

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA “ARENA DO FUTURO”,
CONSTRUÍDA SEGUNDO O DESIGN PARA DESMONTAGEM (DfD)
PARA AS OLIMPÍADAS RIO 2016**

Carolina Polotto Christovan

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Civil da
Universidade Federal de São Carlos como
parte dos requisitos para a conclusão da
graduação em Engenharia Civil

Orientadora: Cristiane Bueno

São Carlos
2023

DEDICATÓRIA

À minha mãe Alessandra, que nunca deixou de acreditar no meu potencial e fez o impossível tornar-se possível para que eu pudesse chegar até aqui.

Ao meu pai Mário Augusto (in memoriam), que é e sempre será minha maior saudade. Pelos ensinamentos em vida e por ser minha maior referência de coragem.

Ao meu irmão Nicholas, que me inspira todos os dias a ser minha melhor versão. Tudo por você, sempre.

Muitas pessoas fizeram parte da minha trajetória acadêmica, e seria impossível expressar em palavras a minha gratidão por todas elas, mas tentarei mesmo assim.

Primeiramente gostaria de agradecer ao Pai, por ser meu alicerce e minha força, a Ele toda honra e toda glória, sempre.

Agradeço também à minha orientadora, Dra. Cristiane Bueno, por ter sido tão compreensiva e atenciosa comigo desde minha iniciação científica até este trabalho de conclusão de curso, que encerra minha jornada de graduação.

À minha família, Alessandra, Mário (in memoriam) e Nicholas, por serem minha base e meus maiores exemplos, sem eles eu não seria a pessoa que sou hoje. Obrigada pelo apoio e por acreditarem no meu potencial em todas as fases da minha vida, até nos piores dias.

À minha dupla de universidade, Beatriz, que esteve comigo em todas as etapas da graduação, inclusive nas mais difíceis. Sem seu apoio o caminho até aqui, que já foi árduo, teria sido muito mais difícil. Que essa amizade não tenha fim com o encerramento desse ciclo tão importante das nossas vidas, você se tornou minha irmã.

À minha amiga Ariele, por ter sido a pessoa que me acolheu quando consegui a aprovação na universidade. Obrigada por estar sempre comigo desde o primeiro dia.

Ao meu amigo Arthur, que foi a pessoa que mais me ajudou academicamente. Obrigada pela paciência, pelo suporte e por ser ombro amigo em todos os tipos de situações. Não tenho palavras para agradecer tudo o que fez e faz por mim.

Também gostaria de agradecer aos meus amigos Gabriel, Samara, Mayara, Jefferson, Juliana, Adriane, por terem sido suporte e acolhimento neste período de graduação. Minha admiração e respeito por todos vocês.

Além dos meus amigos de graduação, também gostaria de agradecer ao Tiago, por todo companheirismo e suporte emocional durante a escrita deste trabalho de conclusão de curso, obrigada por ser peça tão importante deste encerramento de ciclo na minha vida.

À minha amiga Isabella, por ser amiga e companheira desde que me entendo por gente e não soltar minha mão nos momentos que mais precisei.

Por fim, agradeço aos meus avós, Dirce, José, Altecília e Ângelo (in memoriam), por serem tão importantes e por estarem sempre ao meu lado, independente do momento. Obrigada por cuidarem tão bem de mim.

RESUMO

Dentre os métodos existentes para analisar o desempenho ambiental de edifícios, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) apresenta-se com o propósito de avaliar os impactos ambientais decorrentes da construção civil, desde a extração da matéria prima até a disposição dos seus resíduos. O setor da construção civil tem grande parcela de responsabilidade quanto à emissão dos *greenhouse gases* (GHG) responsáveis pelo efeito estufa. Devido à alta taxa de emissões pelo setor, o futuro da construção tende a realizar escolhas que visem fatores ambientais; assim, todas as formas de quantificá-los e avaliá-los ganham destaque nesse meio. Nesse trabalho, um estudo de caso é conduzido para quantificar os impactos ambientais da Arena do Futuro, construída nos Jogos Olímpicos de 2016 no Rio de Janeiro, Brasil. O projeto segue princípios da Economia Circular, uma vez que é pensado com o intuito de realizar a desmontagem da edificação e posteriormente construir quatro escolas do setor público na zona Oeste do Rio. A ACV foi feita através de três ferramentas para estabelecer um nível de confiabilidade dos resultados, para isso, o projeto foi recriado numa plataforma BIM e as informações referentes ao mesmo foram utilizadas como entrada para as ferramentas de ACV escolhidas (*Tally*, *One Click LCA* e *Athena Impact Estimator*). Dois são os principais objetivos da pesquisa: analisar a arena como um todo e avaliar os impactos evitados pela reutilização dos materiais na construção das escolas públicas. Os resultados mostraram que, devido ao impacto evitado pela reutilização dos materiais, o impacto global cai para 40% do que seria gerado caso esses materiais fossem dispostos em aterros ou soluções convencionais de final de vida (ou seja, aproximadamente 60% dos impactos são abatidos pela solução adotada para o final de vida).

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); *Building Information Modelling* (BIM); Economia Circular; Sustentabilidade; Impactos Ambientais (IA).

ABSTRACT

Among the existing methods to analyze the environmental performance of buildings, the Life Cycle Assessment (LCA) is presented with the purpose of evaluating the environmental impacts resulting from civil construction, from the extraction of raw material to the disposal of its waste. The civil construction sector is largely responsible for the emission of greenhouse gases (GHG) responsible for the greenhouse effect. Due to the high rate of emissions by the sector, the future of construction tends to make choices that focus on environmental factors; thus, all ways of quantifying and evaluating them are highlighted in this environment. In this work, a case study is conducted to quantify the environmental impacts of the Arena do Futuro, built at the 2016 Olympic Games in Rio de Janeiro, Brazil. The LCA was carried out using three tools to establish a level of reliability of the results, for this, the project was recreated in a BIM platform and the information related to it was used as input for the chosen LCA tools (*Tally*, *One Click LCA* and *Athena Impact Estimator*). Two are the main points of the research: analyzing the arena as a whole and evaluating the impacts avoided by the reuse of materials in the construction of public schools. The results showed that, due to the negative impact of reusing materials, this global impact drops to 40% of the impact that would be generated if these materials were disposed of in landfills or conventional end-of-life solutions (i.e., approximately 60% of the impacts are slaughtered by the solution adopted for the end of life).

Key-words: Life Cycle Assessment (LCA); Building Information Modelling (BIM); Circular Economy; Sustainability; Environmental Impacts (EI).

Figura 1 - Tipo de integração BIM-ACV das ferramentas.....	14
Figura 2 - Resumo ilustrativo da metodologia a ser adotada	15
Figura 3 - Estrutura da avaliação do ciclo de vida	17
Figura 4 - Indicadores de categoria	18
Figura 5 - Elementos da fase de interpretação relacionado às etapas anteriores	19
Figura 6 - Etapas para realização da ACV e integração com as situações descritas	21
Figura 7 - Etapas de uma ACV de edifícios	22
Figura 8 – Metodologia TRACI	24
Figura 9 - Impactos regionais de uma AICV	24
Figura 10 - Princípios da economia circular.....	28
Figura 11 - Significado e atribuições do BIM	31
Figura 12 - Formas de integração BIM-ACV.....	33
Figura 13 – Modelo 3D de uma escola padrão	40
Figura 14 – Modelo 3D da Arena do Futuro	41
Figura 15 – Legenda do gráfico 1 (análise da arena)	53
Figura 16 – Legenda do gráfico 2 (análise da arena)	54
Figura 17 – Legenda do gráfico 3 (análise da arena)	55
Figura 18 – Resumo dos resultados para aquecimento global (análise da arena)	58
Figura 19 - Legenda do gráfico 17 (análise da escola).....	68
Figura 20 – Legenda do gráfico 18 (análise da escola)	68
Figura 21 – Legenda do gráfico 19 (análise da escola)	69
Figura 22 - Resumo dos resultados para aquecimento global (análise da escola).....	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Categorias de impacto abrangidas por cada metodologia	25
Quadro 2 - Aplicativos para realização de ACV	34
Quadro 3 - Relação entre LOD e impactos de ACV	36
Quadro 4 – Informações sobre os componentes utilizados	43
Quadro 5 – Legenda de cores	45

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição dos municípios com processamento de RCC	30
Gráfico 2 – Resultados pelos estágios do ciclo de vida (análise da arena)	52
Gráfico 3 – Resultados pelas divisões de indicadores (análise da arena).....	53
Gráfico 4 – Resultados pelas categorias do Revit (análise da arena)	54
Gráfico 5 – Resultados para o potencial de aquecimento global por componente (análise da arena)	56
Gráfico 6 – Resultados por tipos de materiais (análise da arena).....	57
Gráfico 7 – Resultados para o potencial de aquecimento global por componente (análise da arena)	60
Gráfico 8 – Comparação para o potencial de aquecimento global (análise da arena).....	61
Gráfico 9 – Média e desvio padrão para potencial de aquecimento global (análise da arena).	61
Gráfico 10 - Comparação para o potencial de acidificação (análise da arena).....	62
Gráfico 11 - Média e desvio padrão para potencial de acidificação (análise da arena)	62
Gráfico 12 - Comparação para o potencial de eutrofização (análise da arena)	63
Gráfico 13 - Média e desvio padrão para potencial de eutrofização (análise da arena)	63
Gráfico 14 - Comparação para o potencial de formação de poluição (análise da arena)	64
Gráfico 15 - Média e desvio padrão para potencial de formação de poluição (análise da arena)	64
Gráfico 16 - Comparação para a depleção da camada de ozônio (análise da arena).....	65
Gráfico 17 - Média e desvio padrão para a depleção da camada de ozônio (análise da arena)	65
Gráfico 18 - Resultados pelos estágios do ciclo de vida (análise da escola).....	67
Gráfico 19 - Resultados pelas divisões de indicadores (análise da escola)	68
Gráfico 20 - Resultados pelas categorias do Revit (análise da escola)	69
Gráfico 21 - Resultados para o potencial de aquecimento global por componente (análise da escola).....	71
Gráfico 22 - Resultados por tipos de materiais (análise da escola)	71
Gráfico 23 - Resultados para o potencial de aquecimento global por componente (análise da escola).....	74
Gráfico 24 - Comparação para o potencial de aquecimento global (análise da escola)	75
Gráfico 25 - Média e desvio padrão para potencial de aquecimento global (análise da escola)	75
Gráfico 26 - Comparação para o potencial de acidificação (análise da escola)	76
Gráfico 27 - Comparação para o potencial de acidificação (análise da escola)	76
Gráfico 28 - Média e desvio padrão para potencial de eutrofização (análise da escola).....	77
Gráfico 29 - Média e desvio padrão para potencial de eutrofização (análise da escola).....	77
Gráfico 30 - Comparação para o potencial de formação de poluição (análise da escola)	78
Gráfico 31 - Média e desvio padrão para potencial de formação de poluição (análise da escola).....	78
Gráfico 32 - Comparação para a depleção da camada de ozônio (análise da escola)	79
Gráfico 33 - Média e desvio padrão para a depleção da camada de ozônio (análise da escola)	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados gerados por área pela ferramenta Tally (análise da arena).....	51
Tabela 2 – Resultados gerados por área pela ferramenta Tally (análise da arena).....	51
Tabela 3 – Resultados gerados pela ferramenta One Click LCA (análise da arena).....	56
Tabela 4 – Resultados gerados pela ferramenta Athena Impact Estimator (análise da arena) .	59
Tabela 5 - Comparação entre as ferramentas (análise da arena)	60
Tabela 6 - Resultados gerados pela ferramenta Tally (análise da escola)	67
Tabela 7 - Resultados gerados por área pela ferramenta Tally (análise da escola)	67
Tabela 8 - Resultados gerados pela ferramenta One Click LCA (análise da escola)	70
Tabela 9 - Resultados gerados pela ferramenta Athena Impact Estimator (análise da escola)	73
Tabela 10 – Comparação entre as ferramentas (análise da escola)	74
Tabela 11 – Impactos evitados e balanço estimado.....	80
Tabela 12 - Impactos evitados e balanço estimado considerando as três ferramentas.....	80
Tabela 13 - Valor gerado caso todos os materiais fossem utilizados em primeira vida.....	81

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Justificativa	9
1.2 Objetivos.....	10
1.3 Metodologia.....	11
2. REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	16
2.1.1 A economia circular no fim de vida dos componentes construtivos	26
2.2 BUILDING INFORMATION MODELLING (BIM)	31
2.3 INTEGRAÇÃO ENTRE BIM E ACV	32
3. CASO DE ESTUDO	40
3.1 APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO	40
3.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA ARENA.....	51
3.2.1 Tally.....	51
3.2.2 One Click LCA.....	55
3.2.3 Athena Impact Estimator	58
3.2.4 Análise de sensibilidade	60
3.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA De uma escola padrão.....	66
3.3.1 Tally.....	66
3.3.2 One Click LCA.....	70
3.3.3 Athena Impact Estimator	72
3.3.4 Análise de sensibilidade	74
3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	80
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

LISTA DE ABREVIATURAS

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

AICV – Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

AP – Potencial de acidificação

BIM – *Building Information Modelling*

EP – Potencial de eutrofização

GHG – *Greenhouse gases*

GWP – Potencial de aquecimento global

ODP – Potencial de destruição do ozônio

PE-Nre – Uso de energia não renovável

PE-Re – Uso de energia renovável

1. INTRODUÇÃO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica de avaliação ambiental que vem ganhando destaque ao longo dos anos pela sua notória importância na certificação ambiental de edifícios e pelas possíveis análises que podem ser feitas ainda em fase inicial de projeto para estimar os impactos ambientais causados devido às escolhas construtivas adotadas.

Segundo Guinée (2002), o objetivo de uma Avaliação do Ciclo de Vida é compilar e avaliar as consequências ambientais de diferentes opções construtivas para cumprir uma determinada função. Além disso, a ACV pode desempenhar uma gestão ambiental pública útil, uma vez que envolve tanto a comparação entre produtos existentes quanto o desenvolvimento de novos produtos. A ACV tem sido o método de escolha para vários tipos de tecnologias de bioenergia e sequestro de carbono (Guinée, 2002).

Sendo assim, é de grande importância investigar e analisar as formas que a integração dessa técnica com o *Building Information Modelling* (BIM) pode ser benéfica para o setor da construção civil e como o avanço da área na indústria pode trazer melhorias para o planeta, uma vez que esse setor é um grande responsável pela poluição e diversos problemas ambientais da atualidade.

Em 1992 a preocupação ambiental já era assunto em pauta. A Agenda 21, realizada no mesmo ano, reuniu 179 países para criar soluções com base na proposta de “pensar globalmente, agir localmente”, o documento feito foi resultante da “Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento”, evento também conhecido como Eco-92 ou Rio-92.

Dentre os documentos da ONU, podemos citar os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), criados em 2015, como agenda socioambiental que estabelece metas a serem atingidas até 2030. Dentre os 17 objetivos estabelecidos, destacam-se alguns que podem e devem ser implementados no setor da construção civil: cidades e comunidades sustentáveis; consumo e produção responsáveis; ação contra a mudança global do clima; indústria, inovação e infraestrutura. Considerando essas informações, mais um papel deve ser acrescentado ao ato de construir: o ambiental. Em países de primeiro mundo, como Holanda e França, é obrigatório aplicar um sistema de certificação de edifícios verdes, onde a ACV é, muitas vezes, exigida (NANEVA et al., 2020).

No Brasil, o tema ainda é recente e pouco explorado no mercado da construção. Mesmo assim, seguindo os princípios da economia circular, nas Olimpíadas Rio 2016 uma arena foi projetada e construída pensando na desmontagem e posterior construção de escolas da rede pública. O projeto é uma inovação e quebra padrões seguidos até o momento com escolhas construtivas reutilizáveis e mais inteligentes. Entretanto, a avaliação quantitativa dos impactos gerados ao longo de todo o ciclo de vida não foi realizada.

1.1 JUSTIFICATIVA

Desde os primórdios da humanidade, os aglomerados populacionais têm importância ímpar no papel social e econômico do ser humano. Considerando esse fator histórico, as taxas crescentes de ocupação das cidades vêm trazendo avanços, mas também alertas ambientais. Ao redor do mundo, o aumento com a preocupação acerca de assuntos sustentáveis aumentou à medida que a poluição, a devastação de ecossistemas e o aumento da severidade dos problemas relacionados com o clima tornaram-se mais evidentes (ZHANG et al., 2020). Segundo Huovila et al. (2009), o setor da construção libera grande parte das emissões de gás carbônico e é responsável por aproximadamente 40% de toda a energia total utilizada, o que acarreta em uma alta porcentagem de gases do efeito estufa; nesse caso, estima-se 30% dos GHG (*Greenhouse gases*).

Devido à alta taxa de emissão de gases como o dióxido de carbono, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ganhou notória importância. Os impactos são quantificados desde a produção dos materiais que serão utilizados (fase essa que leva em consideração os impactos desde a retirada da matéria prima da natureza) até a disposição final dos componentes construtivos. Por meio dessa técnica é possível atingir certificações ambientais devido as escolhas construtivas adotadas e analisar, ainda em fases iniciais de projeto, como essas escolhas impactam ambientalmente o ecossistema. Dentre as certificações mais conhecidas, podem ser citadas: LEED, GBTool, Green Globes, AQUA, entre outras.

Nesse estudo de caso, a ACV da Arena do Futuro será realizada para quantificar os impactos gerados pela construção da mesma e os impactos evitados pela reutilização dos materiais nas quatro novas escolas na zona Oeste do Rio. Nesse caso, pretende-se estimar a quantidade de material que tem potencial para ser reutilizado no projeto padrão da escola (uma vez que as quatro construções são idênticas).

A Arena foi escolhida por ser um projeto considerado inovador pela adoção dos princípios da economia circular. Apesar desse projeto ter sido feito com foco na desmontagem, as certificações atreladas às escolhas ambientais não foram realizadas. Produzir uma ACV é estimar valores que tornem possível expressar os impactos ambientais de dada construção. A Arena do Futuro foi pensada de forma a torná-la um edifício que pode ser visto como banco de materiais. Entretanto, além de ser fonte de materiais para as posteriores escolas, deve também ser pensada como construção sustentável e de baixo impacto ambiental, etiqueta essa que deve ser dada apenas após as análises de impacto.

A falta de informações sobre os poluentes gerados justifica a realização do presente trabalho, que pretende investigar numericamente como esse plano de vida construtivo pode ser interpretado quantitativamente.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral determinar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida da Arena do Futuro, construída para as Olimpíadas do Rio de Janeiro de 2016 e projetada de acordo com os princípios do *design* para desmontagem (DfD), visando posterior construção de quatro novas escolas da rede pública na Zona Oeste do Rio.

Para alcançar o objetivo geral, metas são estabelecidas. Essas metas, que são os objetivos específicos do trabalho, são pensadas de forma a estabelecer quais são os passos a serem seguidos e concluídos para realização geral do trabalho. Sendo assim, os objetivos específicos são listados a seguir:

- Realizar a modelagem do estádio e das escolas numa plataforma BIM para posteriores avaliações;
- Identificar maneiras de realizar uma ACV com base em um projeto BIM e, a partir dessa identificação, escolher as que mais se enquadram no estudo de caso;
- Comparar os resultados encontrados para analisar a coerência e confiabilidade do que foi calculado e interpretar esses valores com base nas escolhas construtivas do projeto.

Nesse caso, avalia-se os impactos utilizando mais de uma ferramenta para que uma análise de sensibilidade seja feita e os resultados tenham maior confiabilidade. Como o projeto foi pensado de acordo com os princípios da economia circular e uso de resíduos como recursos, o final de vida terá uma maior atenção, pois diferente das outras etapas da avaliação

do ciclo de vida, essa apresentará um crédito nesses impactos, que podem ser quantificados tanto no quesito ambiental quanto no quesito econômico.

1.3 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos definidos no presente trabalho, uma pesquisa descritiva experimental é feita através de um estudo de caso da Arena do Futuro construída para as Olimpíadas Rio 2016. Segundo Ventura (2007), página 384:

O estudo de caso como modalidade de pesquisa é entendido como uma metodologia ou como a escolha de um objeto de estudo definido pelo interesse em casos individuais. Visa à investigação de um caso específico, bem delimitado, contextualizado em tempo e lugar para que se possa realizar uma busca circunstanciada de informações.

Considerando a definição citada, a investigação desse caso específico viabiliza a quantificação dos impactos ambientais que ocorrem durante todo o ciclo de vida da construção. Além disso, define-se também quais são as vantagens de aplicar a economia circular no setor da construção civil e quais são os valores atrelados à essa reutilização no que diz respeito à diminuição da emissão de carbono pela não realização da etapa de produção de novos materiais.

Sendo assim, o estudo se delimita em dois principais pontos: a análise do ciclo de vida do estádio especificado e a análise dos créditos de carbono atingidos pela reutilização dos materiais já existentes na construção das escolas públicas que serão posteriormente construídas.

A hipótese pautada para esse caso é que, segundo as escolhas construtivas adotadas, é possível gerar um relatório dos impactos ambientais de todo o ciclo de vida da arena esportiva e quantificar os créditos de carbono que serão salvos pela reutilização dos materiais numa nova construção.

Os procedimentos metodológicos podem ser divididos nas seguintes etapas:

i) Revisão bibliográfica

Uma revisão bibliográfica foi conduzida a partir da leitura de documentos científicos para avaliação do estado atual da arte da temática. Foram escolhidos artigos científicos, teses e normas técnicas que apresentam conceitos importantes sobre a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e como ela pode ser aplicada no setor da construção civil ainda em fases iniciais de projeto. Além disso, outro ponto importante é definir alguns conceitos e investigar as

maneiras de integração existentes entre plataformas projetuais e plataformas específicas de ACV, bem como as metodologias por trás das mesmas.

ii) Realização das modelagens

Visando quantificar os impactos ambientais de todo o ciclo de vida da Arena do Futuro, é preciso realizar as modelagens dos projetos em plataforma BIM com o maior nível de confiabilidade possível. Para isso, essa modelagem deve ser representativa e apresentar as informações de modo coerente com o que foi feito no projeto real.

Para essa etapa foi necessária uma pesquisa aprofundada em relação aos materiais escolhidos, as dimensões da arena, suas especificações, bem como os métodos construtivos empregados. Nesse caso, como o desejo era calcular os impactos de todo ciclo de vida da arena bem como os créditos salvos de carbono na construção das escolas, foi preciso realizar a modelagem do projeto de uma escola para entender quais foram os materiais reutilizados, suas proporções e qual seria o impacto relacionado à etapa de produção desses materiais, caso os mesmos precisassem ser fabricados (a proposta era utilizar os materiais da arena para construção de quatro novas escolas idênticas na zona Oeste do Rio).

Todas as informações foram obtidas em documentos disponibilizados pela prefeitura da cidade do Rio de Janeiro (no caso, especificavam-se os materiais utilizados e o *layout* interno da escola, o *website* com o acesso ao Anexo 2 do documento publicado está nas referências do presente trabalho) e pelo *website* do Estadão, na matéria com título “Rio 2016: O Legado Olímpico”, que publicou algumas informações sobre a Arena (como imagens e *tour* virtual), além da possibilidade de visualização 3D considerando os sistemas construtivos separadamente. Com esse conjunto de informações, foi possível traçar os croquis dos projetos e, posteriormente, realizar as modelagens em plataforma BIM. Vale ressaltar que a dificuldade ao acesso dessas informações projetuais tornaram estas modelagens estimadas.

Considerando as necessidades desse estudo, a plataforma BIM escolhida foi o *Revit* da *Autodesk*, versão 2022.

iii) Criação das tabelas de quantitativos

Para obter uma lista com todos materiais utilizados na construção da arena bem como os materiais utilizados na escola, é preciso realizar uma tabela de quantitativos. Como a plataforma BIM foi utilizada nesse estudo, é possível exportar esse tipo de informação com as modelagens dos projetos prontos em formato Excel.

Com as informações dispostas, é possível prever a quantidade de materiais que podem ser reutilizados da arena e aqueles que devem ser fabricados para a construção das escolas.

Além disso, é possível listar todos os materiais da arena para posterior avaliação do ciclo de vida da mesma em ferramentas que utilizem planilhas ou o próprio arquivo BIM como dados de entrada.

iv) Realização da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Os dados utilizados na Avaliação do Ciclo de Vida (ou seja, as bases de dados utilizadas nas avaliações) são aqueles coletados durante a fase de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), que alimentam todas as fases subsequentes de estudo de ACV, que devem ser feitas de acordo com as definições do objetivo e escopo do estudo (BUENO, 2014). Ainda segundo Bueno (2014), esse conjunto de dados podem ser específicos, médios ou genéricos. Na prática, é comum encontrar combinações entre eles. Geralmente, as bases de dados apresentam os aspectos ambientais de todo o sistema de produto, sendo possível quantificar os impactos diretos e os indiretos relacionados com cada componente.

Após a realização dessa Avaliação do Inventário do Ciclo de Vida, é preciso definir um modelo de caracterização dentre os diversos existentes para analisar esses resultados obtidos pela AICV. Segundo as ferramentas escolhidas para esse estudo de caso, a metodologia do TRACI (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts*) será utilizada, uma vez que foi desenvolvida na América do Norte, pela *United States Environmental Protection Agency (US EPA)*, região onde os softwares utilizados foram desenvolvidos. Maiores informações sobre essa metodologia podem ser encontradas na revisão da literatura do presente trabalho.

Os impactos que foram analisados segundo a metodologia escolhida são: potencial de aquecimento global, potencial de acidificação, potencial de efeitos respiratórios na saúde humana, potencial de depleção do ozônio, potencial de formação de fumaça e potencial de eutrofização. Uma das ferramentas traz ainda o consumo de combustíveis fósseis (*Athena IE*).

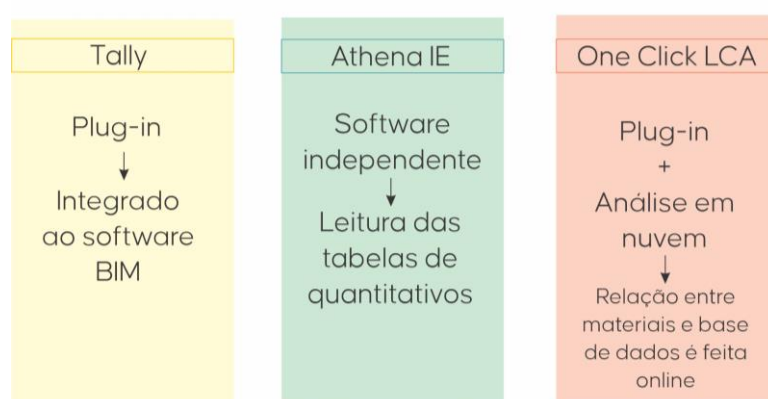
Para esse estudo, as bases de dados utilizadas foram: banco de dados do GaBi, banco de dados do Instituto *Athena* e banco de dados do *Ecoinvent*. Além deles, algumas informações de Declarações Ambientais de Produtos (EDP) da América Latina e da América do Norte foram utilizadas.

As duas primeiras bases de dados são da América do Norte, as declarações ambientais de produtos apresentam valores da América Latina ou da América do Norte. Os mesmos foram escolhidos devido ao ferramental selecionado para o estudo de caso.

Para realizar essas avaliações, três softwares foram utilizados visando estabelecer uma comparação de resultados. São eles: *Tally* (*plug-in* do *Revit*, análises semi-automáticas), *Athena Impact Estimator* (*software* independente, faz as leituras das tabelas de quantitativos exportadas do *Revit*) e *One Click LCA* (*plug-in* do *Revit* é responsável por fazer as leituras das quantidades, mas é na nuvem que as relações/avaliações são feitas). Mais informações sobre cada um deles serão apresentadas na revisão da literatura do presente estudo. Em todos os casos, é preciso relacionar os tipos de materiais do projeto com os materiais das bases de dados utilizada. O processo de cálculo nos três casos é semi-automático, pois em todos é preciso inserir manualmente as relações quanto ao tipo de material do componente. No *One Click LCA*, entretanto, é possível realizar uma análise automática se ignorada a etapa de conferência das relações estabelecidas pelo próprio ferramental entre os componentes do projeto e os componentes das bases de dados.

A relação entre as ferramentas que foram utilizadas e o tipo de integração com a ferramenta BIM pode ser conferida na Figura 1 a seguir.

Figura 1 - Tipo de integração BIM-ACV das ferramentas



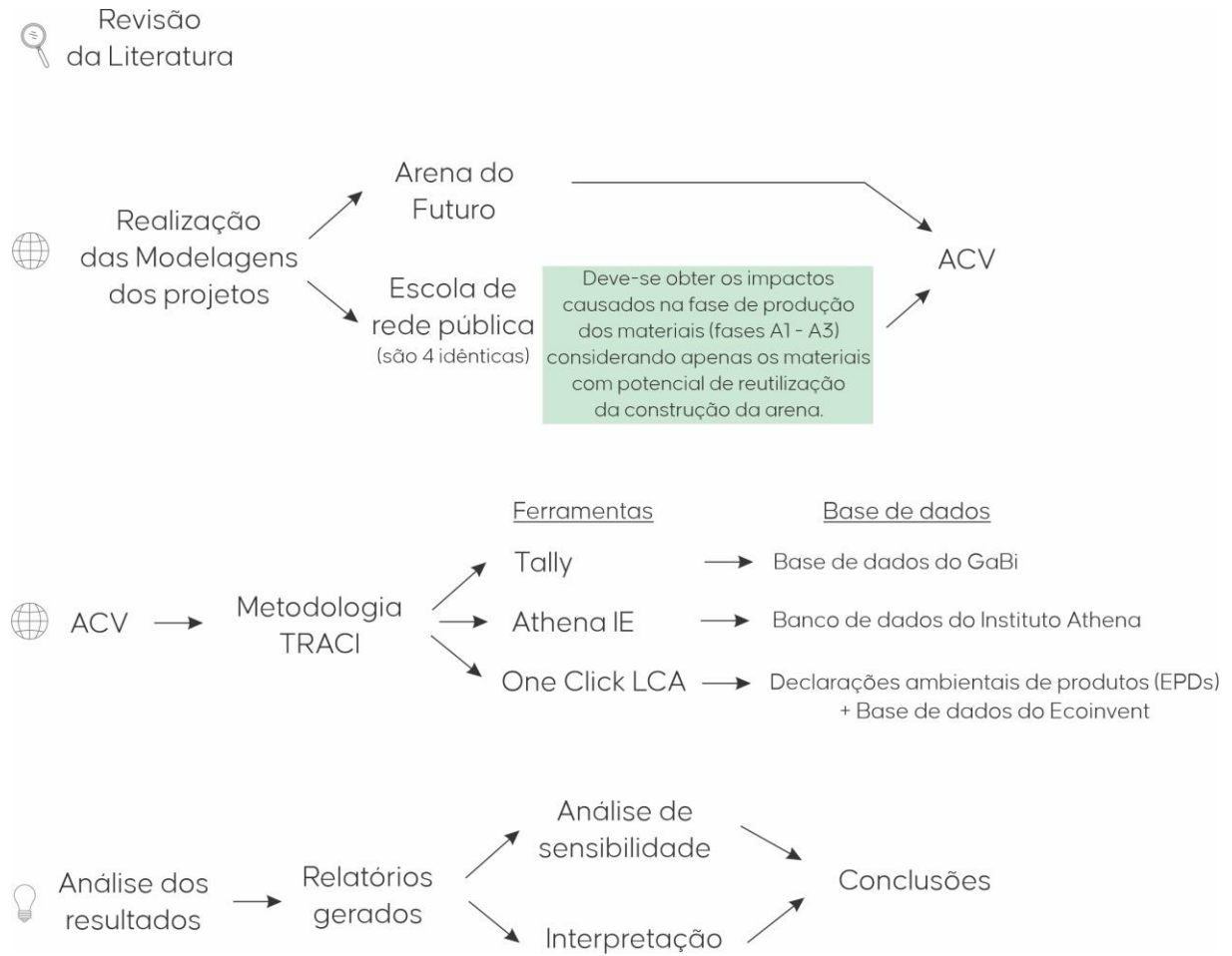
Fonte: Autoria Própria (2022)

v) Discussão dos resultados

Os resultados podem ser exportados das ferramentas e analisados em forma de gráficos e/ou tabelas. Para comparação dos mesmos, foi realizada uma análise dos três resultados obtidos para cada impacto, a média entre esses valores e o desvio padrão a fim de se estabelecer um nível de confiabilidade dos dados obtidos.

Um resumo dessa metodologia pode ser conferido conforme esquema apresentado na Figura 2 a seguir.

Figura 2 - Resumo ilustrativo da metodologia a ser adotada



Fonte: Autoria Própria (2022)

2. REVISÃO DA LITERATURA

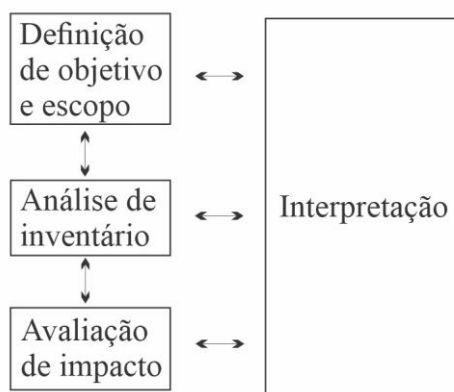
Para descrever o estado atual da arte, a revisão bibliográfica do presente trabalho foi dividida entre tópicos importantes de conhecimento. Primeiramente, as plataformas e metodologias existentes são expostas separadamente e, após isso, é apresentada a integração das mesmas, que pode ser realizada de diversas formas, com auxílio de diferentes ferramentas.

2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

Em relação à Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), duas são as normas técnicas que devem ser consideradas: NBR ISO 14040 (2004) e NBR ISO 14044 (2009). A primeira refere-se aos princípios gerais e estrutura, enquanto a segunda refere-se aos requisitos e orientações.

Segundo a NBR ISO 14040 (2004), a ACV é uma técnica utilizada para avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto mediante: compilação de um inventário de entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto; avaliação dos impactos ambientais potenciais associados a essas entradas e saídas e interpretação dos resultados das fases de análise de inventário e de avaliação de impactos em relação ao objetivo de estudo.

