

Consumo de madeira para fins provisórios em obras em concreto armado moldado *in loco*

Timber consumption for temporary works by buildings with the cast in situ reinforced concrete

Cassio Gomes de Oliveira 
Katia Regina Garcia Punhagui 
Emerson Felipe Perin Pinto 
Erik Souto de Moraes 

Resumo

Estruturas de edifícios em concreto armado moldado *in loco* utilizam madeira para fôrmas, escoras, andaimes, elementos de segurança e estruturas provisórias de canteiro, que caracterizam a subutilização do biomaterial em uma função de curto ciclo de vida e baixo valor agregado. O objetivo deste trabalho é levantar o consumo de madeira para fins provisórios em obras verticais com estrutura em concreto armado moldado *in loco*. Utilizou-se dados secundários obtidos por meio de uma revisão sistemática e exploratória de artigos nacionais e internacionais sobre uso, reuso e descarte da madeira. Para estudos com dados primários de edifícios habitacionais verticais o consumo de madeira por área construída foi de 0,002 a 0,054 m³/m². Para estudos com dados secundários e edifícios verticais de outros usos, o consumo de madeira foi de 0,002 a 0,077 m³/m². Houve variabilidade dos resultados de 33 vezes (média), explicada pelos métodos de quantificação, aplicações e reuso do material.

Palavras-chave: Madeira. Resíduos. Construção. Concreto. Habitação.

Abstract

Building structures made of cast-in-place reinforced concrete use timber for formwork, struts, scaffolding, safety elements, and temporary construction site structures, which characterize the underutilization of biomaterial in a function of short life cycles and low added value. This work aims to survey timber consumption for temporary purposes in high-rise buildings with reinforced concrete structures cast in loco. Secondary data obtained through a systematic and exploratory review of national and international articles on timber use, reuse, and disposal was used. For studies with primary data for vertical housing buildings, timber consumption per constructed area ranged from 0.002 to 0.054 m³/m². For studies with secondary data and high-rise buildings for different uses, wood consumption ranged from 0.002 to 0.077 m³/m². There was variability in the results of 33 times (average), explained by the methods of quantification, applications, and reuse of the material.

Keywords: Wood. Waste. Construction. Concrete. Housing.

¹Cassio Gomes de Oliveira

¹Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Foz do Iguaçu - PR - Brasil

²Katia Regina Garcia Punhagui

²Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Foz do Iguaçu - PR - Brasil

³Emerson Felipe Perin Pinto

³Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Foz do Iguaçu - PR - Brasil

⁴Erik Souto de Moraes

⁴Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Foz do Iguaçu - PR - Brasil

Recebido em 15/04/23

Aceito em 02/08/23

Introdução

No Brasil cerca de 95% das habitações possuem envoltória em alvenaria (IBGE, 2020) (bloco concreto, cerâmico etc.). Considerado como sistema construtivo convencional, a alvenaria de blocos cerâmicos com estrutura em concreto armado moldado *in loco* pode ser largamente encontrada em todo o território nacional (ABDI, 2015; Carvalho *et al.*, 2014). Nesse sistema, baseado em materiais cerâmico e cimentício, também se destaca o emprego da madeira nas fôrmas para concretagem, escoras, estrutura de telhado e esquadrias.

A subutilização da madeira em curto ciclo de vida e com baixo valor agregado, como caixarias para concretagem ou escoras, pode majorar impactos ambientais (Zenid *et al.*, 2009; Kern *et al.*, 2018). Por outro lado, o emprego de biomateriais em finalidades permanentes, como sistemas estruturais ou paredes, explorando as melhores características físico-mecânicas do material, tem o potencial de colaborar com as metas de descarbonização da construção (Cabeza; Chàfer 2020; Orlandini, 2021).

No Brasil, o uso da madeira em fins de longo prazo na construção ainda é pouco explorado (Punhagui, 2014). O país possui um dos maiores índices de produtividade de floresta plantada do mundo, 29,7 – 38,9 m³/ha (pinus e eucalipto, respectivamente) (IBÁ, 2023). Porém, apresenta o consumo per capita de madeira para construção de 0,039 m³, abaixo de países de porte semelhante, como Estados Unidos (0,412 m³), Canadá (0,520 m³), Rússia (0,095 m³) e China (0,123 m³) (FAO, 2021).

No Brasil, destaca-se o uso provisório da madeira (fôrmas, andaimes, escoras, tapumes, etc.) para edificação em concreto e alvenaria. Isto colabora para a geração de resíduos de construção, que correspondem a cerca de 227 kg/hab/ano (ABRELPE, 2022). Porém, este fato não é uma exclusividade brasileira, e vincula-se a sistemas construtivos artesanais.

Acredita-se que a quantificação da intensidade de madeira para construção em concreto armado pode deflagrar não somente o problema do passivo ambiental (produção de resíduos), mas dar sensibilidade sobre o modo de uso da madeira pela construção. Alguns países, como Alemanha, Suécia, França, Irlanda, Holanda, Japão, Canadá e Austrália, têm explorado melhores finalidades construtivas e incentivado o uso da madeira em fins de longo prazo com objetivos de redução de emissões de CO₂ (Rovaris, 2019).

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é estimar o consumo, reuso e geração de resíduos de madeira na construção de edifícios verticais residenciais com estrutura em concreto armado moldado *in loco*. Com isso, espera-se gerar subsídios para futuras discussões sobre o modo de uso da madeira pela construção brasileira.

Referencial teórico

No Brasil o estoque de construções verticais multifamiliares tem aumentado ao longo do tempo. Os apartamentos, que em 1981 eram 1,8 milhões de unidades (IBGE, 2021a), somavam em 2019 aproximadamente 10,3 milhões (IBGE, 2021b); um aumento de mais de 5,7 vezes. Nesse tipo de edificação, o sistema estrutural predominante é o concreto armado moldado *in loco*.

Esse sistema construtivo é caracterizado pelo excesso de atividades em canteiro (ABDI, 2015; Caldas *et al.*, 2017; Lima *et al.*, 2021). Apresenta perdas de recursos materiais nos processos de construção entre 0,033 e 0,128 m³/m² para edifícios verticais brasileiros, considerando materiais cimentícios, cerâmicos, madeira, gesso, papel, plástico e metal (Ângulo *et al.*, 2015). O uso da madeira é geralmente de modo provisório, com aplicações do produto serrado e placas compensadas em sistemas de fôrmas e de proteção coletiva, painéis de *Oriented Strand Board (OSB)* para tapumes, e toras de eucalipto especialmente para escoras (Oliveira, 2022; Kern *et al.*, 2018).

