

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

VANESSA CASTRO DE OLIVEIRA

**ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CO_2 EM CONSTRUÇÕES
SUSTENTÁVEIS COMO PRÉ-REQUISITO PARA CERTIFICAÇÃO LEED**

**Bagé
2024**

VANESSA CASTRO DE OLIVEIRA

**ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CO_2 EM CONSTRUÇÕES
SUSTENTÁVEIS COMO PRÉ-REQUISITO PARA CERTIFICAÇÃO LEED**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Energia da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia

Orientador: Sabrina Neves da Silva

Coorientador: Daniele Ferreira Lopes

**Bagé
2024**

O48e Oliveira, Vanessa Castro de

ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CO2 EM CONSTRUÇÕES
SUSTENTÁVEIS COMO PRÉ-REQUISITO PARA CERTIFICAÇÃO LEED /

Vanessa Castro de Oliveira.

52 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-- Universidade Federal do Pampa,
ENGENHARIA DE ENERGIA, 2024.

"Orientação: Sabrina Neves da Silva".

1. certificação LEED. 2. construções sustentáveis. 3. redução CO2. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

VANESSA CASTRO DE OLIVEIRA

**ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CO2 EM CONSTRUÇÕES
SUSTENTÁVEIS COMO PRÉ-REQUISITO PARA CERTIFICAÇÃO LEED**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para o Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 16 de julho de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dra. Sabrina Neves da Silva
Orientadora
UNIPAMPA

Prof. Msc. Daniele Ferreira Lopes
Co-orientadora
UNIPAMPA

Prof. Dr. Luciano Vieceli Taveira
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **SABRINA NEVES DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/07/2024, às 09:50, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIANO VIECELI TAVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/07/2024, às 14:11, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DANIELE FERREIRA LOPES, Usuário Externo**, em 16/07/2024, às 14:39, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1482280** e o código CRC **07C426D4**.

Dedico este trabalho a minha mãe Vera (in memoriam), que me ensinou como se reerguer diante das adversidades da vida.

AGRADECIMENTO

À Prof. Dra. Sabrina Neves da Silva, pela orientação acadêmica, apoio e confiança.

À Prof. Ma. Daniele Ferreira Lopes pelo empenho dedicado à elaboração deste trabalho.

Aos professores que me acompanharam ao longo do curso e que contribuíram para minha formação acadêmica.

Aos meus colegas e amigos, em especial: Miguel, Nayaranna e Sthéfani, por serem coautores das pausas necessárias e dos momentos de descontração que me mantiveram sã durante este percurso.

À minha família, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

“Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de você, menos o seu conhecimento.”

Albert Einstein

RESUMO

No âmbito do desenvolvimento sustentável na engenharia originou-se o conceito de “Construções Sustentáveis”. Este modelo de projeto tem como meta mitigar os impactos causados pelas emissões de dióxido de carbono (CO_2), consumo de energia, uso de recursos naturais, geração de resíduos, entre outros, decorrentes do setor de construção civil. Neste contexto, este propôs-se neste trabalho um projeto de construção sustentável pelo uso de materiais de construção alternativos e geração própria de energia elétrica. Quantificou-se a redução do consumo de cimento e as emissões de CO_2 e comparou-se os resultados com um projeto similar com materiais convencionais. Com base nos resultados, verificou-se se o projeto proposto atende aos requisitos para certificação LEED (Leadership in Energy and Environmental Design). Como estudo complementar, analisou-se a evolução da certificação LEED no Brasil nos últimos 10 anos (2014-2024). Os resultados demonstraram que, ao adotar materiais sustentáveis, houve redução do consumo de cimento de 14%. Quanto às emissões de CO_2 , a redução total foi de 15,33%. Com base nestes aspectos, a proposta aqui apresentada atende os pré-requisitos para certificação LEED nível silver. Evidenciou-se que o Brasil teve uma média acumulada de 828 empreendimentos certificados sendo o Estado de São Paulo com maior número de certificações no período analisado. Concluiu-se que o emprego de materiais alternativos é eficaz para redução do consumo de cimento e emissões de CO_2 , devendo ser considerado para as construções futuras contribuindo para mitigar impactos ambientais.

Palavras-Chave: certificação LEED; construções sustentáveis; redução CO_2 .

ABSTRACT

In the scope of sustainable development in engineering, the concept of "Sustainable Buildings" emerged. This project model aims to mitigate the impacts caused by carbon dioxide (CO_2) emissions, energy consumption, use of natural resources, waste generation, and more, resulting from the construction sector. In this context, this work proposed a sustainable construction project through the use of alternative construction materials and self-generation of electric energy. The reduction in cement consumption and CO_2 emissions was quantified and compared with a similar project using conventional materials. Based on the results, it was verified whether the proposed project meets the requirements for LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) certification. As a complementary study, the evolution of LEED certification in Brazil over the last 10 years (2014-2024) was analyzed. The results demonstrated that by adopting sustainable materials, cement consumption was reduced by 14%. Regarding CO_2 emissions, the total reduction was 15.33%. Based on these aspects, the proposed project meets the prerequisites for LEED silver certification. It was shown that Brazil had an accumulated average of 828 certified projects, with the State of São Paulo having the highest number of certifications in the analyzed period. It was concluded that the use of alternative materials is effective in reducing cement consumption and CO_2 emissions and should be considered for future constructions to help mitigate environmental impacts.

Keywords: LEED certification; sustainable buildings; CO_2 reduction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Treemap (a) do número de publicações e (b) dos países	16
Figura 2 - Mapa de rede baseado em dados bibliográficos de co-citação	18
Figura 3 - Impacto atual das construções no Brasil	20
Figura 4 - Aplicação de painel solar	27
Figura 5 - Tipologias do sistema LEED	28
Figura 6 - Oito áreas analisada pelas tipologias.....	29
Figura 7 - Níveis de certificação	29
Figura 8 - Planta baixa, corte AA e corte BB	33
Figura 9 - Corpos de prova.....	34
Figura 10 - Consumo mensal da residência	35
Figura 11 - Empreendimentos no Brasil com certificação LEED.....	42
Figura 12 - Estados brasileiros com certificação LEED	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantificações de CO_2 dos materiais utilizados na casa popular eficiente	39
Tabela 2 - Quantificação das emissões de CO_2 dos materiais utilizados na residência padrão	40

LISTA DE ABREVIATURAS

CCA – cinza de casca de arroz
CP - cimento Portland
DRX - difração de raios-X
FE – fator de emissão
FP – fator de perda
FRX - fluorescência de raios-X
gCO₂ – gramas de dióxido de carbono
GEE - gases de efeito estufa
Kg – kilo grama
kW – kilo Watt
kWh – kilo Watt-hora
kWp – kilo Watt-pico
m² – metro quadrado
MEV - microscopia eletrônica de varredura
Mpa - mega Pascal
p. – página
RS – Rio Grande do Sul
tCO₂ – toneladas de dióxido de carbono
W – Watt

LISTA DE SIGLAS

ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

CO₂ – Dióxido de Carbono

ECO-92 - Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento

FEBRABAN - Federação Brasileira de Bancos

GBCB - Green Building Council Brasil

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

LEED –Leadership in Energy and Environmental Design

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MTIC - Ministério de Ciência e Tecnologia

OSB - Oriented Strand Board

PVC - Policloreto de Vinila

SETEC - Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação

UNEP – United Nations Environment

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change

USGBC – United states green building council

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos Gerais	17
1.2 Objetivos Específicos	17
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1 Impactos ambientais na construção civil.....	19
2.2 Sustentabilidade na construção civil.....	20
2.3 Construções sustentáveis	22
2.3.1 Materiais de construção	23
2.3.2 Energia solar fotovoltaica.....	24
2.3.2.1 Dimensionamento do sistema fotovoltaico.....	26
2.4 Certificação ambiental: sistema LEED	27
3 METODOLOGIA	31
3.1 Consumo de cimento e emissões de CO_2	31
3.1.1 Consumo de cimento	31
3.1.2 Emissões de CO_2	31
3.1.3 Concepção do projeto.....	32
3.1.4 Materiais utilizados	33
3.1.5 Projeto dos painéis fotovoltaicos	34
3.1.5.1 Cálculo das emissões de CO_2 pelo uso de painéis solares	37
3.1.6 Certificação LEED no cenário brasileiro	37
4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS	38
4.1 Consumo de cimento	38
4.2 Emissões de CO_2	38
4.2.1 Materiais de construção	38
4.3 Projeto dos painéis fotovoltaicos	41
4.3.1 Cálculo das emissões de CO_2 pelo uso de painéis solares	41
4.4 Certificação LEED no cenário brasileiro	41
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERÊNCIAS.....	46
ANEXOS	51

1 INTRODUÇÃO

De acordo com dados da Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (SETEC) do Ministério de Ciência e Tecnologia (MTIC), as emissões de gases de efeito estufa (GEE) decorrentes do setor de construção e edificações corresponde a 6% das emissões nacionais, totalizando cerca de 139 milhões de toneladas de CO_2 por ano. A nível mundial, os dados do Relatório de Status Global para Edifícios e Construção do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente apontam que o setor foi responsável por 36% do consumo global de energia e 37% das emissões globais de CO_2 . Para os próximos anos, a previsão é de aumento da demanda de energia devido à expansão da área construída, principalmente nos países em desenvolvimento (MTIC, 2023).

Para reduzir os impactos ambientais causados pela construção civil, surge o conceito da construção sustentável. No âmbito da Agenda 21 para a Construção Sustentável em Países em Desenvolvimento, define-se construção sustentável "um processo holístico que aspira a restauração e a manutenção da harmonia entre os ambientes natural e construído, e a criação de assentamentos que afirmam a dignidade humana e encorajem a equidade econômica". Assim, no contexto do desenvolvimento sustentável, este conceito vai além da sustentabilidade ambiental, englobando também a sustentabilidade econômica e social, com ênfase na melhoria da qualidade de vida tanto de indivíduos quanto de comunidades (MMA, 2023).

