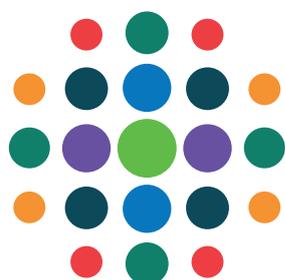


sidac

sistema de informação
do desempenho ambiental
da construção

Relatório de coleta de dados

AÇO



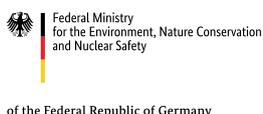
sidac

sistema de informação
do desempenho ambiental
da construção

Relatório de coleta de dados

AÇO

Apoio



Cooperação técnica



Coordenação



Essa publicação foi organizada com o apoio financeiro do Instrumento de Parceria da União Europeia com o Ministério Federal Alemão para o Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear (BMU) no contexto da Iniciativa Climática Internacional (IKI). O conteúdo dessa publicação é de inteira responsabilidade dos seus organizadores e não necessariamente reflete a visão dos financiadores.

SUPERVISÃO DA COLETA DE DADOS

Me. Lidiane Santana Oliveira (USP)

Me. Fernanda Belizario Silva (IPT)

Dr. Daniel Costa Reis (USP)

EQUIPE RESPONSÁVEL PELA COLETA DE DADOS DO VERGALHÃO DE AÇO CA-50¹

Prof^a. Dr^a. Vanessa Gomes da Silva (Unicamp): análise de dados, relatório, supervisão

Lizzie Monique Pulgrossi (Unicamp): levantamento de dados, análise de dados, inserção dos dados no sistema, relatório

Como citar este documento

PULGROSSI, L.M.; SILVA, V. G. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: vergalhão de aço CA-50. São Paulo: Sidac, 2022.

¹ Declaração de crédito dos autores: levantamento de dados: levantamento de dados de inventário de ciclo de vida dos produtos (primários ou secundários); análise dos dados: compilação e análise dos dados de inventário de ciclo de vida dos produtos; inserção dos dados no sistema: cadastro dos processos elementares no Sidac; relatório: elaboração do relatório de coleta de dados; supervisão: supervisão da coleta e análise dos dados de inventário de ciclo de vida dos produtos; apoio: apoio às atividades do projeto.

Sumário

1	Introdução	1
2	Elaboração do processo elementar	1
2.1	Descrição do produto	1
2.2	Fluxograma do processo elementar	1
2.3	Descrição do processo elementar	2
2.3.1	Produção de ferro processado.....	2
2.3.2	Produção do ferro gusa e escória de alto-forno	4
2.3.3	Produção de vergalhão de aço	5
2.4	Alocação	10
3	Métodos de cálculo e considerações.....	10
3.1	Considerações gerais	10
3.2	Métodos de cálculo	12
3.2.1	Ferro processado	12
3.2.2	Ferro gusa	13
3.2.3	Vergalhão de aço CA-50.....	13
3.3	Itens desconsiderados	14
4	Inventário do processo	14
5	Análise dos indicadores	16
6	Considerações finais	18
7	Referências	19
8	Anexo – Fluxogramas detalhados do processo elementar	24
9	Anexo - Checagem de informações disponíveis nas referências bibliográficas.....	26

1 Introdução

O objetivo desse relatório é apresentar os procedimentos adotados na coleta dos dados genéricos do VERGALHÃO DE AÇO CA-50, realizada com base em literatura nacional. Assim, aqui são apresentados o fluxograma dos processos elementares da produção do VERGALHÃO DE AÇO CA-50, considerando a fronteira do portão ao portão (*gate to gate*), dados qualitativos e quantitativos (fluxos de entrada e saída) que descrevem esse processo, bem como todas as conversões realizadas para adequação dos dados ao Sidac.

2 Elaboração do processo elementar

2.1 Descrição do produto

De acordo com a ABNT NBR 7480:2007 (ABNT, 2007), os produtos considerados como barras de aço possuem diâmetro nominal igual ou superior a 6,3 mm e são obtidos por laminação a quente, sem processos de deformação posterior, exceto o endireitamento do material quando produzidos em rolos. As barras de aço são classificadas em CA-25 (lisas) e CA-50 (com nervuras transversais) segundo o valor da resistência de escoamento.

O vergalhão de aço CA-50 é uma barra obliquamente nervurada destinada para armadura em concreto armado, com comprimento de 12 m (Figura 1). As propriedades mecânicas das barras da categoria CA-50 são: Resistência Característica de Escoamento (f_y) de 500 MPa e Limite de Resistência de 1,08 x f_y MPa. Outros detalhes são apresentados na tabela B.3 do Anexo B da NBR 7480:2007 (ABNT, 2007). A unidade declarada do produto é 1 tonelada.

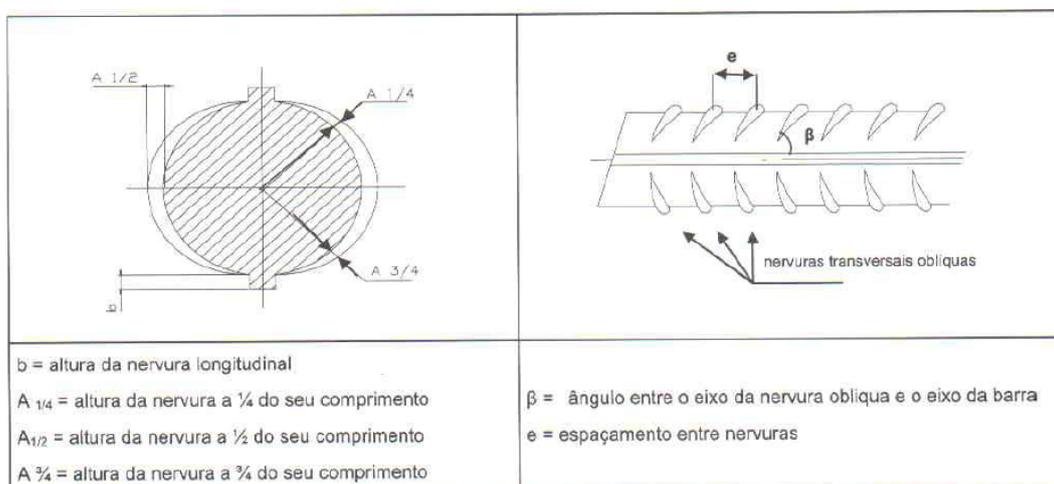


Figura 1. Exemplo de configuração geométrica com nervuras transversais oblíquas e nervuras longitudinais. Fonte: (ABNT, 2007)

2.2 Fluxograma do processo elementar

O fluxograma abaixo (Figura 2) apresenta versão simplificada do processo produtivo. Mais detalhes podem ser encontrados nos fluxogramas da Figura 15 e Figura 16 do Anexo 8.

