em concreto.** 2008. Disponível em: <http://www.faperj.br/?id=1331.2.4>. Acesso em: 15 maio 2021.

MENOSSEI, Rômulo Tadeu. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto.** 2004. Disponível em: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90740/menossi\\_rt\\_me\\_ilha.pdf?se](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90740/menossi_rt_me_ilha.pdf?se). Acesso em: 28 abr. 2021.

MENDES, Gabriela Galdino; DINIZ, Mariana de Faria Gardingo. **SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO POR VIDRO NO CONCRETO: VANTAGENS E DESVANTAGENS.** 2019. Disponível em: <https://fave.univertix.net/wp-content/uploads/2019/11/A95-SUBSTITUI%C3%87%C3%83O-DO-AGREGADO-GRA%C3%9ADO-POR-VIDRO-NO-CONCRETO-VANTAGENS-E-DESVANTAGENS.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2021

MOVIMENTO NACIONAL ODS. **Os 5 P's da Sustentabilidade.** 2019. Disponível em: <https://movimentoods.org.br/nossa-causa/os-5-ps-da-sustentabilidade/>. Acesso em: 10 mar. 2021.

MACIEL, Carlos Alberto. **O Habitar Contemporâneo pós-COVID.** Belo Horizonte: Ibmec, 2020. (100 min.). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=LKsVkw3x9Y&t=1148s>. Acesso em: 16 mar. 2021

NELSON ADELINO PEREIRA. Servidores Jt. **Cinza da queima do bagaço de cana substitui areia na fabricação de concreto.** 2011. Disponível em:

<https://servidoresjt.wordpress.com/2011/02/13/cinza-da-queima-do-bagaco-de-cana-substitui-areia-na-fabricacao-de-concreto/>. Acesso em: 16 maio 2021.

NORRSTRÖM, Heidi. **Sustainable and Balanced Energy Efficiency and Preservation in Our Built Heritage**. 2013. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/5/6/2623/htm#B7-sustainability-05-02623>. Acesso em: 25 jan. 2021.

OLIVEIRA, Vanessa Carina Heinrichs Chirico *et al.* **Estratégias para a minimização da emissão de CO<sub>2</sub> de concretos**. 2014. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1678-86212014000400012](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212014000400012). Acesso em: 27 dez. 2020.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. **Descarte de outros materiais - Pneus**. 2020. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/slu/informacoes/descarte/outros-materiais-pneus>. Acesso em: 08 abr. 2021.

PEREIRA, Adriana Maria *et al.* **Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz**. 2015. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-70762015000100021](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762015000100021). Acesso em: 22 dez. 2020.

PEREIRA, Matheus. **Cascas de concreto: fundamentos de projeto e exemplos**. 2018. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/895363/cascas-de-concreto-fundamentos-de-projeto-e-exemplos>. Acesso em: 10 mar. 2021.

PORTAL DO CONCRETO. **Concreto Protendido**. 2017. Disponível em: Concreto Protendido. Acesso em: 15 abr. 2021.

RORIZ, Mauricio. **Desempenho térmico e as paredes de concreto**. 2013. Entrevista elaborada pela Revista Núcleo Parede de Concreto. Disponível em: <https://nucleoparededeconcreto.com.br/desempenho-termico-e-as-paredes-de-concreto/>. Acesso em: 05 fev. 2021.

SANTOS, Cristiane Carine dos *et al.* **Materiais alternativos para concretos de cimento portland**. 2020. Disponível em: <https://doaj.org/article/945f7b6a4bef4ca985a1ac357abc06e5>. Acesso em: 28 dez. 2020.

SANTOS, Sílvia *et al.* **VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DO PÓ DE PEDRA PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO**. 2017. Disponível em: [https://www.confca.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2017/civil/102\\_vtdudpdppdc.pdf](https://www.confca.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2017/civil/102_vtdudpdppdc.pdf). Acesso em: 10 mar. 2021

SANTOS, Sílvia. **Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/88861>. Acesso em: 14 abr. 2021.

SILVA JUNIOR, Luis Carlos Soares da *et al.* REÚSO DE EFLUENTES DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO BENEFICIAMENTO DE CONCRETO. **Mix Sustentável**, Florianópolis, v. 06, n. 04, p. 85-92, ago. 2020. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/3901>. Acesso em: 31 mar. 2021.

SANTORO, Jair Frederico *et al.* **Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul.** 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/SvtDDYjsv4tpPgpsQbZn6zR/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 08 maio 2021.

SIAMIG. **Unidade mineira da CRV Industrial começa a sua segunda safra.** 2021. Disponível em: <http://www.siamig.com.br/noticias/unidade-mineira-da-crv-industrial-comeca-a-sua-segunda-safra>. Acesso em: 22 abr. 2021.

TIOSSI, Fabiano Martin. Brazilian Journal of Development ISSN: 2525 - 8761 11912 Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.7, n.2, p. 11912 - 11927 feb . 2021 **Economia Circular: suas contribuições para o desenvolvimento da Sustentabilidade.** 2021. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/24108/19301>. Acesso em: 15 mar. 2021.

TEODORO, Paulo Eduardo *et al.* **Comportamento físico-mecânico do concreto com substituição de cimento portland por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar.** 2013. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/22022>. Acesso em: 12 abr. 2021.

TASHIMA, Mauro Mitsuuchi. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** 2006. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/91490>. Acesso em: 28 mar. 2021.

UTIMYAMA, Márcia Mayumi. **APLICAÇÃO DO REGULAMENTO TÉCNICO DA QUALIDADE DO NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS.** 2011. Disponível em: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/121648/utiyama\\_mm\\_tcc\\_guara.pdf?sequence=1](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/121648/utiyama_mm_tcc_guara.pdf?sequence=1). Acesso em: 09 abr. 2021.

UGIONI, Vinicius Marcos *et al.* **ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO PR ODUZIDO COM SUBSTITUIÇÕ ES PARCIAIS E TOTAIS DO S AGREGADO S GRAÚDO S E MIÚDO S POR AGREGADO S RECICLADO S.** 2017. Disponível em: <https://docplayer.com.br/88548021-Analise-das-propriedades-mecanicas-do-concreto-produzido-com-substituicoes-parciais-e-totais-dos-agregados-graudos-e-miudos-por-agregados-reciclad.html>. Acesso em: 30 abr. 2021.

XAVIER, Beatriz Correa. **COMPARAÇÃO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE MÁRMORE E GRANITO COM O**

**CONCRETO AUTOADENSÁVEL CONVENCIONAL.** 2019. Disponível em: [http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/333957/1/Xavier\\_BeatrizCorreia\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/333957/1/Xavier_BeatrizCorreia_M.pdf). Acesso em: 18 maio 2021.