A avaliação do ciclo de vida deve incluir algumas etapas, são elas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados (NBR ISO 14040, 2004). A Figura 3 ilustra as mesmas e como elas se relacionam. Além disso, de acordo com a aplicação pretendida algumas interpretações podem ser feitas. Exemplos de aplicações das avaliações são: desenvolvimento e melhoria do produto, planejamento estratégico, elaboração de políticas públicas, *marketing*, entre outros.

Figura 3 - Estrutura da avaliação do ciclo de vida**Estrutura da avaliação do ciclo de vida**

Fonte: Adaptado de NBR14040 (2004)

Sobre as fontes de dados utilizadas num estudo de ACV, é possível obter resultados de diferentes seleções. Os tipos de dados a serem coletados dependem diretamente do objetivo e escopo do estudo e podem ser coletados nos locais de produção associados aos processos elementares dentro da fronteira do sistema, ou podem ser obtidos ou calculados a partir de outras fontes (NBR 14044, 2009). Dessa forma, segundo a mesma norma, todos os dados podem incluir uma mistura de dados medidos, calculados ou estimados.

A NBR ISO 14044 (2009) descreve de maneira detalhada a estrutura metodológica para a ACV. Começando por definição de objetivo e escopo, a norma define uma série de itens que devem ser declarados de forma objetiva, incluindo aplicações pretendidas, razões para realização do estudo, público-alvo que se pretende comunicar, o sistema de produto a ser estudado, as funções do sistema de produto, a unidade funcional, a fronteira do sistema, entre outros.

Ainda segundo a mesma norma técnica, algumas especificações são feitas referentes à análise de inventário do ciclo de vida (ICV). Os dados qualitativos e quantitativos a serem incluídos no inventário devem ser coletados para cada processo elementar incluído na fronteira do sistema. Os dados coletados (medidos, calculados ou estimados) são utilizados para quantificar as entradas e saídas de um processo elementar.

Depois de definir essas duas primeiras etapas, a NBR ISO 14044 (2009) define também a etapa de avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV). Diferente das outras técnicas, essa abordagem é relativa baseada em uma unidade funcional. A AICV pode utilizar informações coletadas de outras técnicas, tais como: avaliação de desempenho ambiental, avaliação de impacto ambiental e avaliação de risco. Esta fase deve ser planejada visando

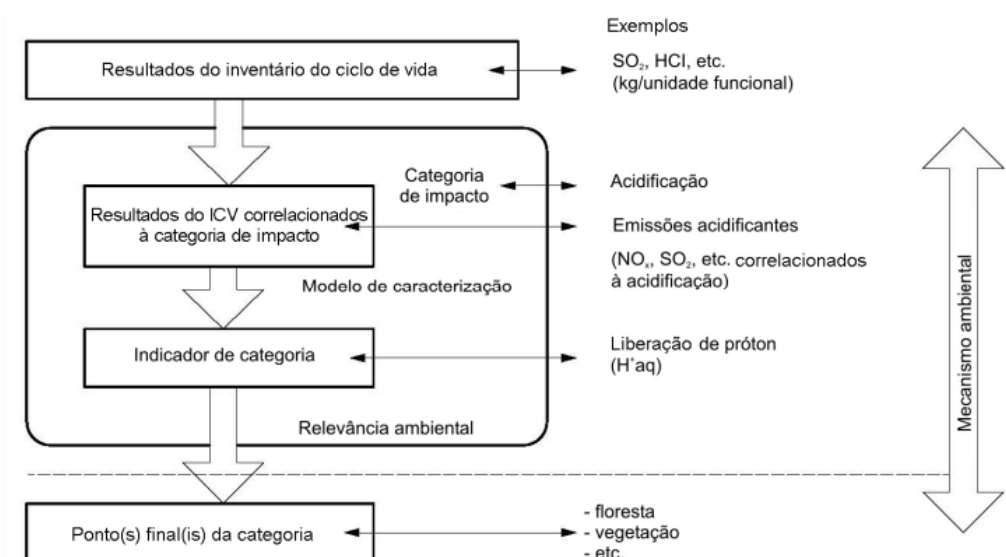
satisfazer o objetivo e escopo de um estudo de ACV. Além disso, a fase de AICV deve ser coordenada com outras fases de ACV para levar em conta possíveis omissões e fontes de incertezas. Segundo a NBR ISO 14044 (2009), essas incertezas são relacionadas à:

- Se a qualidade dos dados e resultados do ICV é suficiente para conduzir a AICV de acordo com a definição do objetivo e escopo do estudo;
- Se a fronteira do sistema e decisões sobre corte de dados foram suficientemente analisadas criticamente para assegurar a disponibilidade dos resultados de ICV necessários para o cálculo dos resultados de indicadores para a AICV;
- Se a relevância ambiental dos resultados de AICV é reduzida devido ao cálculo da unidade funcional do ICV.

Ainda são definidos alguns elementos obrigatórios na etapa de AICV. São eles: seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização; correlação dos resultados do ICV às categorias de impacto selecionadas (classificação) e cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (caracterização) (NBR ISO 14044, 2009).

A Figura 4 exemplifica o que são os indicadores de categoria, parte primordial da análise de impacto.

Figura 4 - Indicadores de categoria

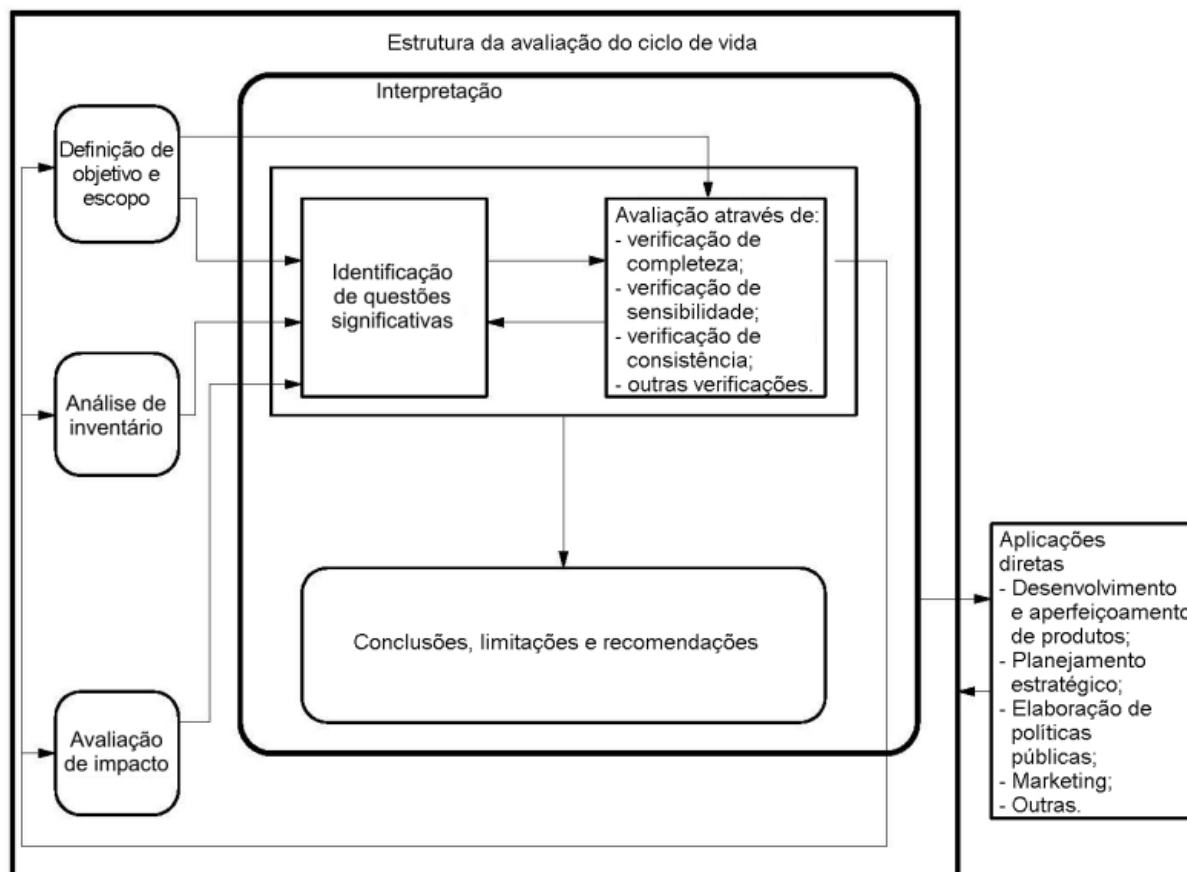


Fonte: NBR14044 (2009)

Finalmente, a norma NBR 14044 (2009) especifica a etapa de interpretação do ciclo de vida. Essa fase é dependente das outras realizadas e inclui diversos elementos, como identificação das questões significativas com base nos resultados das fases de ICV e AICV;

avaliação do estudo, considerando verificações de completeza, sensibilidade e consistência; conclusões, limitações e recomendações. O esquema representado na Figura 5 ilustra esses itens.

Figura 5 - Elementos da fase de interpretação relacionado às etapas anteriores



Fonte: NBR14044 (2009)

Além das normas técnicas citadas até o momento, existe uma outra fonte de informações sobre padrões de produção e consumo mais sustentável. A Comissão Europeia comprometeu-se a produzir um manual sobre as melhores práticas em ACV existentes com foco nos profissionais que lidam com suporte a decisões ambientais relacionadas a produtos, recursos e gestão de resíduos, esse documento recebeu o nome de *International Reference Life Cycle Data System* (ILCD) e fornece orientações técnicas para estudos detalhados de avaliação do ciclo de vida, com bases técnicas para definir critérios, guias e ferramentas simplificadas.

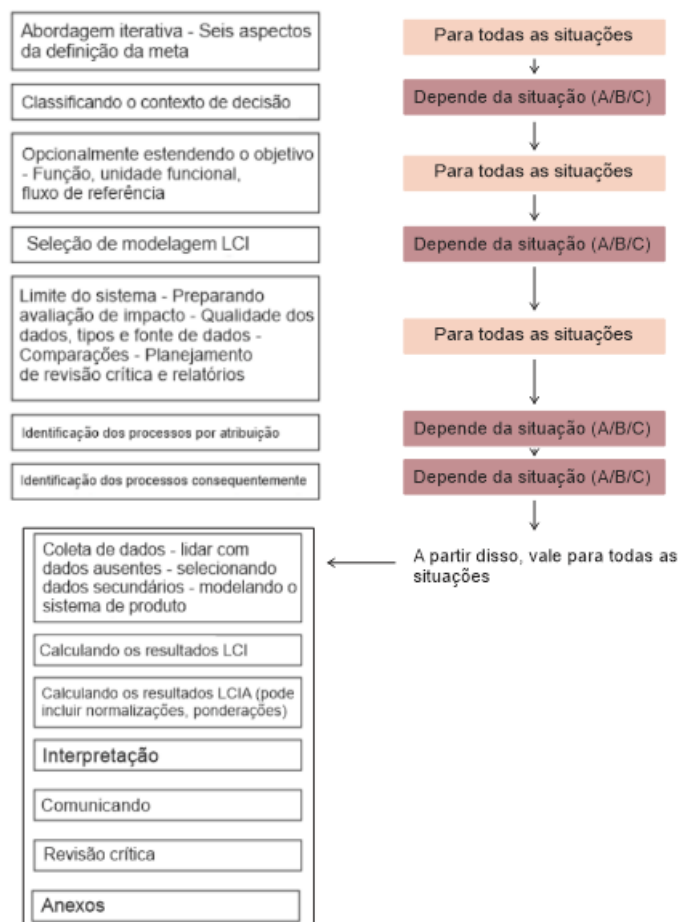
Com base na análise de última geração das melhores práticas, o ILCD foi desenvolvido para fornecer orientação abrangente e aplicável. Com base nisso, o documento considera o que é exposto nas normas já apresentadas com detalhes substanciais para

esclarecer ainda mais as disposições das mesmas a partir da perspectiva das três principais situações de objetivo encontradas nos estudos de ACV:

- Situação A (apoio à decisão em nível micro): são aquelas consideradas como tendo apenas consequências limitadas e sem consequências estruturais fora do contexto de decisão, ou seja, não alteram a capacidade de produção disponível, pois os efeitos são muito pequenos para superar o limite de causar as consequências de grande escala no sistema de fundo ou em outras partes da tecnosfera (EUROPEAN COMMISSION, 2011);
- Situação B (apoio à decisão em nível meso/macro): essa situação é a que fornece apoio em nível estratégico (por exemplo, estratégias de matérias-primas, cenários tecnológicos, opções de políticas, etc.). Presume-se que essas decisões tenham consequências estruturais fora do contexto de decisão, ou seja, elas alteram a capacidade de produção disponível. A decisão analisada por si só resulta em consequências em larga escala no sistema de fundo ou em outras partes da tecnosfera (EUROPEAN COMMISSION, 2011);
- Situação C (contabilidade): documentação puramente descritiva do sistema sob análise, sem estar interessado em qualquer potencial consequência em outras partes da economia. Esta situação se subdivide em dois subtipos: C1, que inclui benefícios existentes fora do sistema analisado e C2 que não o faz (EUROPEAN COMMISSION, 2011).

O sistema proposto pelo ILCD é apresentado a seguir na Figura 6. Nesse esquema é possível identificar as fases em que a escolha da situação é necessária para cálculos dos resultados. Na figura, “LCIA” equivale à “AICV” e “LCI” é o mesmo de “ICV”.

Figura 6 - Etapas para realização da ACV e integração com as situações descritas



Fonte: Adaptado de ILCD HANDBOOK (2011)

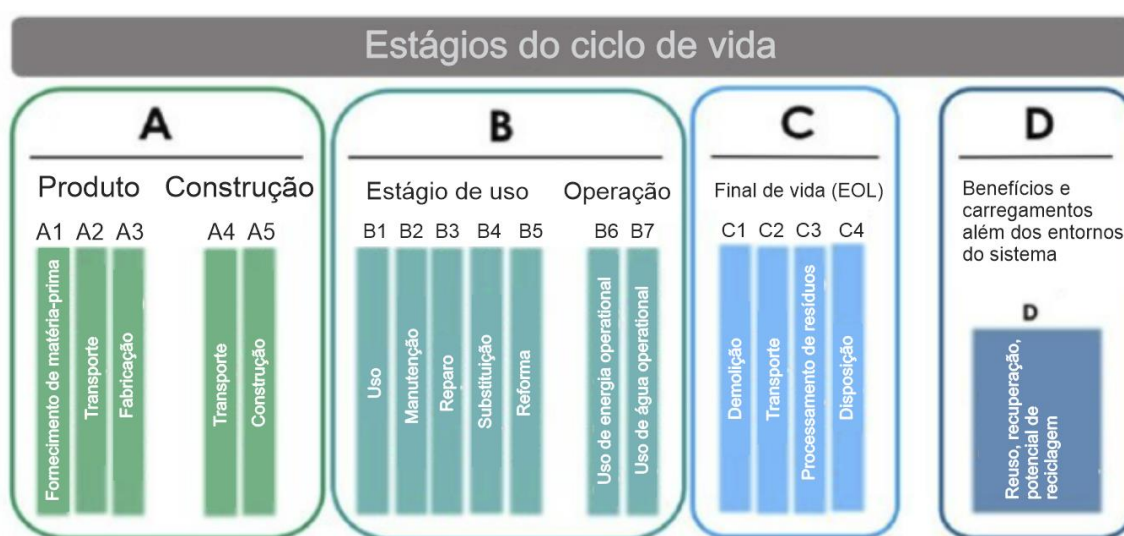
Dessa forma, os documentos citados abrangem todos os principais conceitos necessários para entendimento sobre avaliação do ciclo de vida e suas principais etapas. Cabe discutir em seguida quais são as formas de integração entre essa metodologia e a plataforma BIM, inserindo os conceitos apresentados no setor da construção civil, principalmente em etapas iniciais de projeto.

Apesar de ser importante e promissor utilizar a ACV nas etapas iniciais de projeto, existem duas abordagens que devem ser consideradas para avaliações: uma “de baixo para cima” que representa a avaliação que começa pelos materiais que serão utilizados na construção ainda inexistente e outra “de cima para baixo” que tem como ponto de partida o edifício já pronto para avaliação, visando futuras melhorias (ERLANDSSON; BORG, 2003).

Quando a avaliação diz respeito ao setor da construção, existe uma norma internacional que avalia os principais parâmetros a serem considerados. A EN 15978 (2011) é nomeada como “Sustentabilidade das obras de construção - avaliação do desempenho ambiental dos edifícios - método de cálculo” e é de extrema importância para os profissionais

do setor da Construção Civil mesmo não pertencendo ao cenário nacional, pois é seguida por países que aplicam e já possuem maturidade nas práticas discutidas nesse trabalho. Segundo ela, as etapas a serem consideradas numa ACV de um edifício podem ser resumidas como na Figura 7 a seguir.

Figura 7 - Etapas de uma ACV de edifícios



Fonte: Adaptado de EN 15978 (2011)

A norma citada define:

- A descrição do objeto de avaliação;
- A fronteira do sistema que se aplica ao nível do edifício;
- O procedimento que deve ser utilizado para a análise de inventário;
- A lista de indicadores e processos para os cálculos destes indicadores;
- Os requerimentos para apresentação dos resultados nos relatórios e meios de comunicação;
- Os requerimentos dos dados necessários para cálculos.

Os indicadores listados pela norma (que o quarto tópico acima se refere) são: potencial de aquecimento global, potencial de destruição da camada de ozônio, potencial de acidificação do solo e da água, potencial de eutrofização, potencial de formação dos oxidantes fotoquímicos de ozônio troposférico, potencial de destruição de recursos abióticos dos elementos ou de combustíveis fósseis, além das análises de uso energético e uso de recursos naturais.

Além de definir os indicadores, é preciso entender como cada impacto prejudica a humanidade e o planeta. A AICV, ou seja, Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida, desempenha uma tarefa fundamental na ACV por considerar a integração desses impactos com os escopos regionais. Segundo Bueno (2014), existem diversas metodologias que se originam em diferentes países (majoritariamente na Europa) e apresentam técnicas para avaliação de impacto do ciclo de vida. Alguns exemplos são: CML, Eco-Indicator 99, EDIP97-EDIP2003, EPS 2000, Impact 2002+, LIME, LUCAS, ReCiPe, Swiss Ecoscarcity 07, TRACI, MEEuP, Impact World +, entre outros.

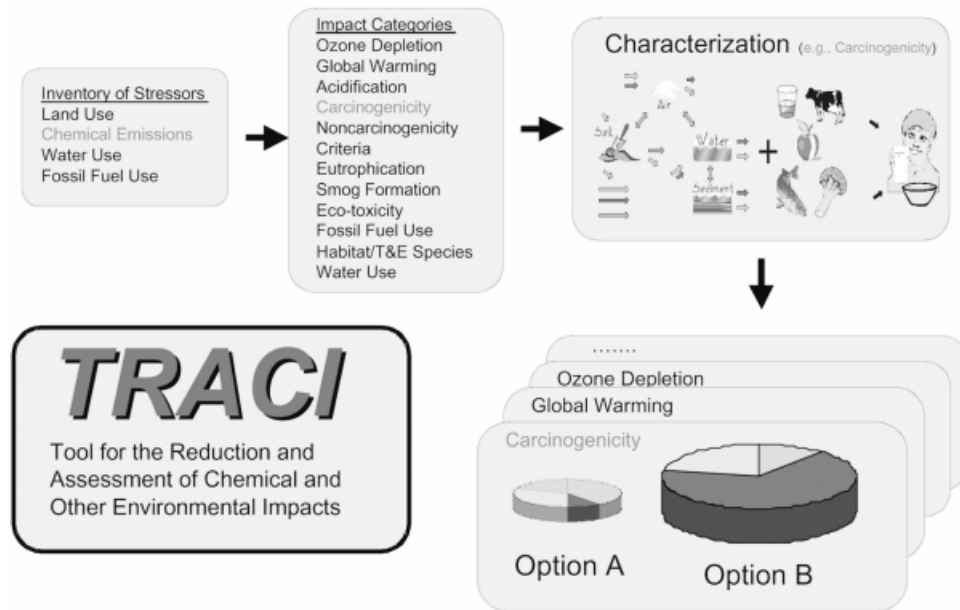
Este estudo usa a metodologia TRACI para realização da Avaliação do Ciclo de Vida. O nome da metodologia se dá pelo significado da mesma: *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts*. No desenvolvimento do TRACI, as categorias de impacto foram selecionadas, as metodologias disponíveis foram revisadas e as categorias foram priorizadas (BARE, 2002). Ainda, segundo Bare (2002), as categorias foram caracterizadas no nível intermediário por razões que incluem um nível mais alto de consenso social sobre as certezas da modelagem neste ponto de cadeia de causa e efeito.

Uma das metodologias mais populares nos EUA foi desenvolvida por holandeses que lançavam suas metodologias na Europa (HEIJUNGS et al., 1992). Devido a essa necessidade, começou o processo de desenvolvimento de uma ferramenta que permitisse a sofisticação, a abrangência e a aplicabilidade desejada para os EUA. O resultado dessa ferramenta para redução e avaliação de impactos foi o TRACI (BARE et al., 2002).

Um exemplo da importância do desenvolvimento dessa metodologia: antes do desenvolvimento do TRACI, muitos pesquisadores usavam medidas simples de toxicidade, ou procedimentos de pontuação com base na persistência e bioacumulação para fornecer indicadores de toxicidade humana (HEIJUNGS et al., 1992). A saída do TRACI incorpora um modelo multimídia seguido por modelagem de exposição humana, fator este que faz essa metodologia se tornar mais sofisticada (BARE, 2002).

O inventário de estressores, bem como as categorias de impacto e um exemplo de caracterização podem ser vistos na Figura 8 a seguir.

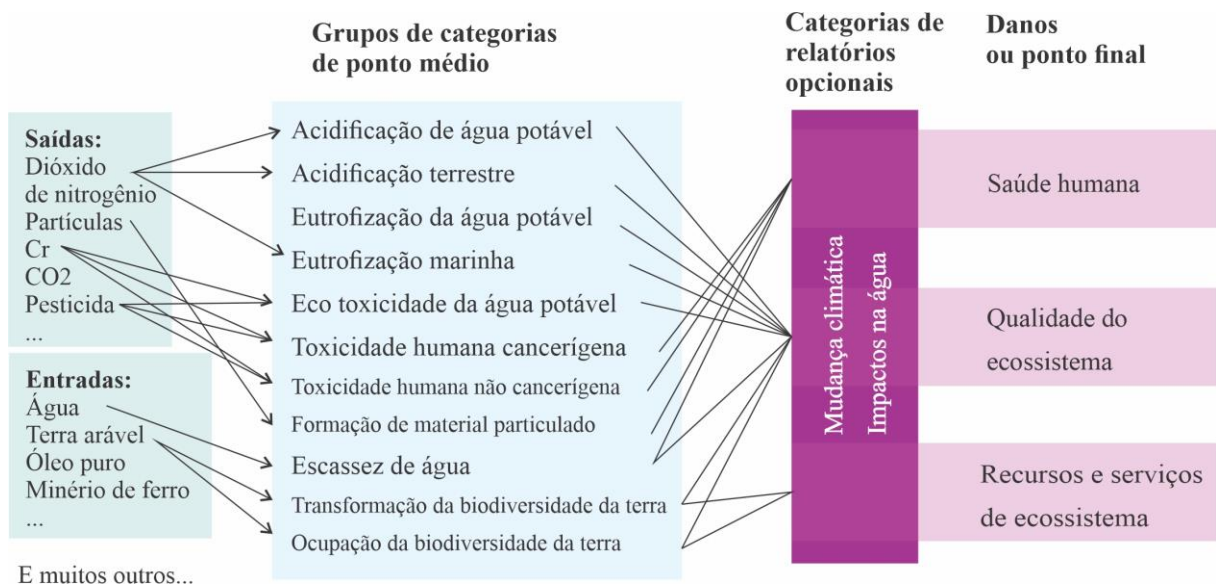
Figura 8 – Metodologia TRACI



Fonte: Bare, 2002

Além da metodologia TRACI, outra que pode ser exemplificada é a metodologia *Impact World +* (2012), que recebe sua importância por ser uma cooperação global. Segundo essa metodologia, é possível analisar fatores que não são dependentes de indicadores regionais e indicadores regionais (devido à necessidade de regionalização da AICV). Os indicadores regionais são tais quais representados na Figura 9.

Figura 9 - Impactos regionais de uma AICV



Fonte: Adaptado de Bulle et al., 2012.

Segundo Bueno (2014), as metodologias, num contexto geral, oferecem fatores de caracterização genéricos, com condições médias para uma região específica, sem levar em consideração a variabilidade dos impactos. A metodologia *Impact World+* atende a regionalização com as incertezas inclusas, permitindo a avaliação de qualquer emissão/consumo de recursos que seja georreferenciado (BUENO, 2014).

Para um entendimento mais completo sobre as metodologias existentes e o que cada uma leva em consideração, é possível observar o Quadro 1 a seguir, retirado do manual de LCI do software *OpenLCA*, escrito por Acero et al. (2016). Percebe-se que alguns fatores são abordados com mais frequência enquanto outros possuem lacunas em comum. Cabe atenção especial à metodologia TRACI, que será utilizada no presente trabalho.

Quadro 1 – Categorias de impacto abrangidas por cada metodologia

METHODS	Acidification	Climate change	Resource depletion	Ecotoxicity	Energy Use	Eutrophication	Human toxicity	Ionising Radiation	Land use	Odour	Ozone layer depletion	Particulate matter/ Respiratory inorganics	Photochemical oxidation
CML (baseline)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	-	-	✓	-	✓
CML (non baseline)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓
Cumulative Energy Demand	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
eco-indicator 99 (E)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-
eco-indicator 99 (H)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-
eco-indicator 99 (I)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-
Eco-Scarcity 2006	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ILCD 2011, endpoint	✓	✓	-	-	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
ILCD 2011, midpoint	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
ReCiPe Endpoint (E)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
ReCiPe Endpoint (H)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
ReCiPe Endpoint (I)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
ReCiPe Midpoint (E)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
ReCiPe Midpoint (H)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
ReCiPe Midpoint (I)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
TRACI 2.1	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	-	-	✓	✓	✓
USEtox	-	-	-	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	-

Table 1: Availability of impact categories per method. ✓ represents that the impact category is contained in the correspondent method and - that not.

Fonte: Acero, Rodríguez e Changelog (2016)

O setor da construção civil pode impactar em todas as categorias apresentadas, uma vez que desde a produção até a disposição dos materiais faz-se necessário o consumo de recursos e energia. Além disso, considerando o fim de vida dos materiais construtivos, é preciso utilizar locais para descarte, o que pode acarretar em problemas ambientais de

diversos níveis. Outro ponto importante é o fator regional e a cultura de determinada sociedade. É preciso conhecer as tecnologias construtivas para relacionar os impactos que devem ser considerados nas avaliações do estudo.

Os impactos discutidos são apresentados ao final do trabalho considerando o contexto brasileiro de acordo com as normas nacionais apresentadas. As etapas para essa realização são descritas adiante.

2.1.1 A ECONOMIA CIRCULAR NO FIM DE VIDA DOS COMPONENTES CONSTRUTIVOS

Os materiais de construção civil precisam de uma gestão de resíduos no final de sua vida. Gonçalves (2012) compilou as informações mais importantes sobre os aspectos normativos e legais da gestão de resíduos da construção civil (RCC). Segundo os autores, atualmente, a resolução no. 307/2002 do CONAMA é o principal instrumento que norteia o Brasil rumo a essa gestão ambiental adequada. A partir disso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei no. 12.305/10), sancionada em agosto de 2010, tornou-se um marco regulatório na questão ambiental que reforça a tese de sustentabilidade da Resolução 307/02.

Os principais aspectos dessa resolução (307/02 do CONAMA) são: definição e princípios, classificação e destinação e prazos estabelecidos. Informações sobre estes três pilares podem ser observados a seguir:

- *Definição e Princípios:*
 - Definição:
 - Os RCC são provenientes de construções, demolições, reformas, reparos e preparação e escavação do solo;
 - Princípios:
 - Priorizar a não-geração de resíduos e proibir disposição final em locais inadequados, como aterros sanitários, em bota-foras, terrenos baldios, corpos d'água, encostas e áreas protegidas por lei;
- *Classificação e destinação:*
 - Classe A: alvenaria, concreto, argamassas e solos;
 - Destinação: reutilização ou reciclagem com uso na forma de agregados, além da disposição final em aterros licenciados;
 - Classe B: madeira, metal, plástico e papel.
 - Destinação: reutilização, reciclagem ou armazenamento temporário;
 - Classe C: produtos sem tecnologia disponível para recuperação (gesso, por exemplo).

- Destinação: conforme norma técnica específica;
- Classe D: resíduos perigosos (tintas, óleos, solventes, etc.), conforme NBR 10004:2004 (Resíduos Sólidos – Classificação);
 - Destinação: conforme norma técnica específica. A Resolução no. 348/2002 incorpora os resíduos de amianto a esta classe;
- *Prazos estabelecidos:*
 - Plano Integrado e Programa Municipal:
 - Devem estar elaborados até janeiro de 2004 e implementados até julho de 2004;
 - Projetos de Gerenciamento:
 - Devem ser apresentados e implementados a partir de janeiro de 2005.

Como pode ser observado nos princípios dessa resolução, conceitos da economia circular devem ser incorporados ao final do ciclo de vida desses componentes. Priorizar a não-geração de resíduos é um ponto chave que incentiva a reutilização dos materiais. Além disso, a classe B dos resíduos, quanto a sua disposição, traz soluções como reutilização, reciclagem e armazenamento temporário para final de vida. Outro ponto a se considerar é que a classe A apresenta soluções como reutilização dos componentes na forma de agregados, solução essa que pode ser adotada visando estender a vida dos componentes já utilizados.

O fim de vida dos elementos é uma das etapas da ACV. Como foi visto nas definições acima, essa etapa é de suma importância, pois pode utilizar resíduos da construção como matéria-prima, fechando o ciclo econômico, que deixa de ser linear e passa a ser circular. Apresentados os conceitos legais, outros pontos podem ser discutidos. Segundo Mattaraia (2019), página 12:

Considerar a desmontagem do edifício desde o início do desenvolvimento do projeto é fundamental para obter melhores resultados na reutilização ou reciclagem dos materiais, além de reduzir o consumo de matérias-primas para a produção de novos materiais, o que, conseqüentemente, contribui para o desenvolvimento sustentável do setor.

Segundo a mesma autora, muitos edifícios são demolidos porque as necessidades mudam e não se adequam mais às necessidades atuais; parte destes materiais demolidos são considerados entulhos e são despejados em aterros ou até em locais ilegais. Essa etapa deve receber atenção especial pelo potencial impacto positivo que pode causar caso os materiais frutos da desconstrução sejam reutilizados. O projeto pensado segundo a desmontagem pode ser feito com auxílio da plataforma BIM, pois é possível reunir informações em um único

modelo, atendendo a complexidade do projeto e seu plano de desmontagem futuro (MATTARAIA, 2019).

Segundo a revisão do estado da arte de Soust-Verdaguer et al. (2017), poucos estudos realizaram em suas avaliações o processo de final de vida (apenas 3 de 11); na etapa “D”, que representa a etapa de reciclagem dos materiais, a diferença é ainda mais acentuada: nenhum dos estudos apresentou estes resultados. Percebe-se, dessa forma, que os trabalhos na área têm um grande foco na fase de produção e uso, mas pouco, ou quase nada, no final do ciclo de vida e no tratamento dos materiais de resíduos da construção.

Como foi visto, uma solução emergente no setor da construção civil é a implementação da economia circular para o fim de vida dos componentes construtivos. Essa solução aumenta a eficiência do uso de recursos, minimiza a geração de resíduos e melhora o equilíbrio entre economia, meio ambiente e sociedade (MUNARO et al., 2022). Para essa implementação, a estrutura dos “9Rs” característica dessa economia deve ser seguida segundo a ordem de prioridade apresentada na Figura 10.

Figura 10 - Princípios da economia circular

Uso e fabricação mais inteligente de produtos	R0 Recusar	Fazer o produto redundante, abandonando sua função através da oferta da mesma função com um produto diferente
	R1 Repensar	Tornar o uso desses produtos mais intenso
	R2 Reduzir	Aumentar a eficiência na produção ou uso consumindo menos materiais de recursos naturais
Extensão da vida útil do produto e suas partes	R3 Reutilizar	Reuso por diferentes consumidores de produtos que seriam descartados, mas estão em boas condições
	R4 Reparar	Reparar e manter produtos com algum defeito para que possa ser utilizado na sua função original
	R5 Reformar	Restaurar um produto antigo e trazer novidades à ele
	R6 Remanufaturar	Usar partes de um produto descartado num novo produto com a mesma função
	R7 Reaproveitar	Usar partes de um produto descartado num novo produto com uma função diferente
Aplicação útil de materiais	R8 Reciclar	Processar materiais para obter a mesma quantidade ou quantidade menor
	R9 Recuperar	Incinerar o material com recuperação de energia

Fonte: Adaptado de Potting et al. (2017)

Algumas estratégias para a implementação da economia circular foram definidas por Guerra et al. (2021). Dentre elas, pode-se citar a utilização de resíduos como novos recursos;

extensão da vida útil dos produtos, garantindo que os materiais sejam utilizados por mais tempo através do aumento da qualidade dos mesmos; revenda de materiais usados; tratamento de materiais antigos para que sejam reutilizados sem prejuízos da qualidade, entre outras medidas.

