XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8547

Proposição do framework para Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS) de materiais de construção no Brasil para categoria "Trabalhadores": estudo de caso para a indústria do aço

Proposed methodological framework for Social Life Cycle Assessment (S-LCA) of construction materials in Brazil for the "Workers" category: a case study of the steel industry

Marcella Clarimundo
Universidade Federal do Rio de Janeiro|Rio de Janeiro|Brasil | marcella.clarimundo@coc.ufrj.br
Carolina Mendonça de Freitas Mendes de Souza
Universidade Federal do Rio de Janeiro| Rio de Janeiro| Brasil | carolina.souza@coc.ufrj.br
Lorenna Coutinho Pitta
Universidade Federal do Rio de Janeiro|Rio de Janeiro|Brasil| lorenna.pitta@coc.ufrj.br
Lucas Rosse Caldas
Universidade Federal do Rio de Janeiro|Rio de Janeiro|Brasil|lucas.caldas@fau.ufrj.br

Resumo

Este estudo combina uma Revisão Sistemática da Literatura, o desenvolvimento de um framework de Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS) para materiais construtivos na categoria "Trabalhadores" e sua aplicação por meio de um estudo de caso da indústria do aço no Brasil. Os resultados evidenciam impactos heterogêneos ao longo do ciclo de vida, com a produção de ferro-gusa como principal *hotspot* e as doenças ocupacionais como principal vulnerabilidade, destacando a necessidade de ações de saúde e segurança. O *framework* inova ao quantificar impactos sociais em função da produção e ao incorporar a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE), ampliando a cobertura e comparabilidade dos dados e fortalecendo o suporte à tomada de decisão para uma avaliação mais robusta da sustentabilidade no ambiente construído.

Palavras-chave: Avaliação social do ciclo de vida. Materiais construtivos. Trabalhadores. CNAE.

Abstract

This study combines a Systematic Literature Review, the development of a Social Life Cycle Assessment (S-LCA) framework for construction materials focused on the "Workers" category, and its application through a case study of the Brazilian steel industry. The results show heterogeneous impacts across the life cycle, with pig iron production as the main hotspot and occupational diseases as the primary vulnerability, highlighting the need for health and safety actions. The framework advances by quantifying social impacts as a function of production and by incorporating National Classification of Economic Activities (CNAE), improving data coverage and comparability, and strengthening decision-making support for a more robust sustainability assessment in the built environment.

Keywords: Social Life Cycle Assessment. Construction materials. Workers. CNAE.

Como citar:
CLARIMUNDO, M. et al. Proposição do framework para Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS) de materiais de construção no Brasil para categoria "Trabalhadores": estudo de caso para a indústria do aço. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8547

INTRODUÇÃO

A provisão de infraestrutura para habitação, trabalho e mobilidade torna o ambiente construído central ao bem-estar humano [1]. Contudo, a construção civil responde por cerca de um terço da demanda global de materiais, 34% das emissões de gases de efeito estufa e 32% do consumo energético mundial [2]. Esses impactos, aliados ao agravamento das mudanças climáticas, têm direcionado a produção científica do setor à dimensão ambiental.

A sustentabilidade no ambiente construído exige abordagem mais abrangente, porém a dimensão social segue pouco operacionalizada devido ao caráter intangível, subjetivo e contextual, dificultando sua mensuração [3]. No setor da construção, essa lacuna é crítica diante de cadeias fragmentadas, alta intensidade de recursos e predominância de terceirização e informalidade, com impactos desproporcionais sobre trabalhadores [4]. Sob a ótica do ciclo de vida, envolve condições de trabalho, saúde e segurança e efeitos sobre comunidades ao longo da cadeia, mas a ausência de *frameworks* padronizados mantém sua avaliação fragmentada e majoritariamente qualitativa [5].

A construção civil está entre os setores com maiores taxas de acidentes de trabalho no mundo [6]. No Brasil, em 2024, foi o segundo em resgates de trabalhadores em condições análogas à escravidão (13,9%) e apresentou participação relevante nas notificações de acidentes e afastamentos acidentários [7]. Esses riscos não se limitam ao canteiro, estendendo-se à cadeia de materiais, onde milhares de acidentes foram registrados entre 2022 e 2024 nos setores de cimento, agregados, vidro e aço [4], evidenciando a distribuição dos potenciais impactos ao longo do ciclo de vida e a necessidade de incorporar indicadores sociais mensuráveis desde a extração da matéria-prima até a fabricação.

A Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS) é uma abordagem sistemática para avaliar potenciais impactos sociais e socioeconômicos de produtos e serviços ao longo do ciclo de vida. Como dimensão social da ACVS, baseia-se no guia para ACVS [8] e Planilhas Metodológicas da UNEP [9] e segue a estrutura das normas ISO 14040 [10] e 14044 [11]. Ao operacionalizar a análise por indicadores, permite identificar *hotspots* sociais, reduzindo a subjetividade e ampliando a comparabilidade e o suporte à decisão [12].