De modo permanente, em estruturas de telhado de casas, a madeira pode representar em média de 27% (Oliveira, 2022) a 42% (Sobral *et al.*, 2002) do total de madeira consumida. Por outro lado, o uso de madeira em cobertura de edifícios verticais é escasso (Oliveira, 2022) e sua presença em estruturas de esquadrias e pisos têm pouca intensidade (Zenid *et al.*, 2009).

O sistema construtivo convencional, ao utilizar alvenaria de blocos cerâmicos com estrutura em concreto armado moldado *in loco* compartilha características semelhantes à de países em desenvolvimento, a exemplo da China (Hao *et al.*, 2020), Malásia (Mah; Fujiwara; Ho, 2016), Bangladesh (Islam *et al.*, 2019) e Líbano (Bakshan *et al.*, 2015).

Devido ao amplo uso da madeira como material provisório, é tratada como resíduo, tema central de pesquisas, e mensurado através de um Indicador de Geração de Resíduos (IGR) (Mah; Fujiwara; Ho, 2016; Li *et al.*, 2013; Lu *et al.*, 2011), calculado pela equação a seguir (Equação 1).

$$IGR = \frac{Q}{A} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

Q = quantidade de resíduos (kg ou m³); e

A = área construída (m²).

Nesses estudos encontram-se duas abordagens de mensuração de resíduos do tipo: *soft*, que utiliza de entrevistas e questionários para obter seus principais dados; e *hard*, que utiliza de visitas ao canteiro, pesagem *in loco* e consulta às anotações de obra, quando necessária (Lu *et al.*, 2011).

Método

O estudo foi dividido em duas etapas. A primeira, objetivou compreender o uso da madeira em construções residenciais verticais em alvenaria com estrutura em concreto armado moldado *in loco*, quanto ao emprego temporário ou permanente do material, levantando informações por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre os produtos, suas aplicações, geração de resíduos e características do uso do material no sistema construtivo. A segunda, objetivou ponderar a variação dos resultados da etapa anterior, por meio da avaliação de estudos correlatos levantados através de Revisão Exploratória de Literatura (REL).

Etapa 1: Revisão Sistemática da Literatura (RSL)

A RSL ocorreu de março de 2020 a junho de 2021, utilizando-se, como ferramenta de recuperação das publicações, as bases de dados das plataformas *Scopus*, *EBSCO*, *Web of Science*, *Proquest* e *Engineering Village*, com acesso através do Portal de Periódicos CAPES.

A recuperação se deu por meio da construção de uma *string* de busca, baseada nos questionamentos de interesse da pesquisa, utilização de operadores lógicos para definir parâmetros de seleção ou descarte e elaboração de um protocolo de revisão sistemática. Seu processo foi dividido em 5 etapas (Figura 1):

- (a) resgate das publicações;
- (b) seleção por filtros automáticos;
- (c) triagem por análise pareada de título, resumo e palavras-chave;
- (d) seleção por leitura do texto completo; e
- (e) harmonização dos dados.

Resgate das Publicações

Na construção da *string*, utilizou-se palavras que compreendiam os questionamentos da pesquisa em 4 dimensões: áreas de interesse do estudo com utilização da madeira como material de construção, limitação do método construtivo, direcionamento dos estudos quanto aos resultados apontados, seja na quantificação de consumo ou de geração de resíduos em obra, e objeto de estudo, que são os diversos temas de pesquisa. Por fim, observou-se a necessidade de estabelecer um operador lógico de exclusão (*not*) para termos indesejados na busca, quando observado uma grande quantidade de publicações recuperadas fora do escopo da pesquisa (Quadro 1).

Figura 1 - Etapas da RSL



Quadro 1 - Estrutura de busca nas bases de dados

Questionamento de interesse	Operador lógico	String de busca
Variações das áreas de interesse de estudo em relação ao uso da madeira como material de construção	-	("construction sector" OR "construction sites" OR "construction projects" OR "construction industry" OR "construction and demolition" OR "C&D" OR "CW" OR "construction waste")
Variações de métodos construtivos e métodos de estudos	AND	("conventional" OR "concrete" OR "masonry" OR "prefabricat*" OR "tipolog*" OR "construction methods" OR "BOQ" OR "case stud*" OR "WGA" OR "MWR" OR "on-site" OR "in-situ" or "off-site ")
Objetivos dos estudos que quantificam consumo e resíduos de materiais em obra	AND	("concrete form" OR "tempora*" OR "falsework" OR "formwork" OR "residues" OR "wood*" OR "plywood" OR "sawnwood" OR "timber" OR "landfill" OR "natural resources" OR "material wast*" OR (environment* PRE/3 (impacts OR performance OR problem OR pollution))
Objetos de estudo	AND	("audit" OR "factors" OR "indicators" OR "management" OR "index" OR "stream" OR "kg/m ² " OR "m ³ /m ² " OR "compar" OR (wast* PRE/4 generat*) OR (comsum* PRE/4 resources) OR (generat* PRE/4 (rates OR material) OR (quanti* PRE/5 wast*))
Termos indesejados na busca	NOT	("oil" OR "earthquake" OR "seismic" OR "strength" OR "stress" OR "pressure" OR "failure" OR "shear" OR "health" OR "mechanical" OR "asphalt" OR "scheduling", "robotics")

Fonte: adaptado de Oliveira (2022).

Seleção por filtros automáticos

Observou-se, pela quantidade e característica dos trabalhos retornados, a necessidade de aplicações de filtros específicos ainda dentro das bases de dados, tais como o tipo, a língua, o ano e a área de conhecimento das publicações (Quadro 2). Utilizou-se como guia um protocolo de revisão sistemática, sendo aplicado o formulário *Reporting Standards for Systematic Evidence Syntheses (ROSES)* (Haddway *et al.*, 2017), com aplicação na área de sustentabilidade e meio ambiente e com base em diretrizes para elaboração de RSL (Scannavino *et al.*, 2017).

Triagem por critérios de elegibilidade

Por se tratar de uma busca em 5 bases de dados, é passível a ocorrência de duplicidades, desta forma utilizou-se o *software* de gerenciamento de referências *Mendeley*, que identifica facilmente tais duplicações e permite as suas exclusões.