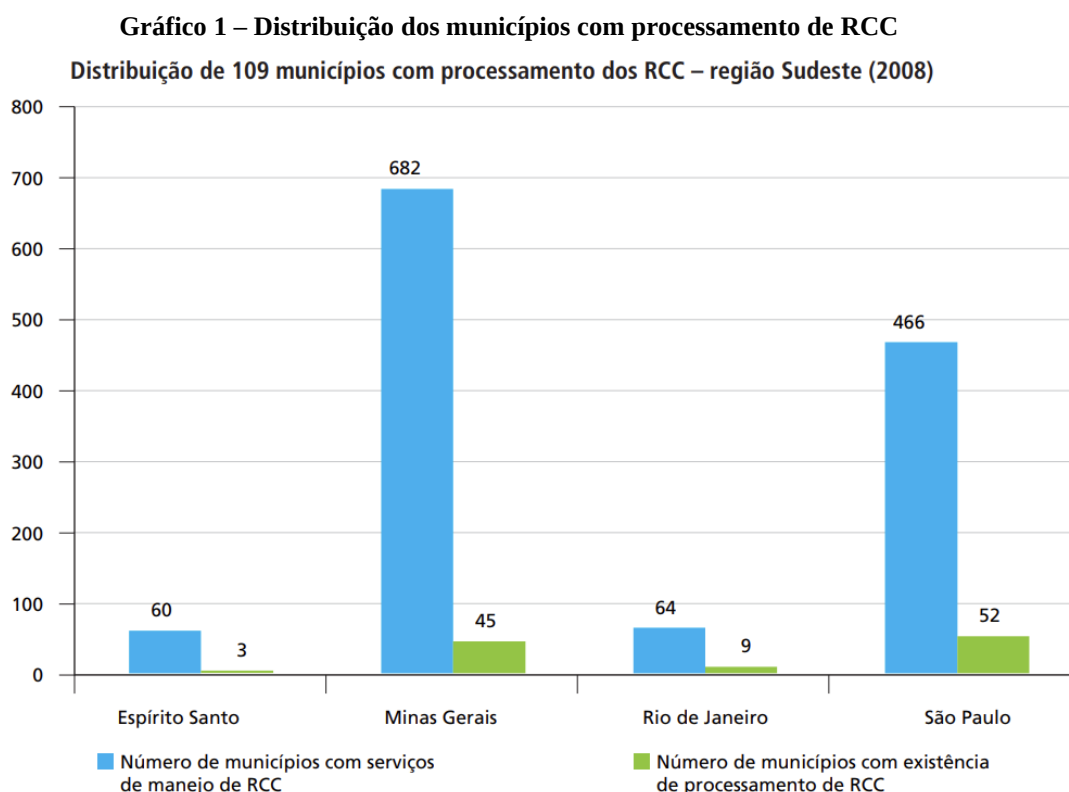
Considerando as fases iniciais de projeto e a metodologia BIM, é possível implementar essas estratégias ainda na concepção projetual. Guerra et al. (2021) também definiram maneiras de projetar com foco na economia circular, como, por exemplo, utilizando o projeto para desmontagem, com peças que possam ser reaproveitadas com facilidade e sem muitas perdas; utilizando projeto para modularidade, possibilitando o alcance de um sistema onde os elementos e materiais possuem funcionalidades diferentes; especificando os materiais que devem ser reutilizados e reciclados ainda no projeto; realizando um projeto que vise a remanufatura dos componentes, entre outras alternativas.

Entretanto, por maior que seja a importância de analisar a “circularidade” de elementos construtivos, esse feito ainda é de difícil padronização e avaliação. Khadim et al. (2022) organizou as maneiras mais adotadas de medir essa circularidade e indicou os pontos específicos de cada uma delas. Primeiramente, alguns grupos de indicadores podem ser identificados e, dentro de cada um deles, algumas análises podem ser realizadas. Todos os indicadores citados pelo estudo partem de um ponto inicial, ou seja, primeiramente avalia-se a circularidade do material (MCI) e, a partir disso, avalia-se a circularidade do edifício (BCI). Dependendo das considerações feitas, graus de importância de sistemas construtivos e condições regionais, os resultados finais dos indicadores existentes no mercado podem mudar. Os parâmetros que sofrem alterações são: fatores econômicos, massa de material, tempos de vida considerados, camadas de análise, detalhamento analisado, estimativas, entre outros.

Como foi dito, quase todos os indicadores/ferramentas têm como ponto de partida o BCI. Cottafova e Ritzen (2021) disponibilizaram uma maneira prática de encontrar esse indicador em seus estudos. Para o cálculo, é preciso partir do indicador de circularidade do material (MCI) e do fator de desmontagem (F_i), que varia de 0 a 1 do pior caso para o melhor caso, como conexões químicas de difícil desmontagem para conexões parafusadas no melhor cenário. A partir disso, o indicador de circularidade do produto pode ser encontrado (PCIp), que é a multiplicação dos dois fatores citados anteriormente. A terceira etapa consiste em calcular o indicador de circularidade do sistema (SCI), utilizando o PCIp encontrado multiplicado pelas massas de cada material. Com isso é possível encontrar o BCI, que é a multiplicação desse último fator (SCI) pelo nível de importância de cada componente (variando essa escala de 0 a 1).

A Arena do Futuro foi projetada de acordo com os princípios da economia circular e, por conta disso, toda sua estrutura foi pensada para atingir altos níveis de circularidade. Como foi dito no parágrafo anterior, os fatores utilizados para calcular a circularidade dos edifícios levam em consideração a forma que os componentes são ligados entre si. A condição de sistemas parafusados é o melhor cenário para os cálculos. A arena, mesmo quando levados em conta os materiais feitos de concreto, evita a utilização de componentes de ligação química (como argamassas) para possibilitar a desmontagem e reutilização dos mesmos.

No Brasil, atualmente, existe uma grande dificuldade dos municípios de realizar uma gestão de resíduos, principalmente pela falta de recursos e pouca capacidade técnica da limpeza pública, coleta seletiva, organização e tratamento adequados (NUNES, 2004). O Gráfico 1 mostra um pouco da distribuição dos municípios com processamento de RCC, observa-se que, dos 92 municípios do Rio de Janeiro, apenas 73 possuem alguma medida de disposição de RCC.



Fonte: IBGE (2010)

Como pode ser visto, quando existe segregação e central de reciclagem, em alguns casos, essa central não estava em operação no momento da coleta de informações. Além disso, a disposição em alguns casos não está facilitada, fator este que faz com que grande parte da população opte por dispor esses materiais em locais a céu aberto, ilegalmente.

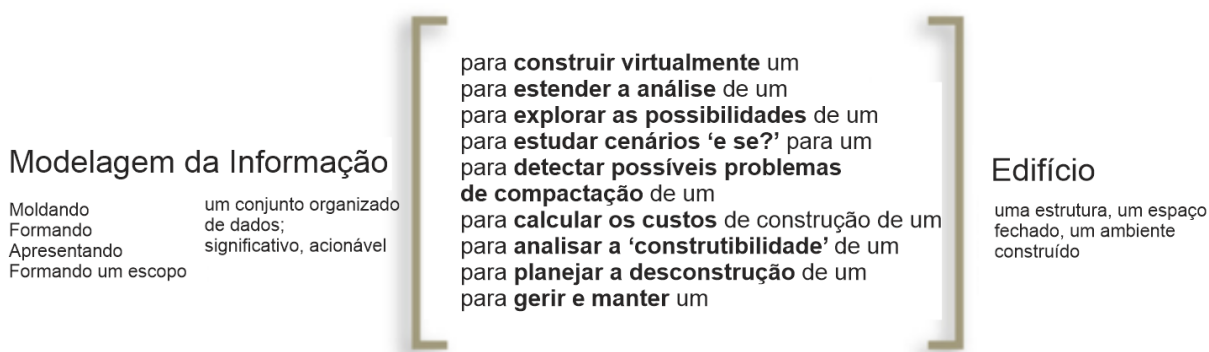
2.2 BUILDING INFORMATION MODELLING (BIM)

Segundo Succar (2009), o *Building Information Modelling* (BIM), ou Modelagem da Informação da Construção, é um domínio de conhecimento expansivo dentro da Arquitetura e da Indústria da Engenharia, Construção e Operação (AECO). Para realizar uma investigação sistemática dos campos divergentes do BIM, seus componentes de conhecimento devem ser definidos e os limites de expansão devem ser delineados. O *framework* desenvolvido pelo mesmo autor identifica uma multidimensionalidade e pode ser representado por um modelo de conhecimento triaxial:

- Campos de atividade BIM, identificando o domínio dos “jogadores” e suas entregas. O grupo de jogadores descrito representa o grupo de especialistas no desenvolvimento de *software*, *hardware*, equipamentos e sistemas de rede necessários para aumentar a eficiência, produtividade e rentabilidade dos setores da AECO;
- Estágios BIM delineando os níveis de maturidade da implementação. São três: estágio 1 que é a modelagem baseada em objetos, estágio 2 que é a colaboração baseada em modelo, estágio 3 que é a integração baseada em rede;
- Lentes BIM que fornecem a profundidade e amplitude de pesquisa necessária para identificar, avaliar e qualificar campos BIM e estágios BIM. Elas podem ser disciplinares, de escopo ou conceituais;

A Figura 11 demonstra visualmente o significado de BIM e suas respectivas atribuições.

Figura 11 - Significado e atribuições do BIM



Fonte: Traduzido de Succar (2009)

Quanto aos níveis de detalhe do projeto BIM, o Instituto Americano de Arquitetos (AIA) definiu o conceito de *Level of Development* (LOD) pela primeira vez numa publicação

de 2008. Segundo esse documento, existem 5 níveis básicos de desenvolvimento, que são respectivamente: LOD100, que é equivalente ao projeto conceitual, onde o modelo consiste numa massa geral do edifício e as análises possíveis são de volume, orientação, custo por metro quadrado, etc; LOD200, que é semelhante ao projeto esquemático ou desenvolvimento do projeto, aqui o modelo é generalizado com quantidades aproximadas, tamanho, forma, localização e orientação, que permitem análises de sistemas selecionados pela aplicação de critérios generalizados; LOD300, em que os elementos do modelo são adequados para geração de documentos de construções tradicionais e desenhos para apresentação ao cliente, sendo que aqui, as análises e simulações são autorizadas para elementos e sistemas detalhados; LOD400, onde o nível de desenvolvimento é considerado adequado para fabricação e montagem, visando os empreiteiros e fabricantes e o LOD500, que é o nível final de desenvolvimento e representa o projeto como foi construído (*as-built*) (AIA, 2008). Além dos níveis citados, Durão et. al. (2019), citou em seu estudo o LOD350, que representa elementos com mais informações sobre interfaces com outros sistemas de construção.

Para exemplificação, algumas ferramentas BIM citadas por Succar (2009) são: *Revit*, *ArchiCAD*, *Digital Project* e *Tekla*. Usuários de tais ferramentas podem gerar modelos multidisciplinares dentro do projeto [D], da construção [C] ou da operação [O], que são as três fases do ciclo de vida do projeto (SUCCAR, 2009).

Quando se trata do cenário nacional, algumas estratégias são realizadas para que o uso do BIM seja uma realidade entre os profissionais do setor AECO. O Decreto nº 9.983, nível federal, de 22 de agosto de 2019, dispõe sobre essa estratégia e tem como objetivo: difundir o BIM e os seus benefícios; coordenar a estruturação do setor público para a adoção do BIM; criar condições favoráveis para o investimento público e privado em BIM; estimular a capacitação em BIM; desenvolver a Plataforma e a Biblioteca Nacional BIM; incentivar a concorrência no mercado por meio de padrões neutros de interoperabilidade; entre outros.

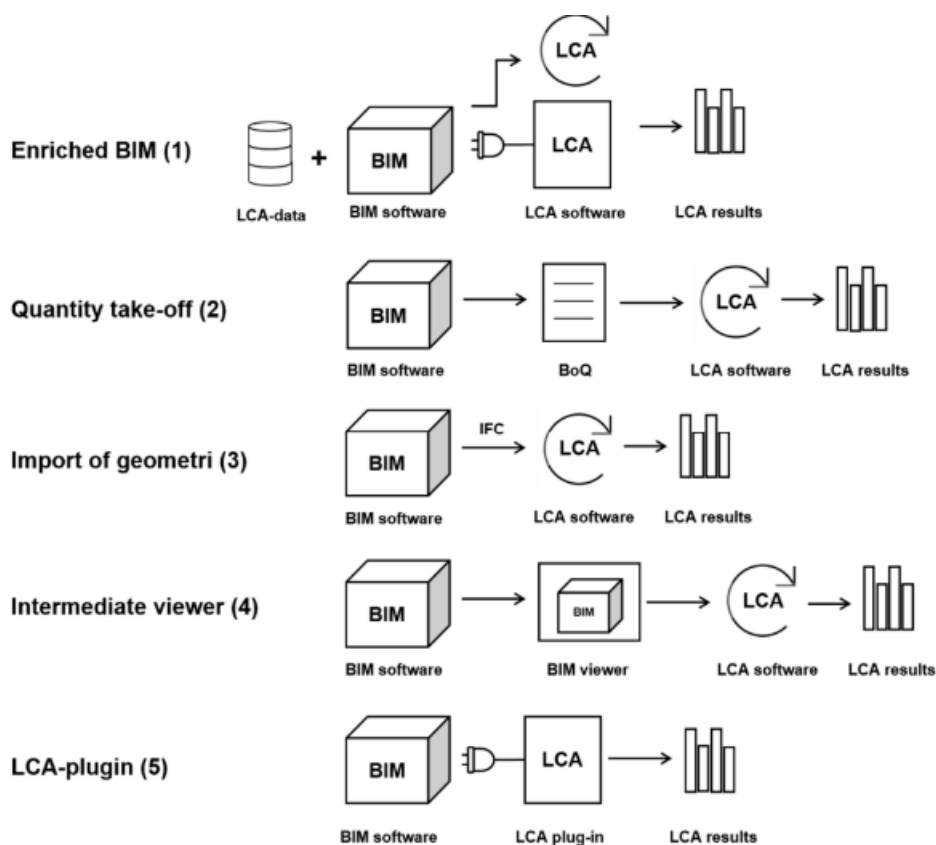
2.3 INTEGRAÇÃO ENTRE BIM E ACV

Segundo Lara et al. (2021), considerando o cenário nacional, o Brasil demanda por estudos de ACV (apenas 2,6% dos estudos selecionados da área são dessa região). Uma maturação das bases de dados locais e disseminação do assunto implicariam em maior conscientização acerca do tema, ainda em desenvolvimento (LARA et al., 2021). Uma das

maneiras disso acontecer é preparando os profissionais da área a utilizarem ferramentas de ACV durante as escolhas projetuais.

Para realizar a integração BIM-ACV é preciso estudar a interoperabilidade entre as ferramentas de projeto (BIM) e as de ACV. Existem diversas formas de realizar essa integração e as ferramentas disponíveis são as mais diversas. Zimmermann et al. (2021), reconhece em seu estudo 5 formas de integração, que consistem em: enriquecer o BIM com dados de ACV; realizar uma extração de quantidades de materiais no BIM para realização de ACV fora da plataforma; importação da geometria nos softwares de ACV; utilização de um visualizador intermediário e utilização de plug-in direto na plataforma BIM. Um esquema com esses processos pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 - Formas de integração BIM-ACV



Fonte: Zimmermann et al. (2021)

Quanto aos aplicativos que podem ser utilizados, o Quadro 2 sumariza alguns exemplos disponíveis no mercado para realização de avaliações com dados de uma plataforma BIM, de maneira direta ou indireta.

Quadro 2 - Aplicativos para realização de ACV

Aplicativos que possuem interoperabilidade com a plataforma BIM	
<i>Autodesk Green Building Studio™</i>	Baseado na nuvem, permite análises energéticas de edifícios completos e análise de otimização de consumo de energia direcionadas a emissões de gás carbônico (desde o início do processo de projeto). Não é um software direcionado a estudos de ACV, mas pode ser utilizado como apoio para tal.
<i>Autodesk Ecotect™</i>	É um programa mais focado na avaliação de condições de conforto ambiental, compreende alguns tipos de análises de energia e não pode ser interpretado como uma ferramenta de avaliação de sustentabilidade global. O <i>Green Building Studio</i> é baseado na <i>web</i> , enquanto o <i>Ecotect</i> é parte da área de trabalho.
<i>Environmental Solutions® - Virtual Environment™</i>	É o mais versátil e poderoso software em termos de capacidade de análise de sustentabilidade, sendo Azhar e Brown (2009).
<i>Elodie (CTBS)</i>	É um programa projetado para fornecer a avaliação de desempenho ambiental de um edifício ao longo do seu ciclo de vida. Pode-se identificar a contribuição de produtos e materiais quanto ao seu potencial de impacto, avaliação de desempenho energético, determinação das emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida da estrutura, modelagem com objetivo de satisfazer os requisitos de desempenho da certificação ambiental, entre outros.
<i>eToolLCD (Lyfe cycle design)</i>	Software de projeto e ACV de edifícios completos de uso aberto. Produz relatórios detalhados com dados comparáveis de desempenho ambiental de edifícios, com resultados compatíveis com as normas internacionais ISSO 14044 e EN 15978. Time internacional: Austrália, Reino Unido, Brasil e Alemanha.
<i>Lesosai</i>	Software que permite o cálculo dos impactos ambientais provenientes do consumo de energia, tendo em vista toda a energia utilizada na operação do edifício, assim como impactos relativos ao consumo de energia provenientes do ciclo de vida de materiais e componentes construtivos utilizados no edifício.
<i>LCADesign™ (Ecospecifier)</i>	Software australiano de modelagem de ACV. É uma ferramenta simplificada de avaliação ambiental de edifícios, a qual busca redução do tempo e esforço de modelagem para uma ACV completa, através da utilização de dados genéricos para os materiais mais correntemente empregados.
<i>Tally™</i>	É um aplicativo simplificado que surgiu da parceria da Autodesk com a <i>Kieran Timberlake Innovations</i> e a <i>PE International</i> . Ele incorpora dados de ciclo de vida necessários para análises no processo de projeto. O <i>Tally™</i> é um plug-in dentro da interface do <i>Revit®</i> , se caracteriza por um aplicativo de integração direta entre ACV e BIM. Além de vincular elementos BIM e materiais de construção a um banco de dados, gera relatórios de impacto.

Quadro 2 – Aplicativos para realização da ACV (continuação).

<i>Energy Plus</i>	Mesmo sendo ferramentas que consideram apenas partes, um conjunto ou elemento, auxiliam muito no resultado final da ACV. Se concentram em uma área de interesse como energia operacional, iluminação, custo do ciclo de vida e efeitos ambientais. São aplicadas geralmente em todo o processo de design. O primeiro, o terceiro e o quarto citados são aplicativos do Reino Unido, o segundo da Austrália.
<i>VE - Ware</i>	
<i>LISA</i>	
<i>Green Guide to Specifications</i>	
<i>Envest</i>	
<i>BREEAM</i>	São estruturas de avaliação abrangentes que incorporam uma ampla gama de aspectos ambientais, econômicos e sociais da sustentabilidade. Esses aplicativos utilizam combinações de objetivos e dados subjetivos. Dos citados, o primeiro é do Reino Unido, o segundo é multinacional e os três últimos são do Canadá/EUA.
<i>GBTtool</i>	
<i>Green Globes</i>	
<i>One Click LCA</i>	
<i>LEED</i>	

Fonte: Adaptado de Bueno e Fabrício, 2016 e 2018; Trusty e Horts, 2005 e Azhar e Brown, 2009.

As ferramentas ACV disponíveis são relacionadas à base de dados existentes e métodos de cálculo. Os resultados, portanto, são diretamente dependentes do inventário utilizado e da representatividade do mesmo para a região de estudo.

Considerando todos os fatores que influenciam no resultado da análise, é preciso ter cautela quanto a base de dados da ACV a ser realizada, uma vez que a confiabilidade dos resultados interfere na análise. Segundo Durão et al. (2019), as fontes utilizadas para encontrar dados confiáveis devem ser: trabalhos de pesquisa publicados, base de dados nacionais ou internacionais (sendo que existem diversos níveis de confiabilidade e representatividade para cada região) e estudos específicos de ACV promovidos por empresas para cumprir um sistema de rotulagem ambiental, como declarações de produtos (EPD).

Além disso, segundo Bueno (2014), é importante estabelecer a interferência das incertezas inerentes aos resultados obtidos quando realizado um estudo comparativo; uma vez que, considerando, por exemplo, o *Ecoinvent*, as incertezas serão menores do ponto de vista de variações dos processos, pois são coletados para períodos de tempos mais longos e para regiões mais vastas. Por outro lado, dados de inventário coletados para empresas específicas apresentam menores incertezas para o cenário específico de tais fornecedores, mas, as incertezas são maiores quanto ao procedimento de coleta de dados. Definir o objetivo da pesquisa, portanto, é essencial para escolha da base de dados para determinado estudo visando diminuir as incertezas para aquela situação específica.

Além do tópico de confiabilidade, o tópico de nível de detalhamento também é importante para uma boa integração BIM-ACV. Como citado anteriormente, os projetos têm níveis de desenvolvimento atrelados aos detalhamentos desenvolvidos pelo projetista. O fator que mede esse desenvolvimento é chamado de LOD. Na integração entre BIM e ACV é importante saber a relação entre eles e como o LOD influencia nos resultados das análises de impacto (vide Quadro 3).

Quadro 3 - Relação entre LOD e impactos de ACV

LOD	Informação de ACV	Tipo de dado
100	Indicador único, como o Eco-indicador (unidade: ponto do Eco-indicador) ou Eco-custos (unidade: unidade monetária, como EUR)	Base de dados genérica
200-300	CO ₂ (ou potencial de aquecimento global, GWP, em KG eq. CO ₂), energia incorporada (em MJ, por exemplo)	Base de dados genérica
400-500	Parâmetros descrevendo impactos ambientais, recursos utilizados e emissões de poluentes dos materiais, e informações ambientais descrevendo os fluxos de saída e categorias de resíduos, como definidos nos conteúdos EPDs	Produtos específicos/ setores específicos (EPDs setoriais)

Fonte: Adaptado de Durão et. al. (2019)

Visto as ferramentas de integração e os pontos mais importantes referentes à mesma, é importante definir as três maneiras mais comumente utilizadas de realizar estudos de ACV integrados ao BIM. Forth et al. (2019), realizou um estudo considerando o fluxo de informações entre plataformas de forma manual, semiautomatizada e automatizada. Para o primeiro caso, o *Revit* foi utilizado para ceder informações de massas, volumes e quantidades que seriam utilizadas pelo usuário, enquanto o eLCA (outra ferramenta ACV disponível no mercado) seria utilizada para o fluxo da ACV; no segundo caso, foi utilizado o *Revit* em conjunto com o *Tally*, já citado anteriormente e, por fim, no terceiro caso, o modelo foi feito no *ArchiCAD* e no *Revit* e a ACV, calculada em um plug-in chamado *One Click LCA* (que pode gerar resultados de forma automática, ou pode permitir edição e análise semiautomatizada). O processo manual é o mais demorado, consome muito tempo e, dependendo da complexidade do edifício, torna-se impraticável; já o processo de trabalho automatizado não é necessariamente mais eficaz, uma vez que existem erros de

interoperabilidade e interpretação de materiais pela ferramenta ACV. O processo semiautomatizado em que é possível escolher as alocações de materiais com as bases de dados ACV mostrou-se promissor e apresentou menores erros quando comparados aos outros dois processos (FORTH et al., 2019).

Por fim, cabe definir alguns dos principais desafios da integração BIM-ACV. Alguns deles já foram observados no parágrafo anterior, entretanto, ainda cabe analisar os resultados de Soust-Verdaguer et al. (2017), que apresentou os seguintes pontos:

- A interoperabilidade entre as ferramentas, uma vez que as mesmas devem ser compatíveis com especificações de formato de arquivos e, o que se observa, são desenvolvimentos acentuados em plug-ins diretos na ferramenta BIM;
- Avaliações feitas em softwares integrados, uma vez que os mesmos podem ser processos automatizados e, por conta disso, pode ser difícil realizar qualquer modificação nos dados;
- Dificuldade em realizar a integração de dados entre BIM e ACV, uma vez que a mesma demanda uma adaptação nas propriedades dos materiais e na lista de quantidades da plataforma BIM para o método ACV.

Considerando o presente trabalho, três foram as ferramentas escolhidas para realização das avaliações. Para a análise de sensibilidade dos resultados, priorizou-se a utilização de ferramentas que utilizavam diferentes tipos de cálculos para compreensão de quanto os resultados eram coerentes entre si. Os dois principais métodos a serem analisados eram o automático (ou o mais automático possível) e o manual. A partir disso, um modelo semiautomático poderia ser escolhido para encontrar um caminho entre os outros dois. Na realidade, as três ferramentas escolhidas possuem etapas semiautomáticas, entretanto, cada uma possui certa peculiaridade para ser enquadrada como um dos três casos apresentados.

Primeiramente, a ferramenta *Tally* foi escolhida por ser de fácil utilização e mais automatizada quando comparada com as outras opções. Segundo informações do próprio website da ferramenta:

O *Tally* permite arquitetos e engenheiros que trabalham com o software *Revit* quantifiquem o impacto ambiental dos materiais de construção para análise de todo edifício, bem como análises comparativas de opções de projeto. Ao trabalhar em um modelo *Revit*, o usuário pode definir relações entre elementos BIM e materiais de construção do banco de dados *Tally*. O resultado é a avaliação do Ciclo de Vida sob demanda e uma camada

importante de informações para tomada de decisões dentro do mesmo prazo, ritmo e ambiente em que os projetos de construção são gerados. O *Tally* é de fácil utilização e não requer práticas especiais de modelagem.

Ainda sobre os métodos de quantificação da ACV pelo *Tally*, os materiais de construção são analisados para todo o edifício, bem como são feitas análises comparativas de projetos. A metodologia segue os padrões das normas: ISO 14040-14044, ISO 21930:2017, ISO 21931:2010, EN 15804:2012 e EN 15978:2011.

Algumas informações também puderam ser retiradas do website da ferramenta *One Click LCA*. Segundo esse website:

A visão dos desenvolvedores da ferramenta é que a indústria da construção gerenciará o carbono da mesma forma que gerencia os custos. Isso significa que medir, relatar e reduzir o carbono serão partes padrão das práticas de negócios. Os desenvolvedores prometem oferecer soluções práticas para que isso aconteça a curto e longo prazo. Segundo informações do site, a plataforma é a líder mundial em realizações de ACV e descarbonização.

O *One Click LCA* integra dados de quase todas as plataformas EPDs disponíveis em todo o mundo. Além disso, as EPDs inseridas no banco de dados *One Click LCA* incluem descrições técnicas detalhadas sobre produtos de construção e estão em conformidade com os padrões EN15804 e/ou ISO 14025. Todas as bases de dados da Europa cumprem a norma EN 15804 e as bases de dados norte-americanas cumprem a norma ISO 14040/44. Para vários produtores europeus e mundiais de materiais de construção, o *One Click LCA* tem dados disponíveis específicos do fabricante, o que permite resultados de cálculo altamente precisos. Para aqueles que ainda não sabem qual produto de construção específico usarão, o *One Click LCA* possui dados médios específicos do país.

Por fim, informações do software *Athena Impact Estimator* puderam ser analisadas utilizando informações do website dos desenvolvedores. Segundo esse website:

Na América do Norte, o *Athena Impact Estimator* é o único software gratuito que foi feito para analisar toda a montagem do edifício baseado em metodologias de ACV internacionais. A ferramenta leva em consideração os seguintes impactos ambientais: fabricação de materiais; incluindo extração de recursos e conteúdo reciclado; transporte relacionado, construção no local, variação regional do uso de energia, transporte e outros fatores; tipo de edifício e vida útil assumida; efeitos dos reparos e substituições; demolição e descarte. Embora não tenha um recurso de simulação de energia operacional, ele permite que

os usuários insiram os resultados de uma simulação para calcular as cargas do ciclo de combustível, incluindo efeitos de pré-combustão, e os inclua nos resultados gerais.

Os dados desenvolvidos pelo instituto Athena incluem inventários do ciclo de vida ou avaliações do ciclo de vida de indústrias específicas, grupos de produtos, transporte, processos de construção e tarefas de manutenção. O trabalho é sempre conduzido seguindo as normas ISO 14040 e ISO 14044 e outras normas apropriadas.

3. CASO DE ESTUDO

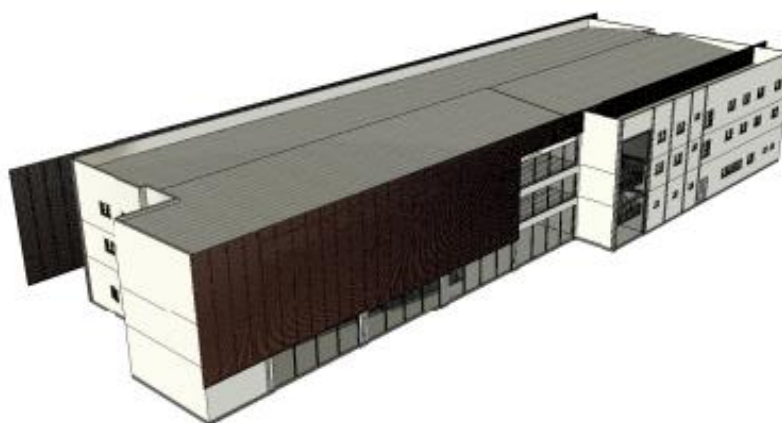
Primeiramente, para iniciar os projetos na plataforma *Revit*, foi preciso encontrar o maior número de informações sobre o projeto da Arena e das escolas. O compilado dessas informações são apresentados a seguir e serão considerados em toda a realização do presente trabalho.

3.1 APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

A Arena do Futuro foi construída de forma a utilizar materiais passíveis de reutilização. Segundo a Prefeitura do Rio de Janeiro (RIO DE JANEIRO, 2016), a estrutura foi feita em componentes de aço, as vedações foram feitas seguindo o sistema construtivo *steel frame*, o piso foi feito em estruturas metálicas e placas de vedação e as rampas e escadas foram feitas de concreto pré-moldado. Foi evitada a utilização ligações químicas entre componentes, ou seja, os mesmos foram parafusados para facilitar a desmontagem. A escola segue exatamente os mesmos sistemas construtivos.

As Figuras 13 e 14 a seguir mostram ilustrações 3D dos modelos feitos no *Revit* da escola e da arena, respectivamente.

Figura 13 – Modelo 3D de uma escola padrão

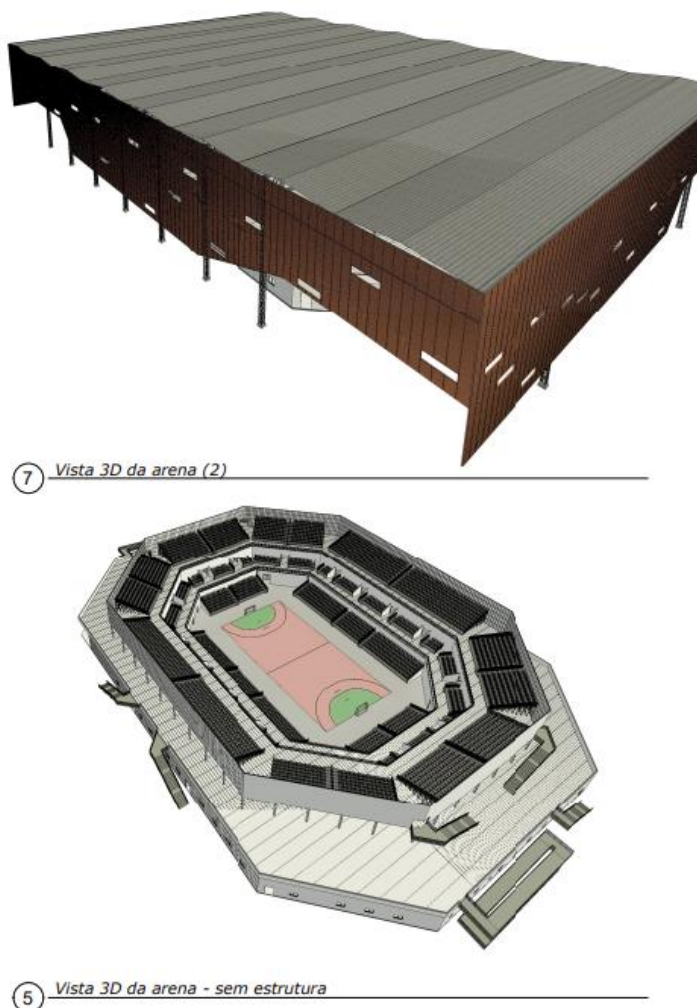


3

Vista 3D

Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 14 – Modelo 3D da Arena do Futuro



Fonte: Autoria Própria (2022)

Mais informações sobre essas modelagens podem ser verificadas no Anexo I (projeto da arena) e Anexo II (projeto da escola) do presente trabalho, tais como as plantas, cortes e detalhes construtivos.

Segundo informações concedidas pela Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro (RIO DE JANEIRO, 2016), o espaço da Arena do Futuro deveria permanecer livre após a desmontagem e demolição para posterior ocupação (uma vez que o estádio seria subutilizado fora da época dos jogos), a única coisa mantida no local, segundo projeto, são as estacas da fundação.

Além disso, o que não fosse considerado passível de reaproveitamento ou reciclagem deveria ser demolido após a análise do poder concedente e devidamente removido do local. A construção das quatro escolas faz parte do escopo da concessionária e o material utilizado seria caracterizado por aqueles reaproveitados da Arena do Futuro e do Centro Aquático, com fornecimento de materiais complementares conforme necessário. Entretanto, como o escopo

desse trabalho é avaliar a Arena, apenas o montante de material da mesma será considerado (uma vez que esse é o principal fornecedor de materiais).

Quanto às escolas, segundo projetos fornecidos pela Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro (RIO DE JANEIRO, 2016), cada uma tem capacidade para 500 alunos e seguem as seguintes características:

- 16 salas de aula;
- 4 salas de múltiplo uso;
- 1 quadra esportiva coberta;
- Áreas técnicas, como edifícios anexos que abriguem depósito de lixo, reservatório de água e central de água gelada.

O edifício da escola é dividido em três pavimentos, interligados por rampa e escada. A estrutura do edifício é formada por um sistema tipo “pórticos planos” em estrutura metálica e lajes de concreto. As vedações são compostas de painel do tipo Eternit ou similar (composto por miolo de madeira laminada ou sarrafeada, contraplacado externamente por placas cimentícias fixadas em estrutura de aço galvanizado). Além disso, a cobertura e os *brises* que recobrem o edifício também são reaproveitados. Em contrapartida, as áreas técnicas e edifícios em anexo serão construídos em blocos de concreto (que não é fruto de reaproveitamento).