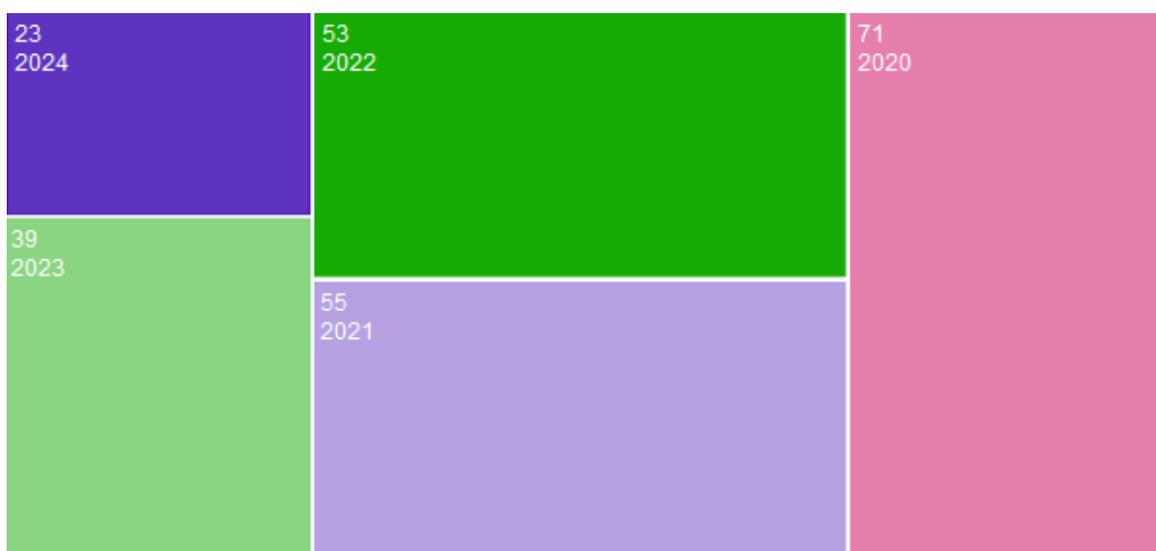
Dessa forma, um dos principais desafios em resposta à Agenda 21 é a implementação de medidas preventivas imediatas, juntamente com a preparação e ajustes na cadeia produtiva em todos os níveis e de maneira sistemática.

Muitos desses impactos podem ser reduzidos ou postergados caso sejam implementadas medidas de mitigação. Dentre as principais medidas estão o uso de materiais alternativos bem como a adoção de processos produtivos menos intensivos energeticamente e menos dependentes de recursos naturais.

Tendo em vista a redução de emissões no setor de construção civil e com o objetivo de contribuir para a redução de impactos ambientais provocados pelo aumento de GEE, este trabalho apresenta um estudo para quantificar a redução do consumo de cimento bem como as emissões de CO_2 em um projeto de construção sustentável tendo a certificação LEED como uma das principais bases para medir o desempenho ambiental do projeto. Além disso, analisando-se a tendência de

publicações na área, verificou-se que nos últimos anos o interesse por construções sustentáveis cresceu e tem potencial para o desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao tema. Isso foi evidenciado a partir de uma análise na base de dados da *Web of Science* em que analisou-se a evolução das pesquisas nos últimos cinco anos e também os principais países que publicam na área. Utilizou-se como palavras-chave: “green building” e “certification” Os resultados são mostrados na Figura 1 (a-b), em que verifica-se que houve maior número de pesquisas em 2020 e que China e Estados Unidos são os principais países que publicam na área.

Figura 1 - Treemap (a) do número de publicações e (b) dos países.



Fonte: Autora (2024)

1.1 Objetivos Gerais

Visando difundir o conhecimento e uso de materiais de construção menos agressivos ao meio ambiente, o objetivo geral deste trabalho consiste no estudo de construções com uso de materiais e soluções sustentáveis visando a redução do consumo de cimento e das emissões de CO_2 .

1.2 Objetivos Específicos

Para atingir os objetivos gerais, propôs-se os objetivos específicos:

- i) Quantificar, de forma estimada, a redução do consumo de cimento e de CO_2 pelo uso de materiais construtivos alternativos e geração própria de energia. Dimensionar um sistema de energia solar fotovoltaico para uma residência sustentável.
- ii) Verificar se os resultados encontrados atendem os requisitos para certificação LEED.
- iii) Analisar a evolução de certificações LEED de empreendimentos no Brasil nos últimos 10 anos.

Observa-se a ocorrência de clusters divididos em quatro cores: azul, vermelho, amarelo e verde. No cluster azul, o termo mais citado foi (traduzido) “construção verde” em co-ocorrências com “sustentabilidade” e “performance”. No cluster vermelho, “performance” “LEED”; “certificação de construções verdes” e “construções verdes”. No cluster amarelo, “construções”; “certificação de construções verdes”; “LEED” e “energia”. E, por fim, no cluster verde “LEED” “energia” e “certificação de construções verdes”. De modo geral, observou-se que em todos os clusters os termos: “sustentabilidade”; “energia”; “certificação de construções verdes” foram mais citados. Com base nestes resultados, ampliou-se a pesquisa bibliográfica para outras bases de dados de relevância científica e atualizada: trabalhos de conclusão de curso, dissertações, teses, artigos e outros.

2.1 Impactos ambientais da construção civil

A construção civil, reconhecida como uma das atividades mais importantes para o desenvolvimento econômico e social com impacto no meio ambiente, seja pelo uso de recursos naturais, pela alteração das paisagens ou pela produção de resíduos. Este setor é fundamental para o crescimento do Brasil, gerando empregos e renda, além de ser uma base para o desenvolvimento de novas tecnologias. (Roque *et al.*, 2019)

Quanto à poluição, no mundo, estima-se que o setor seja responsável por 35% das emissões de CO_2 e 36% do consumo de energia (UNEP, 2020b) e pela geração de 100 milhões de toneladas de resíduos sólidos. Para alcançar o equilíbrio climático até 2050, as emissões de CO_2 precisam ser reduzidas pela metade até 2030 (ABRECON, 2022).

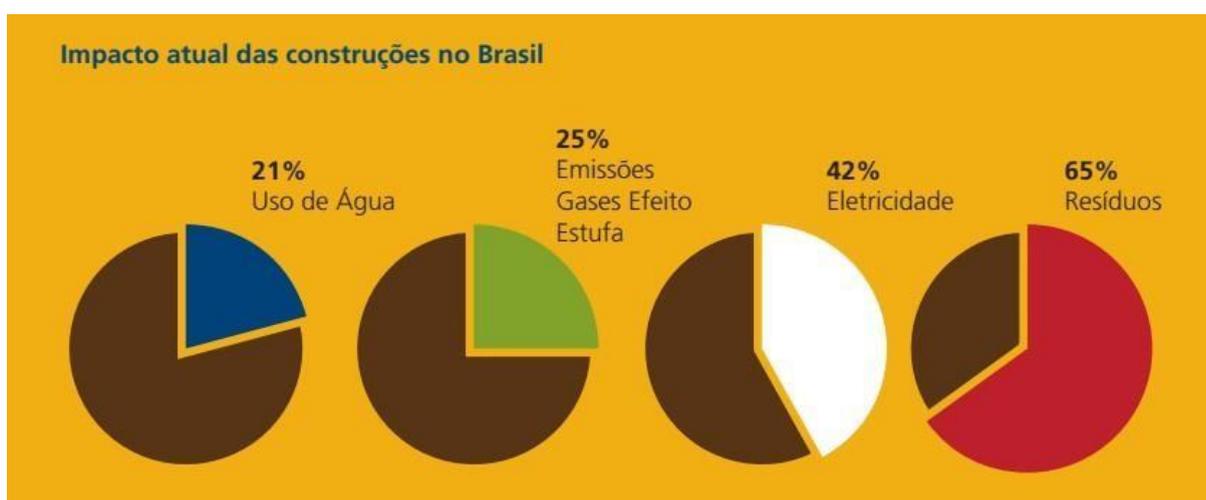
É notório que a construção civil é uma prática excessivamente impactante. Sendo assim, é fundamental a adoção de metodologias sustentáveis que impulsionem ações que apontem para a diminuição dos impactos ambientais em suas atividades (Gomes et al, 2021).

Estima-se que até 2050, cerca de 70% da população mundial viverá em áreas urbanas. O desafio será atender às demandas por infraestrutura e habitação resultante do aumento da concentração urbana, contudo, com baixo impacto ambiental. De modo geral, o bem-estar humano e o desenvolvimento econômico têm sido associados ao consumo de recursos como energia, materiais e água. No entanto,

diante do esgotamento desses recursos e do aumento dos gases de efeito estufa na atmosfera, é essencial dissociar o desenvolvimento humano do consumo crescente de recursos naturais, ao mesmo tempo em que se reduz as emissões de CO_2 (Masuero, 2021).

A seguir, na Figura 3, são mostradas as porcentagens de impacto ambiental das construções no Brasil em relação ao total de impacto incluindo todos os setores, feito pela FEBRABAN (Federação Brasileira de Bancos) a partir de uma apresentação da Green Building Concil Brasil, durante um evento da própria federação (2024).

Figura 3 - Impacto atual das construções no Brasil.



Fonte: 17º Café com Sustentabilidade, FEBRAPAN, 2010.

Dentro deste contexto, é essencial o desenvolvimento de novas tecnologias e soluções inovadoras para reduzir os impactos ambientais, tendo em vista a sustentabilidade em construções (De Sousa *et al.*, 2018).