Estabeleceram-se critérios de elegibilidade para as etapas de análise pareada, sendo eles as características dos estudos, os tipos construtivos, a etapa da obra e uso da madeira (Quadro 3). A análise pareada consistiu em dois pesquisadores avaliarem os documentos integralmente de forma separada, através dos títulos, resumos e palavras-chave, comparando suas seleções posteriormente, tendo como orientação a concordância com os critérios de elegibilidade.

Leitura do texto completo

Por último, realizou-se a leitura do texto completo dos trabalhos selecionados pela análise pareada. A leitura dos resumos, palavras chaves e títulos em alguns casos não foram suficientes para a exclusão dos trabalhos conforme os critérios estabelecidos no protocolo (Quadro 3). Ao serem selecionados, observou-se, pela leitura integral do texto, a necessidade de exclusão de alguns trabalhos por não atenderem completamente os critérios de elegibilidade adotados.

Destes estudos foi elaborada uma síntese da fonte dos dados, dos principais achados e seus resultados quantificados/quantificáveis (Quadro 4).

As informações extraídas dos estudos permitiram a realização de uma meta-análise híbrida (qualitativa e quantitativa), originando indícios de características no uso da madeira para fins provisórios, tipo das edificações investigadas, método construtivo, indicadores do consumo (entradas) e geração de resíduos (saída).

Harmonização dos dados

Nesse trabalho a utilização do IGR se refere ao indicador do fluxo de madeira em obras em concreto armado moldado *in loco*. Esse indicador é comumente citado em trabalhos com temas de resíduos da construção, mas observou-se a necessidade de uma harmonização, de forma a viabilizar a comparação dos resultados.

Tanto para os fluxos de produto quanto para os de resíduos, com valores em massa, utilizou-se de conversão de dados para volume (m^3) da madeira. Porém, para os fluxos tratados como resíduos, a densidade da madeira adotada foi a média entre as densidades aparentes 178 kg/m^3 (Mália; Brito; Bravo, 2011) e 250 kg/m^3 (Carelli, 2008), ou seja, 214 kg/m^3 . Já para os casos em que o fluxo foi encontrado em massa de produto, utilizou-se a média das densidades aparentes da madeira serrada (550 kg/m^3), do compensado e do *Oriented Strand Board (OSB)* (650 kg/m^3) (FAO, 2021), ou seja, 600 kg/m^3 .

Quadro 2 - Filtros adotados nas escolhas dos trabalhos de interesse

Critério	Inclusão	Exclusão
Tipo de Publicação	Periódicos acadêmicos, procedimentos e trabalhos de conferências, dissertações e Teses	Qualquer outro tipo de publicação (livros, resumos, revisões, patentes, notas comentários etc.)
Língua	Inglês, português e espanhol	Quaisquer outras línguas
Cobertura temporal	Qualquer ano	-
Áreas do conhecimento	Construção Civil	Áreas não correlatas (Psicologia, alimentos etc.)

Fonte: adaptado de Oliveira (2022).

Quadro 3 - Critérios de elegibilidade para leitura do texto completo

Temas	Orientações
Características dos estudos	Dados primários, caracterizados como estudos de caso, eliminados estudos baseados somente em dados de outros trabalhos
Tipos construtivos	Casas térreas ou sobrados, condomínios residenciais horizontais ou verticais que possuam estrutura em concreto armado e envoltória externa em blocos, cerâmicos ou de concreto. Não serão considerados estudos sobre obras que não sejam de habitação ou mistos (habitação + comércio/escritórios/serviços etc.)
Etapas da obra	Considerar madeira de uso provisório utilizada em pelo menos um outro elemento da superestrutura além daqueles relacionados a fundação
Uso da madeira	Quantificar a madeira, seja como material construtivo ou resíduos

Fonte: adaptado de Oliveira (2022).

Quadro 4 - Critérios para avaliação crítica dos trabalhos

Critérios	Descrição
Fonte dos dados	Os dados devem ter pelo menos duas origens: entrevistas e análise da documentação/registros de obras. Estudos baseados somente em uma fonte de dado primário (ex.: análise das plantas, entrevista etc.) não serão considerados
Principais achados	As etapas construtivas consideradas devem estar claras, bem como pelo menos um produto de madeira para fins provisórios deve ser mencionado
Resultados	Porcentagem dos resíduos de produtos de madeira em relação aos demais resíduos ou a quantidade de consumo/resíduo por área construída. Aqueles estudos que apresentem quantitativos de madeira e/ou área construída de modo a possibilitar o cálculo da porcentagem de resíduo de madeira, os indicadores de consumo/resíduo de madeira serão considerados

Fonte: adaptado de Oliveira (2022).