As plantas dos três pavimentos das escolas foram utilizadas para reprodução desse projeto em plataforma BIM. Para o caso da Arena, as dimensões foram estimadas utilizando o Google Maps, enquanto a divisão interna foi projetada segundo imagens e dados do site Estadão (2016), que disponibilizou os detalhes construtivos. O ponto negativo dessa representação é que as medidas e as seções das estruturas foram estimadas.

As informações sobre os componentes construtivos considerados tanto no projeto quanto nas ferramentas de ACV podem ser visualizados no Quadro 4 abaixo.

Quadro 4 – Informações sobre os componentes utilizados

Tipo de componente	Código	Componente	Tally	Ferramenta	Athena
				One Click LCA	
Forro de gesso - acartonado	I	Placa de gesso acartonado	Wall board, gypsum, natural		
			Foil facing	-	-
		Pintura esmalte	Paint, interior acrylic latex		
Montante de madeira	II	Montante de 100 mm de madeira	Exterior grade plywood, US	Plywood, generic, 4-50 mm (0.16-1.97 in), 620 kg/m3 (38.7 lbs/ft3)	Plywood Softwood
Montante de aço	III	Montante de aço (perfil I)	Steel, IPE section, galvanized steel	Structural steel profiles, generic, 0% recycled content (only virgin materials), I, H, U, L, and T sections, S235, S275 and S355	Structural Steel Frame Components
Montante de aço		Montante de aço (perfil U)	Steel, U channel, galvanized steel	Structural steel profiles, generic, 0% recycled content (only virgin materials), I, H, U, L, and T sections, S235, S275 and S355	Structural Steel Frame Components
Montante de aço		Montante de aço (perfil U verga)	Steel, U channel, galvanized steel	Structural steel profiles, generic, 0% recycled content (only virgin materials), I, H, U, L, and T sections, S235, S275 and S355	Structural Steel Frame Components
Porta dupla de abrir	IV	Esquadria em alumínio	Hardware, stainless steel	Processed glass, non low-e coating, 72x84in, 72x96in, 96x130in, 130x204in, 2500 kg/m3, Solarban, Sungate, Vistacool, Solarcool, Clarvista, Herculite (Vitro)	Glass, generic
		Porta de vidro	Glazing, monolithic sheet, tempered		
			Stainless steel door hinge		
Porta folha única	V	Esquadria em alumínio	Hardware, stainless steel		Aluminium fixed hung
		Porta de madeira	Door, interior, wood, hollow core	Wooden door with PU core, 2.68m2/unit, Maiman Serenity (ASSA ABLOY) - IBU	Plywood Softwood
			Paint, interior acrylic latex		
Piso de concreto	VI	Concreto pré-fabricado	Structural concrete, 5000 psi, 30% fly ash	Ready-mix concrete, normal-strength, generic, C30/37 (4400/5400 PSI), 0% recycled binders in cement (300 kg/m3 / 18.72 lbs/ft3)	Ready Mixed Concrete (31-35 Mpa)
			Steel, welded wire mesh		
		Pintura do piso	Paint, exterior acrylic latex	Acrylic paint, for interior walls and ceilings, Valspar 2000 VP55W0552	-
Piso - placa cimentícia	VII	OSB	Oriented strandboard (OSB), AWC - EPD	Oriented strand board (OSB), generic, 9.5-28.5 mm (0.37-1.12 in), 610 kg/m3 (38.1 lbs/ft3), min. G4-2	Oriented Strand Board - OSB
			Paint, exterior acrylic latex	Acrylic paint, for interior walls and ceilings, Valspar 2000 VP55W0552	
		Placa cimentícia	Fiber cement dry construction board, Eternit, Hydropanel - EPD	Fibre cement boards, 1300 kg/m3 (81.16 lbs/ft3)	Fibre-Cement Façade Panels
Guarda corpo	VIII	Guarda corpo de aço	Stainless steel, extruded, chromuim 18/8	Extruded aluminum mullion trim cap, 102 mm wide, 1.9 kg/m, 55 Classic (Mull-It-Over Products)	Extruded aluminum mullion
			Epoxy coating, metal stock		

Quadro 4 – Informações sobre os componentes utilizados (continuação)

Telhado de fibrocimento	IX	Telha de fibrocimento	Roofing panel, Eternit, corrugated panel - EPD Paint, Brillux, Arylic facade paint - EPD Fasteners, stainless steel	Fibre cement boards, 1300 kg/m3 (81.16 lbs/ft3)	Fibre-Cement Façade Panels
Escada de concreto	X	Concreto pré-fabricado	Structural concrete, 5000 psi, 30% fly ash	Ready-mix concrete, normal-strength, generic, C30/37 (4400/5400 PSI), 0% recycled binders in cement (300 kg/m3 / 18.72 lbs/ft3) - One Click LCA	Precast Concrete Products
Pilar	XI	Todos os pilares são de aço	Galvanized steel Polyurethane coating, metal stock	Structural steel profiles, generic, 0% recycled content (only virgin materials), I, H, U, L, and T sections, S235, S275 and S355	Structural Steel Frame Components
Vigas	XII	Perfil em L duplo de aço	Galvanized steel Polyurethane coating, metal stock	Structural steel profiles, generic, 0% recycled content (only virgin materials), I, H, U, L, and T sections, S235, S275 and S355	Structural Steel Frame Components
		Perfil em L duplo de aço	Galvanized steel Polyurethane coating, metal stock	Structural steel profiles, generic, 0% recycled content (only virgin materials), I, H, U, L, and T sections, S235, S275 and S355	Structural Steel Frame Components
		Montante de aço (perfil C)	Galvanized steel Polyurethane coating, metal stock	Structural steel profiles, generic, 0% recycled content (only virgin materials), I, H, U, L, and T sections, S235, S275 and S355	Structural Steel Frame Components
		Montante de aço (perfil I)	Galvanized steel Polyurethane coating, metal stock	Structural steel profiles, generic, 0% recycled content (only virgin materials), I, H, U, L, and T sections, S235, S275 and S355	Structural Steel Frame Components
		Montante de aço (perfil U)	Galvanized steel Polyurethane coating, metal stock	Structural steel profiles, generic, 0% recycled content (only virgin materials), I, H, U, L, and T sections, S235, S275 and S355	Structural Steel Frame Components
Divisórias do banheiro	XIII	PVC	PVC rigid sheet, Inpro, EPD	PVC-polyester waterproofing roof membrane, single-ply, 40 mil (Chemical Fabrics and Film Association)	White, single-ply polyester reinforced PVC membrane
Drywall	XIV	Placa cimentícia	Floor and wall adhesive, acrylic Fiber cement dry construction board, Eternit, Hydropanel - EPD	Fibre cement boards, 1300 kg/m3 (81.16 lbs/ft3)	Fibre-Cement Façade Panels
		OSB	Oriented strandboard (OSB), AWC - EPD	Oriented strand board (OSB), generic, 9.5-28.5 mm (0.37-1.12 in), 610 kg/m3 (38.1 lbs/ft3), min. G4-2	Oriented Strand Board - OSB
Parede em bloco de concreto	XV	Alvenaria em bloco de concreto	Autoclaved aerated concrete block (AAC)	Concrete masonry unit (CMU), 2000-3750 psi, NW-Standard (Air Vol Block)	Concrete masonry unit (CMU), Normalweight CMU
			Mortar type N Steel, concrete reinforcing steel, CMC - EPD	Cement mortar, 0.834 lb/ft2, 80.03 lb/ft3 (TCNA)	Type N & S mortar
			Paint, exterior acrylic latex	Acrylic paint, for interior walls and ceilings, Valspar 2000 VP55W0552	-

Quadro 4 – Informações sobre os componentes utilizados (continuação)

Janela de correr	XVI	Esquadria em alumínio	Aluminum extrusion, AEC - EPD	Aluminium fixed and single hung windows, 55.18-70.78 kg/m ²	Aluminium fixed hung windows
		Faixa de madeira	Softwood veneer Adhesive, polyurethane	Plywood, generic, 4-50 mm (0.16-1.97 in), 620 kg/m ³ (38.7 lbs/ft ³)	Plywood Softwood
		Painel em vidro	Glazing, monolithic sheet, generic	Float glass, single pane, generic, 3-12 mm (0.12-0.47 in), 10 kg/m ² (2.05 lbs/ft ²) (for 4 mm/0.16 in), 2500 kg/m ³ (156 lbs/ft ³)	Glass, generic
Janela de 1 módulo	XVII	Esquadria em alumínio	Aluminum extrusion, AEC - EPD	Aluminium fixed and single hung windows, 55.18-70.78 kg/m ²	Aluminium fixed hung windows
		Painel em vidro	Glazing, monolithic sheet, generic	Float glass, single pane, generic, 3-12 mm (0.12-0.47 in), 10 kg/m ² (2.05 lbs/ft ²) (for 4 mm/0.16 in), 2500 kg/m ³ (156 lbs/ft ³)	Glass, generic

Fonte: Autoria Própria (2023)

A legenda para as cores utilizadas pode ser conferida a seguir, no Quadro 5.

Quadro 5 – Legenda de cores

	Forro
	Estrutura (vedação)
	Porta
	Piso
	Guarda-corpo
	Telhado
	Escada
	Pilar
	Viga
	Parede
	Janela

Fonte: Autoria Própria (2023)

Adotando os dados apresentados acima, foi possível calcular os impactos gerados pela construção da arena e os impactos evitados pela reutilização dos materiais. Entretanto, antes de iniciar essa avaliação, foi preciso estimar se todos os materiais da escola seriam provenientes da arena. Para isso, algumas hipóteses foram feitas:

- Janelas (códigos XVI e XVII): dois tipos de janelas foram consideradas nos dois projetos. O primeiro tipo é a janela de abrir (2 folhas) e, comparando o projeto da escola com o da arena, pode-se dizer que nem todas foram reutilizadas. O projeto da arena conta com 64 janelas desse tipo e o da escola conta com 53 janelas. Ou seja, dessas 53 janelas (de cada escola), apenas 16 foram reutilizadas, as outras 37 foram utilizadas como novos materiais. Sobre

o segundo tipo de janela, a de folha única, a arena possuía quantidade suficiente para suprir essa demanda das escolas. Ao todo, 28 janelas foram retiradas da arena e 7 foram utilizadas por escola (totalizando exatamente 28 janelas).

- **Portas (códigos IV e V):** também foram utilizadas dois tipos diferentes de portas. O primeiro tipo é a porta com duas folhas de vidro e, comparando o projeto da escola com o da arena, pode-se concluir que a mesma conseguiu suprir a demanda das escolas. Enquanto o projeto da arena contava com 39 portas desse tipo, as escolas precisavam de 9 cada uma, totalizando 36 ao todo. O segundo tipo de porta, a mais comum de madeira de apenas uma folha, não entrou na lista de materiais completamente supridos pela arena. A conta mostrou que 189 portas poderiam ser reutilizadas, enquanto cada escola precisava de 74 portas. Para simplificar, a consideração feita foi que 47 portas eram provenientes da arena, enquanto as outras 27 eram componentes novos (para cada escola).
- **Pilares (código XI):** Apesar da arena contar com pilares de diferentes tipos, o projeto da escola utilizou apenas os pilares metálicos de seção única do tipo I. Sendo assim, considerando que o pé direito da arena era um pouco mais alto do que a altura total da escola, mas que essa diferença não poderia ser considerada para compor novos pilares (uma vez que união de materiais estruturais resulta em perda de resistência e eficiência) foram contadas as unidades que poderiam ser reutilizadas, considerando o componente e não o comprimento. Sendo assim, a arena dispunha de 26 pilares. Para as escolas, foi considerado que apenas 6 pilares eram reutilizados em cada projeto. Sendo assim, um total de 31 novos pilares foram adquiridos em cada projeto de escola.
- **Curtain Walls:** No projeto da escola, algumas paredes de vidro foram feitas nas fachadas. Entretanto, nenhuma parede de vidro foi observada na arena. Sendo assim, esse tipo de componente não será contabilizado nas análises.
- **Drywall (código XIV):** Para calcular se a quantidade de placas cimentícias provenientes da arena seria suficiente para suprir à quantidade necessária das escolas foi preciso realizar um cálculo com algumas estimativas. Primeiramente, a tabela de quantitativos foi retirada do *Revit* e, considerando

comprimento e altura, foi possível estimar quantas placas estariam presentes em cada parede (considerando placas de 1 metro x 1 metro). Para isso, considerando a arena, um arredondamento para baixo foi feito nas dimensões das paredes e, somando-se o total de placas de todas as paredes da arena, o resultado foi um total de 9267 placas inteiras (desconsiderando as placas que foram cortadas para compor os elementos). O mesmo procedimento foi feito com o projeto padrão da escola, mas, nesse caso, os valores foram arredondados para cima, uma vez que nas quinas algumas placas deveriam ser cortadas sob medida e, para isso, uma placa inteira deveria ser utilizada. Nesse caso, o valor resultante foi de 2445 placas por escola. Considerando uma perda de 15% desse material (que pode ser vista como uma margem de segurança considerando quebras no transporte ou quebras na retirada das placas *in loco*) um total de 1969 placas poderiam ser distribuídas para cada escola. Ou seja, nesse caso, o material proveniente da arena não foi suficiente para cobrir o que cada escola necessitava. Em termos de porcentagem, 80,5% dessas paredes seriam reaproveitadas, os outros 19,5% foram desconsiderados da análise por serem do centro aquático ou adquiridos.

- *Steel Frame* (código III): Um cálculo semelhante ao descrito acima foi feito para a estrutura em *steel frame*. Nesse caso, entretanto, os montantes estariam distribuídos numa distância de 1,5 metros na vertical e 0,6 metros na horizontal. Agora, o cálculo que anteriormente era expresso em 1 m² necessitou de maior atenção. As alturas das paredes em *steel frame* foram divididas por 1,5 metros, arredondando esse valor para baixo para desconsiderar os pedaços de montante que não estariam dentro desse valor cheio. Os comprimentos seguiram o mesmo processo considerando uma divisão por 0,6 metros. Dessa forma, foram considerados para reutilização um total de 8486 retângulos de 1,5 m x 0,6 m provenientes da arena. Para esse mesmo raciocínio, porém arredondando os valores quebrados para cima, a escola necessitava de 2771 retângulos de 1,5 m x 0,6 m de *steel frame*. Nesse caso, o valor resultante do total fornecido pela arena dividido pelo número de escolas foi de 2121 retângulos por escola. Considerando uma perda de 15% desse material um total de 1803 retângulos poderiam ser distribuídos para cada escola. Ou seja, nesse caso, o material proveniente da arena não foi suficiente

para cobrir o que cada escola necessitava. Em termos de porcentagem, 65% do *steel frame* seria reaproveitado, os outros 35% de área de montantes foi desconsiderado da análise.

Nesse caso, o termo “retângulo” foi utilizado para melhor entender o raciocínio adotado. Não significa, portanto, que os montantes estavam de alguma forma conectados em retângulos. Essa forma geométrica é apenas visual para realização dos cálculos.

- Paredes feitas em bloco de concreto (código XV): Nesse caso a análise feita foi relacionando as áreas das paredes em blocos de concreto. Como essas unidades são menores, considera-se uma perda de 20% por conta da desconstrução desse componente construtivo. A soma das áreas das paredes da arena foi de 2374,82 m², entretanto, a área de parede que seria possível construir a partir desse número segundo a perda adotada seria de 1899,86 m², dividindo esse valor por 4, o valor por escola seria de 474,96 m². As escolas, entretanto, precisariam de mais componentes em blocos de concreto, uma vez que as paredes externas são feitas do mesmo. Cada escola precisaria construir uma área de 1463,06 m² em parede. Dessa forma, o material proveniente da arena cobriria uma porcentagem de 32,46% do necessário, o restante de material, por ser considerado novo ou reaproveitado do Centro Aquático, não foi considerado na análise.
- Brises (código II): Nesse caso a área utilizada nas escolas é bem baixa perto da área de brises que a arena possui. Enquanto a escola conta com uma área de 966,87 m², a arena possui 6537,46 m² em brises de madeira. Como o brise é formado por vários elementos em madeira, é possível realizar essa análise pela área dos mesmos.
- Pisos (códigos VI e VII): Primeiro serão consideradas as placas cimentícias. Na arena, a área de piso em placas cimentícias que fazem o fechamento da estrutura em aço que sustenta esse piso é de 9115,03 m². Considerando a porcentagem de perdas de 20%, temos que cada escola receberia um total em área de 1823 m². Cada escola, entretanto, utiliza 2422,12 m² de piso em placa cimentícia. Dessa forma, considera-se que 75% dessas placas são reutilizadas, o restante não é proveniente da arena. Quanto aos pisos de concreto, uma

análise considerando a área também foi feita. Ao todo, a arena conta com 8834,55 m² em piso de concreto pré-fabricado. A perda será a mesma já considerada nos outros casos, de 20%. Dessa forma, cada escola pode receber até 1766,91 m² de piso de concreto proveniente da arena. Cada escola precisa de 1572,17 m² de piso de concreto, ou seja, não é necessário comprar material extra para atender esse componente construtivo.

- Forro de gesso (código I): Ao todo a arena conta com 6306,32 m² de forro de gesso. Considerando os mesmos 20% de perdas, tem-se que cada escola poderia chegar a receber até 1261,26 m² de placas de gesso. Entretanto, cada escola necessita de 3836,95 m² de forro de gesso, ou seja, 32,87% desse material pôde ser fornecido, o restante (67,12%) deveria ser adquirido.
- Telhado (código IX): No caso dos telhados, a arena já conta com a divisão dos mesmos em 8 grupos. Cada um desses grupos possui uma área maior do que uma escola necessita. Dessa forma, o telhado pode ser 100% fornecido pela reutilização dos materiais da arena.
- Estrutura de aço do piso (código III): As placas cimentícias se apoiam numa estrutura em aço de vigas em C. Para saber exatamente quanto pode ser reaproveitado da arena, cada peça de aço foi classificada segundo sua extensão. Nesse caso, grupos foram criados de 5 em 5 metros. Começando pelas vigas de até 10 metros, passando para as vigas entre 10 e 15 metros, assim por diante. As vigas maiores poderiam ser divididas em outras caso essa diferença permitisse a existência de outras duas vigas com o comprimento inteiro, por exemplo, uma viga de 30 metros poderia se tornar duas vigas de 15 metros. Entretanto, mesmo com essas divisões, faltaria para cada escola 39 vigas de 15 metros e 96 vigas de 25 metros. Foi considerado que todo material foi reaproveitado, apenas essa quantidade de vigas foi adquirida. Em porcentagem, pode-se dizer que houve 68,5% de reaproveitamento.
- Escadas (código X): Quanto às escadas, se a análise for feita quanto ao número de escadas inteiras, cada escola necessitaria de 3 escadas. Ao todo, 12 escadas seriam necessárias para suprir essa demanda. A arena, entretanto, possuía apenas 10 escadas. Por outro lado, quando consideramos o número de degraus, a arena possui escadas maiores do que aquelas das escolas. Podemos

considerar que, por estas escadas serem feitas de material pré-fabricado, é possível reaproveitar essa diferença de altura que seria descartada de cada unidade para formação de duas novas escadas. Considerando essa hipótese, as escadas são suficientes para suprir as necessidades das escolas (entretanto, não serão considerados os impactos para a união desses degraus e formação de uma nova escada).

- Guarda corpo (código VIII): Para essa análise é possível analisar apenas o comprimento, uma vez que os guardas corpos são praticamente uma união de vários montantes metálicos. A soma dos comprimentos da arena resultou em 989,35 metros. Cada escola precisaria receber 378,93 metros. Dessa forma, cada escola poderia receber cerca de 65,27% desse material da arena, o restante deveria ser adquirido.
- Rampas (código VI): Quanto às rampas, a arena possui 6 segmentos de rampa. As escolas possuem 4 sub trechos de rampa cada uma. Quanto à inclinação e dimensões, pode-se concluir que são bem próximas (algumas possuem 20 metros, outras, 23 metros). Portanto, para simplificar essa análise, pode-se comparar as quantidades em termos unitários. Sendo assim, apenas 2 escolas receberam 2 trechos de rampa enquanto outras duas receberam apenas 1 trecho de rampa. Para os cálculos, será considerado um trecho e meio de rampa reaproveitado por escola (ou seja, uma taxa de 37,5% de reaproveitamento).

Essas informações foram passadas para o projeto da escola. As ferramentas de ACV dividem os componentes em relação às fases de criação dos mesmos, portanto, para as avaliações, foram considerados apenas aqueles componentes que foram provenientes da Arena do Futuro. Segundo dados da Prefeitura do Rio de Janeiro (2016), os componentes vieram de duas construções, sendo a Arena do Futuro a principal fornecedora de material, mas contando com o Centro Aquático para fornecer os materiais que estariam faltando. Como o foco desse trabalho é analisar apenas o montante de material vindo da arena, foi apenas essa quantidade considerada para as posteriores avaliações.

3.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA ARENA

A avaliação do ciclo de vida da arena foi feita segundo três ferramentas para ser possível criar uma análise de sensibilidade desses dados. Cada uma delas será vista em detalhes adiante.

3.2.1 TALLY

As análises feitas no *Tally* não podem ser consideradas automatizadas, uma vez que é preciso que o usuário faça a relação entre os componentes do projeto com a base de dados do *Tally*. As informações referentes à ferramenta já foram apresentadas no início dessa monografia.

Os materiais escolhidos foram apresentados na Tabela 1 do presente trabalho, onde pode-se comparar as opções disponíveis de cada ferramenta que mais se assemelhava com o material escolhido no projeto.

De um modo geral, a Tabela 1 a seguir mostra os impactos gerados pela construção da arena.

Tabela 1 – Resultados gerados pela ferramenta Tally (análise da arena)

Environmental Impact Totals	Product Stage [A1-A3]	Construction Stage [A4]	Use Stage [B2-B5]	End of Life Stage [C2-C4]	Module D [D]
Global Warming (kg CO ₂ eq)	2.412.835	0	292.523	971.797	-231.471
Acidification (kg SO ₂ eq)	16.423	0	6.842	3.416	-1.675
Eutrophication (kg Neq)	931,9	0	1.020	763,4	-65,6
Smog Formation (kg O ₃ eq)	258.800	0	72.209	19.824	-20.614
Ozone Depletion (kg CFC-11eq)	0,06037	0	0,001786	2,586E-008	0,002119
Primary Energy (MJ)	5,708E+007	0	1,967E+007	2.251.213	-9.026.550
Non-renewable Energy (MJ)	4,464E+007	0	1,100E+007	2.106.815	-6.699.649
Renewable Energy (MJ)	1,247E+007	0	8.666.435	145.952	-2.336.414

Fonte: Autoria Própria (2023)

Como a área da arena é conhecida (11819,6 m²), também é possível obter a tabela dos impactos por m² de construção (Tabela 2).

Tabela 2 – Resultados gerados por área pela ferramenta Tally (análise da arena)

Environmental Impacts / Area					
Global Warming (kg CO ₂ eq/m ²)	204,1	0	24,75	82,22	-19,6
Acidification (kg SO ₂ eq/m ²)	1,389	0	0,5789	0,289	-0,1417
Eutrophication (kg Neq/m ²)	0,07884	0	0,08628	0,06459	-0,005551
Smog Formation (kg O ₃ eq/m ²)	21,90	0	6,109	1,677	-1,74
Ozone Depletion (kg CFC-11eq/m ²)	5,107E-006	0	1,511E-007	2,188E-012	1,793E-007
Primary Energy (MJ/m ²)	4.830	0	1.664	190,5	-764
Non-renewable Energy (MJ/m ²)	3.777	0	930,4	178,2	-567
Renewable Energy (MJ/m ²)	1.055	0	733,2	12,35	-198

Fonte: Autoria Própria (2023)

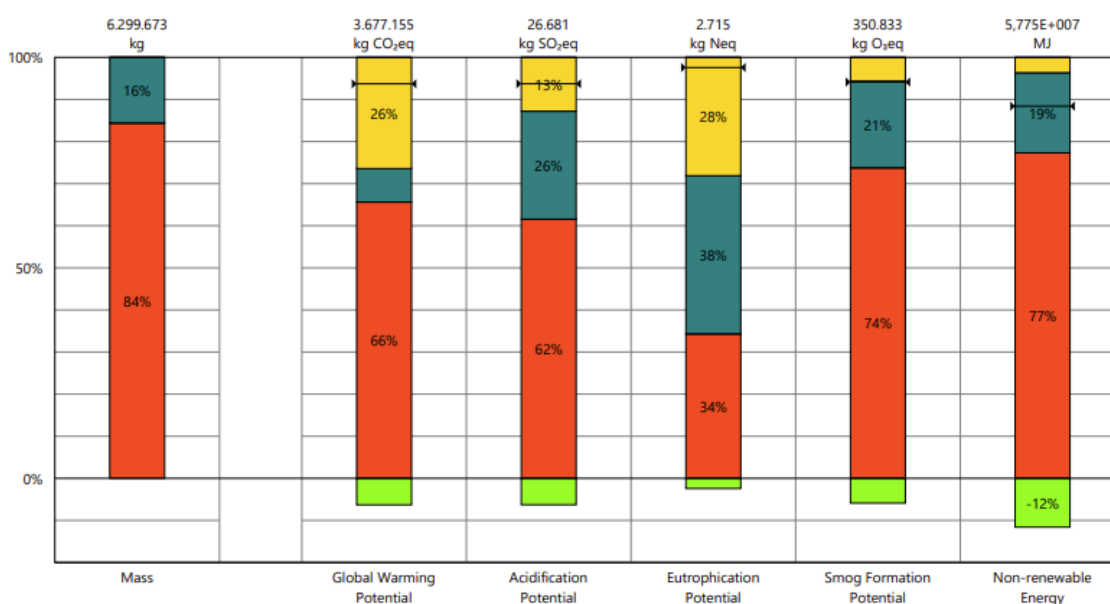
As distâncias percorridas pelos materiais para chegar ao *site* de construção e os valores referentes aos gastos gerados na construção em si não serão fatores considerados nesse trabalho. As informações mais importantes das Tabelas 1 e 2 mostradas são os valores da primeira coluna, referentes ao estágio de produção desses materiais, ou carbono incorporado.

O módulo D, segundo relatório gerado pela ferramenta, é considerado como o potencial de reuso para os materiais além da primeira vida, considerando a recuperação de energia e a reciclagem dos mesmos. Essa reciclagem é modelada utilizando uma abordagem de carga evitada, onde a carga de produção de material primário é alocada para o ciclo de vida subsequente com base na quantidade de material secundário recuperado. A incineração de materiais também inclui créditos para recuperação de energia nos EUA (onde a ferramenta foi desenvolvida). Detalhes sobre esses processos não serão explorados nesse trabalho, uma vez que o módulo D dado pelas ferramentas será ignorado e substituído apenas pelo crédito gerado pela reutilização dos materiais.

O Gráfico 2 a seguir mostra esses resultados por fase do ciclo de vida. Como pode ser observado, a fase de produção é a mais alarmante quando o foco é analisar o potencial de aquecimento global (ou seja, emissão de CO₂ em kg equivalente).

Gráfico 2 – Resultados pelos estágios do ciclo de vida (análise da arena)

Results per Life Cycle Stage



Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 15 – Legenda do gráfico 1 (análise da arena)

Legend

Net value (impacts + credits)

Life Cycle Stages

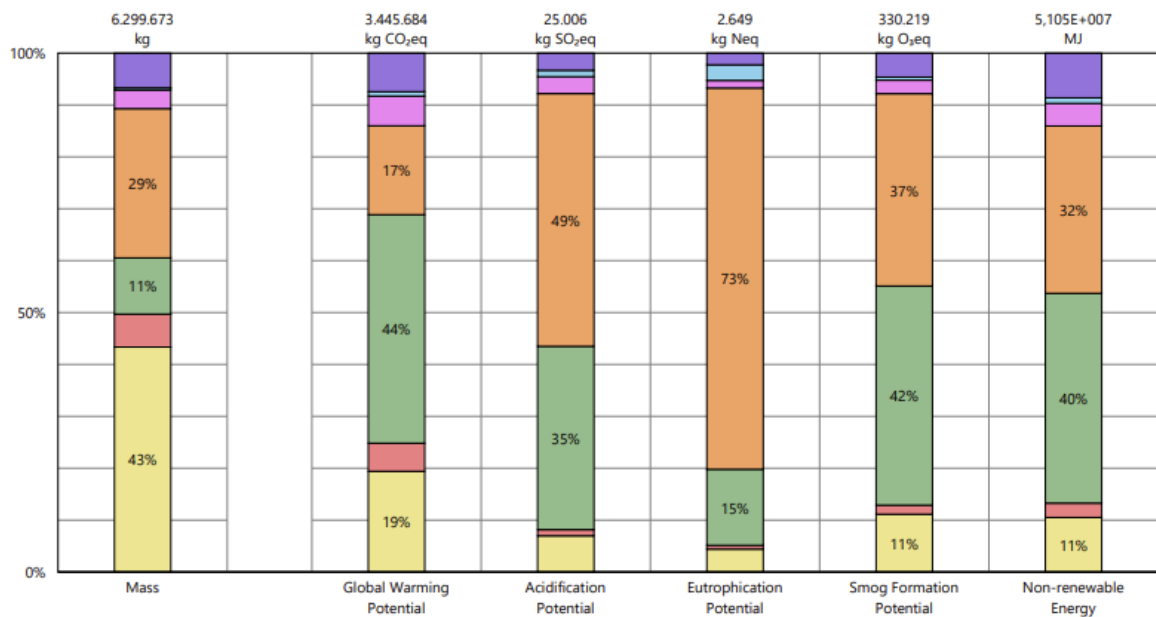
- Product [A1-A3]
- Transportation [A4]
- Maintenance and Replacement [B2-B5]
- End of Life [C2-C4]
- Module D [D]

Fonte: Autoria Própria (2023)

Além desse gráfico, é importante apresentar o Gráfico 3, que diz respeito aos resultados por divisão de componentes. Como pode ser observado, tanto no potencial de aquecimento global quanto em outros indicadores, os metais recebem grande parcela de responsabilidade sobre as emissões, com exceção do potencial de eutrofização, onde a madeira, plástico e compósitos têm maior peso de influência.

Gráfico 3 – Resultados pelas divisões de indicadores (análise da arena)

Results per Division



Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 16 – Legenda do gráfico 2 (análise da arena)

Legend

Divisions

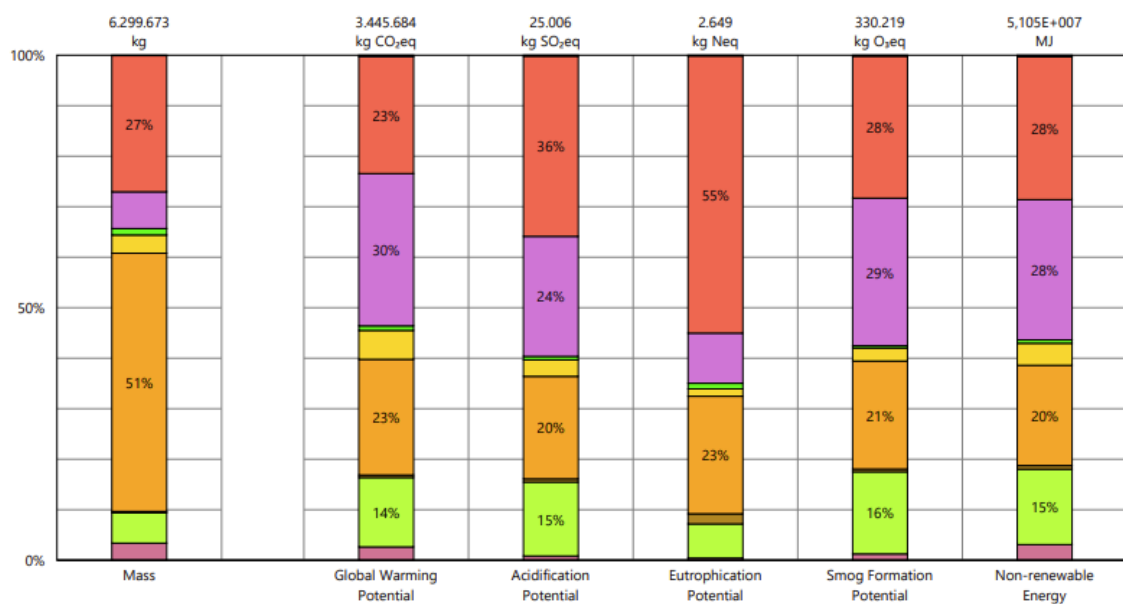
- 03 - Concrete
- 04 - Masonry
- 05 - Metals
- 06 - Wood/Plastics/Composites
- 07 - Thermal and Moisture Protection
- 08 - Openings and Glazing
- 09 - Finishes

Fonte: Autoria Própria (2023)

Para encerrar as análises, também é válido analisar os resultados por categoria do *Revit*. Percebe-se que a estrutura e os pisos são grandes responsáveis pela emissão de CO₂, já que se tratam dos dois materiais mais poluentes nesse indicador, ou seja, aço e concreto/cimento (vide Gráfico 4).

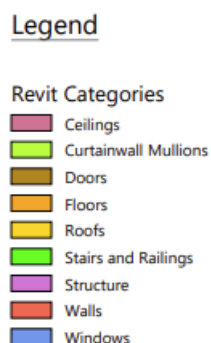
Gráfico 4 – Resultados pelas categorias do Revit (análise da arena)

Results per Revit Category



Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 17 – Legenda do gráfico 3 (análise da arena)



Fonte: Autoria Própria (2023)

Com esses resultados é possível ter uma visão geral do quadro analisado e perceber quais são as categorias de maior impacto. É necessário pontuar que, como pôde ser visto no Gráfico 4, as rampas não entraram na avaliação do *Tally*. Esse tipo de componente construtivo não entra em nenhuma categoria avaliada pela ferramenta, uma vez que todas as categorias possíveis foram incluídas nessa análise.