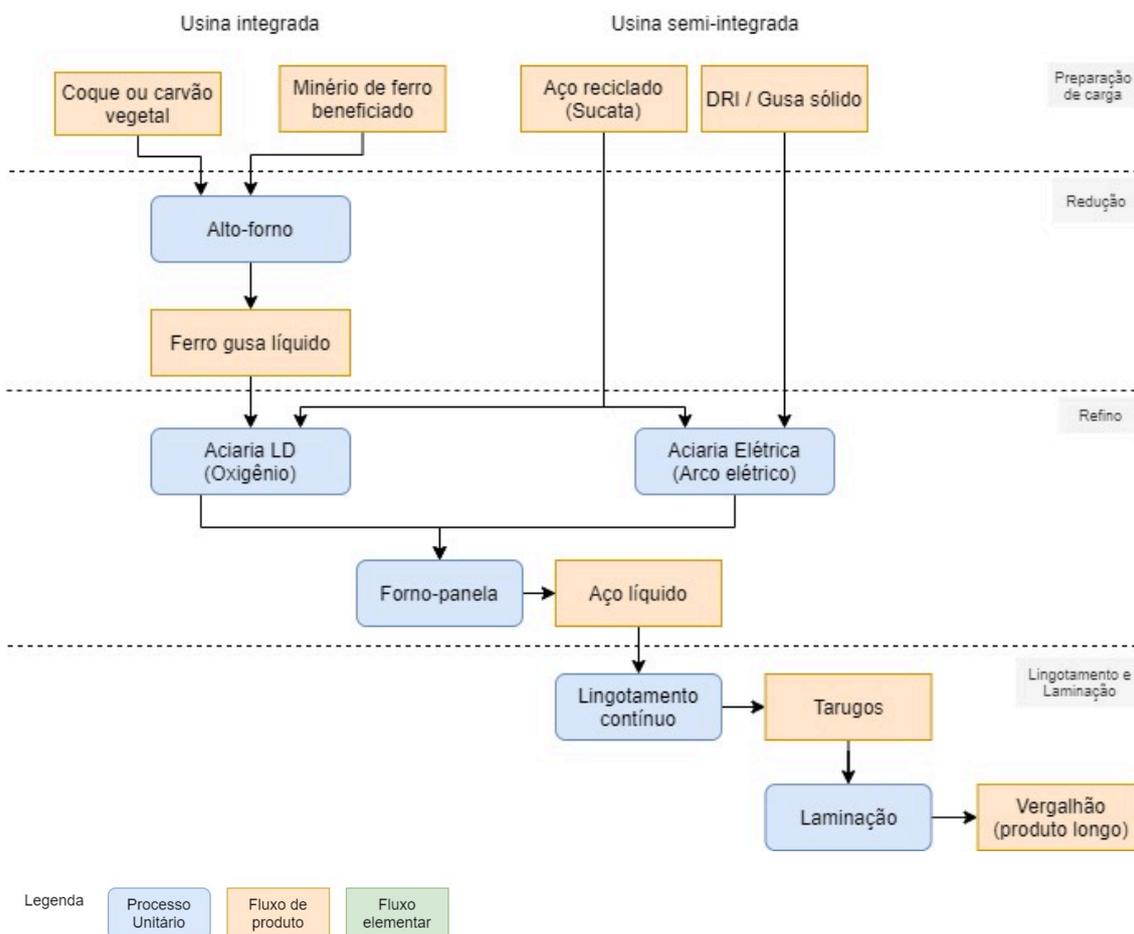


Figura 2. Fluxo simplificado de produção do vergalhão de aço identificando os fluxos de entrada e saída.

2.3 Descrição do processo elementar

A produção do vergalhão de aço foi subdividida em três processos, sendo:

1. Produção de ferro processado
2. Produção de ferro gusa e escória de alto-forno
3. Produção de vergalhão de aço

Juntos, estes três processos compõem o ciclo de vida do vergalhão de aço do berço ao portão de fábrica, ou seja, desde a extração da matéria-prima até o produto finalizado pronto para distribuição e consumo.

2.3.1 Produção de ferro processado

No processo de produção do ferro processado estão contempladas as etapas de mineração, beneficiamento e segregação do minério de ferro bruto, pelotização e sinterização. Isso porque o ferro processado é a composição de carga ferrosa pronta para consumo em alto-forno em uma usina siderúrgica integrada para a produção do ferro-gusa. A composição do ferro processado segue a proporção: 9,6% de granulados; 20,3% de pelotas; 70,1% de sinter. Essa proporção foi

apresentada pelo Instituto Aço Brasil segundo banco de dados nacionais ano-base 2020 (IABR, 2022).

2.3.1.1 Etapa de Mineração

Nas operações de lavras a céu aberto ou minas subterrâneas é feita a exploração do minério de ferro da jazida com uso de equipamentos movidos a óleo diesel (incluindo transporte), obtendo-se o minério de ferro bruto (ROM: Run of mine) e o estéril de mineração (material extraído da natureza, sem valor comercial, depositado na própria lavra) na relação 0,8 kg estéril/kg ROM (VASCONCELOS et al., 2022). O material bruto é submetido a uma série de processos de beneficiamento realizados pelas mineradoras, os quais contemplam etapas de cominuição (britagem e moagem), classificação, concentração, espessamento ou filtração, encerrando-se com a obtenção do minério de ferro segregado entre **granulados** (6,3 a 50mm), **sínter feed** (0,15 a 6,3mm) e **pellet feed** (< 0,15mm) segundo a granulometria do material (Figura 3 e Figura 4). A relação entre minério de ferro beneficiado e minério de ferro bruto segue a média nacional de 0,78 kg minério beneficiado/ROM (ANM, 2020). O rejeito do beneficiamento do minério de ferro é geralmente composto por minério com baixa concentração de ferro, areia e água, o qual é disposto em barragens de rejeitos. Apesar de divergências entre a classificação desses rejeitos, optou-se por uma abordagem conservadora declarando-o como resíduo classe II-A (não perigoso e não inerte).



Figura 3. Apresentação do minério de ferro após beneficiamento. Fonte: CSN Mineração²

2.3.1.2 Etapa de Pelotização

O processo de pelotização é a aglomeração dos finos de minério gerados na lavra e classificados como pellet feed devido sua granulação. Neste processo, o pellet feed é misturado com agentes fundentes (como a cal virgem e o calcário), que corrigem as propriedades químicas das pelotas, atribuindo a basicidade adequada para seu uso em alto-forno, e com aglomerantes (bentonita e dolomita), que contribuem para a formação e para a resistência à compressão das pelotas verdes e queimadas. Caso necessário, a umidade da mistura a ser pelotizada é ajustada. O tamanho das pelotas cruas é ajustado e controlado, sendo retirados os finos e os grossos, que irão reentrar no processo de pelotização. As pelotas cruas são levadas à queima e endurecimento (em torno de 1250°C a 1350°C), consumindo energia elétrica, óleo diesel e carvão mineral para gerar **pelotas de ferro**.