Artigos resultantes

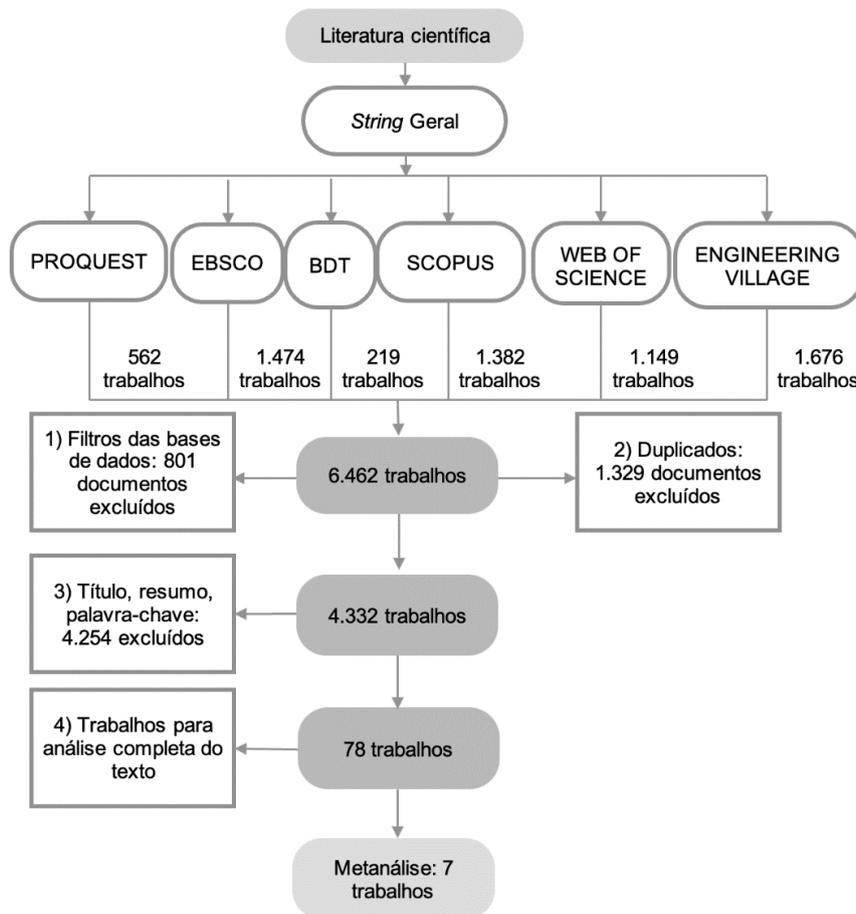
A recuperação das publicações pela *string* retornou 6.462 trabalhos, com publicações até junho de 2021. Com a “Aplicação de filtros automáticos das bases de dados” eliminaram-se 801 trabalhos que não respeitavam as condições estabelecidas. Em seguida, identificaram-se as duplicações, descartando 1.329 trabalhos. Posteriormente, aplicou-se os “Critérios de elegibilidade para leitura dos textos completos”, a partir da leitura dos títulos, palavras chaves e resumos dos trabalhos, selecionando aqueles que atendiam todos os critérios estabelecidos nesta etapa, 4.254 trabalhos foram excluídos por não se adequarem aos filtros propostos. Num próximo passo, procederam-se a leitura dos textos completos dos 78 estudos restantes, elegendo aqueles que atendiam aos critérios estabelecidos para “Avaliação crítica dos trabalhos” e descartando os demais. Por fim, após avaliação crítica, foram selecionados 7 estudos (Borja *et al.*, 2018; Kern *et al.*, 2018; Lachimpadi *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2013; Lu *et al.*, 2011; Mah; Fujiwara; Ho, 2016; Ângulo *et al.*, 2015). A síntese do processo de inclusões e exclusões dos artigos para análise completa está apresentado a seguir (Figura 2).

Os trabalhos inclusos na “meta-análise” trazem dados primários, baseados em estudos de casos, de modo a quantificar o uso da madeira provisória em mais de uma fase da obra (não somente fundações), em construções residenciais verticais em alvenaria com estrutura em concreto armado moldado *in loco*. Os arquivos excluídos após a leitura completa estão apontados e justificados no “Apêndice A” do trabalho de Oliveira (2022).

Etapa 2: Revisão Exploratória de Literatura (REL)

Devido ao pequeno número de artigos decorrentes da RSL e a variabilidade das informações extraídas, verificou-se a necessidade de ponderação dos resultados da meta-análise. Para isto, ampliou-se os critérios de inclusão de trabalhos, integrando estudos com dados secundários e de construções com uso não residenciais (edifícios comerciais, institucionais, etc.), obtidos por meio da lista de arquivos excluídos após a leitura completa e de uma Revisão Exploratória da Literatura (REL).

Figura 2 - Descrição do processo de recuperação dos estudos em cada etapa da RSL



Fonte: adaptado de Oliveira (2022).

A REL foi executada inicialmente com uma pesquisa pelo Google Acadêmico e *ScienceDirect*, utilizando as palavras-chave “*timber waste*”, “*reinforced concrete*”, “*highrise buildings*”. A partir disto, os trabalhos foram filtrados considerando as publicações a partir de 2019 e que traziam dados de resíduos de madeiras em construções verticais em alvenaria com estrutura de concreto armado moldado *in loco*. O número de artigos resultantes ainda foi pequeno e, portanto, utilizou-se o *Connected Paper* para ampliar a busca. Com base nos artigos previamente selecionados, a plataforma apresentou trabalhos correlatos que foram filtrados com os critérios acima mencionados, resultando em 12 estudos analisados.

Resultados e discussão

Observa-se que os estudos encontrados na literatura se referem à edifícios verticais, majoritariamente residenciais, revelando uma lacuna quanto ao fluxo de madeira de uso provisório em habitações residenciais unifamiliares. Uma vez que estas últimas, no Brasil, representam 85,6% do estoque habitacional (IBGE, 2021b) e, adicionalmente, 77% das unidades unifamiliares são autogeridas (Brasil, 2010), tal lacuna promove uma dificuldade na sistematização de informações sobre o consumo do material.

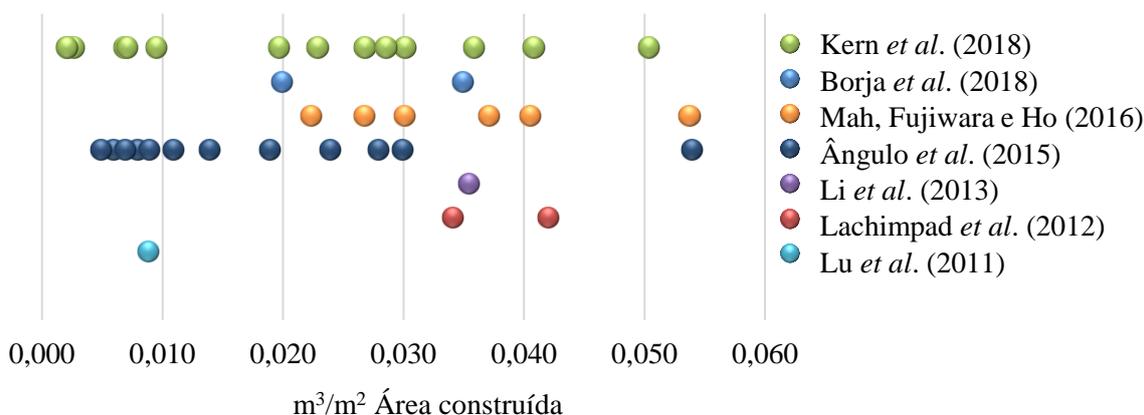
Dos sete estudos selecionados, três são do Brasil, três da China e um da Malásia. A área construída variou de 4 mil a mais de 535 mil m², com número de edifícios variando entre 1 e 14, num total de 38 casos analisados (Quadro 5).