3.2.2 ONE CLICK LCA

A segunda ferramenta utilizada se assemelha com a primeira no sentido de ser semiautomatizada. Nesse caso, é preciso relacionar os componentes do projeto com a base de dados disponível. Diferente da ferramenta *Tally*, onde todas as avaliações são feitas dentro da própria ferramenta BIM, o *One Click LCA* faz a análise em nuvem, ou seja, a leitura dos componentes é feita na própria ferramenta BIM (existe um plug-in que realiza essa função), mas depois disso, uma página da *web* é aberta para a realização dos cálculos. Nesse caso, diferente da primeira ferramenta analisada, os componentes podem ser agrupados de acordo com algumas regras. As paredes, por exemplo, são agrupadas de acordo com seus diferentes tipos, ou seja, é como se as paredes de mesmo tipo fossem um objeto contínuo representado em apenas uma linha. O mesmo acontece para as vigas, pilares, pisos, etc. Portanto, por mais que o projeto tenha um número alto de componentes, a avaliação é rápida, pois basta relacionar apenas uma vez o tipo de material com o banco de dados que todos os componentes daquele conjunto estarão sendo atendidos. As quantidades de materiais são expressas em quantidades totais, em outras palavras, na análise não é possível visualizar cada elemento separadamente, a não ser que o usuário escolha desagrupar os mesmos, opção não recomendada pela plataforma, já que pode gerar lentidão e maior tempo de análise.

Nesse caso, as rampas também não foram consideradas para ser possível traçar um comparativo justo entre as ferramentas.

Um panorama geral pode ser observado segundo a Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Resultados gerados pela ferramenta One Click LCA (análise da arena)

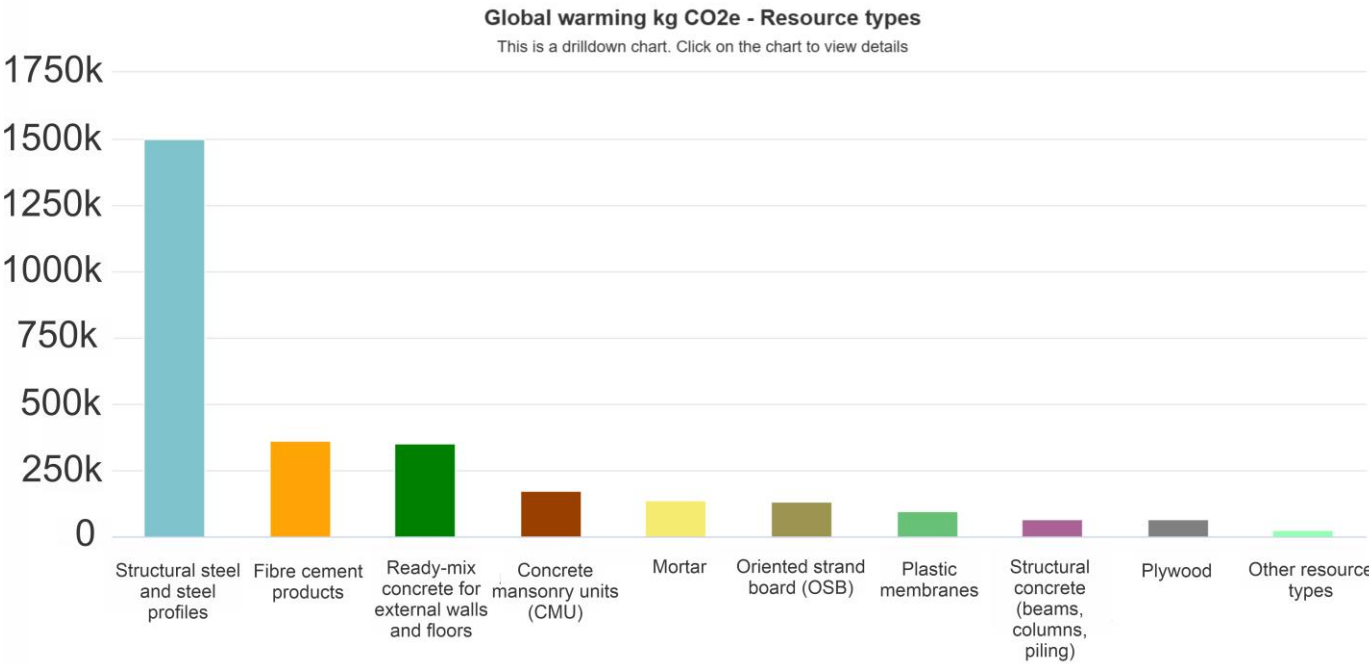
Seção	Categoria de resultados	Global Warming kg CO2e	Acidification kg SO2e	Eutrophication kg Ne	Ozone Depletion kg CFC11e	Formation of tropospheric ozone kg O3e	Fossil fuel primary energy MJ	Total use of primary energy ex. raw materials MJ
A1-A3	Construction Materials	2,772,785.19	15,323.44	9,558.72	141,925.06	38,004,002.03	38,004,002.03	40,152,829.53
A4	Transportation to site							
B3	Repair	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B3a	Repair - materials	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B3b	Repair - transport							
B4-B5	Material replacement and refurbishment	48,738.48	456.14	0.01	4,794.54	253,958.79	253,958.79	519,661.34
B6	Energy consumption							
C1-C4	Deconstruction	87,574.03	487.82	0.01	12,560.68	1,433,268.07	1,433,268.07	1,456,457.16

Fonte: Autoria Própria (2023)

A primeira linha referente aos estágios A1-A3 são as mais importantes, pois são os que avaliam o estágio de produção dos materiais.

Alguns gráficos puderam ser acessados a partir desses valores. Com base no potencial de aquecimento global, que é o indicador que mais receberá atenção no presente trabalho, o Gráfico 5 demonstra como estão distribuídas as emissões de acordo com os diferentes tipos de materiais utilizados nessa construção.

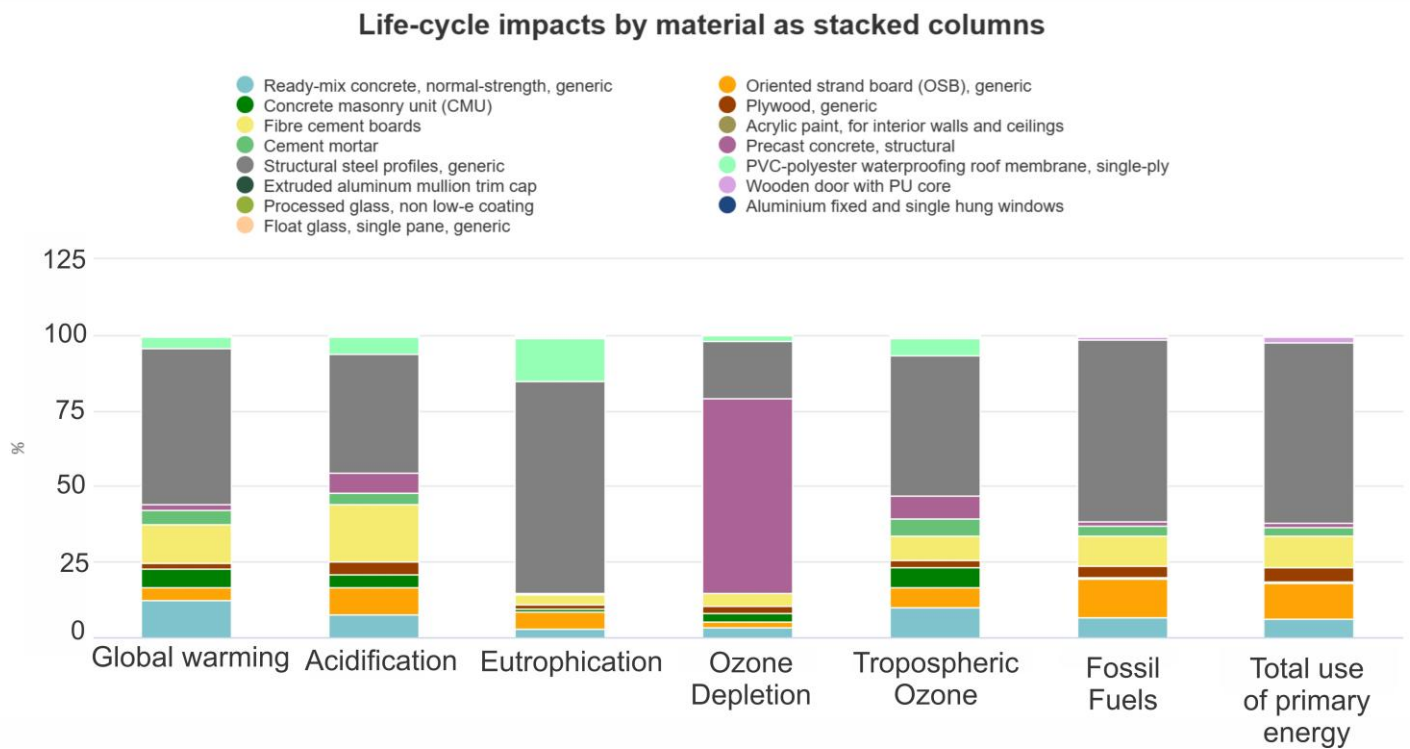
Gráfico 5 – Resultados para o potencial de aquecimento global por componente (análise da arena)



Fonte: Autoria Própria (2023)

Da mesma forma, essa análise pode ser feita levando em consideração todos os indicadores possíveis de avaliação. O resultado desse segundo tipo de gráfico dentro dos tipos de materiais pode ser visualizado a seguir no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Resultados por tipos de materiais (análise da arena)

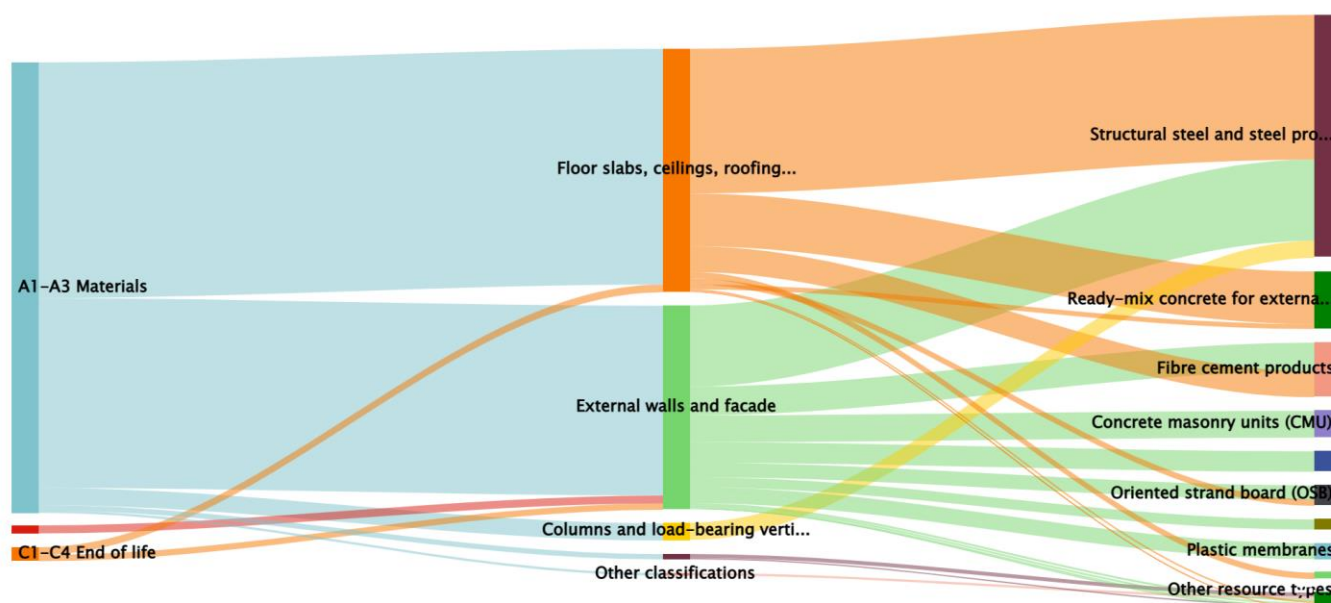


Fonte: Autoria Própria (2023)

Por fim, para representar as proporções descritas nessa seção de uma forma integrada, relacionando os estágios da avaliação do ciclo de vida bem como os tipos de componentes e finalmente seus materiais, a Figura 18 foi criada pela ferramenta e pode ser vista a seguir.

Figura 18 – Resumo dos resultados para aquecimento global (análise da arena)

Sankey diagram, Global warming



Fonte: Autoria Própria (2023)

As análises sobre esses valores e gráficos serão feitas no último tópico dentre os apresentados dentro da Avaliação do Ciclo de Vida da arena. Nessa seção, portanto, são apresentados apenas os valores e informações úteis sobre a ferramenta.

3.2.3 ATHENA IMPACT ESTIMATOR

Primeiramente, as tabelas de quantitativos foram extraídas do *Revit* para ser possível importar para a ferramenta *Athena*. No caso, essa ferramenta não realiza a leitura direta da quantidade de materiais dentro da plataforma BIM, sendo esse processo considerado manual.

Com as tabelas de quantitativos extraídas, foi possível realizar a importação e os consecutivos passos. Cada linha da tabela de quantitativos deveria ser relacionada com um material da base de dados da ferramenta *Athena*. Feita essa associação, era preciso ajustar a unidade de medida importada com a unidade de medida considerada na base de dados; para isso, alguns coeficientes tiveram que ser utilizados (por exemplo, transformar placas que tinham sido extraídas como elementos volumétricos em elementos quadráticos, ou então, transformar o volume de blocos de concreto em número de blocos totais utilizados).

Com todas as conversões feitas, o programa deveria realizar os cálculos a partir dos dados fornecidos. Entretanto, algum erro relacionado com a programação do software não permitiu a realização desses cálculos pela própria ferramenta. Duas tentativas foram

realizadas: uma utilizando a importação da tabela em Excel com as quantidades de materiais e outra utilizando a entrada manual de cada componente dentro do próprio aplicativo.

Como a planilha com todas as quantidades de materiais utilizados estava completa, foi possível recorrer à uma terceira tentativa. No site da ferramenta é possível encontrar um acervo de todos os EPD's utilizados no software, ou seja, os cálculos feitos de forma automática poderiam ser realizados manualmente consultando os EPD's fornecidos pelo Instituto Athena. Essa terceira forma de realizar as análises é mais demorada e necessita de maior atenção para que erros humanos não sejam cometidos, entretanto, por ser a única alternativa viável no momento, foi a escolhida para essa terceira etapa dos cálculos.

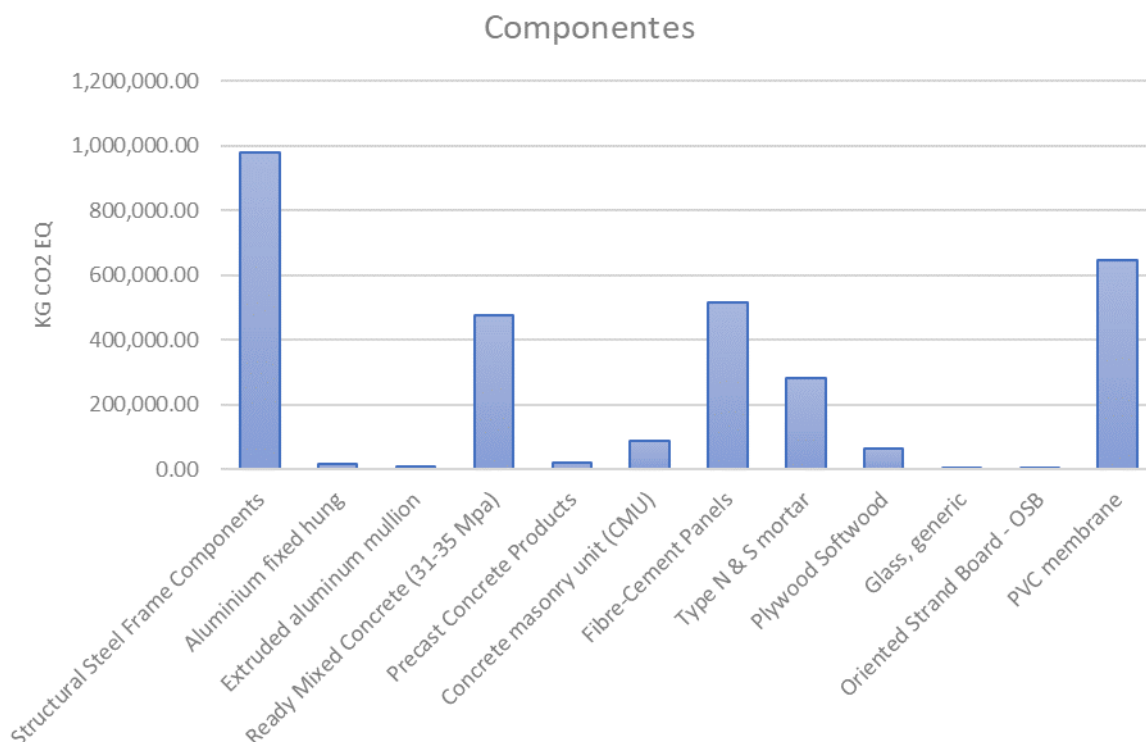
Na Tabela 4 a seguir, são apresentados os resultados referentes aos impactos na fase de produção desses materiais.

Tabela 4 – Resultados gerados pela ferramenta Athena Impact Estimator (análise da arena)

	Global Warming (kg CO ₂ eq)	Acidification (kg SO ₂ eq)	Eutrophication (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Ozone depletion (kg CFC-11 eq)
Componentes	A1 - A3	A1 - A3	A1 - A3	A1 - A3	A1 - A3
Structural Steel Frame Components	981,136.33	3,007.57	548.05	56,742.83	0.01
Aluminium fixed hung	14,553.00	79.25	20.85	0.00	0.00
Extruded aluminum mullion	8,904.42	44.52	55.41	375.96	0.00
Ready Mixed Concrete (31-35 Mpa)	475,954.14	2,111.29	216.84	38,083.18	0.01
Precast Concrete Products	21,900.84	76.91	17.09	1,324.48	0.00
Concrete masonry unit (CMU)	86,444.80	458.82	33.58	6,317.12	0.00
Fibre-Cement Panels	516,238.49	1,780.65	207.51	0.00	0.04
Type N & S mortar	282,861.22	1,308.58	21.94	8,816.97	0.00
Plywood Softwood	62,218.80	633.15	61.43	7,215.08	0.00
Glass, generic	5,549.74	9.60	73.39	0.01	0.00
Oriented Strand Board - OSB	2,064.92	108.21	30,667.16	0.00	0.00
PVC membrane	647,463.60	3,545.63	9,403.64	38,539.50	0.08
TOTAL	3,105,290.30	13,164.18	41,326.87	157,415.13	0.16

Fonte: Autoria Própria (2023)

Os resultados podem ser melhor compreendidos observando o Gráfico 7 a seguir, que traz visualmente a emissão de cada componente citado. Como era esperado, os elementos de aço e concreto (bem como os derivados de cimento) foram os maiores responsáveis por esse alto impacto.

Gráfico 7 – Resultados para o potencial de aquecimento global por componente (análise da arena)

Fonte: Autoria Própria (2023)

Com os resultados dessas três análises foi possível dar início à análise de sensibilidade das ferramentas.

3.2.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Com os resultados de todas as ferramentas, foi possível dar início à análise de sensibilidade. A partir dos resultados, a média e o desvio padrão foram traçados para estimar o quanto o resultado médio foi preciso considerando as três formas de avaliar o mesmo edifício. A Tabela 5 a seguir mostra os principais indicadores e um comparativo das ferramentas.

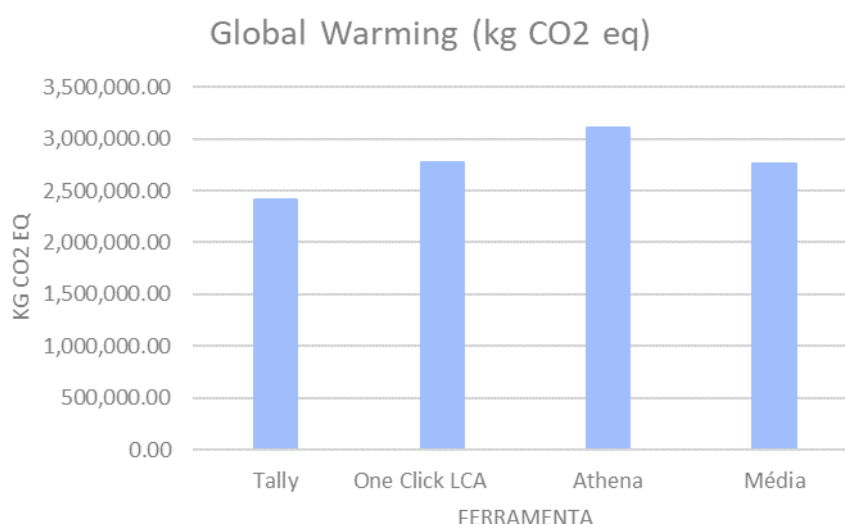
Tabela 5 – Comparação entre as ferramentas (análise da arena)

Categoria de impacto	Ferramenta			Média	Desvio padrão (σ)
	Tally [A1 - A3]	One Click LCA [A1 - A3]	Athena [A1 - A3]		
Global Warming (kg CO2 eq)	2,412,835.00	2,772,785.19	3,105,290.30	2,763,636.83	346,318.29
Acidification (kg SO2 eq)	16,423.00	15,323.44	13,164.18	14,970.21	1,657.88
Eutrophication (kg N eq)	931.90	9,558.72	41,326.87	17,272.50	21,273.58
Smog Formation (kg O3 eq)	258,800.00	141,926.06	157,415.13	186,047.06	63,480.08
Ozone depletion (kg CFC-11 eq)	0.06	0.61	0.16	0.28	0.29

Fonte: Autoria Própria (2023)

Cada indicador será avaliado separadamente, uma vez que a unidade de grandeza de cada um deles é diferente e avaliar todos num mesmo gráfico não seria tão preciso. Considera-se primeiro o resultado obtido pelo potencial de aquecimento global. O Gráfico 8 mostra em barras os três valores encontrados e a média entre eles.

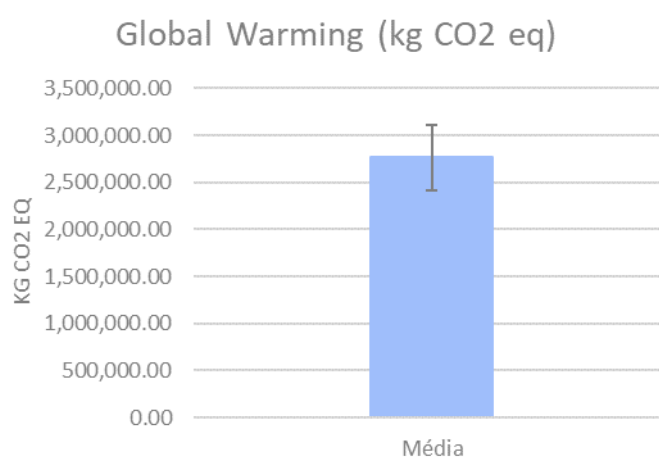
Gráfico 8 – Comparação para o potencial de aquecimento global (análise da arena)



Fonte: Autoria Própria (2023)

O Gráfico 9 mostra apenas a média calculada e o desvio padrão. Percebe-se que, nesse caso, o desvio padrão pode ser considerado pequeno (representa 12,53% do valor da média).

Gráfico 9 – Média e desvio padrão para potencial de aquecimento global (análise da arena)



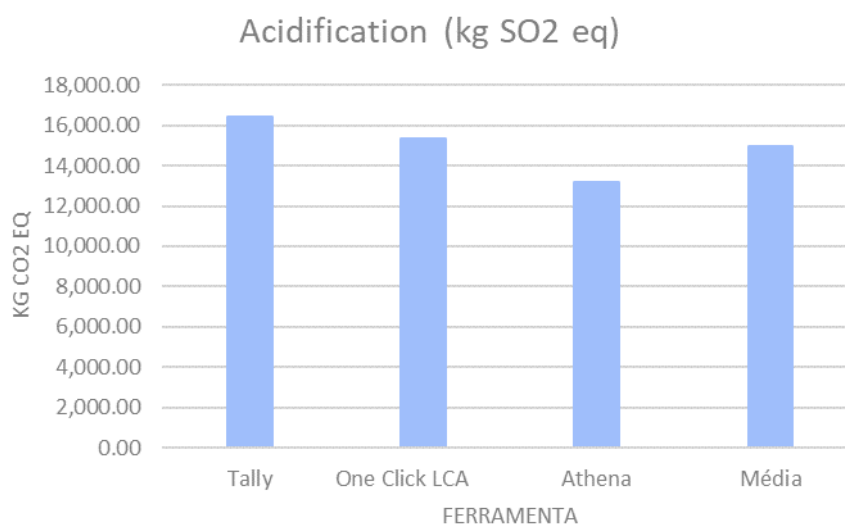
Fonte: Autoria Própria (2023)

Dessa forma, considera-se que o potencial de aquecimento global é um valor coerente considerando as ferramentas utilizadas. Um ponto importante a ser ressaltado é que a arena é um projeto que pode ser considerado relativamente grande, é um edifício de 20 metros de

altura com uma área de 11819,6 m². A quantidade de materiais presentes nessa construção é alta, uma diferença mínima entre um indicador e outro (que é avaliado por alguma unidade de medida do material), pode causar uma grande diferença no final da avaliação. Por conta disso, era esperado que os valores do desvio padrão da arena fossem maiores que aqueles encontrados na escola (fato que será verificado nos tópicos a seguir).

O mesmo gráfico foi feito para o potencial de acidificação (vide Gráfico 10 a seguir). Da mesma forma, são apresentados os resultados encontrados pelas três ferramentas e a média entre esses valores.

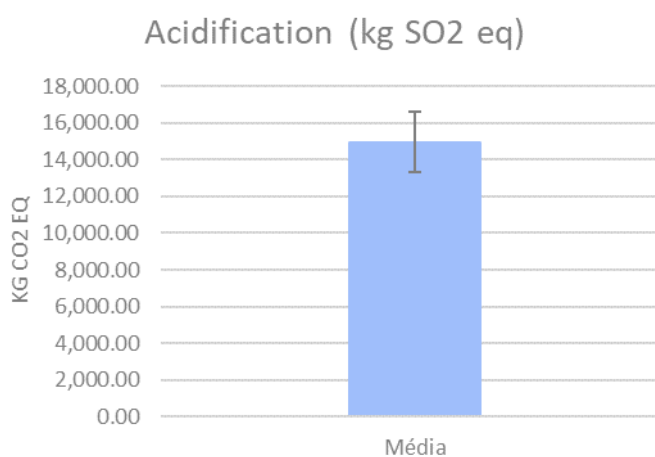
Gráfico 10 - Comparação para o potencial de acidificação (análise da arena)



Fonte: Autoria Própria (2023)

O Gráfico 11 a seguir mostra apenas a média com o desvio padrão para esse caso.

Gráfico 11 - Média e desvio padrão para potencial de acidificação (análise da arena)

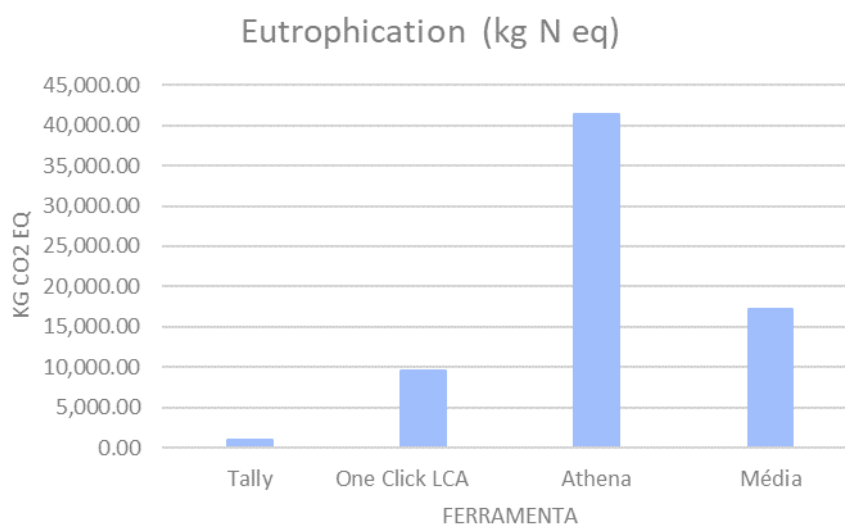


Fonte: Autoria Própria (2023)

Da mesma forma, o resultado pode ser considerado coerente, uma vez que o desvio padrão representa 11,07% do valor da média.

O potencial de eutrofização também pôde ser comparado utilizando os três resultados e a média entre eles. O Gráfico 12 a seguir mostra essa comparação.

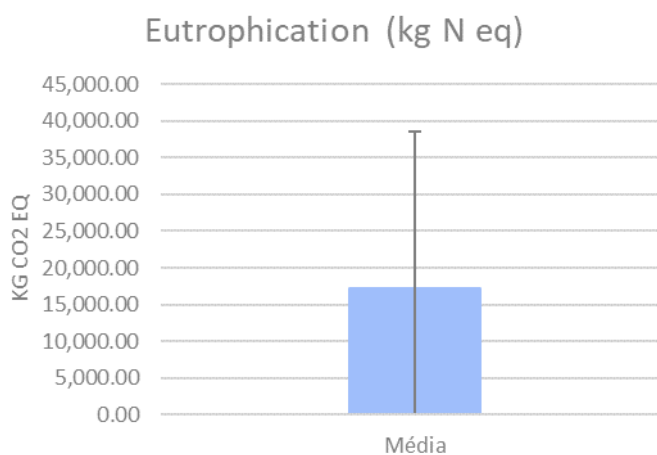
Gráfico 12 - Comparação para o potencial de eutrofização (análise da arena)



Fonte: Autoria Própria (2023)

Como pode ser observado apenas pelo gráfico acima, a variação entre os resultados foi muito grande. Isso pode acontecer devido a falta de informação da base de dados, que, muitas vezes, tem o foco no potencial de aquecimento global e acaba por falhar nos outros indicadores. O Gráfico 13 a seguir mostra apenas a média com o desvio padrão entre os resultados.

Gráfico 13 - Média e desvio padrão para potencial de eutrofização (análise da arena)

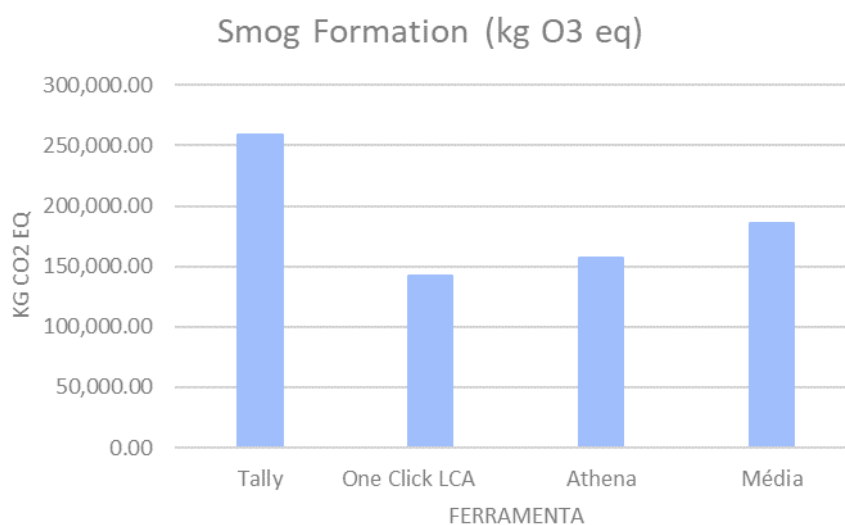


Fonte: Autoria Própria (2023)

Uma vez que o desvio padrão é maior que a própria média entre os resultados, é possível concluir que, pelo menos quanto à esse indicador, os resultados não são coerentes e confiáveis.

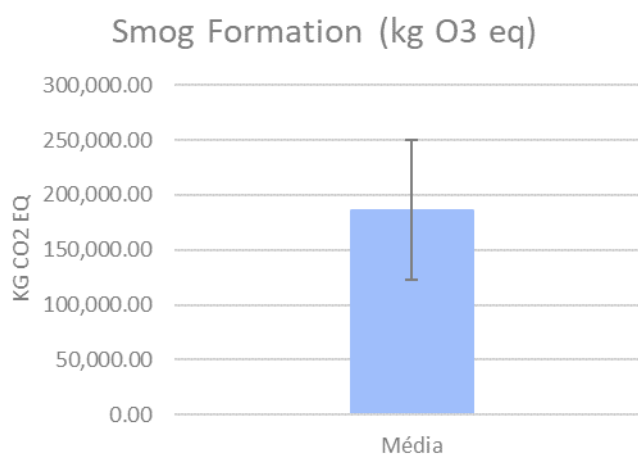
O mesmo foi feito para o potencial de formação de poluição. O Gráfico 14 mostra a comparação entre os valores encontrados pelas três ferramentas e a média, enquanto o Gráfico 15 traz apenas a média com a faixa do desvio padrão encontrado.

Gráfico 14 - Comparação para o potencial de formação de poluição (análise da arena)



Fonte: Autoria Própria (2023)

Gráfico 15 - Média e desvio padrão para potencial de formação de poluição (análise da arena)



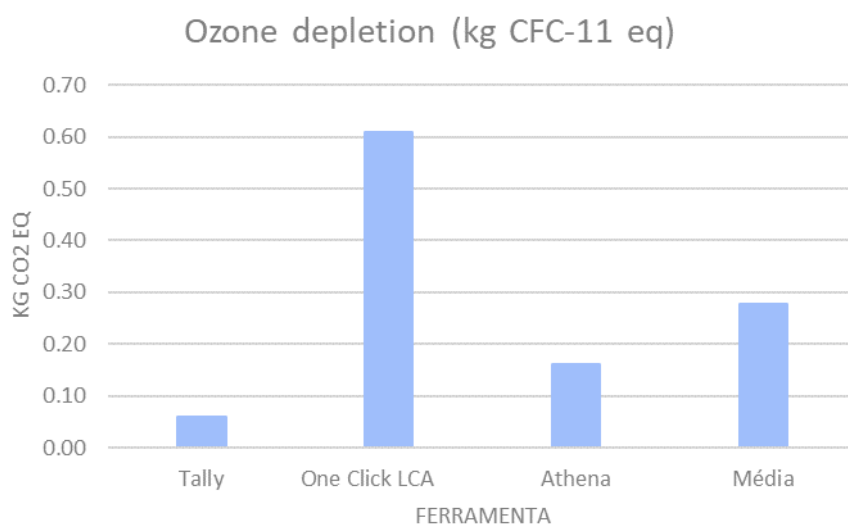
Fonte: Autoria Própria (2023)

Como pode ser observado, os valores do *One Click LCA* e do *Athena Impact Estimator* são relativamente coerentes. Entretanto, o valor que o *Tally* calculou está fora do padrão

observado pelas outras duas ferramentas. Por conta disso, o desvio padrão representa cerca de 34,12% do valor da média.