² disponível em: <https://ri.csnmineracao.com.br/a-companhia/minerio-de-ferro/>

2.3.1.3 Etapa de Sinterização

A aglomeração do sinter feed em sinter é chamado de processo de sinterização, e é realizado nas usinas siderúrgicas integradas. Na sinterização, ocorre uma aglomeração a quente (em torno de 1220°C a 1400°C) usando sinter feed, agentes fundentes a base de cálcio (como cal virgem, calcário, dolomita, quartzo, etc.), combustíveis sólidos (carvão mineral e coque de carvão mineral), gás natural e energia elétrica, promovendo reações químicas que unem as partículas pelas zonas de contato e evapora a água adicionada. Após a queima, é gerado um material poroso, que é quebrado, resfriado e peneirado. O produto final – **sinter** – deve ter alta resistência mecânica, boa redutibilidade e composição química controlada para atender às condições de consumo em alto-forno. As frações superiores a 5mm são utilizadas no alto-forno enquanto as inferiores são reprocessadas na sinterização.



Figura 4. Aglomerados de minério de ferro. Fonte: Policarpo (2012)

2.3.2 Produção do ferro gusa e escória de alto-forno

As usinas de aço são classificadas conforme a rota tecnológica adotada, podendo ser Integradas ou Semi-integradas. As usinas integradas operam as três etapas básica de produção do aço: Redução; Refino/Lingotamento e Laminação. As usinas semi-integradas operam apenas as etapas de Refino/Lingotamento e Laminação. Em uma usina integrada, na etapa de redução indireta, o ferro processado (granulados, pelotas e sinter) é transformado em ferro gusa (ferro de primeira fusão). Já a redução direta do ferro processado (granulados e pelotas) gera o ferro-esponja, que pode ser utilizado por usinas semi-integradas para a produção de aço.

Para o processo de produção do ferro gusa no Sidac foi adotada a rota tecnológica de redução indireta em alto-forno, que é a mais utilizada em todo mundo através das usinas integradas. O processo se inicia com a introdução alternada, pelo topo do alto-forno, de ferro processado (mistura de sinter, pelota e granulado), de fundentes/aditivos (cal virgem, calcário, dolomita, quartzo) e de combustível/redutor, que pode ser carvão vegetal ou carvão mineral/coque mineral.

Para considerar essas duas rotas energéticas, foi adotada a proporção de ferro gusa produzido em 2020 entre usina que utilizam carvão mineral/coque mineral (75% da produção) e usinas que utilizam carvão vegetal (25% da produção) (MME, 2021). O processo de coqueificação ocorre na própria usina, com a queima do carvão mineral/antracito na coqueira, resultando no coque mineral e na emissão de gases de coqueira (alcatrão, amônia; óleos leves e gases combustíveis).

Também pode ser utilizada madeira (processo de carbonização) resultando no carvão vegetal. No Brasil, o consumo de carvão e coque se dá na proporção de 50% carvão mineral e carvão PCI, 22% coque mineral e coque de petróleo, e 7% carvão vegetal (MME, 2021).

Na base do alto-forno, através das ventaneiras, é injetado ar quente e oxigênio (gás redutor quente), dando início ao processo de fusão, que ocorre devido à liberação de calor gerado pela reação entre o carbono do carvão e do coque com o oxigênio injetado, formando monóxido de carbono (agente redutor) (Figura 5).

A carga introduzida desce no interior do alto-forno, enquanto os gases resultantes da combustão ascendem através dessa carga, esse movimento é de extrema importância para a eficiência da ação redutora. A reação de redução entre o monóxido de carbono e o óxido de ferro gera o ferro fundido (ferro gusa), além da escória líquida (resultante da reação com os fundentes, que aglutinam as impurezas) e a emissão de gases contendo enxofre, manganês, entre outros elementos.

A temperatura do alto-forno varia de 300°C no topo a 1.600°C na base, onde é depositado o ferro gusa líquido e a escória líquida, que serão escoados separadamente devido à diferença de densidade entre eles. A escória de alto-forno possui baixa densidade, é alcalina, formada principalmente por silicatos e aluminatos. Após ser solidificada em uma massa petrificada, a escória de alto-forno pode ser utilizada como material isolante ou agregado na indústria de cimento ou na fabricação de asfalto.

A produção do ferro gusa gera os chamados gases de topo, ou gases de alto-forno, que podem ser utilizados na cogeração de energia, sendo que em média 30% desses gases são mantidos no próprio sistema de alto-forno para manter o aquecimento. Mas antes de ser utilizado, esse gás de topo passa por um processo de limpeza. São gerados também resíduos (lama, pós, finos e sucata de ferro gusa), que podem ser reaproveitados dentro do próprio sistema da usina integrada, assim como outros resíduos e gases gerados nos diferentes processos da usina integrada podem ser utilizados no processo de alto-forno (resíduos de coqueria, de sinteria ou de aciaria).

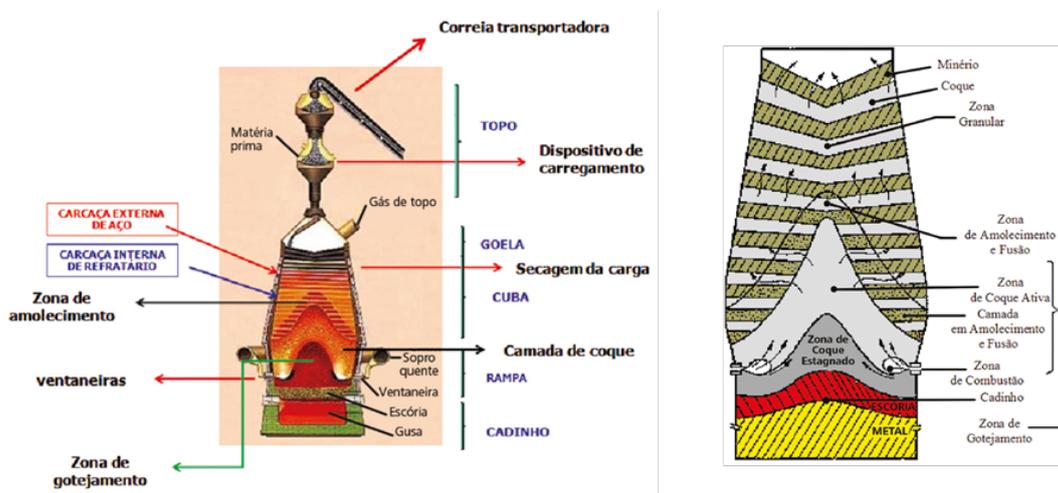


Figura 5. Corte e zonas do alto-forno. Fonte: Silva (2011)

2.3.3 Produção de vergalhão de aço

Para a produção de produtos acabados em aço são necessárias as etapas de refino em aciaria, lingotamento e laminação.