Baseado na amostra de edifícios verticais, tem-se que o consumo de madeira em fins transitórios é de 0,023 m³ de madeira por m² de área construída (média); denominado neste estudo de Indicador de Geração de Resíduos de Madeira (IGR). Os resultados de IGR foram heterogêneos, com variação de até 27 vezes entre os consumos mínimo (0,002 m³/m²) (Kern *et al.*, 2018) e máximo (0,054 m³/m²) (Ângulo *et al.*, 2015). Mesmo quando consideradas as médias de IGR de cada caso, há diferença nos resultados de até uma casa decimal (Figura 3). Edifícios verticais apresentam maior variação formal entre si, em comparação com unidades unifamiliares. Desta forma, aponta-se que parte da heterogeneidade no IGR seja resultante da diversidade de soluções técnicas e volumétricas; ademais daqueles referentes ao método e presença de reuso do material.

Quadro 5 - Características dos estudos submetidos a meta-análise

Referência	Local	Área construída (m ²)	Método do estudo	Número de edificações (n)
Kern <i>et al.</i> (2018)	Porto Alegre (Brasil)	84.077,10	Modelo de regressão linear para estimar a geração de resíduos de madeira de uso provisório em prédios altos, considerando fatores de design e de instalações provisórias	14
Borja <i>et al.</i> (2018)	Feira de Santana (Brasil)	4.055,40	Modelo para estimativa de aspectos ambientais (consumo de materiais e geração de resíduos) em canteiros de obra	2
Mah, Fujiwara e Ho (2016)	Malásia	535.464,00	Estimativa de resíduos através do número de viagens do caminhão caçamba e separação <i>in loco</i> do material	6
Ângulo <i>et al.</i> (2015)	Estado de São Paulo (Brasil)	381.160,00	Estimativa de volume de resíduos por meio de entrevista (m ³), calculando o indicador a partir da área construída (área de piso)	12
Li <i>et al.</i> (2013)	Shenzen (China)	76.117,70	Comparação de modelo preditivo de geração de resíduos da construção com dados primários	1
Lachimpadi <i>et al.</i> (2012)	Shenzen (China)	128.797,02	Estimativa da minimização da geração de resíduos em diferentes sistemas construtivos de prédios altos	2
Lu <i>et al.</i> (2011)	Shenzen (China)	184.678,00	Quantificação de resíduos por separação e pesagem <i>in loco</i>	1
Total				38

Figura 3 - Estimativa do consumo de madeira em uso provisório para construções verticais multifamiliares em concreto armado moldado *in loco* com envoltória em alvenaria



Variação do indicador segundo o método de quantificação

A variação do indicador da meta-análise se explica, em parte, pelo método de quantificação do consumo de madeira adotado em cada estudo. Borja *et al.* (2018) e Li *et al.* (2013) empregam métodos de medição classificados como *soft* (Lu *et al.*, 2011), baseando-se na multiplicação dos quantitativos de madeira comprada (m²) pelas espessuras e densidades (não especificadas). O segundo autor utilizou-se de entrevistas com o gerente da obra, identificando que 20% das madeiras de uso provisório compradas não saem da obra como resíduos, mas são reutilizadas em outros canteiros (Li *et al.*, 2013). Em contrapartida, Borja *et al.* (2018), não investigou a existência de reuso da madeira em outras obras e não separou o fluxo de saída de produtos de madeira do fluxo de produtos metálicos, superestimando o valor reportado, que se apresenta como o maior dentre os casos levantados na literatura.

Observa-se nos estudos de Ângulo *et al.* (2015), Kern *et al.* (2018), Lachimpadi *et al.* (2012), Lu *et al.* (2011) e Mah, Fujiwara e Ho (2016) utilização de medições do tipo *hard*, como separação e pesagem do material em obra, ou/e observação das anotações de transporte de resíduos. Entretanto, cada um dos cinco seguiu uma abordagem diferente.

Os dois primeiros (Ângulo *et al.*, 2015; Kern *et al.*, 2018), basearam-se exclusivamente na quantificação dos resíduos pelo volume de caçambas de madeiras que deixaram as obras, conforme dados fornecidos pelas construtoras. Nesta medição, há incertezas quanto a densidade da madeira empilhada (Amor, 2017). O terceiro (Lachimpadi *et al.*, 2012), quantificou a intensidade de resíduos de madeira para cada uma das 4 fases construtivas principais (trabalhos com terra, subestrutura, superestrutura e trabalhos ao entorno do edifício), somando-se as parcelas ao final. O quarto (Lu *et al.*, 2011), realizou a medição para apenas uma área delimitada e considera que o IGR aferido se repetirá em toda a construção. E o último (Mah; Fujiwara; Ho, 2016) analisou anotações dos responsáveis pelos aterros sobre o material que chegou dos canteiros estudados, obtendo-se a geração de resíduos misturados.

Variação do indicador segundo o reuso do material na construção

Além dos diferentes métodos de quantificação, densidades e espessuras dos materiais avaliados, e do uso de diferentes elementos provisórios, como sistemas de proteção coletiva, escritórios e andaimes fachadeiros, que podem representar até 50% do consumo (Kern *et al.*, 2018), identificaram-se variações quanto as práticas de uso do material, como quantidade de vezes que é reusado dentro da mesma obra.

Quanto maior a quantidade de reuso, menor o IGR. Porém, as possibilidades de reutilização de madeiras de fôrmas dependem do seu estado pós-uso e de seu tamanho; da medida em que peças menores se misturarem a outros resíduos com mais facilidade (Mah; Fujiwara; Ho, 2016); da qualidade inicial do produto, muitas vezes baixa (Lachimpadi *et al.*, 2012); da modularidade dos elementos de concreto armado (Tam; Shen; Tam, 2007); ou da intensidade do uso de concreto armado moldado *in loco* (Kern *et al.*, 2018).

O estudo (Mah; Fujiwara; Ho, 2016), que apresentou uma das maiores médias de IGR, não considerou reuso da madeira em obra. Acredita-se que isto possivelmente interferiu em seus resultados uma vez que parte da

madeira reportada pode ter sido reutilizada. Apenas o estudo (Borja *et al.*, 2018) teve como foco o consumo de madeira, investigando aspectos ambientais como consumo material e geração de resíduos. Os demais abordaram resíduos de construção, onde a madeira foi um dos materiais estimados, representando de 17% a 45% do total de resíduos em peso (Lachimpadi *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2013; Mah; Fujiwara; Ho, 2016); 70,7% dos diversos resíduos relacionados a atividades do uso de concreto armado moldado *in loco* (Lu *et al.*, 2011); único resíduo estimado (Kern *et al.*, 2018).