Para finalizar, a última análise comparativa a ser feita é da depleção da camada de ozônio (ou rarefação da camada de ozônio). O Gráfico 16 mostra o gráfico de barras com os valores retornados pelas ferramentas juntamente com a média e o Gráfico 17 mostra a média com o desvio padrão entre esses valores.

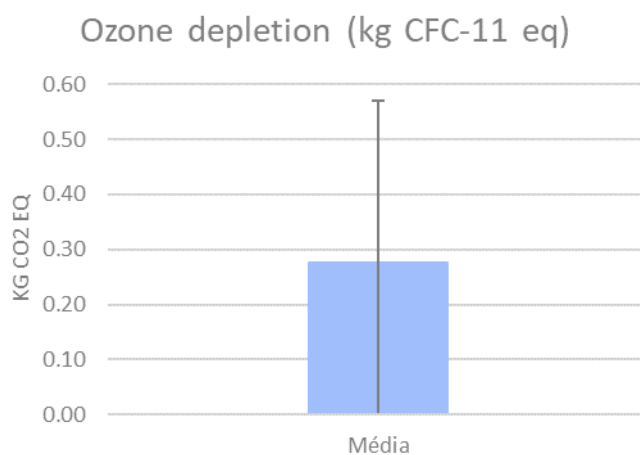
Gráfico 16 - Comparação para a depleção da camada de ozônio (análise da arena)



Fonte: Autoria Própria (2023)

Mais uma vez pode ser observada uma grande inconsistência de dados. Somente pela análise das barras é possível observar que a média não representa um padrão de comportamento e é possível esperar um grande desvio padrão.

Gráfico 17 - Média e desvio padrão para a depleção da camada de ozônio (análise da arena)



Fonte: Autoria Própria (2023)

Nesse caso, o valor do desvio padrão é praticamente o mesmo que o valor da média, ou seja, o resultado encontrado não é representativo. As três ferramentas não são coerentes quanto a esse indicador.

3.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE UMA ESCOLA PADRÃO

Como já foi apresentado, os componentes que foram reutilizados da arena foram marcados para ser possível distinguir daqueles que foram adquiridos. As avaliações desse tópico serão referentes apenas a esses componentes.

3.3.1 TALLY

Como já foi dito, a avaliação feita pelo *Tally* é semiautomatizada, uma vez que os cálculos são automáticos, mas é preciso relacionar os componentes do projeto com a base de dados da ferramenta. Seguindo as mesmas relações já apresentadas no Quadro 5 do presente trabalho, os cálculos foram realizados e serão apresentados a seguir.

Primeiramente, vale ressaltar que o foco desse tópico é analisar apenas os impactos gerados pelo estágio de produção dos materiais, uma vez que esse valor é justamente o impacto que se pretende evitar pela reutilização dos materiais da arena. Dito isso, a Tabela 6 a seguir mostra quais são esses valores.

Tabela 6 - Resultados gerados pela ferramenta Tally (análise da escola)

Environmental Impact Totals	Product Stage [A1-A3]	Construction Stage [A4]	Use Stage [B2-B5]	End of Life Stage [C2-C4]	Module D [D]
Global Warming (kg CO ₂ eq)	412.789	0	8.204	161.100	-22.097
Acidification (kg SO ₂ eq)	2.416	0	1.059	561,7	-290
Eutrophication (kg Neq)	135,1	0	146,2	120,7	-11,0
Smog Formation (kg O ₃ eq)	39.375	0	10.961	3.443	-3.450
Ozone Depletion (kg CFC-11eq)	0,005443	0	3,337E-004	4,644E-009	1,952E-004
Primary Energy (MJ)	9.375.552	0	3.129.256	406.782	-1.481.664
Non-renewable Energy (MJ)	7.375.457	0	1.550.605	380.673	-1.041.830
Renewable Energy (MJ)	2.004.740	0	1.575.986	26.415	-441.199

Fonte: Autoria Própria (2023)

Considerando ainda a área construída de 1481 m², é possível gerar uma segunda tabela com os indicadores por metro quadrado de construção (vide Tabela 7) a seguir.

Tabela 7 - Resultados gerados por área pela ferramenta Tally (análise da escola)

Environmental Impacts / Area					
Global Warming (kg CO ₂ eq/m ²)	278,7	0	5,540	108,8	-14,9
Acidification (kg SO ₂ eq/m ²)	1,631	0	0,7148	0,3792	-0,1961
Eutrophication (kg Neq/m ²)	0,09123	0	0,09871	0,0815	-0,007415
Smog Formation (kg O ₃ eq/m ²)	26,59	0	7,401	2,324	-2,33
Ozone Depletion (kg CFC-11eq/m ²)	3,675E-006	0	2,253E-007	3,136E-012	1,318E-007
Primary Energy (MJ/m ²)	6.331	0	2.113	274,7	-1.000
Non-renewable Energy (MJ/m ²)	4.980	0	1.047	257,0	-703
Renewable Energy (MJ/m ²)	1.354	0	1.064	17,84	-298

Fonte: Autoria Própria (2023)

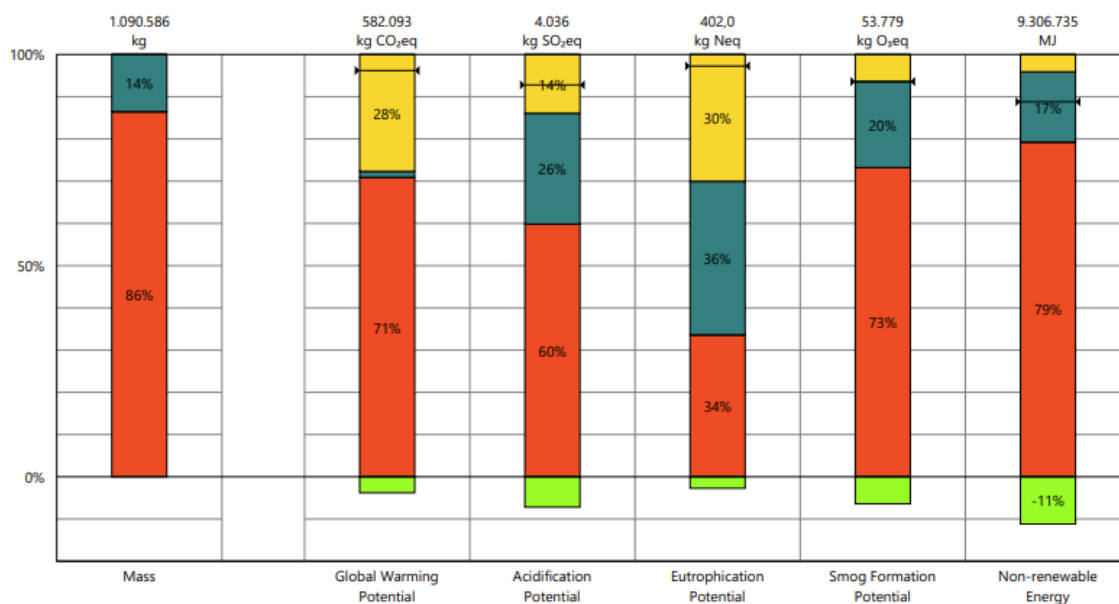
As distâncias percorridas pelos materiais para chegar ao *site* de construção e os valores referentes aos gastos gerados na construção em si não serão fatores considerados neste trabalho.

O módulo D que aparece nas tabelas mostradas na última coluna é sobre o potencial de reuso dos materiais e mais informações sobre ele já foram descritas no item 3.2.1 onde analisa-se os resultados obtidos pela avaliação do ciclo de vida da arena.

Os resultados referentes às porcentagens que cada estágio tem de influência nos impactos podem ser vistos a seguir, no Gráfico 18.

Gráfico 18 - Resultados pelos estágios do ciclo de vida (análise da escola)

Results per Life Cycle Stage



Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 19 - Legenda do gráfico 17 (análise da escola)

Legend

Net value (impacts + credits)

Life Cycle Stages

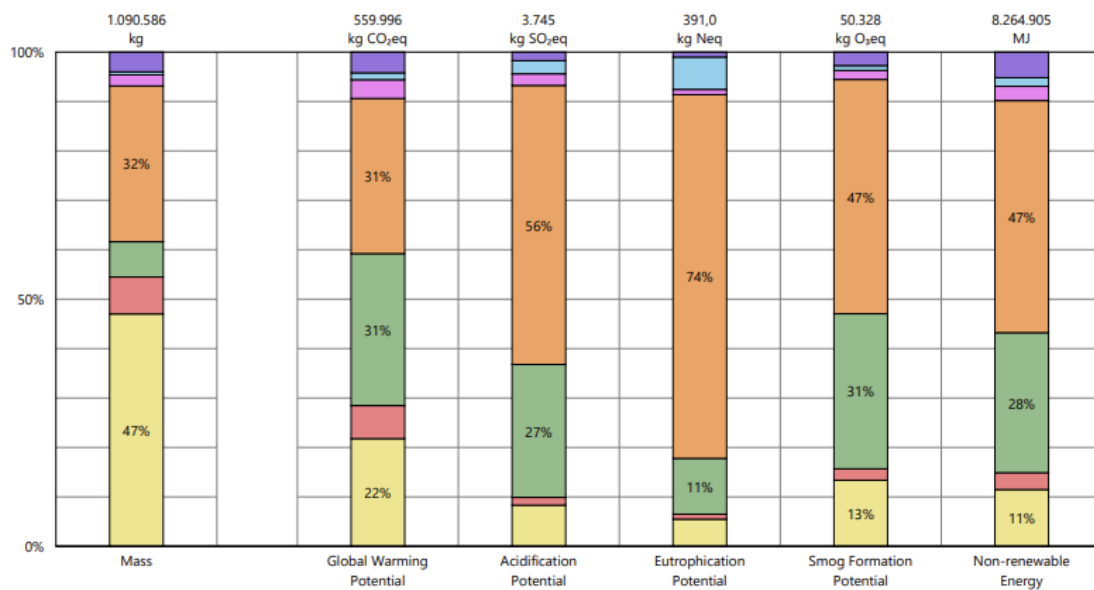
- Product [A1-A3]
- Transportation [A4]
- Maintenance and Replacement [B2-B5]
- End of Life [C2-C4]
- Module D [D]

Fonte: Autoria Própria (2023)

Além desse gráfico, outro que pode ser analisado e é de suma importância para compreender de modo visual quais são as divisões do *Tally* entre os componentes que mais impactaram nos resultados é o Gráfico 19 que pode ser conferido abaixo.

Gráfico 19 - Resultados pelas divisões de indicadores (análise da escola)

Results per Division



Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 20 – Legenda do gráfico 18 (análise da escola)

Legend

Divisions

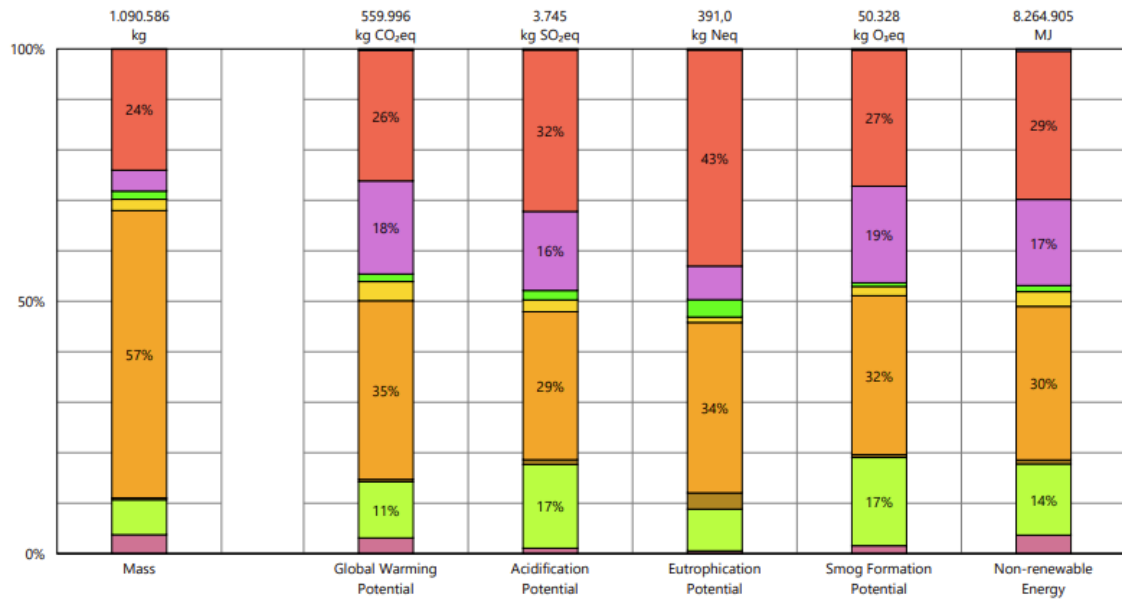
- 03 - Concrete
- 04 - Masonry
- 05 - Metals
- 06 - Wood/Plastics/Composites
- 07 - Thermal and Moisture Protection
- 08 - Openings and Glazing
- 09 - Finishes

Fonte: Autoria Própria (2023)

Por fim, para comparar com os resultados obtidos pela avaliação feita da arena, um último gráfico com porcentagem de influência das categorias de componentes do *Revit* é apresentado (vide Gráfico 20).

Gráfico 20 - Resultados pelas categorias do Revit (análise da escola)

Results per Revit Category



Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 21 – Legenda do gráfico 19 (análise da escola)

Legend



Fonte: Autoria Própria (2023)

Para finalizar os resultados obtidos, vale destacar mais uma vez que as rampas não foram consideradas nessa avaliação uma vez que o *Tally* não apresenta esse componente entre aqueles disponíveis para avaliação.

3.3.2 ONE CLICK LCA

Como já foi discutido no tópico referente às avaliações da arena, a ferramenta *One Click LCA* faz as análises de modo semiautomático. Um ponto positivo que pôde ser observado foi o fato de que as informações utilizadas na análise da arena ficaram salvas no sistema. Os componentes, por apresentarem mesmo nome e mesmos materiais constituintes, foram lidos automaticamente no *website*, o que resultou numa avaliação muito mais rápida.

Da mesma forma que foi feita para a arena, a Tabela 8 a seguir apresenta os resultados gerais alcançados.

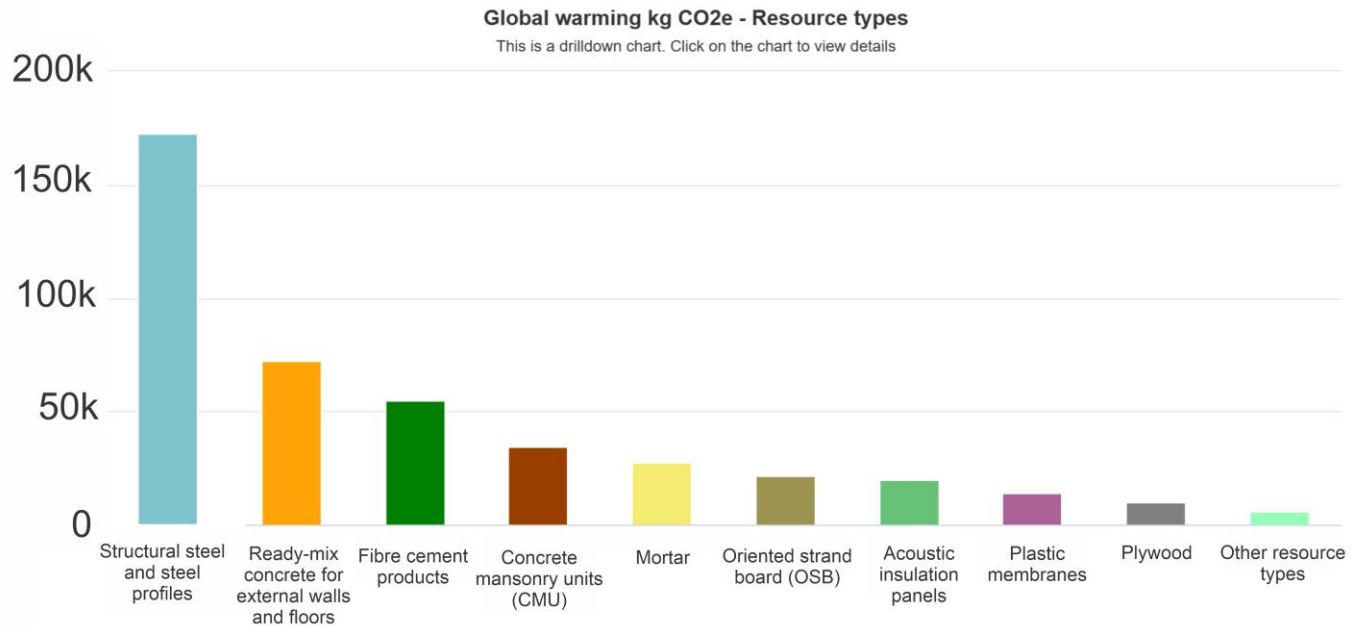
Tabela 8 - Resultados gerados pela ferramenta One Click LCA (análise da escola)

Seção	Categoria de resultados	Global Warming kg CO ₂ e	Acidification kg SO ₂ e	Eutrophication kg Ne	Ozone Depletion kg CFC11e	Formation of tropospheric ozone kg O ₃ e	Fossil fuel primary energy MJ	Total use of primary energy ex. raw materials MJ
A1-A3	Construction Materials	409,963.07	2,318.64	1,203.38	0.03	19,928.23	6,245,230.23	7,035,247.78
A4	Transportation to site							
B3	Repair	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B3a	Repair - materials	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B3b	Repair - transport							
B4-B5	Material replacement and refurbishment	7,103.95	66.46	115.92	0.00	698.62	31,769.56	64,725.56
B6	Energy consumption							
C1-C4	Deconstruction	15,303.18	84.89	97.24	0.00	2,131.31	255,396.87	259,688.82

Fonte: Autoria Própria (2023)

De forma semelhante, alguns gráficos puderam ser acessados a partir desses valores. Com base no potencial de aquecimento global, que é o indicador que mais receberá atenção no presente trabalho, o Gráfico 21 demonstra como estão distribuídas as emissões de acordo com os diferentes tipos de materiais utilizados nessa construção.

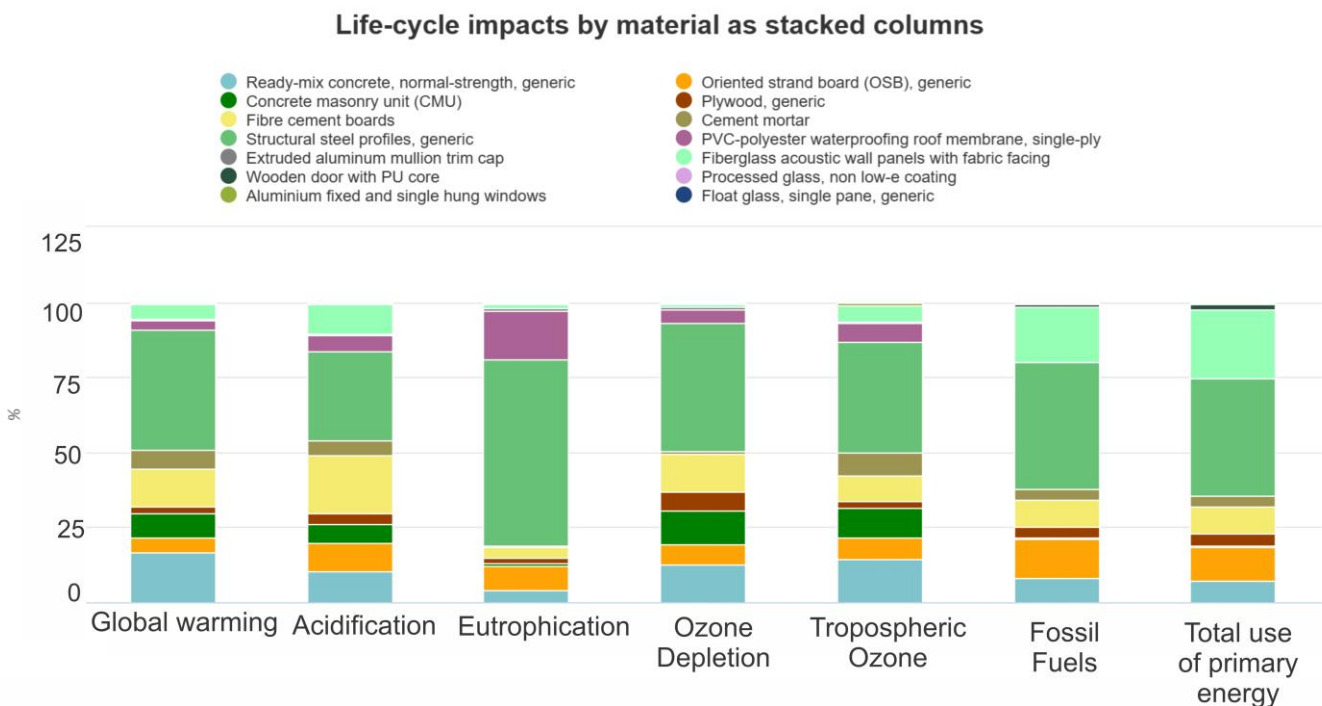
Gráfico 21 - Resultados para o potencial de aquecimento global por componente (análise da escola)



Fonte: Autoria Própria (2023)

Da mesma forma, essa análise pode ser feita levando em consideração todos os indicadores possíveis de avaliação. O resultado desse segundo tipo de gráfico pode ser visualizado a seguir no Gráfico 22.

Gráfico 22 - Resultados por tipos de materiais (análise da escola)

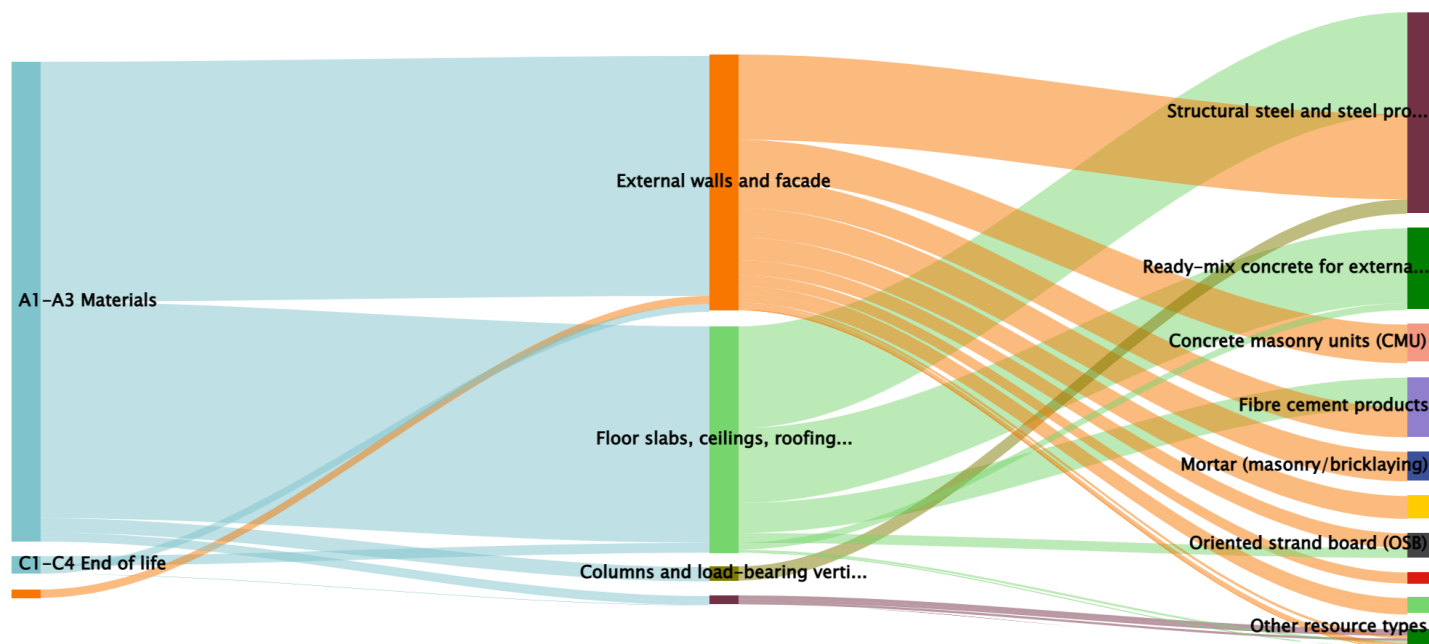


Fonte: Autoria Própria (2023)

Por fim, para representar as proporções descritas nessa seção de uma forma integrada, relacionando os estágios da avaliação do ciclo de vida bem como os tipos de componentes e finalmente seus materiais, a Figura 22 foi criada pela ferramenta e pode ser vista a seguir.

Figura 22 - Resumo dos resultados para aquecimento global (análise da escola)

Sankey diagram, Global warming



Fonte: Autoria Própria (2023)

As análises sobre esses valores e gráficos serão feitas no último tópico dentre os apresentados dentro da Avaliação do Ciclo de Vida da escola. Nessa seção, portanto, são apresentados apenas os valores e informações úteis sobre a ferramenta.

3.3.3 ATHENA IMPACT ESTIMATOR

Como já foi dito no tópico 3.2.3 da presente monografia, os cálculos realizados nesta terceira etapa foram feitos manualmente utilizando as tabelas de quantitativos exportadas do *Revit* e a base de dados do Instituto Athena (uma vez que a lista de EPD's utilizados pode ser encontrada no *website* da ferramenta). A escolha de realizar os cálculos manualmente e não de forma semi-automatizada ocorreu pelo fato de que a ferramenta apresentou problemas no momento de rodar o código que faria essa parte do trabalho.

Como já foi dito, o processo é mais demorado e precisa de maior atenção, mas não deixa de ser preciso ou coerente, uma vez que a base de dados utilizada é exatamente a mesma que seria utilizada dentro da ferramenta.

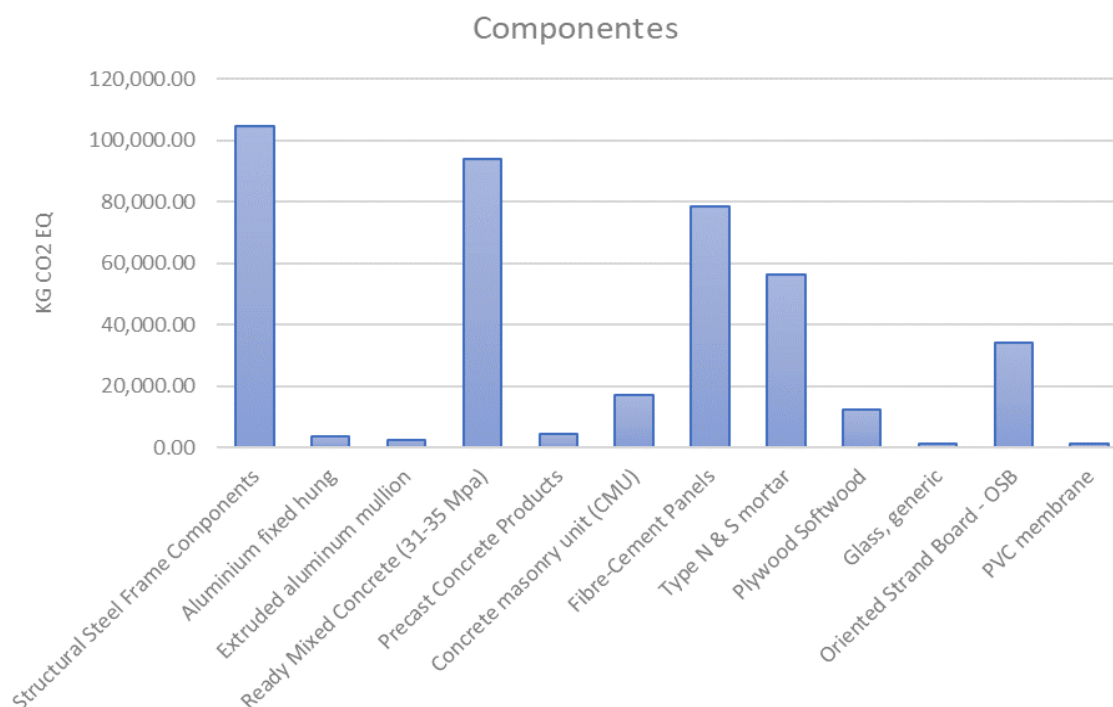
Os resultados obtidos podem ser encontrados na Tabela 9 a seguir. Vale ressaltar que a atenção deve ser dada às etapas A1 – A3, por se tratarem dos impactos gerados pela produção dos materiais, ou seja, é referente aos impactos incorporados ao material. Nesta análise, somente esta etapa será apresentada.

Tabela 9 - Resultados gerados pela ferramenta Athena Impact Estimator (análise da escola)

	Global Warming (kg CO2 eq)	Acidification (kg SO2 eq)	Eutrophication (kg N eq)	Smog (kg O3 eq)	Ozone depletion (kg CFC-11 eq)
Componentes	A1 - A3	A1 - A3	A1 - A3	A1 - A3	A1 - A3
Structural Steel Frame Components	104,785.91	321.21	58.53	6,060.17	0.00
Aluminium fixed hung	3,477.71	18.94	4.98	0.00	0.00
Extruded aluminum mullion	2,425.77	12.13	15.09	102.42	0.00
Ready Mixed Concrete (31-35 Mpa)	93,978.05	416.88	42.81	7,519.60	0.00
Precast Concrete Products	4,427.58	15.55	3.46	267.76	0.00
Concrete masonry unit (CMU)	17,222.40	91.41	6.69	1,258.56	0.00
Fibre-Cement Panels	78,335.50	270.20	31.49	0.00	0.01
Type N & S mortar	56,369.75	260.78	4.37	1,757.08	0.00
Plywood Softwood	12,313.40	125.30	12.16	1,427.90	0.00
Glass, generic	1,332.68	2.31	17.62	0.00	0.00
Oriented Strand Board - OSB	33,950.27	342.63	17.95	5,088.58	0.00
PVC membrane	1,411.20	7.73	20.50	84.00	0.00
TOTAL	410,030.23	1,885.06	235.66	23,566.06	0.01

Fonte: Autoria Própria (2023)

Em gráfico, esses resultados podem ser conferidos e interpretados de forma mais visual (vide Gráfico 23). Conforme pode ser observado, os materiais que mais estão impactando no carbono emitido são os elementos em aço (estrutura) e os elementos de concreto/cimento.

Gráfico 23 - Resultados para o potencial de aquecimento global por componente (análise da escola)

Fonte: Autoria Própria (2023)

A partir desses resultados é possível iniciar a análise de sensibilidade entre as três ferramentas.

3.3.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Para começar a análise de sensibilidade cada um dos indicadores será analisado separadamente, uma vez que as ordens de grandezas dos mesmos são muito diferentes. Primeiramente, uma tabela foi feita para, a partir dela, alguns gráficos serem apresentados. De modo geral, sem considerar as categorias dos materiais, os impactos gerados bem como a média do valor encontrado pelas três ferramentas e o desvio padrão entre esses valores podem ser visualizados na Tabela 10 a seguir.

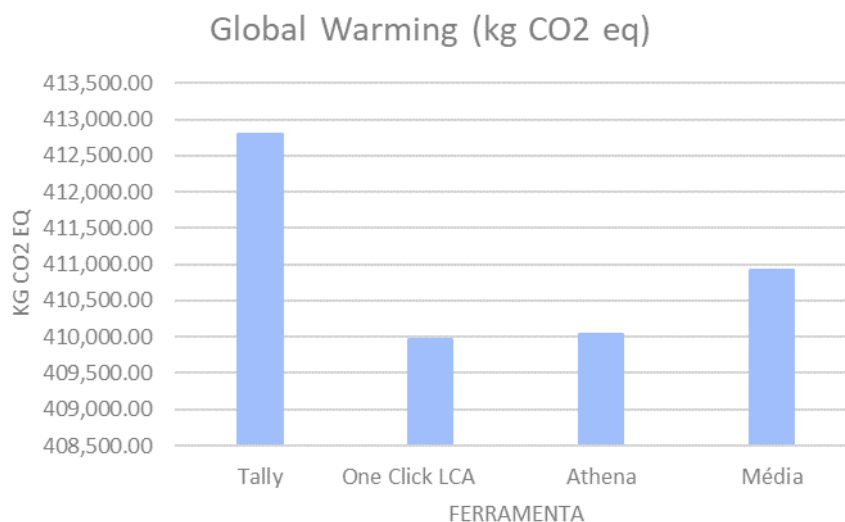
Tabela 10 - Comparação entre as ferramentas (análise da escola)

Categoria de impacto	Ferramenta			Média	Desvio padrão (σ)
	Tally [A1 - A3]	One Click LCA [A1 - A3]	Athena [A1 - A3]		
Global Warming (kg CO2 eq)	412,789.00	409,963.07	410,030.23	410,927.43	1,612.51
Acidification (kg SO2 eq)	2,416.00	2,318.64	1,885.06	2,206.57	282.66
Eutrophication (kg N eq)	135.10	1,203.38	235.66	524.71	589.89
Smog Formation (kg O3 eq)	39,375.00	19,928.23	23,566.06	27,623.10	10,338.71
Ozone depletion (kg CFC-11 eq)	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01

Fonte: Autoria Própria (2023)

A partir disso, considerando o principal indicador desse estudo, que é o potencial de aquecimento global, foi possível gerar o Gráfico 24 que mostra a comparação das três ferramentas juntamente com a média entre esses valores.