Entretanto, a aplicação da ACVS ainda enfrenta limitações, sobretudo quanto ao fluxo metodológico, à disponibilidade, padronização e integração de dados [5]. Nesse contexto, é fundamental identificar fontes confiáveis e sistematizar um fluxo que subsidie a construção de *frameworks* aplicáveis à cadeia produtiva dos materiais construtivos.

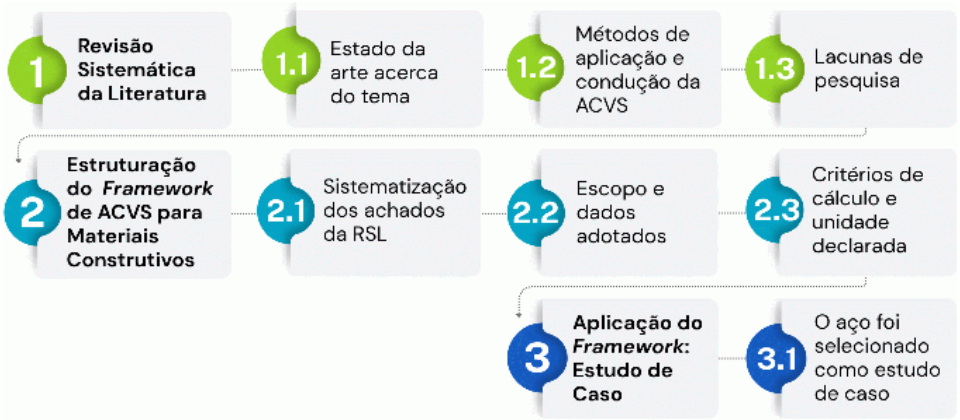
Assim, este artigo objetiva estruturar e testar uma abordagem metodológica para a ACVS aplicada a materiais de construção. Realizou-se uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para analisar o estado da arte e identificar metodologias de ACVS, cujos elementos subsidiaram um *framework* de ACVS para a categoria “Trabalhadores”. A validação ocorreu por meio de um estudo de caso na cadeia produtiva do aço no Brasil.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8547

MÉTODO

Buscando preencher as lacunas de pesquisa identificadas em relação a metodologia de ACVS aplicada a cadeia produtiva de materiais de construtivos, este estudo seguiu um fluxo metodológico formado por 3 fases principais, conforme Figura 1.

Figura 1 - Fluxo metodológico.

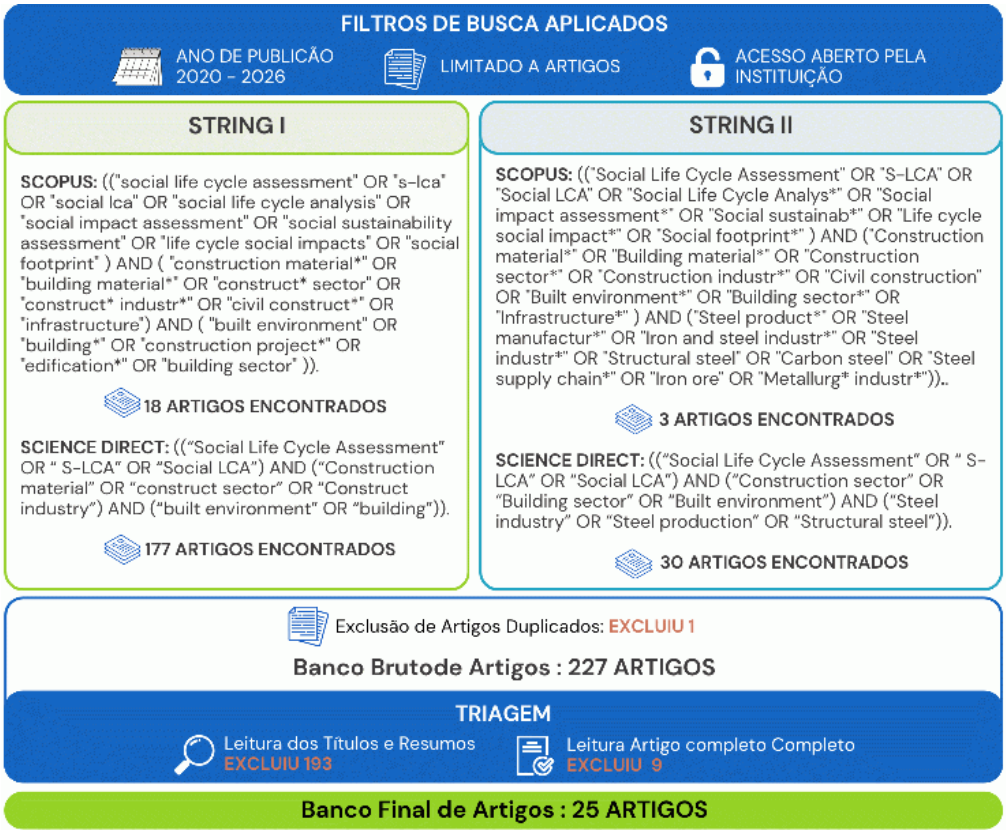


Fonte: os autores.

REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A primeira fase da pesquisa, iniciada em 10 de março de 2026, compreendeu a realização de uma RSL voltada à identificação do estado da arte da ACVS, com ênfase em seus métodos de aplicação na construção civil e em materiais construtivos.

Figura 2 - Revisão Sistemática da Literatura (RSL).



Fonte: os autores.

Os achados dessa etapa constituíram a base teórica e metodológica para o desenvolvimento do *framework* proposto, contribuindo para sua fundamentação científica e garantindo maior abrangência, consistência e confiabilidade em sua estruturação. Para tanto, definiu-se a seguinte pergunta de pesquisa: Como a ACVS tem sido aplicada na literatura científica no contexto dos materiais construtivos, e quais métodos, abordagens e indicadores são empregados nesses estudos?

A Figura 2 apresenta a condução da RSL deste estudo. Duas *strings* de busca foram elaboradas a partir de quatro eixos temáticos, sendo: (i) *Social Life Cycle Assessment, (ii) Construction Materials, (iii) Built Environment e (iv) Steel Production. A string I aplicada às bases Scopus e Science Direct retornou 18 e 177 artigos, respectivamente.* Para a *string* II, foram identificados três artigos na Scopus, publicados em 2020, 2018 e 2014, apesar de estarem fora do recorte temporal definido (2020-2026), os estudos de 2014 e 2018 foram incluídos por apresentarem elevada aderência aos objetivos da pesquisa. Na *Science Direct*, foram encontrados 30 artigos, dos quais um correspondia a uma duplicata dos resultados previamente obtidos.

Ao final, 227 artigos compuseram o banco de dados bruto desta RSL. A triagem por título foi conduzida, seguida pela triagem com a leitura completa dos resumos. Como resultado, 25 artigos foram selecionados para leitura e análise completa pelos autores.

ESTRUTURAÇÃO DO *FRAMEWORK* DE ACVS PARA MATERIAIS CONSTRUTIVOS

A segunda etapa concentrou-se no desenvolvimento do *framework* para ACVS da cadeia de materiais de construção para a categoria de *stakeholders* "Trabalhadores". Para sua estruturação, os achados da RSL foram utilizados como principal referência para a definição dos elementos metodológicos que compõem o *framework,* em principal aspectos metodológicos, escopo, dados, critérios de cálculo e unidade declarada (UD). Além disso, a revisão permitiu identificar as principais abordagens empregadas na literatura, as lacunas metodológicas existentes e os desafios recorrentes associados à operacionalização da ACVS no setor da construção civil.

Essas evidências subsidiaram a elaboração de uma estrutura metodológica alinhada às boas práticas reportadas na literatura e aos guias da UNEP para ACVS [8][9], além de permitirem a identificação de limitações e desafios a serem superados. Assim, o *framework* foi concebido com base em conhecimento científico consolidado, contribuindo para sua consistência metodológica, aplicabilidade prática e potencial de replicação em diferentes contextos produtivos. Ademais, para garantir maior completude à base metodológica do framework, as normas NBR ISO 14040:2025 [10] e EN 15978:2011 [13] também foram consideradas em sua estruturação.

Para adequação ao contexto brasileiro e aos dados públicos disponíveis relacionados aos vínculos empregatícios [4], adotou-se a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) [14] como base padronizada para a organização e análise dos potenciais impactos ao longo da cadeia produtiva. A metodologia de cálculo desenvolvida para sua aplicação é apresentada, juntamente com as etapas do *framework*, na seção de Resultados e Discussão.

APLICAÇÃO DO *FRAMEWORK* - ESTUDO DE CASO

Para validar o *framework*, adotou-se a produção de aço no Brasil em 2024, nos estágios A1 (extração) e A3 (fabricação), com Unidade Declarada (UD) de 1 megatonelada (Mt). A escolha se deve à relevância do material e ao alto uso de recursos [15][16]. A

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8547

categoria de *stakeholder* “Trabalhadores” foi selecionada e a subcategoria “Saúde e Segurança". As etapas da cadeia foram classificadas por estágio (Figura 3) com base no IBGE [14].

Figura 3 - Etapas produtivas do aço e atividades CNAE relacionadas.

	ETAPA PRODUTIVA		ATIVIDADE CNAE	ESTÁGIO	QTD. MÉDIA VÍNCULOS*	PRODUÇÃO BRASIL (2024)	Und.
Indústria Extrativa	Extração de minério de ferro	710	Minério de Ferro	A1	64.983,42	523,01	Mt
	Atividade de apoio à extração de minerais	990	Atividades de apoio ao minério de ferro		3.708,00	523,01	
Indústria da Transformação	Produção fero-gusa e ferroliga	2411	Produção ferro-gusa	A3	12.890,00	0,00126	Mt
		2412	Produção ferroliga		13.039,00	1,05	
	Siderurgia	2422	Fabricação de semiacabados, laminados planos e longos		31.013,67	33,88	
		2423	Produção de laminados longos		30.178,25		
		2424	Produção de relaminados, trefilados e perfilados		12.637,08		
	Fundição	2451	Fundição de ferro e aço		42.395,08	2,79	
		2452	Fundição de metais não ferrosos e suas ligas		12.746,00		

Vínculos* = Quantidade média de vínculos empregatícios, segundo a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE), no Brasil (2024).
Mt = milhões de toneladas (megatonelada).