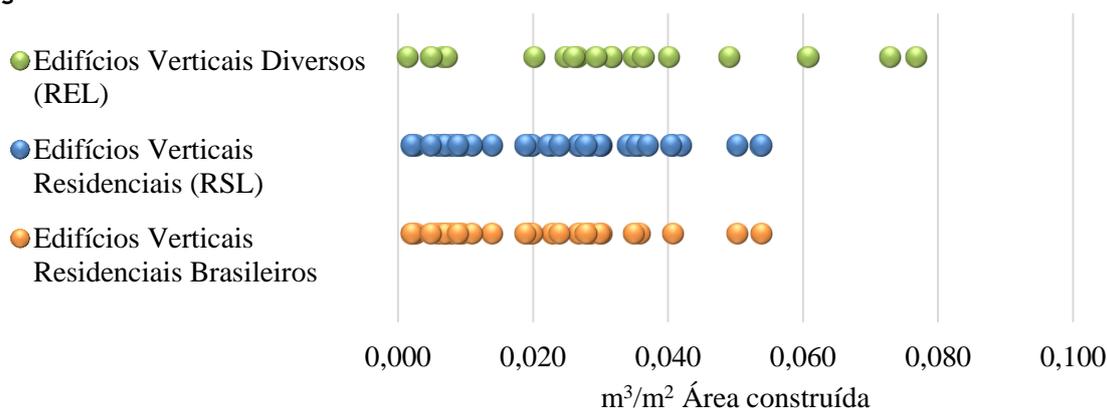
Ponderação sobre a variabilidade do indicador

Devido à heterogeneidade do indicador de geração de resíduos, resultante da meta-análise a partir dos dados dos artigos selecionados na RSL, fez-se uma segunda etapa de avaliação. Esta, considerou novos estudos advindos da REL, com a ampliação dos critérios de inclusão, aceitando dados secundários (indicadores estimados a partir de base de dados governamentais, outros estudos etc.) e edifícios não residenciais (Quadro 6). Nesta amostra, o indicador variou de 0,002 a 0,077 m³/m², ficando na mesma faixa de incerteza dos trabalhos anteriores (Figura 4); porém com maior variação entre o mínimo e máximo, 39 vezes.

Quadro 6 - Características dos estudos da revisão exploratória de literatura

Referência	Local	Área construída (m ²)	Número de edificações (n) e tipo	Método do estudo
Hao <i>et al.</i> (2020)	Anhui (China)	10.697	1, residencial	Simulações de cenários por meio do software Oracle Cristal Ball, estimando o potencial de redução de geração de resíduos pela substituição de elementos concretados no canteiro por elementos pré-fabricados de um edifício residencial.
Islam <i>et al.</i> (2019)	Dahka (Bangladesh)	2.344.320	-, residencial e comercial	Regressão linear para estimar geração de resíduos de uma cidade inteira, dentro do ano fiscal de 2016.
Dong <i>et al.</i> (2015)	Hong Kong (China)	96	-, residencial	Comparação de emissões de CO ₂ incorporado de um apartamento em um edifício residencial com estrutura em concretos armado com elementos moldado no canteiro e pré-fabricados.
Bakshan <i>et al.</i> (2015)	Beirute (Líbano)	475.050	20, residencial e comercial	Estimava da geração de resíduos de vários estágios da construção, incluindo prédios comerciais e residenciais.
Hu <i>et al.</i> (2021)	Várias cidades (China)	n/a	206, comercial	Regressão linear para estimativa da geração de resíduos de 206 canteiros de edifícios comerciais.
Wang <i>et al.</i> (2019)	Várias cidades (China)	n/a	148, residencial	Estimativa da geração de resíduos com pesagem no canteiro em diferentes estágios das obras residenciais.
Telrandhe e Ahire (2021)	Pune (Índia)	77.512	1, residencial	Estudo do uso de diferentes tipos de estruturas de fôrmas em um edifício residencial.
Quiñones <i>et al.</i> (2022)	Sevilha (Espanha)	2.314	1, residencial	Estimativa da geração de resíduos baseada em indicadores europeus e simulações de softwares BIM.
Liu <i>et al.</i> (2019)	China	5.568	1, residencial	Modelo de estimativa de geração de resíduos baseado em indicadores da literatura.
Kin <i>et al.</i> (2019)	Coreia do Sul	891.979	46, residencial	Estimativa de geração de resíduos com separação e pesagem no canteiro.
Ferronato <i>et al.</i> (2022)	La Paz (Bolívia)	-	-, residencial	Estimativa da geração de resíduos baseado em da geração de resíduos totais da cidade e de indicadores de geração de resíduos de estudos internacionais.
Jin, He e Dong (2021)	Shenzhen (China)	-	-, residencial, comercial, público e industrial	Estimativa da geração de resíduos baseados em dados de indicadores de relatório técnico da cidade de Shenzhen.

Figura 4 - Faixa de variação do indicador de geração de resíduos de madeira em construções verticais segundo estudos levantados na revisão de literatura



Contribuições para o contexto nacional

A madeira serrada e o compensado são os produtos mais citados nos trabalhos. A despeito da popularização do uso dos painéis compensados em obras de edifícios mais recentes (Ângulo *et al.*, 2015), este ainda não é o principal produto madeireiro consumido por obras civis no país. No ano de 2020, a indústria da construção foi destino de aproximadamente 21% dos quase 63 milhões de metros cúbicos de produtos madeireiros consumidos no Brasil, com destaque para:

- madeira serrada (51,7%) de coníferas (78%);
- toras roliças de folhosas (40,3% de eucalipto);
- painéis de madeira compensada (4,9%);
- lâminas de madeira (2,8%); e
- painéis *OSB* (0,3%) (Oliveira, 2022).

Dos estudos brasileiros, o consumo médio de madeira de uso provisório foi de 0,028 m³/m² para Rio Grande do Sul (Kern *et al.*, 2018), de 0,020 m³/m² para Bahia (Borja *et al.*, 2018) e de 0,018 m³/m² para São Paulo (Ângulo *et al.*, 2015). Acredita-se que o consumo de madeira seja independente da disponibilidade local de fornecimento. Nestes Estados, a capacidade de suprimento de toras para uso industrial varia de 0,55 m³/hab. no Rio Grande do Sul, 0,13 m³/hab. em São Paulo, e 0,02 m³/hab. na Bahia; estando nas posições de sétimo, décimo quinto e vigésimo segundo, respectivamente, no ranking de produção nacional de tora de madeira. A média nacional é de 0,33 m³/hab. (IBGE, 2022, 2023).