Na aciaria são retiradas as impurezas do ferro gusa, e o teor de carbono é reduzido, obtendo-se o aço líquido. Para a produção do aço destacam-se duas rotas tecnológicas de refinamento, sendo:

- a. Aciaria com forno à oxigênio (Conversor LD/BOF), mais utilizada nas usinas brasileiras – em média de 77% da produção de aço bruto por processo de aciaria e lingotamento contínuo utilizam essa tecnologia, que compõe o sistema de usina integrada.
- b. Aciaria com forno elétrico (Forno elétrico a arco) – Em média 21% da produção de aço bruto é através deste processo de aciaria e lingotamento contínuo. A produção do vergalhão de aço para construção civil brasileira é majoritariamente realizada através da aciaria elétrica, que compõe as usinas semi-integradas (mini-mills) (IABR, 2020a).

Assim, a rota tecnológica adotada para o processo de produção do vergalhão de aço no Sidac é através de forno elétrico a arco.

2.3.3.1 Etapa de Refino – Forno elétrico a arco

Neste processo foi considerado o forno a arco direto, iniciando com a inserção de sucata de aço selecionada e de ferro gusa sólido pela abóbada superior do forno, através de cestos apropriados que se abrem no fundo. Há uma ordem de inserção dessa carga metálica, sendo que a mais leve deve ficar no fundo, para amortecer a queda dos pedaços maiores (carga média, seguida pela carga pesada) e novamente, uma cobertura de carga leve, para proteger a abóbada do forno (Figura 6).

A fusão dessa carga metálica ocorre devido ao calor gerado pelo arco formado entre eletrodos de grafite e a sucata. A temperatura local gerada pela corrente elétrica pode ultrapassar 5000°C nesta etapa, que forma o banho líquido de aço, coberto por uma camada de escória.

É iniciado o refino primário (ou refino oxidante) com a injeção de oxigênio, que junto com a cal virgem (elemento escorificante) promoverá a oxidação do carbono, fósforo, silício e outros elementos indesejados, constituindo a escória de PH básico e o pó de aciaria (SILVA, 2011).

Para a espumação da escória é utilizado elementos carburantes (como finos de carvão mineral ou de coque mineral³), que permitirá que a escória seja escoada por uma saída na parte inferior do forno devido sua menor densidade (sobrenada o banho metálico), enquanto que os dutos de despoejamento sugam a poeira gerada no forno. A escória de aciaria, após beneficiamento, pode ser utilizada como agregado para pavimentação (base ou sub-base), lastro ferroviário, fertilizantes e corretivos de solo, ou material de retorno na própria aciaria (Figura 7).

A próxima etapa é o refino secundário (ou refino redutor) promovido pela adição de elementos desoxidantes (como alumínio, sílica e manganês), ferroligas e gases inertes (nitrogênio e argônio) que permitirão a homogeneização do aço, desoxidando o metal, eliminando o enxofre e ajustando sua composição química e temperatura. O processo de aciaria promove a emissão de diversos gases, além do monóxido de carbono e do dióxido de carbono. (EPE, 2018).

³ No processo é utilizado coque injetado para gerar energia térmica a partir de reação química (coque com oxigênio ou coque com gás natural), auxiliando no aquecimento das zonas frias do banho metálico. Fonte: Antônio Paulo Pereira Filho - Especialista da área – conversa telefônica em 24/03/2022.

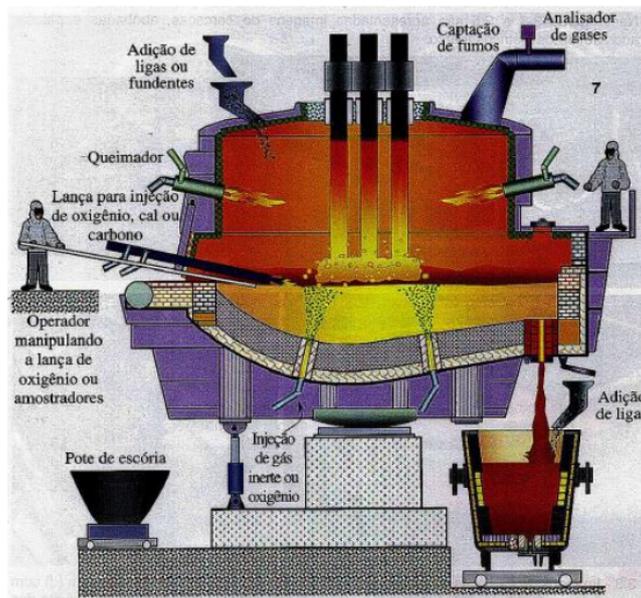


Figura 6. Corte e zonas do forno elétrico a arco (FEA). Fonte: Ramos (2013)

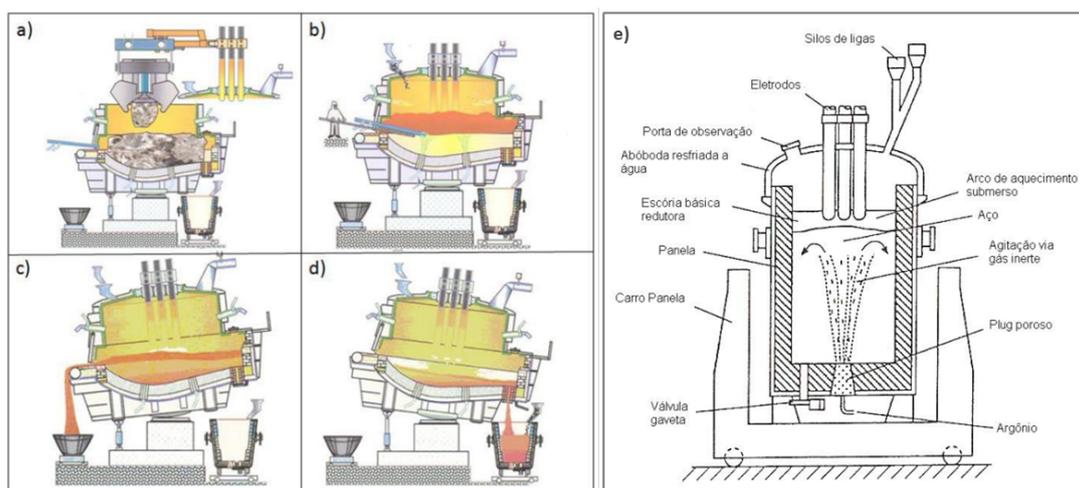


Figura 7. Representação esquemática das etapas do FEA: a) carregamento; b) fusão e formação de escória; c) refino e retirada da escória; d) vazamento; e) esquema de um forno-panela. Fonte: Bittencourt (2015)