Fonte: adaptado da Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) [14], Anuário Mineral Brasileiro [17] e do Anuário do Setor Metalúrgico [18].

Quanto aos índices e taxas apresentados na Tabela 1, entende-se que o IAc./vinc. relaciona a frequência total de acidentes; o IDO/vínc. considera apenas casos decorrentes de enfermidades ocupacionais; o IAT/vínc. inclui eventos diretamente relacionados à atividade exercida; o IIT/vínc. abrange acidentes que resultam em afastamento do trabalho; a TM/vínc. mede a proporção de óbitos em relação aos trabalhadores expostos; a TL/vínc. indica a gravidade dos acidentes ao relacionar

mortes ao total de ocorrências e o IAd/vínc. contabiliza a distribuição dos acidentes em grupos específicos, como trabalhadores de 16 a 34 anos.

Tabela 1 - Indicadores de saúde e segurança ocupacional por CNAE considerados no ICVS para categoria 'Trabalhadores".

CNAE	IAc./ vinc.	IDO/ vinc.	IAT/ vinc.	IIT/ vinc.	TM/ vinc.	TL/ vinc.	IAd/ vinc.
710	0,04829	0,00064	0,00448	0,03895	0,0006438	0,01333	0,3467
990	0,00936	0,00132	0,00448	0,00516	0,0000016	0,00172	0,3345
2411	0,01491	-	0,03605	0,00944	0,0000248	0,01667	0,4500
2412	0,04182	0,00015	0,03466	0,03725	0,0000228	0,00546	0,3388
2421	0,02297	0,00054	0,01813	0,01667	-	-	0,4916
2422	0,00686	-	0,00366	0,00351	-	-	0,4000
2423	0,01232	0,00019	0,00645	0,00851	0,0000322	0,00262	0,4424
2424	0,01508	0,00063	0,00885	0,00852	0,0000331	0,0022	0,4308
2451	0,04249	0,00150	0,03102	0,03482	0,0001583	0,00372	0,4339
2452	0,11013	0,00196	0,09765	0,03673	0,0000708	0,00064	0,5110

IAc./vinc. = Índice de acidentes por vínculo.
IDO/vinc. = Índice de Doenças Ocupacionais por vínculo.
IAT/vinc. = Índice de Acidentes Típicos por vínculo.
IIT/vinc. = Índice de Incapacidade Temporária por vínculo.
TM/vinc. = Taxa de Mortalidade por vínculo.
TL/vinc = Taxa de Letalidade por vínculo.
IAd/vinc. = Índice de Acidentalidade por faixa-etária entre 16 e 34 anos.

Fonte: adaptado de Anuário Estatístico de Acidentes do Trabalho [4].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção são apresentados o *framework* elaborado e os resultados do estudo de caso conduzido.

FRAMEWORK DE ACVS PARA MATERIAIS CONSTRUTIVOS - CATEGORIA "TRABALHADORES"