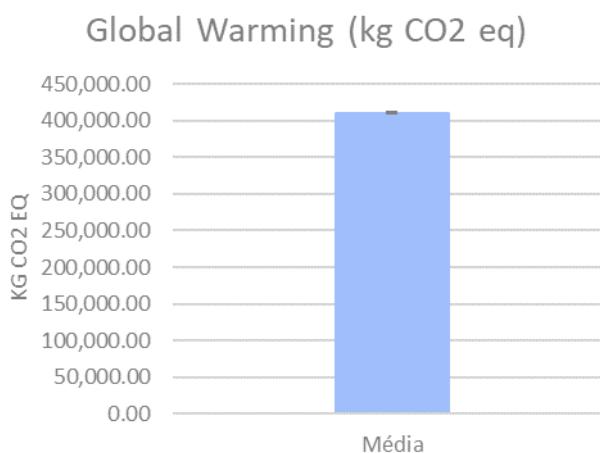
Gráfico 24 - Comparação para o potencial de aquecimento global (análise da escola)



Fonte: Autoria Própria (2023)

Além deste gráfico, outro foi gerado para mostrar, em escala, se o desvio padrão calculado era representativo (significando dessa forma um problema de alinhamento entre as ferramentas). O Gráfico 25 mostra essa análise e, como pode ser observado, o desvio padrão é tão pequeno que é quase insignificante nesse gráfico.

Gráfico 25 - Média e desvio padrão para potencial de aquecimento global (análise da escola)

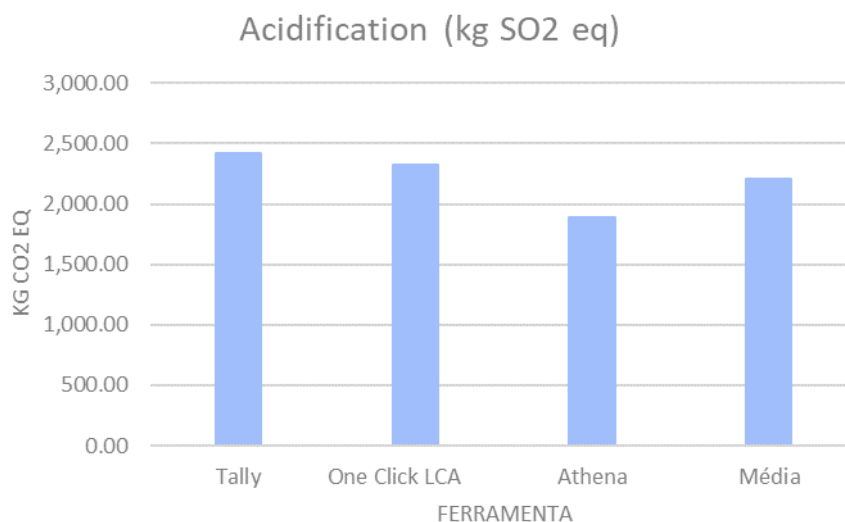


Fonte: Autoria Própria (2023)

Concluí-se a partir dessas análises que, em relação ao potencial de aquecimento global, as três ferramentas estão coerentes e o resultado pode ser considerado confiável.

A mesma análise foi realizada para o potencial de acidificação. Como pode ser observado, os valores retornados pelas ferramentas são bem próximos. O Gráfico 26 mostra essa comparação.

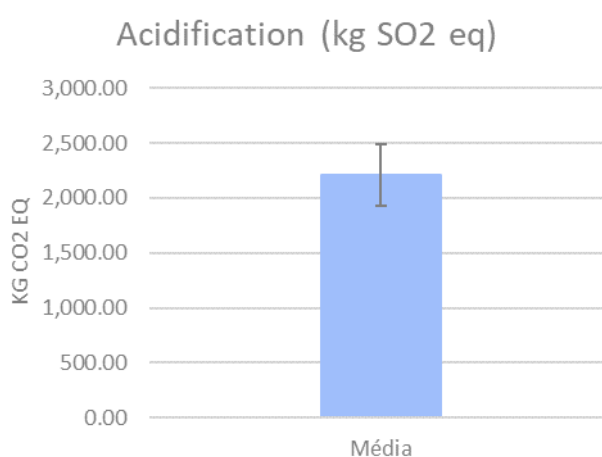
Gráfico 26 - Comparação para o potencial de acidificação (análise da escola)



Fonte: Autoria Própria (2023)

Da mesma forma que foi feito para o potencial de aquecimento global, o potencial de acidificação também foi analisado em relação ao desvio padrão. O resultado pode ser conferido no Gráfico 27.

Gráfico 27 - Comparação para o potencial de acidificação (análise da escola)

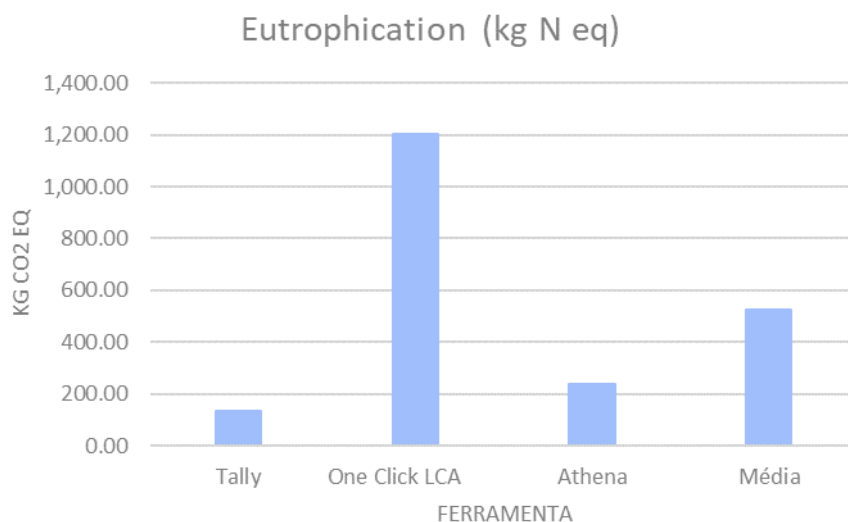


Fonte: Autoria Própria (2023)

O desvio entre os resultados é mais representativo, entretanto, ainda é pequeno em relação ao resultado médio encontrado (12,81% de desvio em relação à média).

Na terceira análise, referente ao potencial de eutrofização, uma maior discrepância pôde ser observada. O Gráfico 28 mostra a comparação entre os valores retornados pelas ferramentas e a média encontrada.

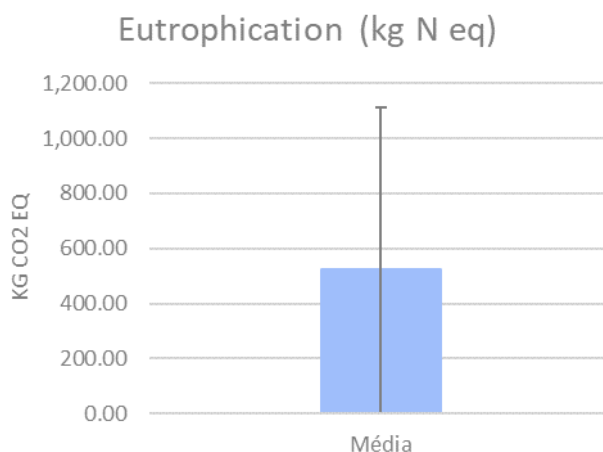
Gráfico 28 - Média e desvio padrão para potencial de eutrofização (análise da escola)



Fonte: Autoria Própria (2023)

De forma semelhante ao que já foi feito, o Gráfico 29 mostra a média desses valores juntamente com o desvio padrão.

Gráfico 29 - Média e desvio padrão para potencial de eutrofização (análise da escola)



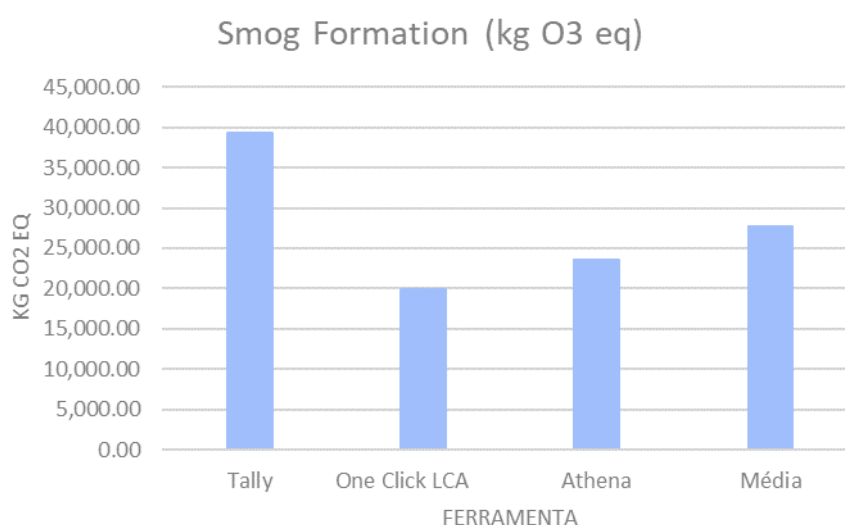
Fonte: Autoria Própria (2023)

Diferente das outras análises apresentadas, esta é marcada por uma alta discrepância. O desvio padrão tem praticamente a mesma dimensão do que a média encontrada, sinal esse de que as ferramentas não estão alinhadas e, como pode ser visto, nenhuma das três apresentou alguma coerência. Uma forma de explicar essa alta variação é que alguns EPD's

não possuem dados relativos ao potencial de eutrofização. Como as análises utilizando a base de dados do Instituto Athena foi feita de forma manual, foi possível observar essa lacuna de informações (feito que não pode ser confirmado nas outras ferramentas pelas análises serem automatizadas ou semi-automatizadas).

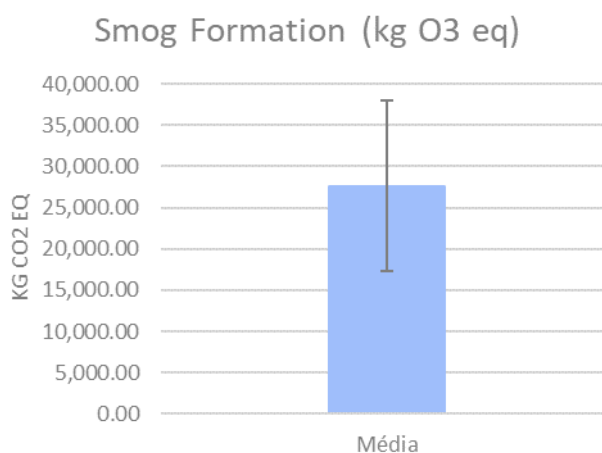
A análise foi realizada da mesma maneira para o potencial de formação de poluição. O Gráfico 30 mostra a comparação entre os valores encontrados e sua média, enquanto o Gráfico 31 mostra a comparação dessa média com o desvio padrão calculado.

Gráfico 30 - Comparação para o potencial de formação de poluição (análise da escola)



Fonte: Autoria Própria (2023)

Gráfico 31 - Média e desvio padrão para potencial de formação de poluição (análise da escola)



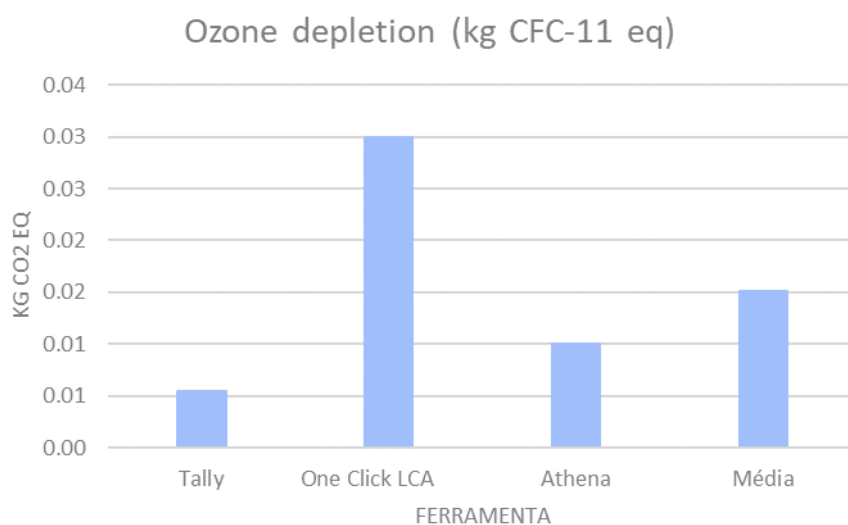
Fonte: Autoria Própria (2023)

Os resultados também são discrepantes, uma vez que o desvio padrão representa 37,43% do valor da média. Os resultados encontrados pelo *One Click LCA* e pelo *Athena*

Impact Estimator possuem maior grau de semelhança, enquanto o resultado obtido pelo *Tally* é quase o dobro se comparado com os dois primeiros valores.

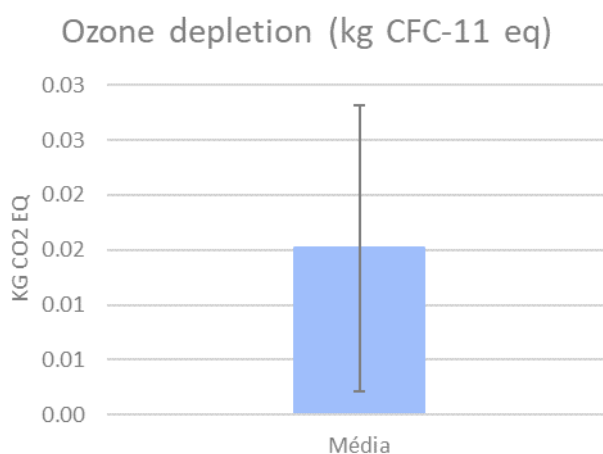
Por fim, a última análise comparativa a ser feita é da depleção da camada de ozônio (ou rarefação da camada de ozônio). O Gráfico 32 mostra o gráfico de barras com os valores retornados pelas ferramentas juntamente com a média e o Gráfico 33 mostra a média com o desvio padrão entre esses valores.

Gráfico 32 - Comparação para a depleção da camada de ozônio (análise da escola)



Fonte: Autoria Própria (2023)

Gráfico 33 - Média e desvio padrão para a depleção da camada de ozônio (análise da escola)



Fonte: Autoria Própria (2023)

Da mesma forma, o desvio padrão é muito alto se comparado com a média. Segundo os valores encontrados (considerando todas as casas decimais), o desvio padrão representa 86,24% da média encontrada. Esse valor, portanto, não converge para um padrão e não é

considerado confiável. Os motivos podem ser semelhantes aos citados anteriormente, como falta de dados ou falta de precisão dos dados disponibilizados.

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

No início do desenvolvimento do presente trabalho, foi possível observar através dos projetos que apenas uma parte dos materiais eram passíveis de reutilização. A estrutura, por exemplo, por depender de soluções únicas, utilizou apenas parte do aço que a arena poderia disponibilizar. Dentre os componentes, aqueles referentes às vedações do edifício foram considerados passíveis de reciclagem, uma vez que a segurança do edifício não dependia rigorosamente destas escolhas construtivas.

A Tabela 11 a seguir mostra, ao todo, os impactos evitados pela reutilização dos materiais descritos no começo do tópico dos resultados. Os valores médios dos impactos foram utilizados para o potencial de aquecimento global, potencial de acidificação e potencial de formação de poluição.

Tabela 11 – Impactos evitados e balanço estimado

Categoria de impacto	Valor médio evitado 1 escola	Valor médio evitado 4 escolas	Valor médio gerado Arena	Balanço	% que o balanço representa
Global Warming (kg CO ₂ eq)	410,927.43	1,643,709.73	2,763,636.83	1,119,927.10	40.52
Acidification (kg SO ₂ eq)	2,206.57	8,826.27	14,970.21	6,143.94	41.04
Smog Formation (kg O ₃ eq)	27,623.10	110,492.39	186,047.06	75,554.68	40.61

Fonte: Autoria Própria (2023)

A porcentagem que o balanço representa, por ser calculada considerando as médias, resultou em aproximadamente 40% para todos os casos. Entretanto, se considerarmos as análises por cada ferramenta separadamente, esses valores mudam, e se tornam mais distantes. Para uma análise do balanço considerando cada ferramenta separadamente, a Tabela 12 a seguir foi montada.

Tabela 12 – Impactos evitados e balanço estimado considerando as três ferramentas

Ferramenta	Categoria de impacto	Valor médio evitado 1 escola	Valor médio evitado 4 escolas	Valor médio gerado Arena	Balanço	% que o balanço representa	% que os impactos evitados representam
Tally	Global Warming (kg CO ₂ eq)	412,789.00	1,651,156.00	2,412,835.00	761,679.00	31.57	68.43
One Click LCA		409,963.07	1,639,852.28	2,772,785.19	1,132,932.91	40.86	59.14
Athena I.E.		410,030.23	1,640,120.92	3,105,290.30	1,465,169.38	47.18	52.82
Tally	Acidification (kg SO ₂ eq)	2,416.00	9,664.00	16,423.00	6,759.00	41.16	58.84
One Click LCA		2,318.64	9,274.56	15,323.44	6,048.88	39.47	60.53
Athena I.E.		1,885.06	7,540.24	13,164.18	5,623.94	42.72	57.28
Tally	Smog Formation (kg O ₃ eq)	39,375.00	157,500.00	258,800.00	101,300.00	39.14	60.86
One Click LCA		19,928.23	79,712.92	141,925.06	62,212.14	43.83	56.17
Athena I.E.		23,566.06	94,264.24	157,415.13	63,150.89	40.12	59.88

Fonte: Autoria Própria (2023)

Somente os três indicadores acima foram considerados uma vez que, considerando os outros parâmetros, o valor do desvio padrão foi quase tão grande ou maior que a média encontrada. O desvio padrão, por definição, é o parâmetro que indica o grau de variação de um conjunto de elementos. Esse valor ser maior que a média encontrada representa uma falta de coerência entre dados, uma vez que o intervalo da distribuição dos mesmos (intervalo da média menos desvio padrão até média mais desvio padrão) resulta em um dos limites negativo, condição essa que deve ser considerada impossível se tratando de impactos emitidos. Dessa forma, a análise foi feita apenas para os indicadores de maior confiabilidade.

A Tabela 11 mostra na primeira coluna os impactos considerados nessa última análise, a segunda coluna representa o valor médio dos impactos evitados pela reutilização dos materiais em apenas uma escola, a terceira coluna diz respeito ao total que pode ser evitado considerando todas as escolas que receberam materiais provenientes da arena, a quarta coluna representa os impactos causados pela construção da arena, a coluna “balanço” representa a diferença entre os impactos gerados e os evitados, já a última coluna representa o percentual de impacto dos materiais que realmente encerrarão seu ciclo de vida com a demolição da arena.

Percebe-se que mais da metade do impacto gerado (cerca de 60%) pode ser emitido apenas uma vez, já que a construção das escolas representa o início de uma segunda vida para esses elementos construtivos. Se fosse somado o impacto causado pela construção da arena com o impacto causado pela construção das quatro novas escolas (sem considerar reaproveitamento de materiais), teríamos os seguintes valores (vide Tabela 13).

Tabela 13 – Valor gerado caso todos os materiais fossem utilizados em primeira vida

Categoria de impacto	Valor médio gerado 4 escolas	Valor médio gerado Arena	Valor médio gerado Total	% *
Global Warming (kg CO ₂ eq)	1,643,709.73	2,763,636.83	4,407,346.56	159.48
Acidification (kg SO ₂ eq)	8,826.27	14,970.21	23,796.47	158.96
Smog Formation (kg O ₃ eq)	110,492.39	186,047.06	296,539.45	159.39

* Porcentagem considerando a razão entre o impacto total que foi gerado reutilizando os materiais e o impacto que seria gerado caso todos os materiais fossem utilizados em primeira vida, ou seja, as emissões seriam aproximadamente 60% maiores.

Fonte: Autoria Própria (2023)

Dentre as fases do ciclo de vida da arena, essa análise mostra que a fase A de produção dos materiais (mais especificamente, da fase A1 – A3) teria um impacto positivo de + 2.763.636,83 kg de CO₂; enquanto a fase D, referente aos benefícios e carregamentos além dos entornos do sistema teria um impacto negativo de – 1.643.709,73. Ao todo, considerando que os impactos devem ser somados em todas as fases dos ciclos de vida para obter um

quadro geral da avaliação ambiental da construção, o valor mostrado na coluna “Balanço” da Tabela 10 mostra como essa soma é amenizada pela existência dessa fase final (D) na vida do edifício, que geralmente não é adotada na maioria das edificações.

Como encerramento das análises dos resultados, fica provado a importância da reutilização de materiais em boas condições de reaproveitamento. Neste estudo de caso foram considerados principalmente elementos de vedação nas reutilizações e, ainda que os elementos estruturais não fossem completamente passíveis de reaproveitamento, o resultado final foi claramente benéfico e impactante.

Numa análise crítica, considerando formas de diminuir a pegada de carbono da arena (uma vez que o total emitido é um valor significativamente alto), uma possível solução seria substituir as vedações feitas em *steel frame* por vedações em *wood frame*. Quando comparados os EPD's dos materiais em aço e em madeira, percebe-se que o segundo tipo possui uma baixa pegada de carbono quando comparado com o primeiro. A estrutura em madeira emite um total de 329,4 kg de CO₂ eq por metro cúbico enquanto o aço emite cerca de 18.058,61 kg de CO₂ eq por metro cúbico (dados retirados dos EPD's utilizados pela ferramenta *One Click LCA*). Sendo assim, essa substituição poderia gerar uma grande diminuição da pegada de carbono geral da arena.

Outra alternativa viável seria substituir as placas cimentícias da parede (também com uma função apenas de vedação) por placas de gesso acartonado. As placas cimentícias emitem cerca de 1.068,93 kg de CO₂ eq por metro cúbico, enquanto a placa de gesso acartonado à prova de fogo emite cerca de 187,82 kg de CO₂ eq por metro cúbico.

Um ponto importante de discussão é analisar também a divergência entre as ferramentas e os possíveis motivos para as mesmas. Como já foi dito na apresentação dos resultados obtidos, nem sempre todos os valores relativos à todos os impactos estão disponíveis nas bases de dados. O único valor que está sempre presente e se mostrou ser o mais assertivo quando comparadas as ferramentas é a emissão de carbono de um dado material. Outro fator que influencia muito os resultados é a região que o projeto está sendo desenvolvido, uma vez que existem diferentes bases de dados para diferentes regiões. No caso do presente trabalho foram considerados valores relativos à América do Norte (Estados Unidos e Canadá), uma vez que as ferramentas foram desenvolvidas nesta região.

No caso da ferramenta *Tally*, não é possível estabelecer relação entre região e base de dados. Na ferramenta *One Click LCA*, é possível escolher o país em questão e, algumas vezes,

até mesmo a região dentro do país do projeto. Fazendo uma análise de usuário, a ferramenta *One Click LCA* foi a que apresentou maior transparência em todas as etapas, sendo possível escolher o EPD que melhor se enquadrava no caso entre uma infinidade de EDP's disponíveis. Além disso, depois da leitura dos dados do projeto, foi possível analisar as unidades, valores encontrados e até mesmo realizar alterações nessas quantidades dentro desta ferramenta. O *Athena Impact Estimator* se mostrou muito semelhante ao *Tally*, onde os dados de entrada eram lidos da planilha Excel e os cálculos eram realizados de acordo com a relação entre materiais da base de dados e do projeto (opções mais limitadas e sem grandes definições ou características específicas). A diferença entre o *Tally* e o *Athena* é que o primeiro não disponibilizava a opção de escolher a região do projeto e o segundo sim. Não foi possível saber como o código do programa funcionava, mas é possível que essa escolha mude a base de dados fornecida para o usuário.

Unindo facilidade de uso, transparência e variedade, a ferramenta *One Click LCA* foi a mais vantajosa, rápida e de fácil utilização, podendo ser enquadrada como uma escolha eficiente e efetiva quanto aos cálculos de impactos ambientais de edifícios dentro dos três indicadores de maior confiabilidade de resultados apresentado neste tópico.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral do presente trabalho era determinar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida da Arena do Futuro, projetada segundo os princípios do *design* para desmontagem. Ao longo da realização deste projeto, o objetivo foi cumprido a partir da avaliação do carbono incorporado dos materiais utilizados no projeto da arena e da avaliação quanto ao impacto evitado pela reutilização de alguns dos materiais.

Como resultado, foi possível concluir que aproximadamente 40% do impacto gerado na construção da arena foi realmente “desperdiçado” ao final da vida, os outros 60% foram emitido apenas uma vez, considerando a reutilização de certos materiais. Ao todo 2.763.636,83 kg de CO₂ foram emitidos na produção dos materiais primários da arena. Caso os materiais que foram reutilizados fossem adquiridos em primeira vida, a emissão total dos mesmos seria de 1.643.709,73 kg de CO₂, ou seja, esse foi o crédito de carbono gerado pela reutilização dos materiais. O balanço mostra que, considerando o impacto negativo da fase de carregamentos além do entorno do sistema (reutilização dos materiais), a emissão total da arena passou a ser de 1.119.927,10 kg de CO₂.

O projeto da arena é inovador em vários sentidos. Realizar um projeto com alto nível de desmontabilidade e pensar na reutilização desses componentes ainda na fase inicial de projeto é um avanço que o Brasil começou a adotar, ainda que timidamente. Entretanto, a falta de conhecimento dos profissionais da indústria da construção acerca dos impactos gerados pelas escolhas construtivas pode fazer com que essas análises fiquem em segundo plano e, como mostrado na presente monografia, as mesmas são de extrema importância para alcançar um projeto sustentável em várias esferas.

Como foi abordado no começo desta monografia, o mundo está passando por um processo de descarbonização, uma vez que as emissões estão crescendo em ritmo desenfreado e, o planeta, como fonte esgotável de matéria prima, está passando por problemas ambientais graves e mudanças climáticas sentidas facilmente por qualquer ser humano ao longo dos anos. Pelos resultados encontrados no presente trabalho é possível concluir que este tema é relevante e importante principalmente no setor da construção civil que é grande responsável pelas emissões de dióxido de carbono atualmente. Caso esses resultados fossem visíveis em

todas as grandes construções da atualidade (principalmente as construções que podem ter caráter provisório, como a arena), muitos profissionais optariam por soluções inteligentes de desmontagem e reutilização de materiais para fins de caráter permanente (como a construção das escolas de rede pública).

Um pequeno ajuste como este poderia desencadear uma onda de reutilização em massa. Os edifícios, que hoje são vistos apenas como construções, podem passar a ser vistos como bancos de materiais passíveis de reutilização. Caso isso ocorra, a necessidade de adquirir materiais primários diminuiria ao passo que a cultura da economia circular seria instalada na sociedade moderna.

Quanto às ferramentas, foi demonstrado como as bases de dados utilizadas devem passar por revisões, principalmente quanto aos impactos além do potencial de aquecimento global. Além disso, caminhar rumo à uma padronização dos aplicativos e aumento do banco de dados (considerando diversas regiões do mundo), seria uma forma de aumentar a adoção e prática destes cálculos. Mesmo com esses fatores, as três formas de realização dos cálculos são confiáveis quanto aos valores referentes ao potencial de aquecimento global, potencial de acidificação e potencial de formação de poluição.

Futuros estudos na área podem explorar essas divergências, os motivos para que elas ocorram e o caminho rumo à uma maior padronização e consequente maior confiabilidade dos resultados. Além disso, formas de implementar a economia circular nos edifícios e nas cidades podem ser estudadas a fim de mudar culturalmente a prática da aquisição de matéria prima. Por fim, vale ressaltar que soluções seguindo os 9 R's da economia circular devem ser exploradas e adaptadas para o setor da construção civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040. **Avaliação do Ciclo de Vida: princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2004. 30 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO 14044, **Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009. 52 p.

ACERO, A.; RODRÍGUEZ, C.; CHANGELOG, A. **LCIA methods Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2016/08/LCIA-METHODS-v.1.5.5.pdf>>.

AIA. AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS. **Building Information Modeling Protocol Exhibit. Model Progression Specifications**. In M. P. Specifications (Ed.): AIA California Council, 2018. 9 p.

AZHAR, S.; BROWN, J. BIM for sustainability analyses, **Int. J. Constr. Educ. Res.** 5 (4), p. 276–292. novembro, 2009.

BARE, J. C. TRACI: The tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts. **Journal of industrial ecology**, v. 6, n. 3-4, p. 49-78, 2002.

BRASIL. **Decreto nº 9.983**, de 22 de agosto de 2019. Dispõe sobre a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling e institui o Comitê Gestor da Estratégia do Building Information Modelling. Lex: Coletânea da Legislação e Jurisprudência, Brasília, 4 p., 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA Nº 307, de 17/07/2002.

BUENO, C.; FABRICIO M.M. Aplicação da modelagem de informação da construção (BIM) para a realização de estudos de avaliação de ciclo de vida de edifícios. **PosFAUUSP**. v.23, n.40. 2016.

BUENO, C. **Avaliação de Ciclo de Vida na Construção Civil: Análise de Sensibilidade**. 2014. Dissertação de Doutorado – Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

BUENO, C.; FABRICIO, M. M. Comparative analysis between a complete LCA study and results from a BIM-LCA plug-in. **Automation in Construction**. São Carlos, Brazil. v. 90, p. 188-200, junho, 2018.

BULLE, C., MARGNI, M., Patouillard, L. et al. IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. p. 1653-1674. fevereiro, 2019.

COTTAFAVA, D.; RITZEN, M. Circularity indicator for residential buildings: Addressing the gap between embodied impacts and design aspects. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 164, p. 105120, 2021.

DURÃO, V.; COSTA, A. A.; SILVESTRE, J. D.; MATEUS, R.; DE BRITO, J. Integration of environmental life cycle information in BIM objects according with the level of development. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. v. 225, p. 5-7, fevereiro, 2019.

EN. EUROPEAN STANDARD NORME EUROPÉENNE EUROPAISCHE NORM. EN 15.978. **Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method.** Brussels, 2011. 60 p.

ERLANDSSON, M.; BORG, M. Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions e operation services: today practice e development needs. **Building and Environment.** Oxford. v. 38, n. 7, p. 919 – 938, 2003.

ESTADÃO. Rio 2016: O Legado Olímpico. Disponível em: <<https://infograficos.estadao.com.br/esportes/rio-2016-legado-olimpico/arena-do-futuro.php>>. Acesso em: 3 set. 2022.

European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - **General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**, Luxembourg, (2011).

FORTH, K.; BRAUN, A.; BORRMANN, A. BIM-Integrated LCA – model analysis and implementation for practice. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.** v. 90, p. 11-14, setembro, 2019.

GONÇALVES, S. C. et al. A gestão dos resíduos da construção civil sob os aspectos legais e normativos. **Revista NUPEM**, v. 4, n. 7, p. 133-151, 2012.

GUERRA, B.C.; SHAHI, S.; MOLLAEI, A.; SKAF, N.; WEBER, O.; LEITE, F.; HAAS, C. Circular economy applications in the construction industry: A global scan of trends and opportunities. **Cleaner Production, Elsevier.** v. 324. novembro, 2021.

GUINEE, J. B. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 7, n. 5, p. 311–313, set. 2002.

HEIJUNGS, R.; GUINÉE, J.; HUPPES, G. **IMPACT CATEGORIES FOR NATURAL RESOURCES AND LAND USE Survey and analysis of existing and proposed methods in the context of environmental life cycle assessment.** [s.l: s.n.], 1992. Disponível em: <<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=662eebc78641b667424f1c36679b5cb05c45ba2b>>.

HUOVILA, P.; ALA-JUUSELA, M.; MELCHERT, L.; POUFFARY, S.; CHENG, C.; ORGEVORSATZ, D.; KOEPEL, S.; SVENNINGSSEN, N.; GRAHAM, P. Climate Change: Summary for Decision-Makers. **United Nations Environment Programme.** Paris, France, 2009.

KHADIM, N. et al. Critical review of nano and micro-level building circularity indicators and frameworks. **Journal of Cleaner Production**, p. 131859, 2022.

LARA, B. L. E.; ROSADO, L. P. e PENTEADO, C. S.G. Avaliação do Ciclo de Vida aplicada ao gerenciamento de resíduos da construção civil: viabilidade ambiental de agregados reciclados. In: **VII Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida.** Rio Grande do Sul: Vinícius Gonçalves Maciel, 2021. v. 2, p. 14-19.

MATTARAIA, L.F. **Projeto para desmontagem e BIM: ferramentas projetuais para aperfeiçoar a reutilização de materiais.** 2019. Dissertação de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

MUNARO, M. R.; TAVARES, S. F. Analysis of Brazilian public policies related to the implementation of circular economy in civil construction. **Ambiente Construído.** Porto Alegre. v.22, n. 2, p. 129-142. abril, 2022.

NANEVA, A.; BONANOMI, M.; HOLLBERG, A.; HABERT, G.; HALL, D.; Integrated BIM-Based LCA for the entire building process using an existing structure for cost estimation in Swiss context. **Sustainability**. Suíça, v.12, maio, 2020.

NUNES, K. R. A. **Avaliação de Investimentos e de Desempenho de Centrais de Reciclagem para Resíduos Sólidos de Construção e Demolição**. 2004. Dissertação de Doutorado – Departamento de Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, fevereiro, 2014.

POTTING, J. et al. Circular economy: measuring innovation in the product chain. The Hague: PBL Publishers. janeiro, 2017.

SOUST-VERDAGUER, B.; LLATAS, C.; GARCÍA-MARTÍNEZ, A. Critical review of bim-based LCA method to buildings. **Energy and Buildings**, v. 136, p. 110-120, 2017.