2.2 Sustentabilidade na construção civil

O conceito de sustentabilidade, devido às suas implicações tanto no presente quanto, principalmente, no futuro, está sendo amplamente pesquisado e desenvolvido em diversas áreas da sociedade. Na construção civil, especificamente, esses esforços se manifestam em todas as etapas do processo, desde o planejamento, com foco na seleção de materiais e tecnologias que sejam ambientalmente benéficas, até a eventual demolição e reciclagem dos resíduos gerados (Driemeier *et al.*, 2023).

A construção civil, grande consumidora de recursos naturais, desempenha um papel importante na melhoria da qualidade de vida. Esse setor vem sendo pressionado a considerar as dimensões econômicas, sociais e ambientais. Dado que é um dos principais usuários de recursos naturais e geradores de resíduos, há uma crescente demanda para que cumpra suas obrigações sustentáveis (De Souza, 2023).

A sustentabilidade é uma filosofia que incentiva o mundo empresarial a buscar melhorias ambientais que simultaneamente geram benefícios econômicos. Focando em oportunidades de negócios, permitindo que as empresas se tornem mais responsáveis ambientalmente. Além disso, promove a inovação, o crescimento e a competitividade (Yemal *et al.*, 2011).

Surgiu a partir do debate sobre desenvolvimento sustentável, cujo ponto de partida foi a primeira Conferência Internacional das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano, realizada em 1972 em Estocolmo, Suécia. Com a evolução dos termos e conceitos de Desenvolvimento Sustentável, a sustentabilidade na construção civil ganhou destaque na década de 1980, impulsionada pelo fundador do Worldwatch Institute, e se tornou um padrão global. (Aires, 2019).

A Agenda 21, concebida no final dos anos 80, durante a ECO-92 (Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento), propõe diretrizes para a construção sustentável visando melhorar as condições ambientais para as gerações futuras. Isso inclui uma revisão de toda a cadeia produtiva, desde a extração de matéria-prima, até o aprimoramento dos processos construtivos considerando a saúde e segurança dos trabalhadores. Outras medidas preconizadas são a redução da poluição, a conservação de energia e água, o controle e redução da liberação de materiais perigosos no ambiente, além do aumento da qualidade e a diminuição dos custos das construções (Lopes *et al.*, 2023).

A construção civil deve buscar soluções que minimizem ou evitem danos ao meio ambiente. Existem maneiras de tornar a construção mais sustentável, reduzindo os impactos ambientais. (De Farias *et al.*, 2020).

O uso de materiais sustentáveis demonstra uma maior responsabilidade com o meio ambiente, sendo interessante expandir este tipo de construção. (Queiroz, 2016).

2.3 Construções sustentáveis

A construção sustentável é uma estratégia que promove ações em relação ao meio ambiente sem onerar os recursos naturais. Este modelo emprega a utilização de eco materiais e soluções tecnológicas inteligentes, que impulsionam a redução da poluição. Uma construção sustentável emprega o uso de materiais e tecnologias que preservam o meio ambiente, seja no decorrer do processo de obtenção, fabricação, aplicação ou durante sua vida útil (Da Silva *et al.*, 2017).

Nessa conjuntura, entende-se que é possível a averiguação de adaptações para construções sustentáveis realizando com que através de planejamento e gestão ambiental, as construções provenientes do acelerado crescimento demográfico e urbano, se convertam em alternativas sustentáveis (Franco *et al.*, 2020).

Uma construção sustentável é aquela que minimiza os impactos ambientais gerados pelo processo construtivo e traz a concepção de que produzir com sustentabilidade refere-se a ser adequado ecologicamente e economicamente viável (Lopes *et al.*, 2023).

A demanda por construções sustentáveis tem crescido e ganhado destaque, principalmente devido ao aumento da conscientização ambiental. Isso fez com que a busca pela sustentabilidade se tornasse uma tendência global (Ribeiro *et al.*, 2013).

A mesma proporciona interposições acerca do meio ambiente adequando-o para sua utilização, fabricação e consumo humano, utilizando-se de tecnologias modernas sem acabar com os recursos naturais. Os materiais sustentáveis trazem vantagens para a construção e meio ambiente, porém sem ser obrigatoriamente um bem natural, podendo ser fabricados em larga escala (Moises *et al.*, 2022).

A inserção de técnicas sustentáveis ainda enfrenta resistência de alguns construtores devido à preocupação com os custos iniciais. Apesar desse tipo de construção ter um custo inicial cerca de 2% mais alto do que as construções tradicionais, alguns projetos não apontam aumento em seus custos (Kats, 2010).

As tecnologias implementadas em uma casa sustentável podem reduzir de maneira eficiente o desperdício de água e energia elétrica, entre outros recursos. Um exemplo disso é a instalação de uma usina fotovoltaica no telhado de uma residência, que converte diretamente a luz solar em energia elétrica através de inversores automatizados. As células fotovoltaicas são feitas de silício, o segundo elemento mais abundante no mundo. Fontes de energia renovável são consideradas inesgotáveis e

não prejudiciais ao meio ambiente. As formas comuns de energia renovável incluem solar, eólica, biomassa, hidrelétrica e geotérmica, cada uma caracterizada por seu método específico de geração de energia para os consumidores (De Freitas Mota *et al.*, 2021).

Segundo o MMA, as tendências atuais na construção sustentável estão seguindo duas direções. Por um lado, institutos de pesquisa em tecnologias alternativas advogam pelo resgate de materiais e técnicas tradicionais, como terra crua, palha, pedra, bambu, e outros materiais naturais e minimamente processados, para serem utilizados em ecovilas e comunidades alternativas. Por outro lado, empresários estão investindo em "empreendimentos verdes", buscando certificações tanto para edifícios individuais quanto para desenvolvimentos urbanos (Larrosa *et al.*, 2017).

2.3.1 Materiais de Construção

Conforme mencionado nos tópicos anteriores, é de fundamental importância a redução dos impactos ambientais decorrentes do setor construtivo. Observa-se que não só os aspectos técnicos e econômicos devem ser levados em conta, mas também os ecológicos. Contudo, a parcela do mercado mobilizada na mitigação dos impactos ambientais é ainda restrita (Dos Santos, 2017).

Um material de construção sustentável deve ser menos poluente e/ou ter menor consumo de água, energia ou recursos naturais na sua produção, comparando-o a produtos convencionais (Dos Santos, 2017).

Para produção de cimento Portland, de acordo com Farid e Zaheer (2023) para reduzir as emissões de CO_2 tem-se como opções (i) obter maior eficiência no processo de produção do clínquer, reduzindo o consumo de combustível e (ii) reduzir a taxa de produção de clínquer através da utilização de materiais cimentícios suplementares.

Ainda segundo os autores supracitados, a preocupação em produzir material de construção sustentável, tem levado ao desenvolvimento de pesquisas relacionadas a materiais cimentícios suplementares a partir de subprodutos e resíduos. De fato, na literatura já está amplamente desenvolvido, o uso de sílica ativa, escória de alto forno, cinza volante, metacaulim, cinza de casca de arroz, etc., pode melhorar as propriedades do concreto (Farid e Zaheer, 2023).

O Rio Grande do Sul (RS) é o Estado com maior produção de arroz do Brasil. Com isso, gera-se um grande volume de casca de arroz. Por apresentar poder calorífico adequado para combustão e um alto conteúdo de materiais voláteis, a casca de arroz pode ser utilizada como combustível nas indústrias beneficiadoras. Contudo, a queima da casca de arroz gera outro resíduo, a cinza da casca de arroz (CCA) a qual não pode ser descartada pois pode contaminar o solo e as águas. Vale destacar geralmente as beneficiadoras de arroz não possuem uma forma de destinação adequada para as cinzas sendo um problema ambiental a ser gerenciado. Sendo assim, pensar em reaproveitar todos os resíduos do beneficiamento e da geração de energia vai ao encontro de uma produção agroindustrial com baixo impacto ambiental (Oliveira *et al.*, 2023)

A CCA possui alta área superficial, natureza amorfa e contém cerca de 80% de sílica, que é considerada uma superpozolana (Ojeda *et al.*, 2022).

A utilização de pozolanas em substituição parcial ao cimento deve-se à presença de fases ativas em sua constituição química. Sendo assim, ao adicionar uma pozolana em uma matriz cimentícia melhora-se as propriedades mecânicas do material de construção. Contudo, é importante salientar que a atividade pozolânica da CCA está relacionada à morfologia e ao tamanho das partículas dos grãos das cinzas (Oliveira *et al.*, 2022).

O teor de substituição de CCA por cimento, a composição química e o tamanho das partículas de CCA bem como a proporção água/cimento da mistura de concreto afetam o desempenho do concreto. Com isso, segundo Farid e Zaheer (2023) recomenda-se substituir entre 10 e 25% de cimento por CCA para o desenvolvimento bem-sucedido de resistência do material cimentício.

2.3.2 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar, que é teoricamente inesgotável e limpa, com uma quantidade captada pelo planeta muito superior à necessária para atender todo o consumo atual de energia, tem sido objeto de extensa pesquisa. Atualmente, observa-se uma melhoria significativa em seu desempenho (Parida *et al.*, 2011).

A participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira está em ascensão. A energia solar, atualmente uma das mais adotadas em construções sustentáveis, reduz a dependência de fontes energéticas tradicionais e, por

consequência, diminui os impactos ambientais causados pela humanidade (França *et al.*, 2014).