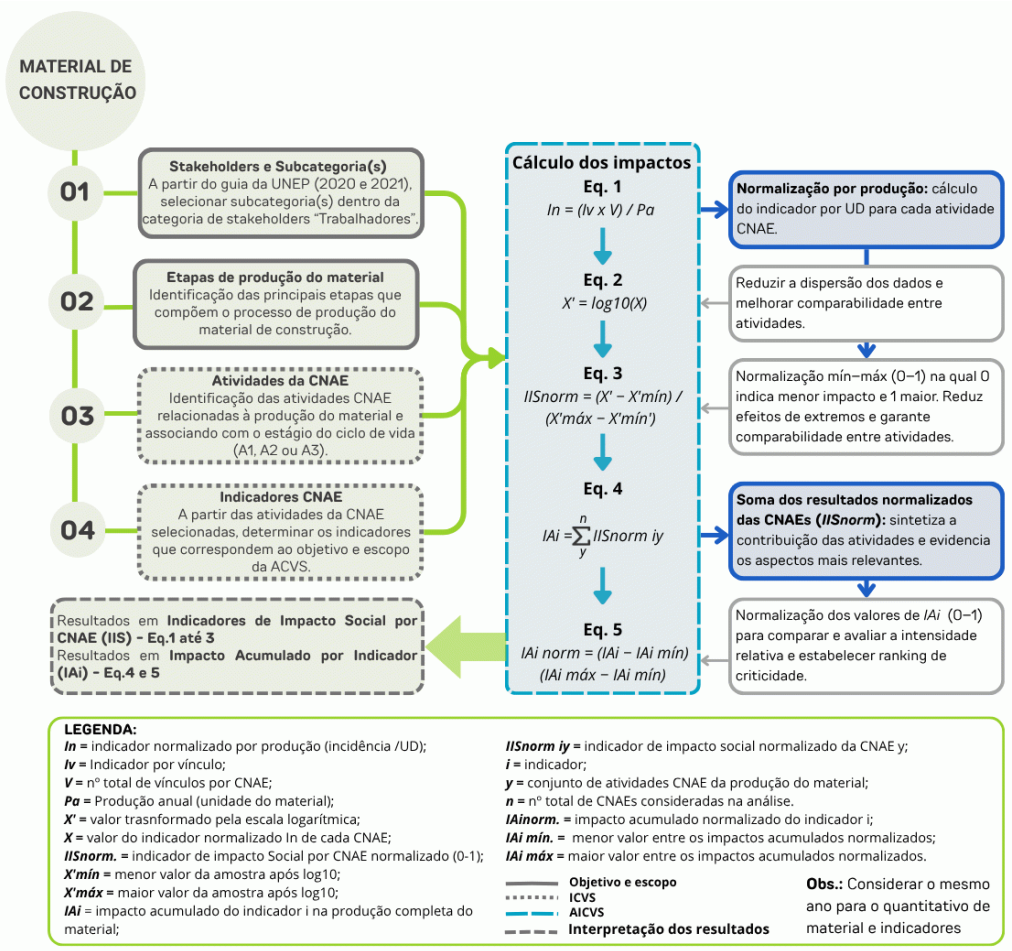
O *framework* proposto, Figura 4, orienta a ACVS na cadeia de materiais de construção no Brasil, com foco em "Trabalhadores". Entre os principais achados da RSL para construção do *framework*, destaca-se que saúde e segurança é a subcategoria mais recorrente [19][20]. Observa-se ainda a escassez de estudos que relacionem de forma consistente os potenciais impactos sociais às etapas da cadeia produtiva, limitando sua integração ao ciclo de vida [21]. Predomina o uso combinado de fontes — dados primários (entrevistas, questionários e medições in loco) [22], bases globais [19][22], setoriais e governamentais [20] — evidenciando limitações e falta de padronização nos dados e metodologias.

Para integrar indicadores à cadeia produtiva, o *framework* estrutura-se em quatro etapas sequenciais e interdependentes, sendo 1 e 2 dedicadas à definição de Objetivo e Escopo da ACVS. A primeira consiste na seleção das subcategorias de impacto social da categoria "Trabalhadores". Essa fase delimita o escopo da ACVS, orienta a identificação das dimensões mais relevantes e assegura consistência na definição dos indicadores ao longo da avaliação.

Na segunda etapa, identificam-se as principais etapas de produção do material, da extração à fabricação, sob a perspectiva de ciclo de vida. Isso permite compreender a

estrutura produtiva e segmentar a análise nos estágios A1, A2 e A3, garantindo a rastreabilidade dos potenciais impactos sociais [10][13]. A terceira etapa consiste no mapeamento das atividades econômicas via CNAE e associando-as às etapas do ciclo de vida, consolidando a base para integração entre dados setoriais e a ACVS.

Figura 4 - *Framework* para ACVS para a categoria "Trabalhadores".



Fonte: os autores (2026).

A quarta etapa consiste na seleção dos indicadores sociais a partir das atividades, permitindo mensurar aspectos como condições de trabalho, saúde e segurança ocupacional. As etapas 3 e 4 constituem o ICVS, relacionado tanto à produção do material como aos potenciais impactos sociais.

Em uma proposição inicial de AICV, os cálculos iniciam-se com a normalização dos indicadores pela produção. Para cada atividade CNAE, calculou-se o indicador por produção, UD previamente definida (Equação 1). Diante da alta dispersão dos resultados normalizados (indicador por UD) que pode comprometer a comparabilidade direta entre os valores, variando de aproximadamente 0,4 a 0,00000161, propõem-se uma transformação logarítmica de base 10 (Equação 2) para atenuar a influência de valores extremos e comprimir a amplitude da distribuição. Como resultado, os indicadores passaram a ser representados em uma escala logarítmica mais equilibrada, favorecendo a análise comparativa entre as diferentes atividades.

Em seguida, os valores transformados foram normalizados pelo método mín–máx, resultando em uma escala adimensional de 0 a 1, na qual 0 representa o menor

impacto relativo observado e 1 o maior (Equação 3). Esse procedimento reduz a influência desproporcional de valores extremos e aumenta a consistência da análise comparativa entre as atividades avaliadas. Essa escala é recomendada pelas Diretrizes para ACVS [8] e pelas Tabelas Metodológicas para ACVS [9], além de já ter sido aplicada em estudos identificados na RSL [21][23][24].