Em um forno elétrico convencional é possível realizar todas as etapas (carregamento de carga, fusão, refino oxidante, refino redutor e vazamento). Porém, é possível utilizar o forno a arco em conjunto com o forno-panela, permitindo que o primeiro seja destinado apenas para a fusão e refino oxidante (Figura 8). O uso de forno-panela se mostra vantajoso pois melhora a qualidade do produto final e aumenta a produtividade. Após o refinamento, o aço é solidificado no processo de lingotamento contínuo e transformado em produtos semiacabados (tarugos).

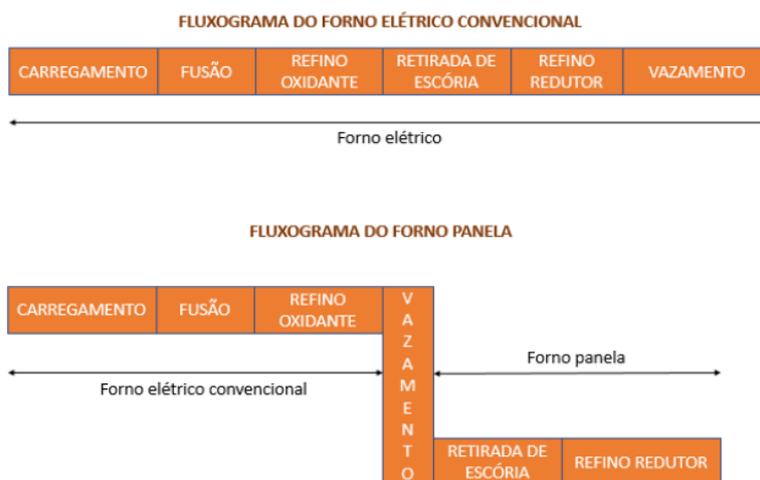


Figura 8. Fluxogramas de produção do aço em forno elétrico convencional e forno-panela. Fonte: EPE (2018)

2.3.3.2 Lingotamento

No processo de lingotamento o aço líquido é vazado em moldes de cobre resfriados à água, provocando sua solidificação progressiva, da superfície do aço até seu núcleo (Figura 9 e Figura 10). Após o resfriamento inicial da casca, a peça é extraída do molde e resfriada através de chuveiros de água. Após a solidificação do núcleo, a peça é cortada com maçaricos ou tesouras mecânicas no comprimento desejado do produto semiacabado. Para a conformação em vergalhão, o produto semiacabado tem o formato de tarugos de aço com 1,5" x 1,5" ou mais largo. O processo de lingotamento contínuo permite alto rendimento do aço líquido na transformação em tarugo, além de reduzir custos de produção e aumentar a qualidade do produto final (SILVA, 2011).

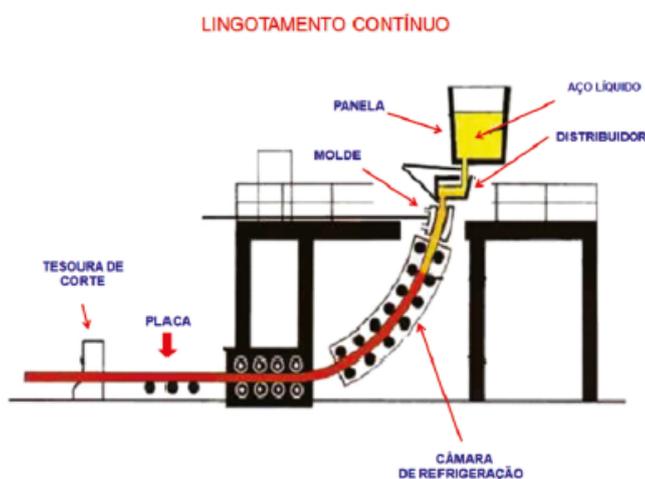


Figura 9. Processo de lingotamento contínuo. Fonte: Silva (2011)

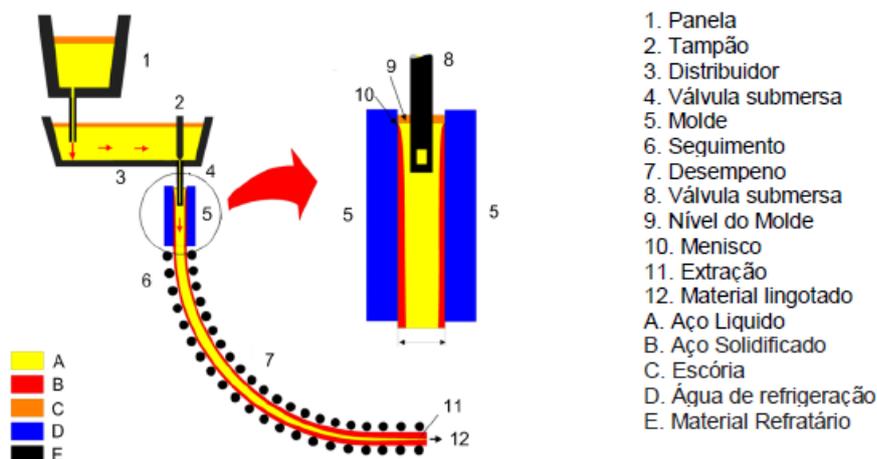


Figura 10. Detalhe da máquina de lingotamento contínuo. Fonte: EPE (2018)

2.3.3.3 Laminação - Conformação mecânica

A última etapa é a laminação (conformação mecânica), transformando o produto semiacabado em produto acabado. Se trata de um processo mecânico, em que o produto semiacabado (tarugo) é reaquecido nos fornos de reaquecimento a uma temperatura próxima a 1150°C, permitindo que fique dúctil o suficiente para passar por cilindros de aço ou de ferro fundido com eixos paralelos que, através da compressão, darão o formato final desejado (Figura 11). Esse maquinário é movido a eletricidade e a gás natural, podendo realizar laminação a quente ou a frio e conformar produtos acabados planos (chapas, folhas laminadas, etc.) ou longos (vergalhões, tubos, etc.).