Entre essas tecnologias, destacam-se a energia solar térmica e a energia solar fotovoltaica, que têm um grande potencial para contribuir significativamente na resolução de algumas das questões energéticas mais urgentes da atualidade. A energia solar térmica utiliza a luz solar diretamente para aquecer água e apoiar o aquecimento de ambientes em edifícios, enquanto a energia solar fotovoltaica transforma a luz solar em eletricidade, tanto de forma direta quanto indireta.

Como o próprio nome sugere, a energia solar fotovoltaica utiliza a luz do sol, que chega à atmosfera através de ondas eletromagnéticas. Uma parte dessa radiação é refletida, enquanto a porção que não se dissipa possui um alto potencial energético, podendo ser utilizada para a geração de energia elétrica (Cabral *et al.*, 2023)

A energia solar fotovoltaica requer o seguinte sistema para funcionar: as placas solares fotovoltaicas geram energia elétrica a partir da luz solar; o inversor solar converte a corrente contínua das placas em corrente alternada, similar à da rede local; a energia convertida pelo inversor é direcionada ao quadro de luz e, posteriormente, utilizada na residência ou empresa. Vale destacar que, se o sistema solar produzir mais energia do que o consumido pelo usuário, o excesso é enviado para a rede distribuidora, gerando créditos para futuras faturas de consumo (Souza, 2010).

Acolhido sempre por arquitetos responsáveis por construções certificadas, os painéis fotovoltaicos, que podem ser os grandes responsáveis pelo aumento da produção de energia limpa em grandes centros, sejam para demandas residenciais ou empresariais, ganham cada vez mais adeptos (MENEZES, 2012, p. 249).

A inclusão de outras fontes renováveis na matriz energética, como a solar fotovoltaica, possibilita a geração própria de energia para cada imóvel. O marco regulatório da energia solar fotovoltaica no Brasil ocorreu com a publicação da Resolução Normativa nº 482 de 2012 pela ANEEL. Esta resolução permitiu que os consumidores trocassem a energia gerada por eles com a rede do sistema interligado, denominando essa modalidade como geração distribuída. Por meio dela, foi permitida a conexão de fontes geradoras de energia elétrica com a rede de distribuição das companhias de energia nas áreas urbanas e rurais (Micheletti *et al.*, 2021).

2.3.2.1 Dimensionamento do sistema fotovoltaico

A energia solar no Brasil corresponde a 13,1% da matriz elétrica nacional, sendo a segunda maior fonte de energia, superada apenas pela energia hidrelétrica. Nos últimos anos, o número de sistemas fotovoltaicos instalados no país tem aumentado significativamente, especialmente nas regiões Sul e Sudeste. O Brasil tem uma vantagem significativa devido ao seu vasto potencial energético de energia solar, considerando que os níveis de incidência solar são maiores do que os de países que frequentemente desenvolvem projetos fotovoltaicos, como Alemanha, França e Espanha. Portanto, é essencial que a geração de energia fotovoltaica seja amplamente explorada no país, pois possui os incentivos necessários para isso (Portal Solar, 2024).

O sistema *on grid* é definido pela geração de energia elétrica conectada à rede da concessionária. Todo o excesso de energia produzida é enviado para a rede, gerando créditos que podem ser utilizados por um período de até 60 meses. Quando os painéis solares não produzem energia suficiente para atender ao consumo, como à noite ou em dias nublados, a rede fornece a energia necessária. Essa diferença é compensada pelos créditos acumulados, caso existam, resultando na redução da fatura de energia (Santucci; Barbosa, 2021)

O sistema de energia solar, Figura 4, conectado à rede é composto por três fases:

- **(A) Captação:** Durante o dia, os painéis fotovoltaicos transformam a energia solar em eletricidade. A quantidade gerada depende da área disponível no telhado e do nível de irradiação na cidade.
- **(B) Conversão:** O inversor transforma a energia solar em um formato compatível com o uso nas tomadas, sem precisar de modificações ou trabalho adicional nas instalações elétricas da residência.
- **(C) Remuneração:** Caso a energia solar gerada não for utilizada, o excesso é enviado para a rede da concessionária e o consumidor recebe créditos em sua conta de energia.

Desde abril de 2012, os consumidores brasileiros têm a possibilidade de produzir sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada, podendo inclusive fornecer o excedente à rede de distribuição local. Isso refere-se à micro e minigeração distribuída de energia elétrica, iniciativas que

combinam economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade (Alves *et al.*, 2018).

Figura 4 - Aplicação de painel solar



Fonte: Do Rosário (2018)

Ainda que não haja emissão de CO_2 para gerar energia fotovoltaica, ao considerar-se a produção dos painéis, dos equipamentos e o ciclo de vida destes, estima-se que o haja fator de emissão (F_e) de CO_2 variando entre $20 \frac{gCO_2}{kWh}$ a $50 \frac{gCO_2}{kWh}$ (Gallina *et al.*, 2022).

2.4 Certificação ambiental: Sistema LEED

A avaliação do desempenho ambiental de edificações surgiu quando se percebeu que países que se consideravam eficientes e que dominavam projetos de construções ecológicas ou “verdes”, não tinham meios de verificar o quão sustentáveis eram seus projetos. Sendo assim, a classificação de desempenho ligada a sistemas de certificação representa um dos métodos mais eficazes para melhorar tanto o desempenho ambiental de edificações existentes quanto de novas construções (Da Silva Rech, 2018).

O *Green Building Council Brasil* (GBCB) define o LEED como um sistema global de certificação e orientação ambiental para construções. Seu objetivo é promover a transformação dos projetos, da construção e da operação das edificações, priorizando a sustentabilidade em suas atividades (GBCB, 2024).

A certificação LEED consiste em um método de classificação com base na harmonização, ponderação de créditos (em função do impacto ambiental e da saúde

humana) e regionalização. A eficiência energética e a redução da emissão de CO_2 são os itens mais importantes neste sistema de classificação. Através de um selo, a construção é certificada pelo atendimento de requisitos e créditos. O selo possui quatro níveis: certificado, prata, ouro e platina (USGBC, 2024).

O volume de empreendimentos com certificação LEED é crescente. Contudo, há algumas barreiras quanto a este avanço, como a pouca disponibilidade de materiais verdes, o alto custo inicial dessas novas tecnologias, e a insuficiência de dados técnicos que comprovem a capacidade de reciclagem, durabilidade e o baixo impacto ambiental desses materiais (GBCB, 2024).

O sistema LEED possui quatro tipologias diferentes, que consideram as necessidades específicas de cada tipo de empreendimento. A Figura 5 ilustra essas quatro categorias.

Figura 5 - Tipologias do sistema LEED



Fonte: GBCB, 2024

De acordo com a GBC Brasil (2024) a certificação LEED possui oito dimensões a serem avaliadas nas edificações, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Oito áreas analisadas pelas tipologias



Fonte: GBCB, 2024

Onde cada uma dessas áreas possui pré-requisitos e créditos. Os pré-requisitos são as ações obrigatórias para qualquer empreendimento que almeja a certificação. O não cumprimento de qualquer um dos pré-requisitos impede que o empreendimento obtenha a certificação. E os créditos são as ações recomendadas pelo LEED, sempre focadas no desempenho. À medida que o empreendimento adota essas ações, recebe uma pontuação. Independente da categoria aplicada, o LEED proporciona quatro níveis de certificação baseados na pontuação obtida nas áreas avaliadas (GBCB, 2024). Esses pontos são obtidos conforme o empreendimento implementa os créditos sugeridos pelo LEED. A Figura 7 apresenta os níveis de certificação.

Figura 7 - Níveis de certificação



Fonte: GBCB, 2024

Para obter a certificação mínima, é necessário alcançar 40 pontos, a certificação “silver” é concedida a partir de 50 pontos, a certificação “gold” a partir de 60 pontos e a certificação “platinum” é atribuída para pontuações superiores a 80 pontos sendo total de pontos possíveis em todas as categorias de 110 (Duarte *et al.*, 2016).

3 METODOLOGIA

A metodologia é dividida em duas etapas distintas, porém interligadas. Primeiramente quantificou-se as emissões de CO_2 e o consumo de cimento associadas a um projeto de construção sustentável, visando a certificação LEED. A seguir, analisou-se a evolução de certificações LEED de empreendimentos no Brasil nos últimos 10 anos.

3.1 Consumo de Cimento e Emissões de CO_2

3.1.1 Consumo de cimento

. De acordo com Guimarães (2022), para construir uma casa de 70 m², são utilizados 3200 kg de cimento, correspondendo a 64 sacos de 50 kg, 480 kg de CCA. Segundo Metax (2019), são utilizados aproximadamente 2,05 sacos de cimento para cada m² de construção, o que resulta em uma redução de 10 sacos de cimento na construção. Para uma casa popular de 55,40 m², os cálculos foram ajustados para determinar a quantidade necessária de cimento e a redução ao adicionar 15% de cinza de CCA.

3.1.2 Emissões de CO_2

O cálculo das emissões de CO_2 foi realizado pelo método QE- CO_2 , proposto por Costa (2012). A escolha por essa ferramenta de quantificação de CO_2 baseou-se no desenvolvimento da mesma para os materiais da construção civil em um contexto nacional, e considera na contagem as fases de extração das matérias primas, transporte e produção de materiais empregados em uma edificação (Kozloski; Vagheti, 2019).

O método QE- CO_2 foi desenvolvido com base em dados do IPCC, da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), da 2ª Comunicação Nacional do Brasil, do Balanço Energético Nacional, além de artigos científicos, associações, fabricantes e metodologias existentes a nível global (Costa, 2012). Este procedimento é dividido em três níveis que se fundamentam em uma fórmula geral (equação 1), adaptada para as particularidades de cada material, e são definidos pela quantidade e qualidade dos dados disponíveis para cada material, resultando em dados com diferentes graus de precisão.

$$Emissões\ MT1,j = QTj \times FPj \times FEPj \quad (1)$$

Onde:

- *Emissões MT1,j*: emissões de CO_2 devido a utilização do produto j em edificações, em toneladas de CO_2
- *QTj*: quantidade de produto j necessária na obra, em toneladas
- *FPj*: fator de perda do produto j, adimensional
- *FEPj*: fator de emissão de CO_2 devido a utilização do produto j em edificações, em toneladas de $\frac{CO_2}{tonelada}$ de produto acabado.