Apesar da variabilidade dos valores e incertezas nas estimativas, os resultados apresentam a ordem de grandeza do consumo de madeira para fins de baixo valor agregado. A escassez de dados primários na literatura científica sobre os resíduos de madeira decorrentes da construção de habitações unifamiliares, que são a base do estoque edificado do Brasil, demonstra indiretamente a irrelevância dada ao material.

Enquanto sistemas construtivos estruturados em madeira consomem de 0,02 a 0,34 m³/m² (Araújo *et al.*, 2020) do biomaterial em fins de longo prazo e maior valor agregado; a construção de edifícios verticais em concreto armado moldado *in loco*, de caráter artesanal, dispensa equivalente volume de madeira (0,025 m³/m² ± 0,018, média das duas amostras RSL e REL) como resíduo.

Conclusões

Estimou-se, por meio da RSL um Índice de Geração de Resíduos de Madeira (IGR), reportado pela literatura nacional e internacional, da ordem de 0,023 m³/m² (± 0,015) em média. Este valor refere-se ao volume de madeira empregado em fins provisórios (fôrmas, escoras, andaimes fachadeiros, escritórios, tapumes, sistema de proteção coletiva etc.) para construção de 38 edifícios verticais residenciais com estrutura em concreto armado moldado *in loco* e dispensados como resíduos.

Houve variabilidade dos resultados em 27 vezes entre o menor (0,002 m³/m²) e o maior (0,054 m³/m²) valor de IGR. As edificações estudadas nos trabalhos brasileiros encontram-se na mesma faixa de consumo de madeira dos casos internacionais. As variações na quantidade empregada são explicadas, em partes, pela

diferença do tipo de edificação, reuso do material (dentro e fora do canteiro) e método de quantificação dos resíduos de construção (*hard e soft*), além de incertezas quanto a densidade e medidas dos produtos de madeira.

O IGR médio encontrado pela REL foi de $0,032 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,022$), para edifícios verticais de usos diversos (residenciais, comerciais, públicos etc.), apresentando variação de 38 vezes entre o valor mínimo ($0,002 \text{ m}^3/\text{m}^2$) e máximo ($0,077 \text{ m}^3/\text{m}^2$). Apesar da inviabilidade de comparação entre as duas amostras (resultantes da RSL e REL), utilizou-se as informações disponíveis para ponderação dos resultados. Observou-se mesma ordem de grandeza e equivalente variabilidade nos IGRs.

Apesar das incertezas, os resultados denotam a amplitude da subutilização da madeira em fins de curto ciclo de vida e baixo valor agregado. O volume de madeira descartado como resíduo é equivalente ao necessário para se construir com sistemas estruturados com madeira. A falta de literatura com foco nos resíduos de madeira resultantes do processo artesanal de construção com concreto moldado *in loco* também expõe o potencial de desenvolvimento no uso da madeira.

Referências

- AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Manual da construção industrializada**: conceitos e etapas: estrutura e vedação. Brasília: ABIDI, 2015. Disponível em: <https://www.abdi.com.br/>. Acesso em: 14 abr. 2023.
- AMOR, L. L. V. **Modelo para estimar a geração de resíduos de madeira de uso provisório em obras de edifícios verticais**. São Leopoldo, 2017. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2017.
- ÂNGULO, S. C. *et al.* Parte 2: reuso e reciclagem de resíduos de construção em canteiro de obras. In: CAMPOS, A. A.; VASCONCELLOS NETO, F. A. de. (coord.). **Gestão ambiental de resíduos da construção civil**: avanços institucionais e melhorias técnicas. São Paulo: SindusCon-SP, 2015.
- ARAUJO, V. de *et al.* Wood consumption and fixations of carbon dioxide and carbon from timber housing techniques: a brazilian panorama. **Energy and Buildings, Lausanne**, v. 216, p. 109960, jun. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>. Acesso em: 23 out. 2023.
- BAKSHAN, A. *et al.* A field based methodology for estimating waste generation rates at various stages of construction projects. **Resources, Conservation and Recycling**, Ann Arbor, v. 100, p. 70-80, jul. 2015.
- BORJA, L. C. *et al.* A quantitative method for prediction of environmental aspects in construction sites of residential buildings. **Sustainability**, Basel, v. 10, n. 1870, jun. 2018.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano de Ação para Produção e Consumo Sustentáveis – PPCS**. 2010. Disponível em: https://criancaconsumo.org.br/wp-content/uploads/2014/06/08_meioambiente_consulta.pdf. Acesso em: 14 abr. 2023.
- CABEZA, L. F.; CHÀFER, M. Technological options and strategies towards zero energy buildings contributing to climate change mitigation: a systematic review. **Energy and Buildings**, Amsterdam, v. 219, p. 110009, jul. 2020.
- CALDAS, L. R. *et al.* Life cycle carbon emissions inventory of brick masonry and light steel framing houses in Brasília: proposal of design guidelines for low-carbon social housing. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 3, p. 71-85, jul./set. 2017.
- CARELLI, É. D. **A resolução CONAMA no 307/2002 e as novas condições para a gestão de resíduos de construção e demolição**. São Paulo, 2008. 157 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2008.
- CARVALHO, J. *et al.* Safety analysis of modern heritage masonry buildings: box-buildings in recife, Brazil. **Engineering Structures**, Oxford, v. 80, p. 222-240, dez. 2014.
- DONG, Y. H. *et al.* Comparing carbon emissions of precast and cast-in-situ construction methods – A case study of high-rise private building. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 99, p. 39-53, nov. 2015.

FERRONATO, N. *et al.* Construction and demolition waste recycling in developing cities: management and cost analysis. **Environmental Science and Pollution Research**, Heidelberg, v. 30, n. 9, p. 24377-24397, nov. 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAO Yearbook of Forest Products 2019**. Roma, 2021. n. 73. Disponível em: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb3795m>. Acesso em: 23 out. 2023.

HADDWAY, N. R. *et al.* **ROSES for Systematic Review Protocols**. Version 1.0 Online. 2017. Disponível em: <https://www.roses-reporting.com/systematic-review-protocols>. Acesso em: 14 abr. 2023.

HAO, J. *et al.* Quantifying construction waste reduction through the application of prefabrication: a case study in Anhui, China. **Environmental Science and Pollution Research**, Heidelberg, v. 28, n. 19, p. 24499-24510, may 2020.