Neste processo do Sidac, foi considerada a laminação a quente para a produção de vergalhões de aço CA-50. Em média, 38% dos produtos longos produzidos no Brasil são vergalhões de aço (IABR, 2020a).

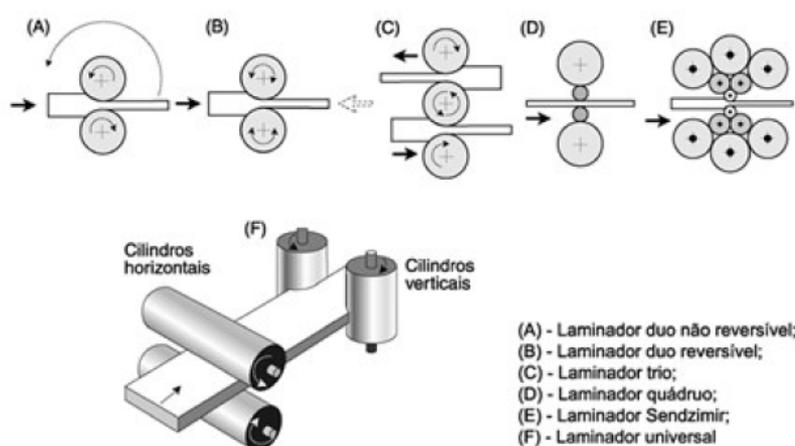


Figura 11. Tipos de laminadores. Fonte: EPE (2018)

2.4 Alocação

No processo produtivo do ferro gusa é gerada a escória de alto-forno como coproduto. A escória é utilizada como agregado pela indústria de cimento em substituição ao clínquer. Essa parceria entre os setores siderúrgico e da construção civil é ambientalmente benéfica para ambos, sendo que o primeiro promove a reciclagem de seu coproduto, e o segundo reduz o consumo de um recurso natural não renovável. Portanto é importante que seja feita uma distribuição justa dos impactos ambientais gerados pelo processo produtivo do ferro gusa.

A norma ISO 14044:2006 (ISO, 2006) recomenda que a alocação de impactos seja evitada através da subdivisão dos processos elementares ou da expansão das fronteiras do sistema. Porém, na impossibilidade, como é este caso, a alocação pode adotar um critério pré-definido como massa, energia ou valor econômico.

Neste cenário, o processo inserido no Sidac adotou a abordagem por valor econômico, seguindo as mesmas premissas apresentadas pela Diretoria de Habitação, Planejamento Urbano e Paisagens (Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages - DHUP) do Ministério de Transição Ecológica e Solidária da França para a base de dados INIES (DHUP, 2021).

A proposta da DHPU é baseada no preço médio mundial do ferro gusa produzido e no preço médio de compra mundial de escória de alto-forno pelo setor de cimento dos últimos 5 anos (2016 - 2020). Para o cálculo, considerou o dado da WorldSteel Association de 0,28 toneladas de escória de alto-forno por tonelada de ferro gusa. A proposta francesa resultou em uma alocação de 98,5% dos impactos para o ferro gusa e 1,5% dos impactos para a escória de alto-forno.

Para o Sidac, foram considerados os dados de produção nacional apresentados pelo IBGE através da Pesquisa Industrial Anual (PIA) – Produtos (IBGE, 2022). Fazendo a relação entre a produção anual de ferro gusa e de escória de alto-forno chegou-se ao valor médio de 0,26 toneladas de escória por tonelada de ferro gusa (0,26 t escoria/ t ferro gusa). Foi considerado o preço médio comercializado do ferro gusa (R\$ 1.023,55) e da escória de alto-forno (R\$ 38,97) dos últimos 5 anos (2015 – 2019). O cálculo resulta em uma alocação arredondada de 99% dos impactos para o ferro gusa e 1% dos impactos para a escória de alto-forno. A alocação econômica para escória de alto-forno segue a seguinte fórmula:

$$\frac{\text{Valor econômico de 0,26 t escória}}{\text{Valor econômico de 1 t ferro gusa} + \text{Valor econômico de 0,26 t escória}} = \frac{(38,97 \text{ R\$/t}) * (0,26 \text{ t})}{(1023,55 \text{ R\$/t}) + ((38,97 \text{ R\$/t}) * (0,26 \text{ t}))} = 1,0\%$$

3 Métodos de cálculo e considerações

3.1 Considerações gerais

As técnicas adotadas para cada uma das etapas de produção do vergalhão de aço CA-50 não sofreram alterações significativas desde a publicação dos dados (vide referência bibliográfica), portanto as informações são consideradas válidas para os dias atuais.

Para estimar a composição dos processos do Ferro processado e do Ferro gusa (com respectivos transportes) foi considerada a distribuição de probabilidade uniforme a partir dos valores mínimo (“a”) e máximo (“b”) de cada fluxo de entrada e de saída. O cálculo da média (“ \bar{x} ”) e do desvio padrão (“dp”) foram orientados pelas equações:

$$\bar{x} = \frac{a + b}{2} \qquad dp = \frac{b - a}{\sqrt{12}}$$

Para a composição do processo do Vergalhão de aço CA-50 (e respectivos transportes) foi considerada a distribuição de probabilidade triangular a partir dos valores mínimo (“a”), máximo (“b”) e o valor mais provável (“c”) de cada fluxo de entrada e de saída. O valor mais provável foi calculado através da média geral de todos os dados levantados. O cálculo da média (“ \bar{x} ”) e do desvio padrão (“dp”) foram orientados pelas equações:

$$\bar{x} = \frac{a + b + c}{3} \qquad dp = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 - ab - ac - bc}{18}}$$

Atendendo às necessidades do Sidac e ao conjunto de dados de literatura disponíveis, foram adotadas as seguintes premissas:

- a. Toda a energia elétrica dos processos foi considerada como proveniente de rede pública.
- b. A cal virgem foi adotada como insumo representante dos diferentes tipos de fundentes utilizados no processo (cal, calcário, dolomita, demais aditivos).
- c. O gás natural foi adotado como insumo representante dos gases consumidos como fonte energética no processo de sinterização e no processo de produção do ferro gusa (gás de coqueria, gás de aciaria, gás natural).
- d. O coque de carvão mineral foi adotado como insumo representante dos elementos carburantes utilizados no processo de refino em aciaria elétrica para formação da escória espumante (finos de carvão, coque mineral, coque de petróleo).
- e. Para todos os fluxos, a quantidade foi calculada em kg de produto (matéria-prima) para produzir 1 tonelada do produto final (Ferro processado, Ferro gusa e Vergalhão de aço CA-50).
- f. No cálculo das emissões de CO₂ químico foi considerado apenas a emissão pela calcinação da cal virgem (0,44 kg CO₂ / kg cal).
- g. Os fatores de conversão adotados para os cálculos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Fator de conversão utilizado (PCI para combustíveis)