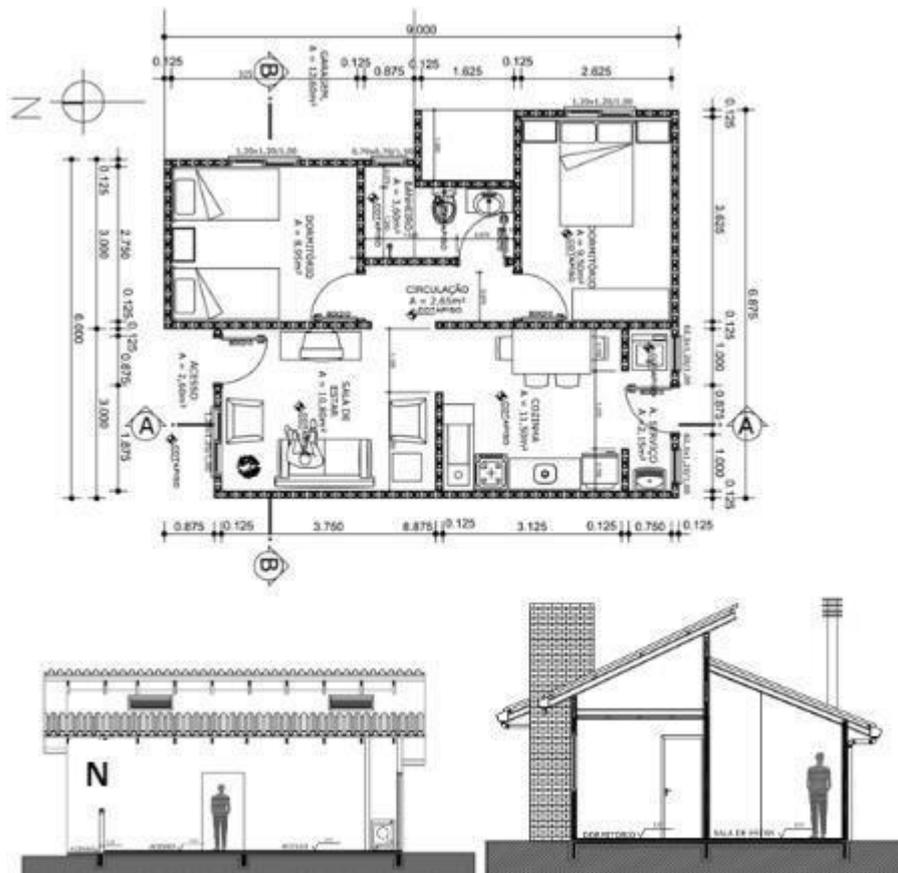
Para que fosse possível analisar a possível redução das emissões de CO_2 pela adoção de alternativas sustentáveis, “projeto sustentável” estimou-se também as emissões sem as medidas sustentáveis, identificada neste trabalho como “projeto padrão”.

3.1.3 Concepção do projeto

Para o projeto da residência, baseou-se no modelo proposto por Vagheti, Santos, Carissimi (2015).

A edificação possui uma área construída de 55,40 m², sendo constituída por dois dormitórios, um banheiro, uma sala de estar, uma cozinha e uma área de serviço, integradas. Na Figura 8 pode ser observada a Planta Baixa da casa e os Cortes AA e BB.

Figura 8 - Planta baixa, Corte AA e Corte BB.



Fonte: Euro-ELECS,2015.

3.1.3 Materiais Utilizados

O material de construção utilizado foi uma argamassa cimentícia contendo 15% em massa de CCA em substituição ao cimento Portland (CP IV). Caracterizou-se a CCA quanto à morfologia e quanto à composição mineral e química. Para isso, foram utilizadas as técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de raios-X (DRX) e Fluorescência de raios-X (FRX).

Os corpos de prova, figura 9, foram curados por 28 dias e, logo a seguir, mediuse a resistência à compressão. Os resultados mostraram que a CCA analisada contém 80% de sílica (SiO_2) predominantemente amorfa na forma de cristobalita. Sendo assim, pode ser considerada pozolana. A resistência à compressão foi de 25 Mega Pascal (MPa). O detalhamento dos resultados de caracterização da CCA e de desenvolvimento do material cimentício estão detalhados em trabalhos preliminares:

Figura 9 - Corpos de prova



Fonte: Autora, 2024.

Além da argamassa com CCA, propôs-se o uso de telha ecológica Tetra Pak, forro de Painéis de Tiras de Madeira Orientadas (OSB), piso de policloreto de vinila (PVC) reciclável e esquadrias em eucalipto, conforme proposto por Kosloski, Vaghetti, Da Silva (2019).

Para comparação, no “projeto padrão” considerou-se o uso de tijolo de cerâmica vazado, telha de cerâmica, forro de PVC, piso de placas cerâmicas e esquadrias de alumínio (Kosloski, Vaghetti, Da Silva ,2019).

3.1.3 Projeto dos painéis fotovoltaicos

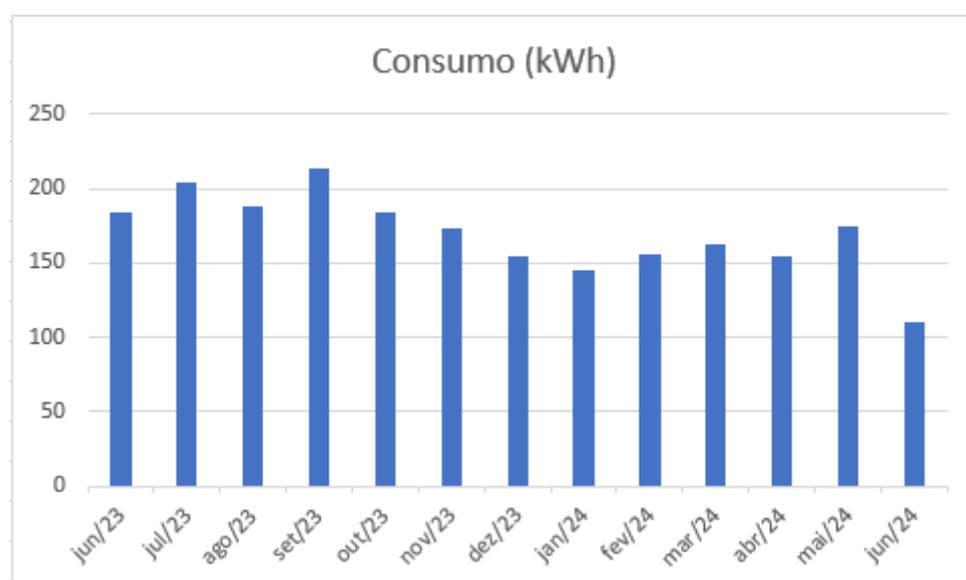
Para dimensionar o sistema fotovoltaico, inicialmente deve-se analisar o histórico de consumo dos últimos 12 meses. Para determinar a média de consumo mensal, somou-se os valores de cada e dividiu-se o total pela quantidade de meses (Santucci; Barbosa, 2021).

Ao examinar a fatura de energia, pode-se identificar a classificação do sistema. Com essa informação, é possível determinar o custo de disponibilidade do sistema elétrico, que é aplicado ao faturamento mensal do consumidor responsável por uma unidade consumidora (Nascimento *et al.*,2021).

Portanto, para otimizar a determinação do gerador fotovoltaico, é necessário calcular o consumo médio diário anual da edificação ($\frac{kWh}{dia}$), descontando o valor da disponibilidade mínima de energia.

A residência onde será instalado o projeto fotovoltaico possui o histórico de consumo dos últimos 12 meses, conforme mostrado no gráfico 10:

Figura 10 - Consumo mensal da residência



Fonte: Autora, 2024

Dessa forma, pode-se observar que o consumo médio dessa residência é de 183,75 kilo Watt-hora (kWh). O sistema de alimentação da casa é bifásico, ou seja, a entrada de energia no padrão de entrada é formada por dois condutores de fase e um condutor neutro. Assim, a geração de energia solar fotovoltaica pode ser 50 kWh inferior à média, já que essa quantidade mínima corresponde à taxa mínima exigida pela concessionária (Santucci; Barbosa, 2021). Por isso, o sistema fotovoltaico deve produzir no mínimo 133,75 kWh para atender a demanda do consumo do local.

Com base na energia estimada de geração, calcula-se a potência de pico do projeto, que corresponde à soma das potências dos módulos, levando em consideração o índice de irradiação do local de instalação, a potência individual de cada módulo e o número de dias no mês. Além disso, deve-se aplicar o rendimento do sistema, que é influenciado por fatores como a orientação e inclinação do telhado, sombreamento e a possibilidade de dias totalmente nublados. Para este projeto, o rendimento será de 80% (Santucci; Barbosa, 2021).

Neste projeto, serão utilizados painéis com potência de 270 Watt (W). Os dados de irradiação para a cidade de Bagé/RS foram obtidos no site do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), concluindo que a média é de $4,52 \frac{kWh}{m^2 dia}$.