Os valores normalizados (IISnorm) de cada indicador de saúde e segurança foram agregados ao longo da cadeia produtiva do aço por meio da soma das CNAEs analisadas (Equação 4), resultando no Impacto Acumulado por Indicador (IAi). Esse procedimento sintetiza a contribuição conjunta das atividades e evidencia os aspectos mais relevantes de saúde e segurança do setor.

Subsequentemente, os valores de IAi também foram normalizados pelo método mín–máx (IAinorm), tornando-os comparáveis entre as diferentes dimensões de saúde e segurança ocupacional (Equação 5). O procedimento reescalona os valores para o intervalo de 0 a 1, em que 1 representa o maior impacto relativo e 0 o menor, permitindo avaliar sua intensidade relativa e estabelecer um ranking de criticidade entre os indicadores. Essa padronização amplia o potencial de aplicação dos resultados, tanto para a comparação entre alternativas (*benchmarking*) quanto para a identificação de *hotspots* sociais ao longo da cadeia produtiva.

A partir dessa abordagem, o *framework* permite identificar as atividades e indicadores mais críticos para os trabalhadores, subsidiando a priorização de investimentos e ações de melhoria em saúde e segurança ocupacional. Adicionalmente, a relação entre impactos sociais e produção permite a comparação dos impactos de diferentes materiais, como aço e cimento, possibilitando a avaliação relativa de alternativas na cadeia produtiva. Esse resultado também pode apoiar a definição de critérios de compras sustentáveis e a seleção de materiais provenientes de setores ou empresas com melhor desempenho social por UD.

APLICAÇÃO DO *FRAMEWORK* - ESTUDO DE CASO

Os resultados (IIS por CNAE e IAi) para a cadeia produtiva do aço são apresentados na Figura 5. Na escala adotada (0–1), 1 indica maior impacto relativo, não devendo ser interpretado como um limiar absoluto de severidade, mas como referência interna de maior intensidade relativa dentro da cadeia analisada, e 0 menor impacto, cujo valor não representa ausência de impacto, mas baixa intensidade no contexto analisado.

Os achados evidenciam elevada heterogeneidade dos impactos sociais. A Produção de Ferro-gusa destaca-se como principal *hotspot*, com valor máximo (1,0) na maioria dos indicadores. A Fundição também apresenta alta criticidade, especialmente no Índice de Doenças Ocupacionais (0,82 para ferro e aço; 0,74 para não ferrosos). Em contraste, a extração de minério de ferro e atividades de apoio exibem impactos reduzidos, com valores nulos ou próximos de zero.

Na análise do IAi para 2024, o Índice de Doenças Ocupacionais (1,0) configura-se como a principal vulnerabilidade da cadeia, seguido pelo índice de acidentes (0,89) e pelo índice de incapacidade temporária (0,85). Por outro lado, a Taxa de Letalidade (0,0) e o índice de acidentalidade entre jovens (0,04) apresentam baixa relevância no impacto acumulado.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8547

Figura 5 - Matriz de Criticidade Social da categoria "Trabalhadores" e subcategoria Saúde e Segurança da Produção de Aço no Brasil (2024).



Fonte: os autores (2026).

A aplicação das etapas do *framework* permitiu identificar e quantificar diretamente os potenciais impactos sociais de saúde e segurança por etapa do ciclo de vida, em função da produção (Mt). Em linha com a literatura levantada, os resultados foram estruturados por fases do ciclo de vida, contudo, a abordagem proposta avança ao quantificar diretamente os impactos em relação ao volume produzido [12][20].

Além disso, o uso de dados da CNAE possibilitou ampliar a cobertura de indicadores sociais ao longo da cadeia. Diferentemente de bases como o SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil), mais voltadas às fases de construção, operação e fim de vida [25], essa abordagem incorpora informações das etapas de extração de matérias-primas e fabricação.

No estágio atual de desenvolvimento, duas principais contribuições são identificadas na abordagem proposta. A identificação de *hotspots* sociais ao longo do ciclo de vida da cadeia produtiva do material analisado consiste em uma delas, permitindo reconhecer etapas e atividades que demandam melhorias em aspectos relacionados à saúde e segurança dos trabalhadores. A quantificação dos impactos sociais por UD (Mt) de material produzido também representa outra contribuição relevante, considerando que uma das principais dificuldades na aplicação e comparação de resultados em ACVS reside na ausência de uma UD claramente definida e metodologicamente comparável entre estudos, o que limita a consistência de análises

comparativas e o avanço de *benchmarks* consolidados na área. Ademais, o *framework* também viabiliza a comparação dos impactos sociais entre diferentes materiais, como aço e cimento, possibilitando a análise comparativa de alternativas a partir de seu desempenho social.

Assim, o *framework* demonstra não apenas capacidade de quantificar potenciais impactos sociais de forma integrada, mas também de estruturar e consolidar dados dispersos ao longo da cadeia produtiva. Ao preencher lacunas críticas de informação, especialmente nas etapas iniciais, a abordagem proposta oferece uma análise mais completa e robusta, contribuindo para maior transparência e fornecendo subsídios mais consistentes para a tomada de decisão no setor da construção.