COMBUSTÍVEL	UNID.	FATOR	FONTE
Carvão mineral	MJ/kg	28,87	EPE, 2020 - BEN 2020 - Ano base 2019
Carvão vegetal	MJ/kg	27,05	EPE, 2020 - BEN 2020 - Ano base 2019
Coque de carvão mineral	MJ/kg	28,89	EPE, 2020 - BEN 2020 - Ano base 2019
Eletricidade da rede	MJ/kWh	3,6	EPE, 2020 - BEN 2020 - Ano base 2019
Gás natural	MJ/kg	36,81	EPE, 2020 - BEN 2020 - Ano base 2019
Gás natural	kg/m ³	0,74	EPE, 2021 - BEN 2021 - Ano base 2020
Óleo diesel	MJ/litro	35,5	EPE, 2020 - BEN 2020 - Ano base 2019
Óleo diesel	kcal/kg	10750	EPE, 2021 - BEN 2021 - Ano base 2020

3.2 Métodos de cálculo

3.2.1 Ferro processado

Diante da escassez de dados, para compor as etapas completas de sinterização e de pelotização a partir das informações nacionais coletadas, foram utilizadas as proporções apresentadas na Tabela 2 e na Tabela 3, gerados a partir dos dados europeus de Remus et al. (2013).

Tabela 2. Proporções adotadas referentes à etapa de sinterização

ENTRADAS	UNID.	TAXA	PROPORÇÃO
Sínter feed			
Cal virgem	kg/kg	14,5%	Proporção entre kg cal/kg sínter feed
Carvão mineral	kg/kg	0,018	Consumo unitário kg carvão/kg sínter feed
Coque de carvão mineral	kg/kg	0,037	Consumo unitário kg coque/kg sínter feed
Gás natural	m ³ /kg	0,006	Consumo unitário m ³ gás natural/kg sínter feed
Energia elétrica da rede pública	kWh/kg	0,037	Consumo unitário kWh eletricidade/kg sínter feed
SAÍDAS	UNID.	TAXA	PROPORÇÃO
Resíduo não perigoso e não inerte	kg/kg	1,1%	Proporção entre resíduo não inerte e a diferença entre insumos de entrada (massa em kg) e saída de sínter (kg)

Tabela 3. Proporções adotadas referentes à etapa de pelotização

ENTRADAS	UNID.	TAXA	PROPORÇÃO
Pellet feed		97%	Proporção entre kg pelotas/ kg pellet feed
Cal virgem	kg/kg	7,6%	Proporção entre kg cal/kg pellet feed
Carvão mineral	kg/kg	0,0080	Consumo unitário kg carvão/kg pellet feed
Óleo diesel (combustão)	L/kg	0,0054	Consumo unitário L óleo diesel/kg pellet feed
Energia elétrica da rede pública	kWh/kg	0,0285	Consumo unitário kWh eletricidade/kg pellet feed

A etapa de mineração utilizou as proporções (Tabela 4 e Figura 12) de energia para processamentos e tratamento de lavra apresentadas em Vasconcelos et al. (2022) e a proporção Minério beneficiado/ROM apresentada pela Agência Nacional de Mineração (ANM, 2020).

Tabela 4. Proporções adotadas referentes à etapa de mineração (lavra)

ENTRADAS	TAXA
Eletricidade - kWh/ t Minério de ferro tratado (Granulado + Sínter feed + Pellet feed)	17,76
Diesel - L/t Minério de ferro tratado (Granulado + Sínter feed + Pellet feed)	1,45
Diesel - L/t ROM (Minério de ferro bruto)	1,02
Relação estéril / ROM (Minério de ferro bruto)	0,8
Relação Minério de ferro tratado (Granulado + Sínter feed + Pellet feed) / ROM (Minério bruto)	77,7%

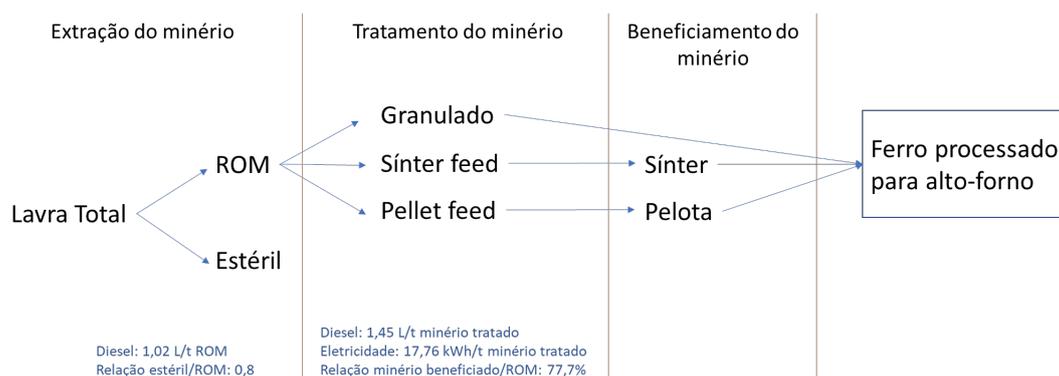


Figura 12. Fluxograma simplificado do processo de Ferro processado.

3.2.2 Ferro gusa

Diante da escassez de dados referentes aos fundentes inseridos no processo, foi utilizada a proporção apresentada na Tabela 5 gerada a partir dos dados europeus de Remus et al. (2013).

Tabela 5. Proporções adotadas referentes à etapa de sinterização

ENTRADAS	UNID.	TAXA	PROPORÇÃO
Cal virgem	kg/kg	0,02%	Proporção entre kg cal/kg ferro processado

Para considerar essas duas rotas energéticas utilizadas pelas usinas integradas em alto-forno (uso de carvão mineral e coque mineral ou uso de carvão vegetal), foi adotado o seguinte cálculo:

- i. Conversão do dado levantado referente à carvão mineral, coque mineral e carvão vegetal em energia (MJ).
- ii. Distribuição do valor total da energia na proporção 25% origem vegetal / 75% origem mineral, segundo a rota energética adotada para a produção de 2020 de ferro gusa (MNE, 2021).
- iii. Conversão da energia (MJ) em massa (kg) de carvão mineral, coque mineral e carvão vegetal.

3.2.3 Vergalhão de aço CA-50

Para o processo de produção do vergalhão de aço CA-50, dentre os dados levantados da literatura, foram consideradas as Declarações ambientais de produto (DPA) disponibilizados pelas principais empresas do setor. Porém, os dados apresentados na DAP Gerdau – Unidade Divinópolis foram desconsiderados por se tratar de usina integrada e os quantitativos serem mais compatíveis com as proporções observadas para uso em aciaria a oxigênio BOF/LD.