Para determinar a quantidade mínima de painéis, deve-se inicialmente calcular a potência de pico do sistema de energia solar fotovoltaica, em kilo Watt-hora pico (kWhp). Para isso, utiliza-se a equação 2.

$$P_{projeto} = \frac{E_{consumo}}{p \cdot \eta \cdot I} \quad (2)$$

Sendo:

$P_{projeto}$ - Potência de pico necessária para o projeto (kWp);

$E_{consumo}$ - Energia mínima de consumo mensal (kWh);

p - Período de consumo no mês (dias);

η - Rendimento do sistema (%);

I - Índice de irradiação (kWh/m²dia).

Com a potência de pico do sistema determinada, pode-se então calcular a quantidade mínima de painéis necessários para o projeto, para isso utiliza-se a equação 3.

$$Q = \frac{P_{projeto}}{P_{módulo}} \quad (3)$$

Sendo:

Q = Quantidade mínima de painéis fotovoltaicos;

$P_{projeto}$ = Potência de pico do projeto;

$P_{módulo}$ = Potência de pico do módulo

Para calcular a média de geração fotovoltaica, inicialmente foi determinada a potência de pico dos módulos, de acordo com a equação 4.

$$P_{pico} = \text{quantidade painéis} \cdot P_{painel} \quad (4)$$

Onde:

P_{pico} = Potência de pico do conjunto de painéis

Dessa forma, a quantidade de energia ($E_{geração}$) gerada mensalmente é dada pela equação 5.

$$E_{geração} = P_{pico} \cdot I \cdot p \cdot \eta \quad (5)$$

3.1.3.1 Cálculo das emissões de CO_2 pelo uso de painéis solares

Para calcular as emissões de CO_2 utilizou-se o método bottom-up, no qual a emissão é calculada considerando o consumo energético final, dado pela Equação 6.

$$ECO_2 = E_P \times F_E \quad (6)$$

Sendo ECO_2 a emissão de CO_2 da usina, medida em gramas de CO_2 (gCO_2), e E_P a energia gerada pela usina em quilowatt-hora (kWh).

As usinas fotovoltaicas também têm um fator de emissão, mesmo que não emitam gás carbônico durante a geração de energia, pois o CO_2 está presente na fabricação dos equipamentos e ao longo de seu ciclo de vida. Dessa forma, o fator de emissão pode variar entre $20 \frac{gCO_2}{kWh}$ e $50 \frac{gCO_2}{kWh}$.

3.1.4 Certificação LEED no cenário brasileiro

Com base nos dados fornecidos pela GBC Brasil, analisou-se os registros de certificação LEED no Brasil nos últimos 10 anos. Os resultados evidenciam a crescente conscientização sobre a importância da construção sustentável e o impacto positivo que esses empreendimentos têm no meio ambiente.

4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Consumo de cimento

Levando em conta a construção de uma moradia popular com área de 55,40 m², estimou-se o uso de 2532 kg de cimento, totalizando 50 sacos de 50 kg de cimento. Substituindo-se 15% de cimento por CCA (379 kg) estima-se que serão necessários 1953 kg de cimento, resultando em uma redução de 22,86% no consumo de cimento, mantidas as características de resistência mecânica do material de construção.

Reduzir o consumo de cimento, vai ao encontro do objetivo das construções sustentáveis pois, considerando-se o menor consumo, reduz-se a exploração de jazidas em busca de matéria-prima para produzir o cimento e diminuir o consumo de clínquer

4.2 Emissões de CO_2

4.2.1 Materiais de Construção

A quantificação dos materiais analisados e as emissões de CO_2 decorrentes da utilização dos materiais no projeto sustentável estão apresentados na Tabela 1. Já os resultados para o projeto padrão encontram-se dispostos na Tabela 2.

Tabela 1 - Quantificações de CO_2 dos materiais utilizados na casa popular eficiente

CASA POPULAR EFICIENTE								
VOLUME	UN	FP (%)	MATERIAL	FEP	UNIDADE	Emissões de CO_2 sem FP (tCO_2)	Emissões de CO_2 com FP (tCO_2)	
32,236	t	18	Argamassa com CCA	0,6518	$\frac{tCO_2}{tproduto}$	2,101	3,18	
0,511	t	8	Telha Ecológica Tetra Pak	0,0434	$\frac{tCO_2}{tproduto}$	0,022	0,024	
0,539	m ³	15	Forro de OSB	0,3312	$\frac{tCO_2}{m^3}$	0,179	0,205	
0,288	t	10	Piso de PVC reciclável	0,615	$\frac{tCO_2}{tproduto}$	0,177	0,195	
2,653	t	56	Cimento	0,6518	$\frac{tCO_2}{tproduto}$	1,729	2,698	
1,171	t	11	Aço	1,845	$\frac{tCO_2}{tproduto}$	3,156	3,503	
25,159	t	9	Agregados graúdos	0,086	$\frac{tCO_2}{tproduto}$	2,164	2,358	
8,52	t	7	Agregados miúdos	0,086	$\frac{tCO_2}{tproduto}$	0,733	0,784	
0,048	m ³	0	Esquadrias <i>Eucalyptus grandis</i>	0,4086	$\frac{tCO_2}{m^3}$	0,048	0,02	
TOTAL (em tCO_2)						10,299	12,967	

Fonte: Autora, 2024.

Tabela 2 - Quantificação das emissões de CO_2 dos materiais utilizados na residência padrão

RESIDÊNCIA PADRAO							
VOLUME	UN	FP (%)	MATERIAL	FEP	UNIDADE	Emissões de CO_2 sem FP (tCO_2)	Emissões de CO_2 com FP (tCO_2)
32,236	t	18	Tijolos de cerâmica vazados	0,111	$\frac{tCO_2}{tproduto}$	3,578	4,187
0,511	t	8	Telha de cerâmica	0,111	$\frac{tCO_2}{tproduto}$	0,057	0,062
0,539	m ³	15	Forro de PVC	0,615	$\frac{tCO_2}{m^3}$	0,331	0,348
0,288	t	10	Piso de placas cerâmicas	0,187	$\frac{tCO_2}{tproduto}$	0,054	0,064
2,653	t	56	Cimento	0,6518	$\frac{tCO_2}{tproduto}$	1,129	2,698
1,71	t	11	Aço	1,845	$\frac{tCO_2}{tproduto}$	3,156	3,503
25,159	t	9	Agregados graúdos (brita 1)	0,086	$\frac{tCO_2}{tproduto}$	2,164	2,358
8,52	t	7	Agregados miúdos (areia)	0,086	$\frac{tCO_2}{tproduto}$	0,733	0,784
0,048	m ³	0	Esquadrias de alumínio	4,441	$\frac{tCO_2}{m^3}$	0,214	0,214
TOTAL (em tCO_2)						11,416	14,218

Fonte: Autora, 2024.

Os dados das Tabelas 1 e 2 indicam que a argamassa com CCA contribuiu para reduzir cerca de 18% as emissões de CO_2 , de 3,58 para 2,95 tCO_2 evitando que mais de uma tonelada de CO_2 fosse liberada na atmosfera em comparação com os tijolos cerâmicos vazados. .

Ao contabilizar os Fatores de Perda (F_P) de cada material, a diferença total de emissões entre a casa popular eficiente e a residência padrão aumenta de 1,117 tCO_2 (sem F_P) para 1,251 tCO_2 . Isso demonstra o potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa quando se utilizam materiais alternativos com menor impacto ambiental na construção. Assim, as emissões totais dos materiais analisados

somaram 12,97 tCO_2 para a casa popular eficiente e 14,22 tCO_2 para a residência padrão, considerando os fatores de perda de cada material.

Conforme descrito na Revisão da Literatura, para alcançar a certificação LEED é necessário reduzir as emissões de CO_2 da construção. Considerando-se a redução total do impacto calculado neste trabalho, 15,33%, e conforme a pontuação de desempenho da USGBC (2024), seria possível atribuir ao projeto a certificação “silver”.

4.3 Projeto dos painéis fotovoltaicos

A potência de pico do sistema fotovoltaico será de 1,23 kilo Watt-pico (kWp), exigindo um mínimo de 4,56 painéis fotovoltaicos. Portanto, a quantidade mínima de módulos a serem instalados nesta residência será de 5 painéis. Nesta residência, foram instalados 6 painéis solares com o objetivo de gerar mais energia do que o consumo mensal. Dessa forma, é possível acumular créditos que serão descontados em meses em que a energia fornecida pela concessionária for maior do que a energia injetada na rede. A potência de pico dos módulos será de 1,62 kilo Watt (kW). Assim, a quantidade de energia gerada mensalmente corresponderá a $172,73 \frac{kWh}{mês}$

4.3.1 Cálculo das emissões de CO₂ pelo uso de painéis solares

Considerando a potência projetada, $172,73 \frac{kWh}{mês}$, e o valor máximo do F_e , 50 $\frac{gCO_2}{kWh}$ a emissão de CO_2 será de $3,4 \times 10^{-5} tCO_2$ por ano, em torno de $3,8 \times 10^9$ vezes menor que a emissão de uma usina térmica a diesel (130426 tCO_2) que gere a mesma quantidade de energia.

4.4 Certificação LEED no cenário brasileiro

A Figura 11 apresenta a evolução da certificação LEED no Brasil entre os períodos de 2014 a 2024.

Figura 11 - Empreendimentos no Brasil com certificação LEED.