LIMITAÇÕES E APLICAÇÕES FUTURAS

O *framework* de ACVS proposto constitui uma abordagem inicial e um incentivo para ampliar a aplicação da ACVS no setor da construção civil no Brasil. Entretanto, algumas limitações foram identificadas em sua estruturação e aplicação. Destaca-se a elevada dispersão dos dados disponíveis em bases públicas, o que exigiu a integração de múltiplas fontes e sua consolidação em um banco de dados estruturado. Além disso, a incompletude e a heterogeneidade das informações para determinados indicadores comprometeram a estimativa de alguns resultados.

Adicionalmente, destaca-se a ausência de estudos consolidados de ACVS em âmbito nacional e de referenciais de *benchmarking* para o setor da construção, o que limita a possibilidade de comparação direta dos resultados obtidos com outras avaliações similares. Essa lacuna reduz a capacidade de validação externa e posicionamento relativo dos achados dentro do contexto brasileiro, restringindo a interpretação dos resultados a uma análise essencialmente interna ao estudo.

A estrutura proposta apresenta potencial para ser aplicada em outras cadeias de materiais construtivos, subsidiando futuros *benchmarkings* sociais não só de materiais construtivos e sistemas produtivos, mas do ambiente construído como um todo, possibilitando a comparação de desempenhos sociais.

Mediante a ampliação da base de dados e a incorporação de indicadores específicos de empresas, através de Relatórios de Sustentabilidade (relacionados às práticas de ESG), por exemplo, os resultados poderão subsidiar comparações entre sistemas construtivos e fornecedores, de forma semelhante ao que atualmente é realizado com indicadores ambientais em estudos de ACV.

Ademais, à medida que o *framework* seja amplamente aplicado e refinado, os resultados obtidos podem vir a apoiar a renovação e ampliação de normativas brasileiras voltadas à saúde e segurança no trabalho, incorporando uma abordagem baseada em ciclo de vida e em indicadores quantitativos de desempenho social ao longo da cadeia produtiva.

CONCLUSÕES

O estudo evidencia avanços na operacionalização da Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS) no contexto brasileiro, com foco nos “Trabalhadores” na cadeia do aço. O principal aporte do *framework* é a quantificação dos potenciais impactos sociais, como

acidentes e doenças ocupacionais, em função da massa produzida (Mt), preenchendo lacunas de dados nas etapas de extração (A1) e fabricação (A3).

Os resultados confirmam a heterogeneidade dos impactos ao longo do ciclo de vida. A Produção de Ferro-gusa destaca-se como principal *hotspot*, com valores máximos (1,0) na maioria dos indicadores, incluindo acidentes, doenças ocupacionais e mortalidade. Em contraste, as atividades de apoio à extração de minério de ferro apresentam baixa criticidade, com valores nulos ou próximos de zero.

Quanto ao Impacto Acumulado por Indicador (IAi) para 2024, o Índice de Doenças Ocupacionais (1,0) configura-se como a principal vulnerabilidade da cadeia, seguido pelo índice de acidentes (0,89) e de incapacidade temporária (0,85). Esses achados reforçam que a saúde de longo prazo e a integridade física dos trabalhadores nas etapas de transformação metalúrgica demandam maior atenção.

Conclui-se que o *framework* proposto e seus resultados representam oportunidades e avanços não só para compreender onde estão os impactos sociais dentro de um sistema produtivo de material construtivo visando melhorar socialmente o próprio produto ou sistema, mas também refletem uma perspectiva para um futuro *benchmarking* social brasileiro para o setor da construção, que poderá viabilizar a comparação de diferentes alternativas com base em indicadores sociais, funcionando como mecanismo para escolher a alternativa com menor impacto social.

Como continuidade, recomenda-se a aplicação do *framework* em outras cadeias de materiais de construção, como cimento, vidro e agregados, ampliando a comparação da "pegada social" entre sistemas construtivos. Sugere-se também integrar os indicadores sociais à ACV ambiental e de custos, avançando para uma Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as bolsas concedidas pela CAPES, CNPq e FAPERJ.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, os autores utilizaram o ChatGPT 5.5 para revisão gramatical do texto. Após a utilização da ferramenta, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] SCHANDL, H., et al. Global material flows and resource productivity: the 2024 update. **Journal of Industrial Ecology**, v. 28, p. 2012–2031, 2024. DOI: 10.1111/jiec.13593.

[2] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025: Not just another brick in the wall - The solutions exist. Scaling them will build on progress and cut emissions fast**. Paris: UNEP, 2025. Disponível em: https://wedocs.unep.org/20.500.11822/47214.

[3] MONTALBÁN-DOMINGO, L.; PELLICER, E.; GARCÍA-SEGURA, T.; SANZ-BENLLOCH, A. An Integrated Method for the Assessment of Social Sustainability in Public-Works Procurement. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 89, p. 106581, 2021. DOI: 10.1016/j.eiar.2021.106581

[4] BRASIL. Ministério da Previdência Social. **Anuário Estatístico de Acidentes do Trabalho 2024**. Brasília: Ministério da Previdência Social, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/previdencia/pt-br/assuntos/previdencia-social/arquivos/AEAT-2024.