HU, R. *et al.* Estimation of construction waste generation based on improved on-site measurement and SVM-based prediction model: a case of commercial buildings in China. **Waste Management**, China, v. 126, p. 791-799, may 2021.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DA ÁRVORE. **Relatório Anual IBÁ 2022**. Disponível em: <https://www.iba.org/publicacoes/relatorios>. Acesso em: 14 abr. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA. Banco Multidimensional de Estatística. **Dados Históricos da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD)**. 2021a. Disponível em: <https://www.bme.ibge.gov.br/index.jsp?url=https%3A%2F%2F>. Acesso em: 06 jul. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados**. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/>. Acesso em: 06 jul. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio (PNAD)**: contínua. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/educacao/17270-pnad-continua.html?edicao=24772&t=downloads>. Acesso em: 06 jul. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA. **PEVS - Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=resultados>. Acesso em: 06 jul. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA. Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - Anual (PNAD)**. Tabela 6820 - Domicílios e Moradores, por tipo de domicílio. 2021b. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/6820>. Acesso em: 14 abr. 2023.

ISLAM, R. *et al.* An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling. **Waste Management**, Oxford, v. 95, p. 10-21, jul. 2019.

JIN, K.; HE, C.; DONG, S. Study on estimation method of new construction waste. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 783, n. 1, p. 012107, may 2021.

KERN, A. P. *et al.* Factors influencing temporary wood waste generation in high-rise building construction. **Waste Management**, Oxford, v. 78, p. 446-455, ago. 2018.

KIM, Y.-C. *et al.* Analysis of waste generation characteristics during new apartment construction: considering the construction phase. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, Basel, v. 16, n. 18, p. 3485, set. 2019.

LACHIMPADI, S. K. *et al.* Construction waste minimisation comparing conventional and precast construction (Mixed System and IBS) methods in high-rise buildings: a malaysia case study. **Resources, Conservation and Recycling**, Ann Arbor, v. 68, p. 96-103, nov. 2012.

LI, J. *et al.* A model for estimating construction waste generation index for building project in China. **Resources, Conservation and Recycling**, Ann Arbor, v. 74, p. 20-26, May 2013.

LIMA, L. *et al.* Sustainability in the construction industry: a systematic review of the literature. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 289, p. 125730, mar. 2021.

- LIU, J. K. *et al.* Estimation of construction wastes based on the bill of quantity in South China. **Applied Ecology and Environmental Research**, Budapest, v. 17, p. 123-146, 2019.
- LU, W. *et al.* An empirical investigation of construction and demolition waste generation rates in Shenzhen city, South China. **Waste Management**, Oxford, v. 31, n. 4, p. 680-687, Abr. 2011.
- MAH, C. M.; FUJIWARA, T.; HO, C. S. Construction and demolition waste generation rates for high-rise buildings in Malaysia. **Waste Management & Research**, London, v. 34, n. 12, p. 1224-1230, set. 2016.
- MÁLIA, M.; BRITO, J. de; BRAVO, M. Indicadores de resíduos de construção e demolição para construções residenciais novas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 3, p. 117-1360, jul./set. 2011.
- OLIVEIRA, C. G. de. **Fluxo de madeira na execução de construções habitacionais em concreto armado moldado no local**. Foz do Iguaçu, 2022. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022.
- ORLANDINI, L. C. **Estratégias para redução das emissões de CO2 e o aumento de estoque temporário de carbono do setor da construção por meio de uso da madeira**. Foz do Iguaçu, 2021. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021.
- PUNHAGUI, K. R. G. **Potencial de redução das emissões de CO2 e da energia incorporada na construção de moradias no Brasil mediante o incremento do uso de madeira**. São Paulo, 2014. 289 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- QUIÑONES, R. *et al.* Quantification of construction waste in early design stages using bim-based tool. **Recycling**, Basel, v. 7, n. 5, p. 63, ago. 2022.
- ROVARIS, C. **Estudo para ampliação do uso da madeira para a construção de habitações no Brasil**. Foz do Iguaçu, 2019. 224 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2019.
- SCANNAVINO, K. R. F. *et al.* **Revisão sistemática da literatura em engenharia de software: teoria e prática**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.
- SOBRAL, L. *et al.* **Acertando o alvo 2: consumo de madeira amazônica e certificação florestal no Estado de São Paulo**. Belém: Imazon, 2002. Disponível em: <https://www.imaflora.org>. Acesso em: 14 abr. 2023.
- TAM, V. W.; SHEN, L.; TAM, C. M. Assessing the levels of material wastage affected by sub-contracting relationships and projects types with their correlations. **Building and Environment**, Oxford, v. 42, n. 3, p. 1471-1477, mar. 2007.
- TELRANDHE, S. M.; AHIRE, H. Comparative analysis of alluformwork and conventional formwork in pune region. **International Research Journal of Engineering and Technology**, Tamilnadu, v. 08, n. 08, p. 1374-1381, Aug. 2021.
- WANG, Q. *et al.* An empirical study on waste generation rates at different stages of construction projects in China. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, London, v. 38, n. 4, p. 433-443, nov. 2019.
- ZENID, G. J. *et al.* **Madeira: uso sustentável na construção civil**. São Paulo: 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 2009.

Agradecimentos

O financiamento para esta pesquisa foi fornecido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) processo nº. 436997/2018-5 e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - 001.

Cassio Gomes de Oliveira

Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal da Integração Latino-Americana | Av. Tarquínio Joslin dos Santos, 1000, Polo Universitário | Foz do Iguaçu - PR - Brasil | CEP 85870-650 | Tel.: (45) 3522-9863 | E-mail: cassio.oliveira@lme.pcc.usp.br

Katia Regina Garcia Punhagui

Conceitualização, Recebimento de financiamento, Supervisão, Design da apresentação de dados, Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal da Integração Latino-Americana | E-mail: katia.punhagui@unila.edu.br

Emerson Felipe Perin Pinto

Validação, Redação do manuscrito original.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal da Integração Latino-Americana | E-mail: emerson030734@gmail.com

Erik Souto de Moraes

Análise de dados, Pesquisa, Redação do manuscrito original.

Engenharia Civil de Infraestrutura | Universidade Federal da Integração Latino-Americana | E-mail: erikmoraes_dm@hotmail.com

Editora do artigo: **Edna Possan**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.