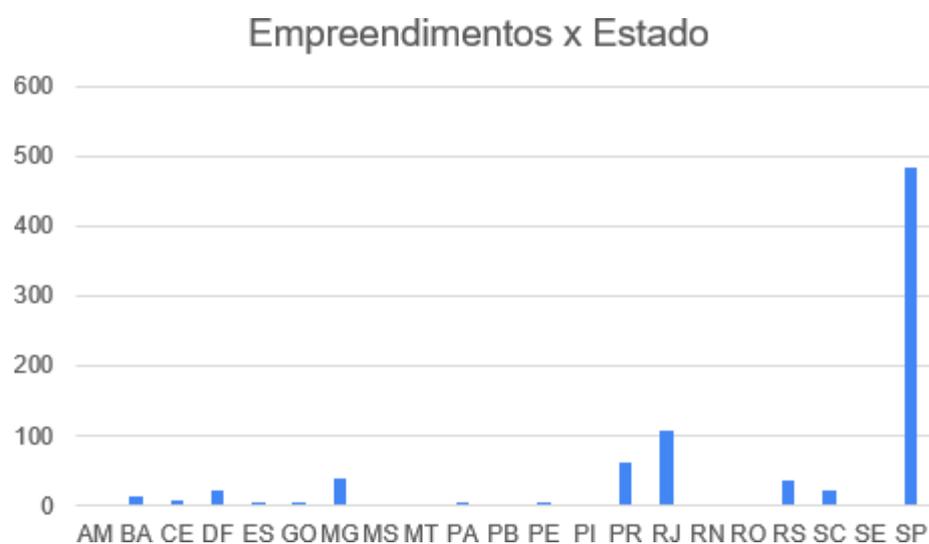


Fonte: Autora, 2024.

Com a análise dos dados, constatou-se que o ano de 2015 apresentou o maior número de certificações, com uma média de 95 empreendimentos certificados. Os anos de 2022 e 2023 vêm em seguida, com um total de 88 certificações cada.

A Figura 12 apresenta a evolução da certificação LEED por estados nos últimos 10 anos.

Figura 12 - Estados brasileiros com certificação LEED



Fonte: Autora, 2024.

Observa-se, na figura acima, os estados com maior número de projetos LEED certificados na última década sendo o estado de São Paulo o estado com maior número de certificações totalizando 484, seguido pelo Rio de Janeiro com 108 certificações e o estado do Paraná com 63 certificações.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quanto aos objetivos propostos verificou-se que:

Os resultados demonstram que o uso de materiais alternativos e de geração própria de energia podem servir como estratégia para diminuir as emissões de CO₂ provenientes dos materiais de construção para a atmosfera, contribuindo para mitigar o aquecimento global:

- Pelo uso de 15% de uma CCA, caracterizada como superpozolana, em substituição ao cimento Portland, estimou-se a redução do consumo de cimento de 22,86% considerando-se o projeto para construção de uma casa popular de 55,40 m².
- A diferença total de emissões entre a casa popular eficiente e a residência padrão aumenta de 1,117 tCO₂ para 1,251 tCO₂. Isso demonstra o potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa quando se utilizam materiais alternativos com menor impacto ambiental na construção.
- As emissões totais dos materiais analisados somaram 12,98 tCO₂ para a casa popular eficiente e 14,22 tCO₂ para a residência padrão, considerando os fatores de perda de cada material.
- Considerando-se a potência projetada para os painéis solares, as emissões de CO₂ ficaram em torno de $3,4 \times 10^{-5}$ tCO₂ por ano.
- Com base na redução de -15,33% de tCO₂, seria possível atribuir ao projeto a proposta de certificação LEED “silver”.
- Em média, no Brasil anualmente são certificados pelo sistema LEED 80 empreendimentos.
- O estado de São Paulo possui o maior número de certificações na última década.

Por fim, ainda que haja a incorporação de novos materiais no mercado da construção civil, é fundamental a conscientização e validação das recorrentes preocupações ambientais por investidores e usuários. Assim, essa incorporação poderia se tornar um processo comum e natural, a partir de uma necessidade, e não mais alternativo, diferenciado e opcional, como ainda é considerado atualmente.

É essencial ainda promover a conscientização tanto da sociedade quanto de todos os setores envolvidos na construção civil, não apenas sobre a metodologia

LEED, mas também sobre o comportamento e a responsabilidade individual na criação de ambientes urbanos mais sustentáveis para se viver e trabalhar.

Deve ser considerado ainda, que é importante destacar que as construções sustentáveis oferecem oportunidade para a mitigação de riscos corporativos, devido à crescente pressão da sociedade e da mídia em relação às questões de sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- ABRECON. A gestão dos resíduos da construção e demolição e o papel do engenheiro. Brasil, 2022. Disponível em: <https://abrecon.org.br/noticias/a-gestao-dos-residuos-da-construcao-e-demolicao-e-o-papel-do-engenheiro>. Acesso em: 30 mai.2024.
- AIRES, E. K. S. Sustentabilidade na Construção Civil: O Caso de Uma Residência Padrão Popular. **Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)–Curso de Engenharia Civil, UNINOVAFAPI, Teresina-PI**, 2019.
- ALVES, Eduardo Felipe Quixabeira; BEZERRA, Eduardo Freud Ferreira; LEITE, Maria Gracielly Alves. Avaliação da eficiência energética e aplicação de energia solar fotovoltaica: estudo em uma indústria metalúrgica em Caruaru. 2018.
- BARBISAN, Ailson Oldair et al. Impactos ambientais causados pela construção civil. **Unoesc & Ciência-ACSA**, v. 2, n. 2, p. 173-180, 2011.
- ARGAMASSA SUSTENTÁVEL COM INCLUSÃO DE CINZAS DA CASCA DE ARROZ. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, [S. l.], v. 2, n. 15, 2023. Disponível em: <https://periodicos.unipampa.edu.br/index.php/SIEPE/article/view/116425>.. Acesso em: 7 jul. 2024.
- BRAGANÇA, Luís; NAGUISSA YUBA, A.; ENGEL DE ALVAREZ, C. **Euro-ELECS 2015-Latin-American and European Conference on Sustainable Buildings and Communities**. Universidade do Minho. Escola de Engenharia (EEng), 2015.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Projeto do MCTI quer descarbonizar construção civil por meio de edifícios com zero emissão de CO2**, 2023.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Construção Sustentável**, 2023.
- CABRAL, Flávio Garcia; DA SILVA JAQUES, Abner; VASQUES, Rafael Luís Correa. Repercussão jurídica e sustentável do uso de energia solar fotovoltaica em propriedades rurais. **Revista de Direito Econômico e Socioambiental**, v. 14, n. 1, p. e238-e238, 2023.
- COSTA, Bruno Luis de Carvalho. Quantificação das emissões de CO2 geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil. **Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE**, 2012.
- DA SILVA, Diogo Hilário et al. Construção sustentável na engenharia civil. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS**, v. 4, n. 2, p. 89-89, 2017.
- DARKO, Amos et al. Drivers for implementing green building technologies: An international survey of experts. **Journal of cleaner production**, v. 145, p. 386-394, 2017.

DE FARIAS, Lucas Menezes; MARINHO, Jefferson Luiz Alves. Construções sustentáveis: Perspectivas sobre práticas utilizadas na construção civil. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 16023-16033, 2020.

DE FREITAS MOTA, Loyslène et al. Construções sustentáveis, desenvolvimento econômico e a engenharia: otimização dos recursos naturais. **Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo**, v. 6, n. 2, p. 221-242, 2021.

DE SOUSA, Ivo Arcaro; SOARES, Maria José Nascimento. Reflexões legais sobre impactos ambientais na construção civil. **Semioses**, v. 12, n. 4, p. 163-183, 2018.

DE SOUZA, CLEIDMAN EUZÉBIO. SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL: BENEFÍCIOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS. **Multidebates**, v. 7, n. 4, p. 300-307, 2023.

DO ROSÁRIO, Nathália Santiago; DE SANTANA, Claudemir Gomes. Eficiência energética como estratégia sustentável na construção civil: Unidade de produção de móveis de MDF1.

DOS SANTOS, Rafaela Lima; SANTANA, Júlio Cesar Oliveira. Materiais de construção sustentáveis em empreendimentos de habitação de interesse social financiados pelo PMCMV. **Mix Sustentável**, v. 3, n. 3, p. 53-62, 2017.

DRIEMEIER, Giovana Smolski et al. SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL. **SEPE-Seminário de Ensino, Pesquisa e Extensão da UFFS**, v. 12, 2023.

FARID, Sayed Ali; ZAHEER, Mohd Moonis. Production of new generation and sustainable concrete using Rice Husk Ash (RHA): A review. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

FEBRAPAN. 17º Café com Sustentabilidade: **Construção Sustentável**. Disponível em: <https://portal.febraban.org.br/pagina/3069/38/pt-br/cafe-sustentabilidade>. Acesso: 25 jun.2024.

FRANÇA, Samara A. de S. et al. Ecoedifícios: construções ecologicamente corretas e sustentáveis. **Anais dos Encontros Nacionais de Engenharia e Desenvolvimento Social-ISSN 2594-7060**, v. 11, n. 1, 2014.

FRANCO, Maria Antonia Macedo; DE SOUSA, Joyce Silvestre. Construções sustentáveis: aplicações para a cidade de Uberaba-MG. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 9, n. 1, p. e16205-e16205, 2020.

GALLINA, Aline Santana et al. Estimativa de redução de emissão de CO2 pela inserção de UFV para cidades isoladas na Amazônia. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE**, v. 2, n. 1, 2022.

GOMES, Carla Pinheiro et al. Impacto Ambiental e Gerenciamento de Resíduos Sólidos Advindos da Construção Civil no Brasil: Uma Revisão de Literatura/Environmental Impact and Solid Waste Management Arising from Civil

Construction in Brazil: A Literature Review. **ID on line. Revista de psicologia**, v. 15, n. 55, p. 729-742, 2021.

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL. **Compreenda o LEED**. Disponível em: <https://www.gbcbrasil.org.br/certificacao/certificacao-leed/>. Acesso em: 13 jun. 2024.
GUIMARÃES, Juliana Nogueira et al. A influência da substituição parcial do cimento Portland por cinza de casca de arroz no processo de produção de argamassa: uma revisão literária. 2022.