[5] BHATNAGAR, A., HARRI, A., LEVÄNEN, J., NIINIMÄKI, K. Exploring the role of social life cycle assessment in transition to circular economy: A systematic review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 207, aug. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107702. Acesso em: 29 mar. 2026.

[6] INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION (ILO). **A call for safer and healthier working environments.** Geneva: International Labour Office, 2023. DOI: 10.54394/HQBQ8592.

[7] SMARTLAB. **Observatório de Segurança e Saúde no Trabalho (SST)**. Disponível em: https://smartlabbr.org/sst. Acesso em: 8 abr. 2026.

[8] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations 2020**. Nairobi: UNEP, 2020. Disponível em: https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/34554.

[9] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Methodological Sheets for Subcategories in Social Life Cycle Assessment (S-LCA) 2021**. Paris: UNEP, 2021. Disponível em: https://www.lifecycleinitiative.org/library/methodological-sheets-for-subcategories-in-social-life-cycle-assessment-s-lca-2021/.

[10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040: Gestão Ambiental — Avaliação do Ciclo de Vida — Princípios e Estrutura**. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14044: Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - requisitos e orientações.** Versão corrigida. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

[12] BARBERO, I.; REZGUI, Y.; BEACH, T.; PETRI, I. Social Life Cycle Assessment in the construction sector: current work and directions for future research. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 29, p.1827–1845, 2024. DOI: 10.1007/s11367-024-02341-7.

[13] BSI STANDARDS PUBLICATION. **EN 15978**: **Sustainability of construction works: Assessment of environmental performance of buildings** - Calculation method. Brussels: CEN - European Committee for Standardization, 2011.

[14] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Classificação Nacional de Atividades Econômicas – CNAE:** estrutura (versão 7.0.0 – classes; versão 10.1.0 – subclasses). 2026. Disponível em: https://cnae.ibge.gov.br/?option=com_cnae&view=estrutura&Itemid=6160&tipo=cnae&versao_classe=7.0.0&versao_subclasse=10.1.0.

[15] RODRIGUEZ, M. M. T.; SILVA, V. G.. **Análise da Atual Legislação Brasileira de Descarbonização para Edificações**. ANAP Brasil, São Paulo, Brasil, v. 17, n. 43, 2024. DOI: 10.17271/19843240174320245132.

[16] INSTITUTO AÇO BRASIL. **Brazil Steel Databook - Anuário Estatístico.** Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2025b. Disponível em: https://www.acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2025/08/AcoBrasil_Anuario_2025-1.pdf.

[17] BRASIL. Agência Nacional de Mineração (ANM). **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas** – 2025 (ano-base 2024). Brasília: ANM, 2025. Disponível em: http://www.anm.gov.br.

[18] BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Anuário do Setor Metalúrgico. Ministério de Minas e Energia, Brasil, 2025**. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/anuario-do-setor-metalurgico.

[19] AHMED, H. A.; WANG, Z.; LI, Y. Life Cycle Sustainability Assessment and Optimization of Seismic Retrofit Solutions for RC Frame Structures. **Case Studies in Construction Materials**, v. 22, p. 04315, 2025. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04315.

[20] PALUMBO, E.; POMPONI, F. Embodied Environmental and Social Impacts: a Regionalised Sectoral Method for Low-Carbon Construction Materials in Italy. **Sustainability**, v. 17, p. 9797, 2025. DOI: 10.3390/su17219797.

[21] NAVARRO, I. J.; VILLALBA, I.; YEPES-BELLVER, L.; ALCALÁ, J. Social life cycle assessment of railway track substructure alternatives. **Journal of Cleaner Production**, v. 450, p. 142008, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142008.

[22] WENIGER, A.; CHABRAWI, A. M. R. O.; TRAVERSO, M. Method to Develop Social Impact Pathways: A Case on Carbon- and Steel Reinforced Concrete. **Developments in the Built Environment**, v. 22, p. 100665, 2025. DOI: 10.1016/j.dibe.2025.100665.

[23] JOSA, I.; BORRION, A. Rebuilding or retrofitting? An assessment of social impacts using Social Life Cycle Assessment. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 112, 2025. DOI: 10.1016/j.eiar.2024.107794.

[24] AYBAR, D. M. R.; BISWAS, W.; JOHN, M. Development of a Life Cycle Sustainability Assessment Framework for Hemp-Based Building Materials in Australia. **Advances in Environmental and Engineering Research**, v. 6, 2025. DOI: 10.21926/aeer.2501014.

[25] BALASBANEH, A. T.; RAMADAN, B. S. Integrating Three Pillars of Sustainability for Evaluating the Modular Construction Building. **Construction Innovation**, 2024. DOI: 10.1108/CI-01-2024-0002.