SUCCAR, B. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. **Automation in Construction**. Austrália. v. 18, n. 3, p. 357–375, 2009.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

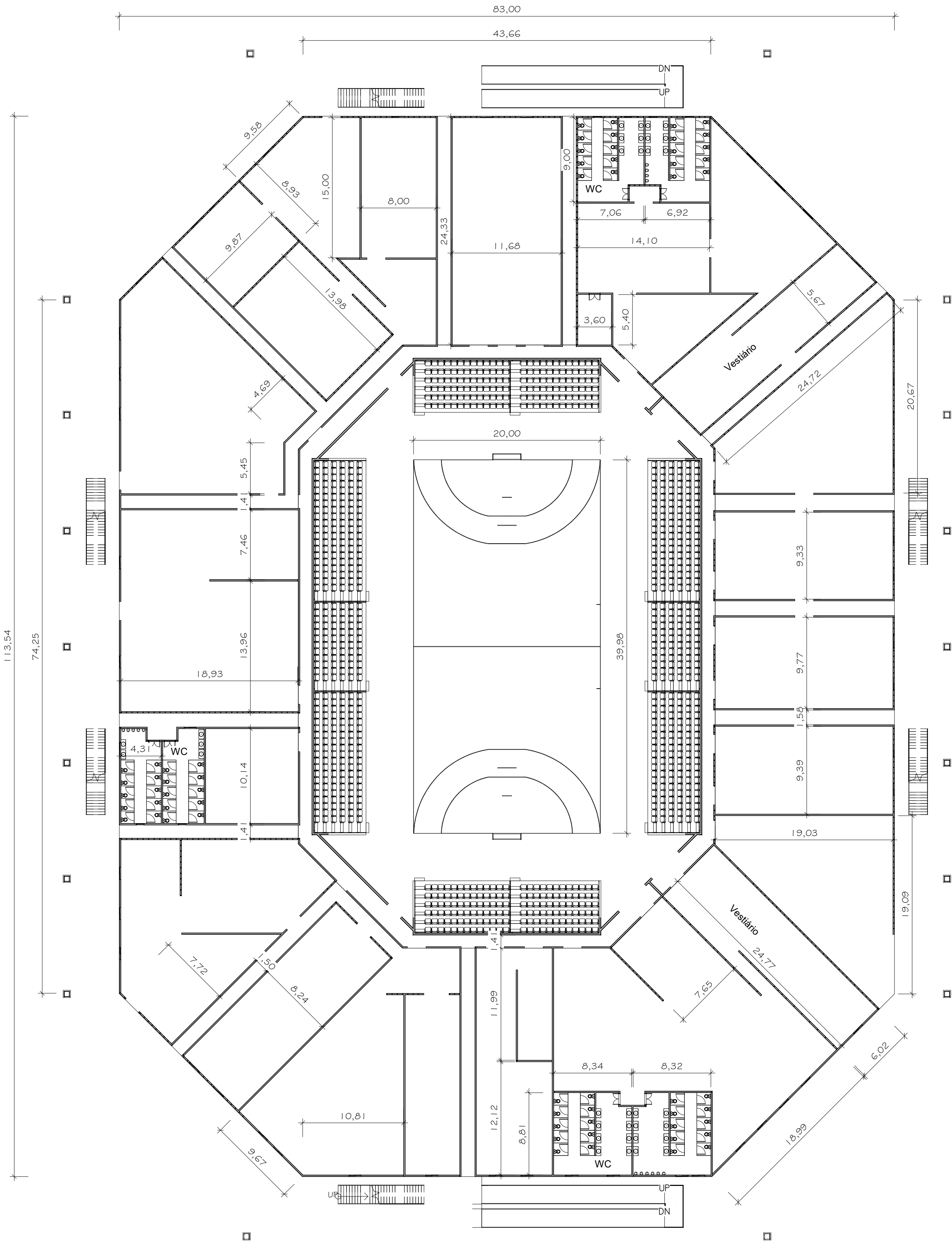
Termo de Referência (Anexo 2). Descrição das Obras de Adaptação e dos Serviços. Rio de Janeiro, 2016. RIO DE JANEIRO, **Prefeitura** da Cidade do. Secretaria Especial de Concessões e Parcerias Público-Privadas. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/documents/2887926/a706c8c0-a740-4249-9c6b-f43bba5745eb>>. Acesso em: 14 out. 2022.

TRUSTY, W.; HORST, S. LCA Tools Around the World. **Building Design & Construction**. p. 12-15. 2005.

VENTURA, M. M. O estudo de caso como Modalidade de Pesquisa. **Pedagogia Médica**. Rio de Janeiro, Brasil. p. 383-386. setembro, 2007.

ZHANG, X.; LIU K.; ZHANG Z. Life cycle carbon emissions of two residential buildings in China: Comparison and uncertainty analysis of different assessment methods, **Cleaner Production**. China, v. 266, maio, 2020.

ZIMMERMANN, R. K.; BRUHN, S.; BIRGISDÓTTIR, H. BIM-Based Life Cycle Assessment of Buildings – Na Investigation of Industry Practice and Needs. **Sustainability**. Dinamarca, v. 13, maio, 2021.

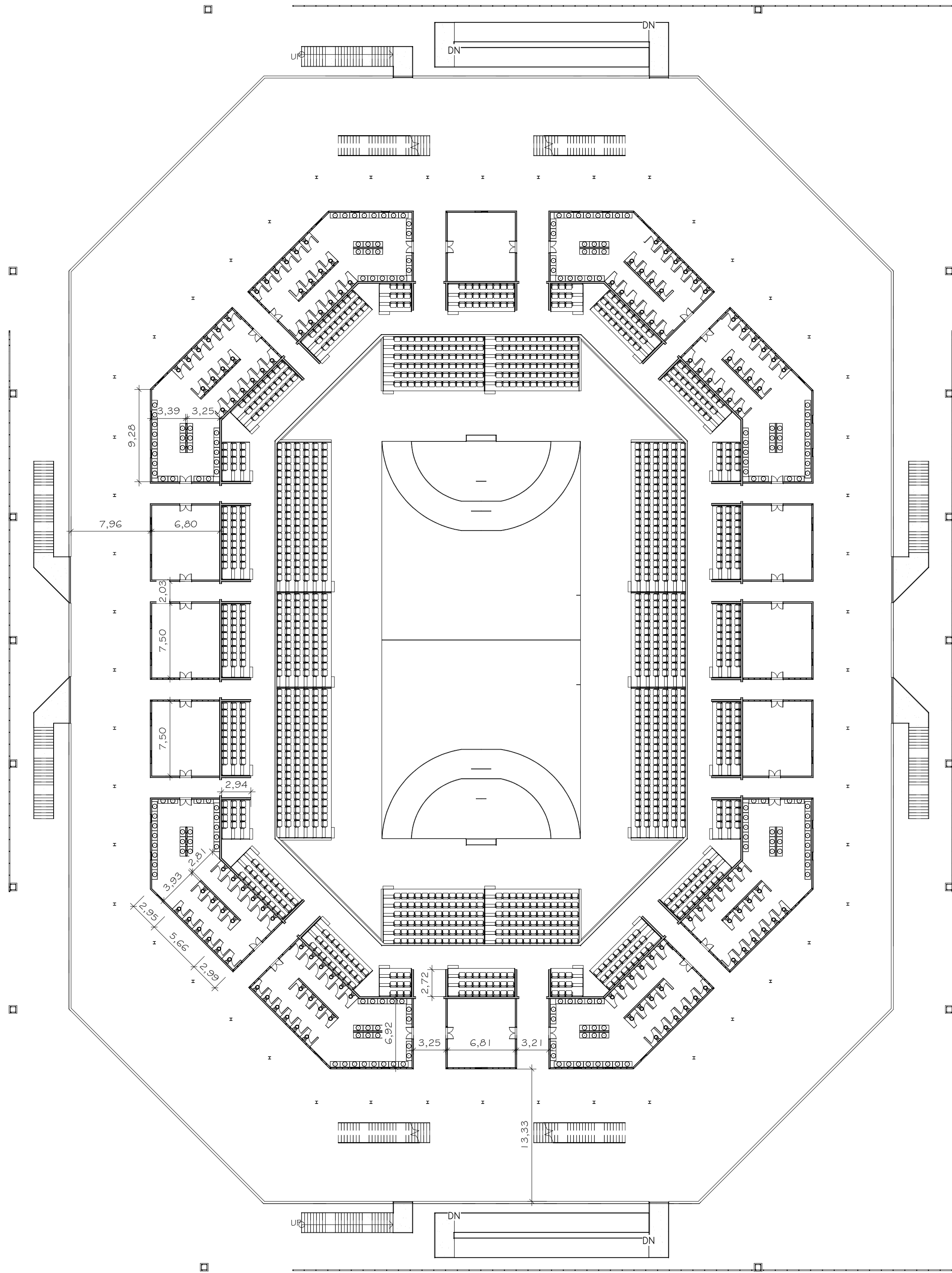


1 **TÉRREO**
1 : 300

Paredes em Drywall:
- Uma camada de OSB e outra de placa cimentícia de cada lado;
- Centro composto por estrutura de steel frame espaçadas em 1,5 metros na vertical e 0,6 metros na horizontal;

Paredes em Blocos de concreto:
- Centro em blocos de concreto de 14 cm;
- Camadas de emboço e reboco de 2 cm cada;

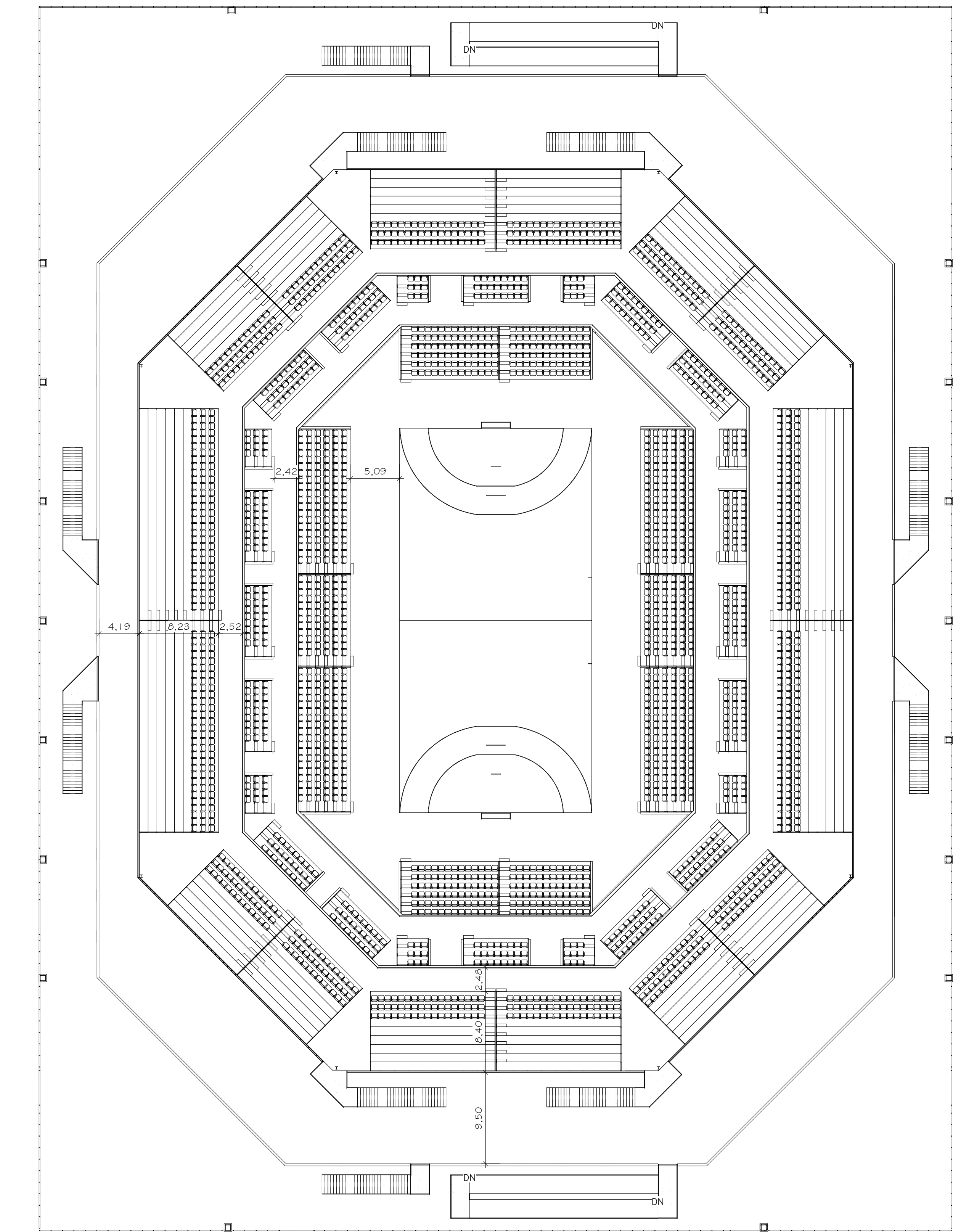
Piso em concreto no térreo;
Piso em estrutura metálica, OSB e placas cimentícias nos demais pavimentos.



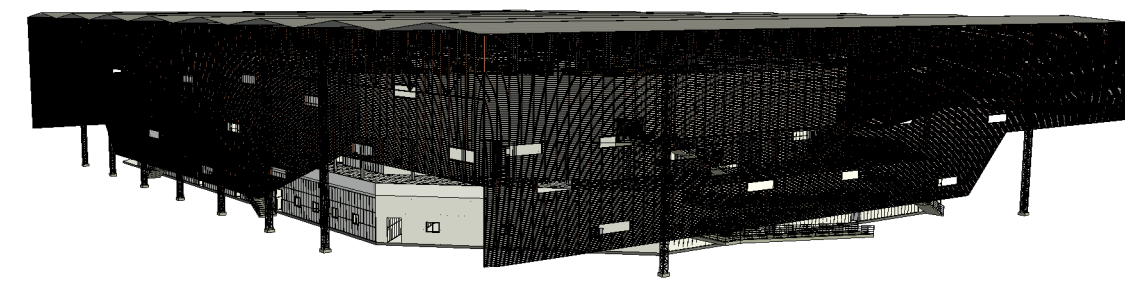
2 **1º PAVIMENTO**
1 : 300

No primeiro pavimento apenas algumas cotas foram mostradas. Esse pavimento é simétrico, então subentende-se que os demais lados possuem mesma dimensão daquele que foi apresentado.

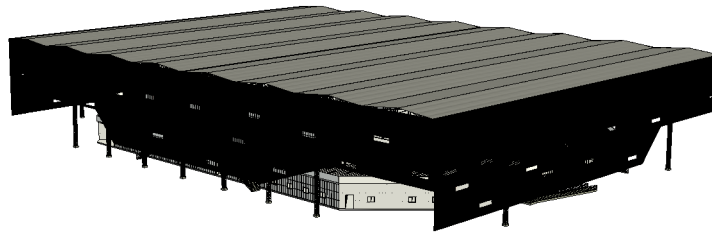
Para as avaliações era preciso gerar tabelas de quantitativos, dessa forma o projeto apresentado é para entendimento do trabalho feito. Não precisa ser, portanto, altamente detalhado nas pranchas. As cotas disponibilizadas são para criar uma noção de ordem de grandeza.



1 2º PAVIMENTO
1 : 300



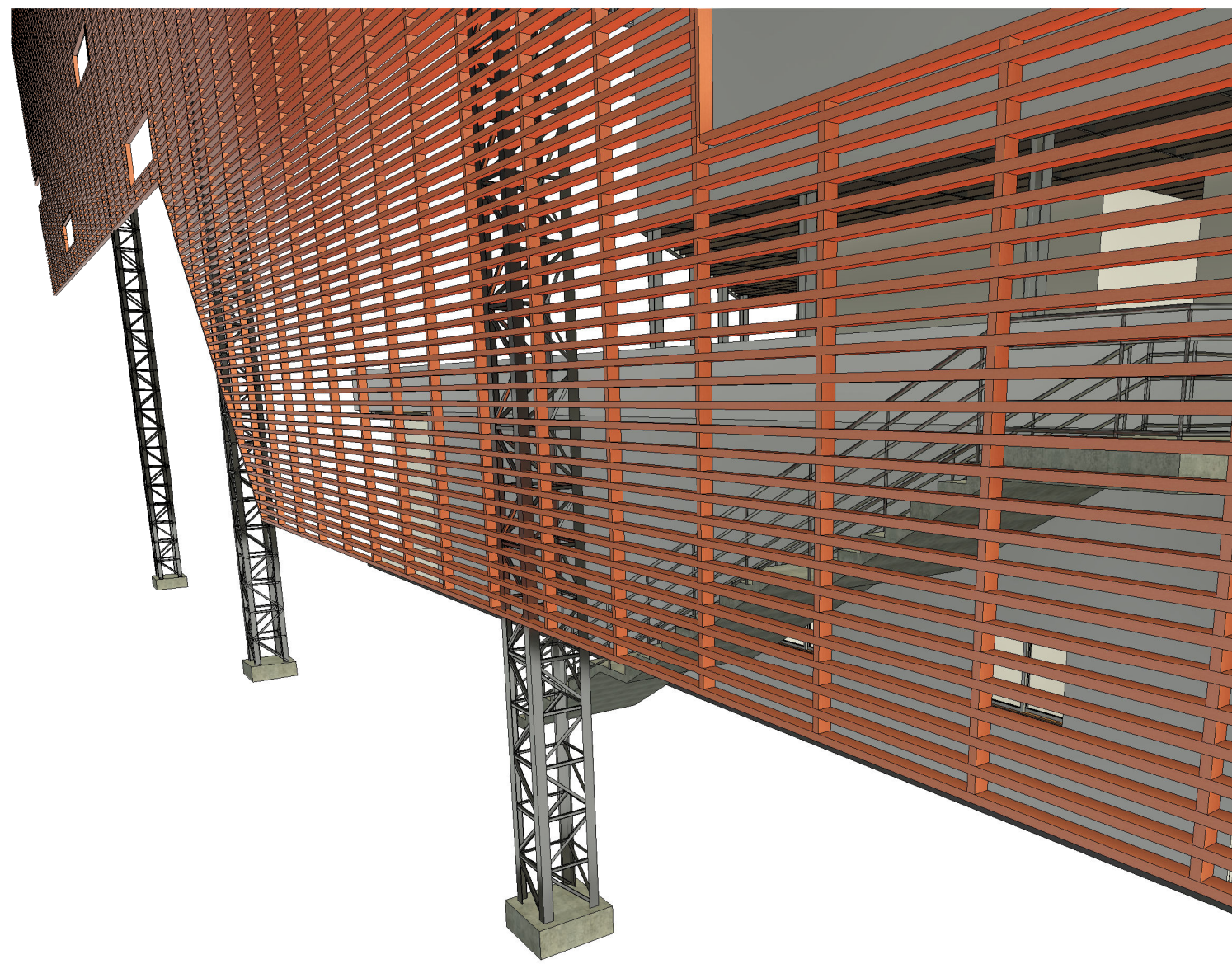
2 Vista 3D da arena



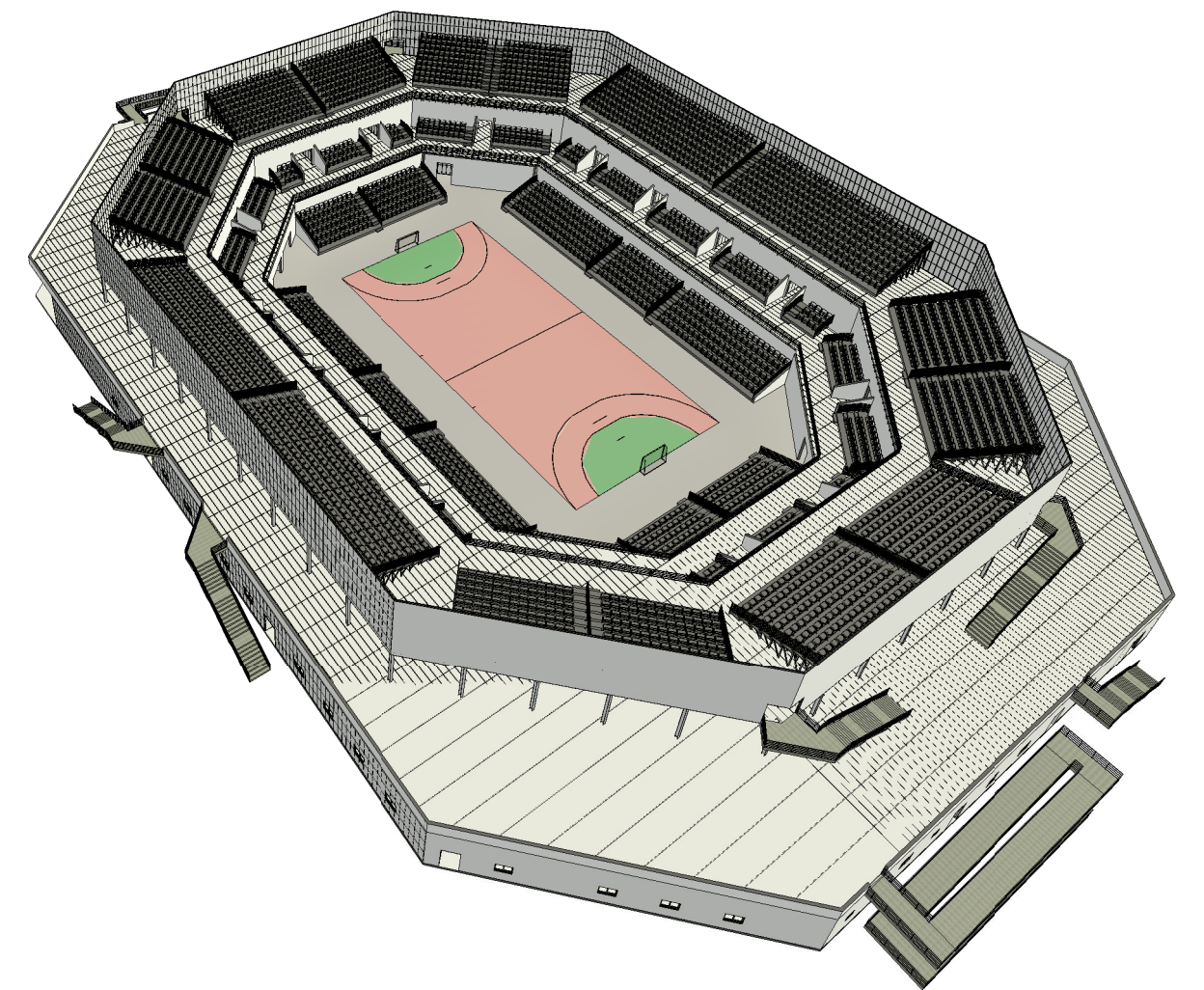
3 Vista 3D da arena - segunda



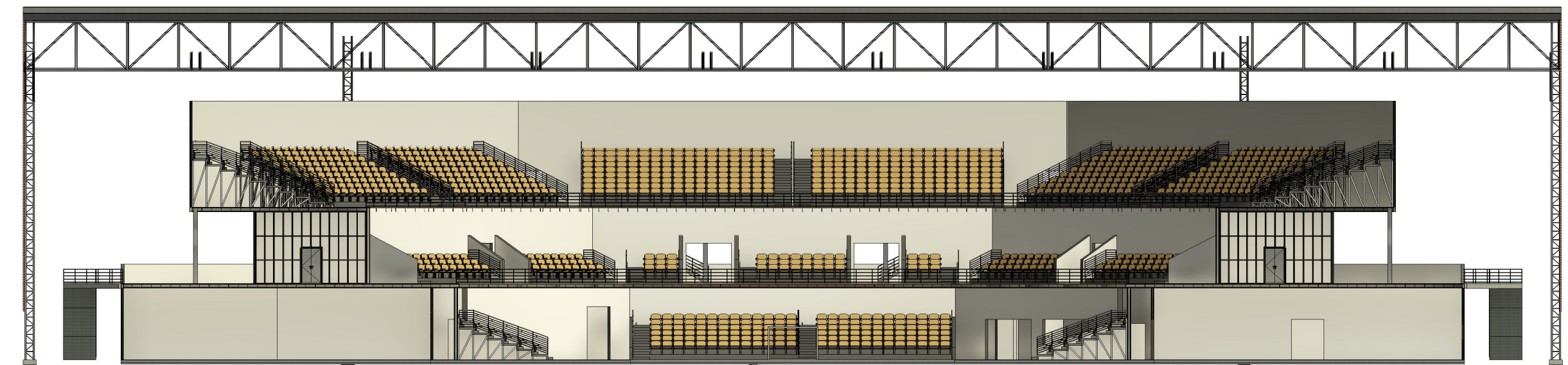
7 Vista 3D da arena (2)



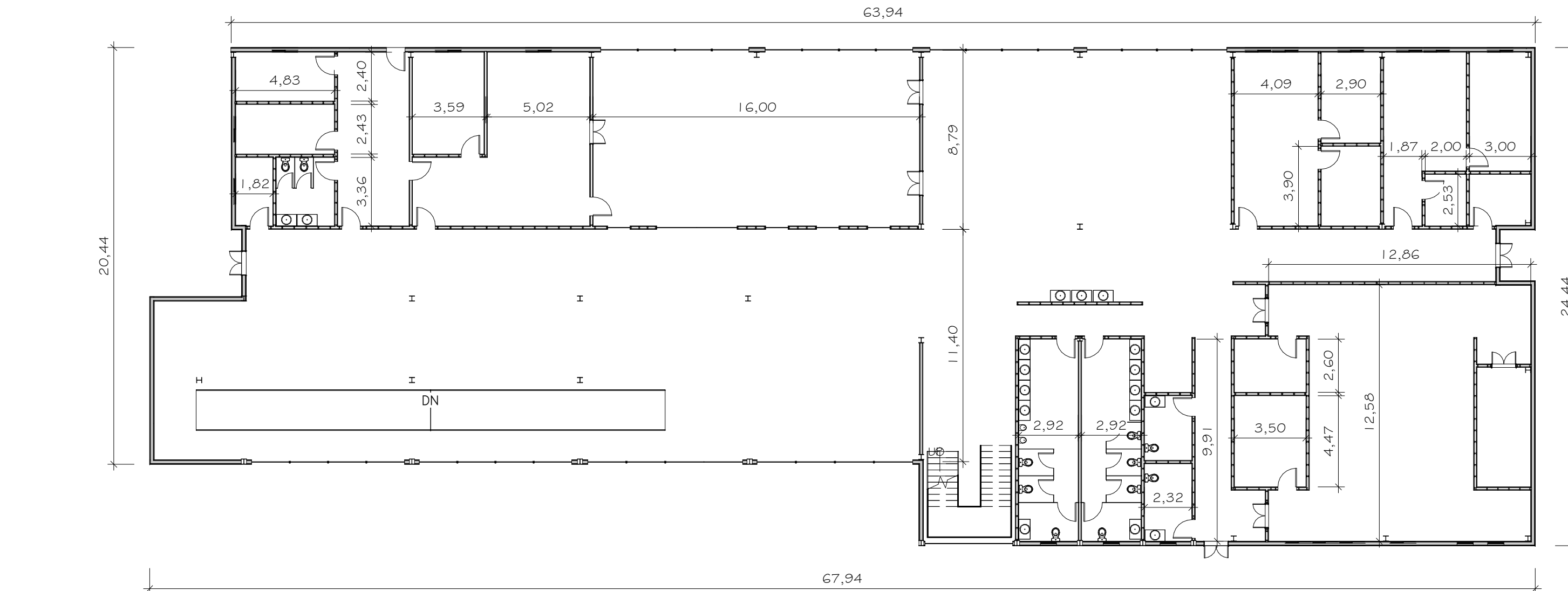
4 Detalhe do brise



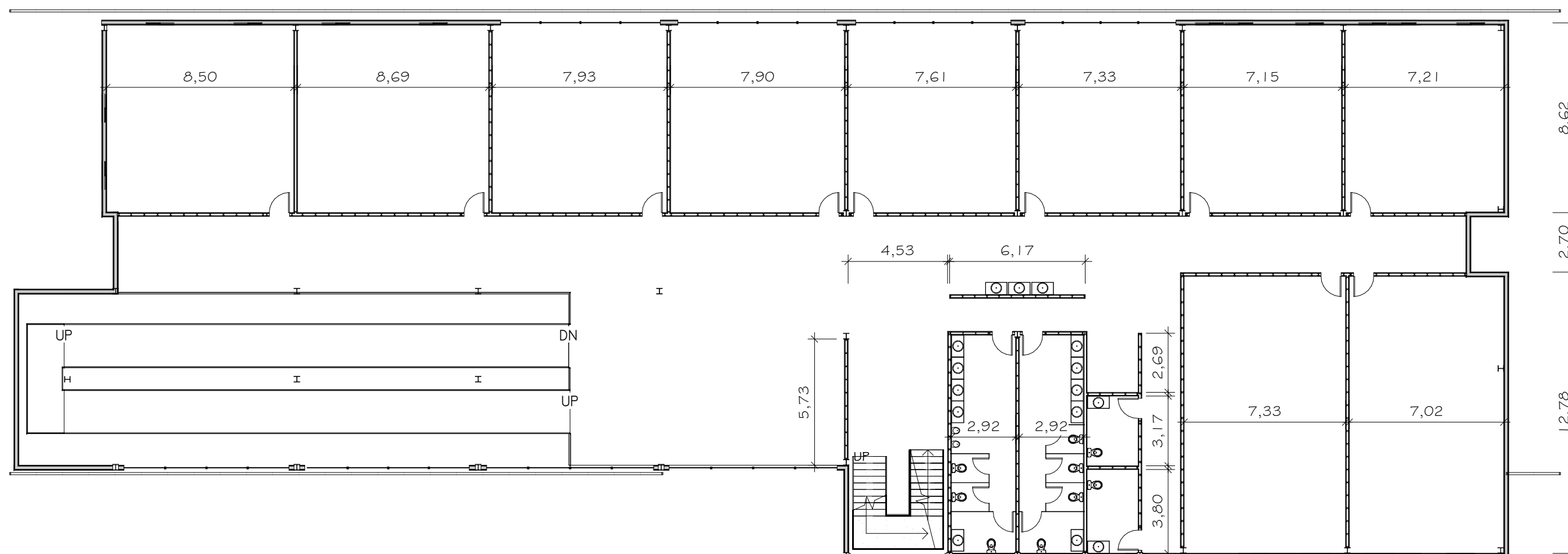
5 Vista 3D da arena - sem estrutura



6 Corte transversal - genérico
1 : 300



1 **TÉRREO**
1 : 200



2 **1º PAVIMENTO**
1 : 200

O segundo pavimento é idêntico ao primeiro pavimento, portanto não será representado nesse projeto

Paredes em Drywall:

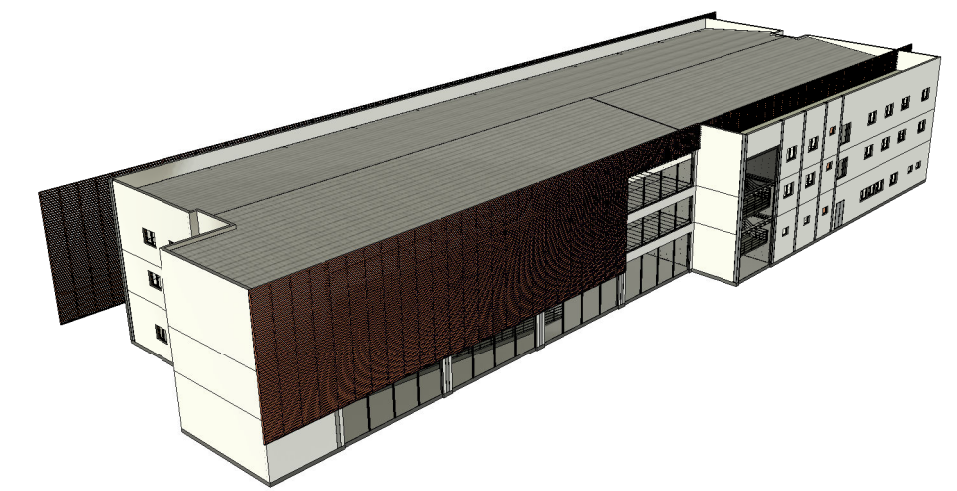
- Uma camada de OSB e outra de placa cimentícia de cada lado;
- Centro composto por estrutura de steel frame espaçadas em 1,5 metros na vertical e 0,6 metros na horizontal;

Paredes em Blocos de concreto:

- Centro em blocos de concreto de 14 cm;
- Camadas de emboço e reboco de 2 cm cada;

Piso em concreto no térreo;

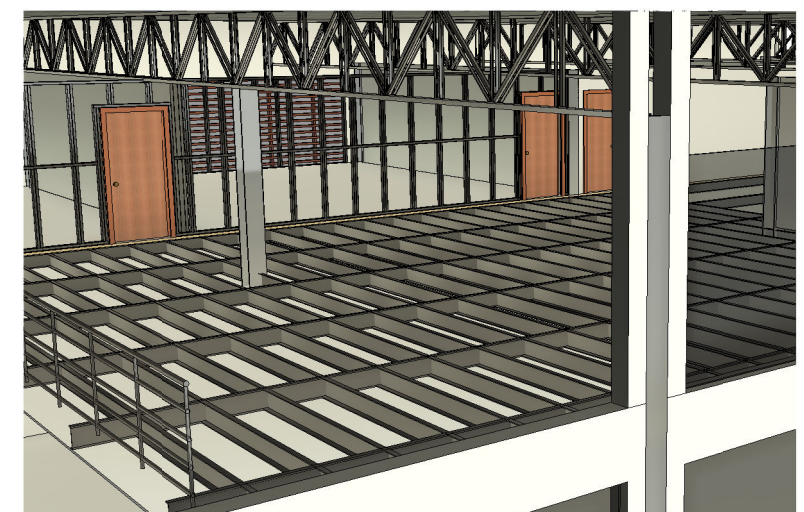
Piso em estrutura metálica, OSB e placas cimentícias nos demais pavimentos.



3 **Vista 3D**



4 **Detalhe do Brise**



5 **Detalhe das estruturas em aço**

UFSCar - Universidade Federal de São Carlos



Departamento de Engenharia Civil

Projeto padrão de uma das escolas a ser construída

Carolina Polotto Christovan

ESCALA

DATA

FOLHA

Orientadora: Dr Cristiane Bueno

1:200

04/01/23

01/ 01