KATS, Greg; BRAMAN, Jon; JAMES, Michael. Tornando nosso ambiente construído mais sustentável: custos, benefícios e estratégias. **São Paulo: IslandPress**, 2010.

KOZLOSKI, Cássia Laire; VAGHETTI, Marcos Alberto Oss; DA SILVA, Bibiana Noschang. Emissões de co2 na casa popular eficiente e o emprego de materiais alternativos. **ENCONTRO LATINO AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS**, p. 1350-1360, 2019.

LARROSA, Cláudia Anahi Aguilera; DA SILVA BUENO, Liane. Construções Sustentáveis: O Aspecto Social e o Desafio Cultural na Engenharia Civil. **IGNIS Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo Engenharias e Tecnologia de Informação**, p. 156-163, 2017.

LOPES, Diogo Plachi et al. SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, p. 10-98, 2023.

MASUERO, Angela Borges. Desafio da Construção Civil: crescimento com sustentabilidade ambiental. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 04, p. e13123, 2021.

MENEZES, Sirley. **Energia solar conquista espaço importante na construção civil**. Disponível em: <<https://biocomunicacao.wordpress.com/2012/08/>>. Acesso em: 09 jun. 2024.

METAX. **Quantos sacos de cimento são usados para construir uma casa?** Metax, soluções a altura da sua obra, 2019. Disponível em: <https://www.metax.com.br/?v=19d3326f3137>. Acesso em: 05.07.2024.

MICHELETTI, Igor Talarico Da Silva et al. Energia solar, extrafiscalidade e políticas públicas na promoção ao desenvolvimento sustentável Solar energy, extrafiscality and public policies in promoting sustainable development. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 58659-58680, 2021.

MOISES, Jackson et al. A SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL E O PAPEL DO ARQUITETO: UMA REVISÃO NARRATIVA. **Revista Mundi Sociais e Humanidades (ISSN: 2525-4774)**, v. 7, n. 2, 2022.

PARIDA, Bhubaneswari; INIYAN, Selvarasan; GOIC, Ranko. A review of solar photovoltaic technologies. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 3, p. 1625-1636, 2011.

PORTAL SOLAR. Energia Solar no Brasil. Disponível em: [Energia Solar no Brasil - Portal Solar - Tudo sobre Energia Solar Fotovoltaica | Portal Solar](#) Acesso em: 02 jul. 2024.

QUEIROZ, Neucy Teixeira. Construções sustentáveis na Engenharia Civil e a responsabilidade socioambiental. **Rev. Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, 2016.

RIBEIRO, Henrique Ferreira; MARTINS, Lucas Mattos; RIBAS, Luiza Pinheiro Rezende. CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS: HISTÓRICO E PERSPECTIVAS. **FUMEC, Belo Horizonte, MG**, 2013.

ROQUE, Rodrigo Alexander Lombardi; PIERRI, Alexandre Coan. Uso inteligente de recursos naturais e sustentabilidade na construção civil. **Research, society and development**, v. 8, n. 2, p. e3482703-e3482703, 2019.

SANTUCCI, Julia Maria Quinsan; BARBOSA, Rubia Tereza. Dimensionamento de um sistema de energia solar fotovoltaica: conceitos e estudo de caso. 2021.

SOUZA, M. O. (2010) Sustentabilidade na construção civil – Energia Solar, disponível em: <http://www.sbpcnet.org.br/livro/63ra/arquivos/jovem/88sustentabilidade.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2024.

UNEP. **Emissões do setor de construção civil atingiram recordes em 2019** - relatório da ONU. UNEP, 2020b. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/emissoes-do-setor-de-construcao-civil-atingiram#:~:text=Isto%20equivale%20a%20uma%20queda,devido%20%C3%A0%2> Acesso em: 30 mai.2024.

USGBC. **Arc updates for LEED users: Emissions factors, performance score and ACPs**, 2024. Disponível em: <https://www.usgbc.org/articles/arc-updates-lead-users-emissions-factors-performance-score-and-acps>. Acesso em: 03 jul.2024.

USO DE CCA RESIDUAL EM ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS PARTE I: DETERMINAÇÃO DA POZOLANICIDADE POR DRX, FRX E MEV. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, [S. l.], v. 2, n. 14, 2022. Disponível em: <https://periodicos.unipampa.edu.br/index.php/SIEPE/article/view/115859>.. Acesso em: 7 jul. 2024.

USO DE CCA RESIDUAL EM ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS PARTE II: INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO GRÃO NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, [S. l.], v. 2, n. 14, 2022. Disponível em: <https://periodicos.unipampa.edu.br/index.php/SIEPE/article/view/115827>.. Acesso em: 7 jul. 2024.

VAGHETTI, Marcos Alberto Oss; SANTOS, J. C. P.; CARISSIMI, Elvis. Casa popular eficiente: uma proposta de moradia de baixo custo e sustentável. **Encontro Latino-Americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis**, v. 1, 2015.

YEMAL, J. A.; TEIXEIRA, N. O. V.; NAAS, I. A. Sustentabilidade na construção civil. In: **INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION**. 2011. p. 1-10.

ANEXOS



ARGAMASSA SUSTENTÁVEL COM INCLUSÃO DE CINZAS DA CASCA DE ARROZ

Vanessa C. Oliveira, discente de graduação, Universidade Federal do Pampa,
Campus Bagé
Daniele F. Lopes, discente de pós-graduação (coorientadora), Universidade Federal
de Pelotas
Sabrina N. da Silva, docente (orientadora), Universidade Federal do Pampa,
Campus Bagé

vanessaoliveira.aluno@unipampa.edu.br

O Rio Grande do Sul (RS) é o Estado com maior produção de arroz do Brasil. Para a safra de 2022/2023, estima-se que a produção possa chegar em 7,1 milhões de toneladas. Sendo assim, o arroz é um dos principais produtos no contexto agrícola do Estado, junto à soja e o trigo, representando uma commodity de grande importância para o país. A maior parte do arroz produzido no Estado do RS tem seu beneficiamento, que inclui a secagem, descascamento e embalagem realizada no próprio Estado, em geral, em engenhos regionais, próximos às zonas de produção. Na região da fronteira com a Argentina, a região Central e a região Sul do Estado do RS são responsáveis pela maior parte da safra produzida, e nestas estão concentradas as indústrias de beneficiamento. Uma fonte de biomassa bastante abundante no Estado do Rio Grande do Sul são os resíduos agroindustriais como a casca de arroz. Por apresentar poder calorífico adequado para combustão e um alto conteúdo de materiais voláteis, a casca de arroz pode ser utilizada como combustível. O potencial energético da casca corresponde a 50% da capacidade térmica de um carvão betuminoso de boa qualidade e de 33% da capacidade térmica do petróleo. Neste sentido, a geração de energia através da combustão da casca de arroz é uma alternativa tecnológica viável, do ponto de vista econômico, e ético, do ponto de vista ecológico. Isto ocorre uma vez que existe tecnologia para a conversão, e a matéria-prima é abundante na região Sul e todo o dióxido de carbono produzido na queima volta para o ciclo da biosfera terrestre. Desta forma, pesquisadores vêm buscando alternativas para o aproveitamento da casca do arroz resultante do beneficiamento do produto, uma vez que sua deposição a céu aberto pelos próprios produtores é prejudicial ao meio ambiente pois a emissão de metano é alta, gás esse que é produzido pela decomposição da matéria orgânica é 20 vezes mais prejudicial ao meio ambiente que o CO₂. A queima da casca de arroz gera outro resíduo, a cinza da casca de arroz (CCA) a qual, da mesma forma, não pode ser descartada pois pode

contaminar o solo e as águas. Vale destacar que deste processo, para a indústria, nem sempre tem uma destinação que possa se considerar adequada, sendo um problema ambiental a ser gerenciado, uma vez que tanto a casca como a cinza produzida pela sua queima indiscriminadamente, tornaram-se preocupantes em determinadas regiões do país, sobretudo em nossa região, em virtude do grande volume produzido anualmente. Pensar em reaproveitar todos os resíduos do beneficiamento e da geração de energia vai ao encontro de uma produção agroindustrial com baixo impacto ambiental. Como alternativa para uso da CCA, tem-se a inclusão deste resíduo em matrizes cimentíceas em substituição ao cimento. Isso porque, a produção de cimento tem um alto impacto em termos de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Neste cenário, o presente trabalho tem como objetivo verificar a viabilidade do uso da cinza de casca de arroz (CCA) sem controle de queima como substituto parcial do cimento visando o desenvolvimento de um material de construção sustentável. É importante destacar que serão apresentados resultados de parte de um projeto que visa desenvolver construções sustentáveis, visando o bem estar ambiental e social, que engloba, além do material de construção, geração descentralizada de energia (fotovoltaica), reutilização da água e aproveitamento da matéria orgânica gerada. A CCA utilizada neste trabalho foi previamente caracterizada como superpozolana. Substituiu-se 15% de cimento por CCA moída durante 3 horas e obteve-se melhoria nas propriedades mecânicas do material quando comparado com a argamassa sem CCA. Dessa forma, considerando-se a construção de uma residência popular de 46m², estima-se uma redução do uso de 14 sacos de cimento, considerando uma média de 2,05 sacos de cimento por m² de construção, contribuindo para redução das emissões de CO₂. Com isso, o material desenvolvido introduz-se no conceito de sustentabilidade. Isso vai ao encontro das metas da Global Cement and Concrete Association (GCCA) a qual prevê a redução das emissões de carbono no processo de fabricação do cimento até 2050.

Palavras-chave: Beneficiamento do arroz, cinza de casca de arroz, aplicações tecnológicas.