A principal geração de resíduo da aciaria em forno elétrico a arco (FEA) é a escória. Ainda que a escória possa ser considerada como coproduto, parte desse resíduo é estocado na usina ou descartado em aterro. Portanto, a quantidade média gerada de escória foi segregada entre os fluxos de saída “escória de aciaria” e “resíduo não perigoso e não inerte” segundo a média (Tabela 6) dos dados apresentados nos relatórios de sustentabilidade do Instituto Aço Brasil (IABR, 2014, 2018, 2020b).

Tabela 6. Proporção de escória de aciaria e outros resíduos considerada como resíduo não perigoso e não inerte a partir dos dados apresentados pelo Instituto Aço Brasil.

ENTRADAS	2014	2016	2017	2018	2019	2020	MÉDIA
Estoque passivo	9%	20%	17%	23%	14%	36%	-
Aterro	0%	0%	1%	2%	2%	1%	-
Total	9%	20%	18%	25%	16%	37%	21%

3.3 Itens desconsiderados

Atendendo às necessidades do Sidac e ao conjunto de dados de literatura disponíveis, foram desconsiderados os seguintes insumos:

- Em nenhum momento foram considerados os fluxos que água consumidas no processo de tratamento e beneficiamento do minério de ferro ou no processo de resfriamento do ferro gusa e do aço/tarugo/vergalhão. Atualmente, o escopo da versão 1.0 do Sidac não contempla o indicador de consumo de água.
- Não foi considerado o consumo de gás de alto-forno como fonte energética no processo de produção do ferro gusa, para evitar duplicação de impactos, nem sua emissão ao final do processo.
- Não foram considerados o consumo de materiais residuais (lama, pó e escória de aciaria ou de alto-forno) por estarem dentro da regra de cut-off.
- Não foi considerado o consumo de gases diversos (oxigênio, nitrogênio, argônio, etc.), elementos desoxidantes (alumínio, sílica, etc.) e de ferroligas (ferro-manganês, etc.) na etapa de aciaria elétrica.
- Não foram consideradas as emissões de gases diversos em nenhum dos processos por estarem dentro da regra de cut-off.
- Não foram considerados os resíduos do aço no processo de produção do vergalhão de aço (aciaria, lingotamento e laminação) para evitar duplicação de impactos, pois estes resíduos retornam ao processo de aciaria.

4 Inventário do processo

Abaixo são apresentados os dados de cada processo inserido no Sidac contendo os valores da média e desvio padrão dos fluxos de entrada e de saída considerados e respectivos transportes (Tabela 7, Tabela 8, Tabela 9). Os dados de transporte consideram distância de ida e volta, sendo que o caminhão retorna vazio.

Os dados brutos levantados da literatura consultada estão disponíveis em repositório próprio – CBCS – administração Sidac.

Tabela 7. Dados referentes ao Processo de Produção de 1t de Ferro Processado

FLUXOS		INVENTÁRIO		TRANSPORTE RODOVIÁRIO (KM)		
ENTRADAS	UNID.	MÉDIA	DESVIO P.	MÉDIA	DESVIO P.	TIPO
Minério de ferro bruto - Lavra total	t	2,37	0,15	-	-	-
Cal virgem	kg	119,50	8,71	-	-	-
Carvão mineral	kg	23,71	7,15	-	-	-
Coque de carvão mineral	kg	17,56	5,46	-	-	-
Gás natural	m ³	2,49	0,66	-	-	-
Energia elétrica da rede pública	kWh	43,23	3,32	-	-	-
Óleo diesel	L	2,65	0,92	-	-	-
SAÍDAS		UNID.	QTDE	DESVIO P.		
Resíduo estéril	t	1,05	0,07			
Resíduo não perigoso e não inerte	kg	294,96	1,18			
Emissões - CO2 químico	kg	52,58	3,83			
Ferro Processado	t	1,00	0,00			

Tabela 8. Dados referentes ao Processo de Produção de 1t de Ferro gusa

FLUXOS		INVENTÁRIO		TRANSPORTE RODOVIÁRIO (KM)		
ENTRADAS	UNID.	MÉDIA	DESVIO P.	MÉDIA	DESVIO P.	TIPO
Ferro processado	t	1,60	0,00	516,6	279,09	5 eixos
Cal virgem	kg	86,50	48,21	749	372,39	3 eixos
Carvão mineral ¹	kg	170,53	32,81	650	273,66	4 eixos
Coque de carvão mineral	kg	207,23	39,87	-	-	-
Carvão vegetal	kg	134,45	25,87	880	415,69	4 eixos
Gás natural	m ³	7,67	2,92	-	-	-
Energia elétrica da rede pública	kWh	69,39	24,23	-	-	-
SAÍDAS		UNID.	QTDE	DESVIO P.		
Resíduo não perigoso e não inerte	kg	140,29	11,72			
Emissões - CO2 químico	kg	38,06	21,21			
Escória de alto forno	kg	245,00	43,30			
Ferro gusa	t	1,00	0,00			

¹ nas referências consultadas os dados de distância foram apresentados para o insumo “coque de carvão mineral”. Porém, nos para este processo do Sidac, o dado médio e desvio padrão foram considerados para o insumo “carvão mineral”, uma vez que o coque é produzido na usina integrada.

Tabela 9. Dados referentes ao Processo de Produção de 1t de Vergalhão de aço CA-50

FLUXOS		INVENTÁRIO		TRANSPORTE RODOVIÁRIO (KM)		
ENTRADAS	UNID.	MÉDIA	DESVIO P.	MÉDIA	DESVIO P.	TIPO
Ferro gusa	kg	283,32	92,81	1734,57	349,49	5 eixos
Sucata metálica	kg	802,88	98,38	260,11	61,74	5 eixos
Cal virgem	kg	40,34	7,39	2024,93	937,38	5 eixos
Coque de carvão mineral	kg	15,81	5,51	2398,42	985,34	5 eixos
Gás natural	m ³	43,34	13,90	-	-	-
Energia elétrica da rede pública	kWh	637,73	88,24	-	-	-
SAÍDAS		UNID.	MÉDIA	DESVIO P.		
Resíduo não perigoso e não inerte	kg	26,18	3,28			
Emissões - CO2 químico	kg	16,67	3,05			
Escória de aciaria	kg	99,50	12,45			
Vergalhão de aço CA-50	t	1,00	0,00			

5 Análise dos indicadores

Na siderurgia, o carbono utilizado como energético e agente redutor tem uma fração incorporada aos produtos e outra emitida em forma de CO₂ devido a combustão. Dentre os gases de efeito estufa, o CO₂ é o de maior relevância no processo siderúrgico.

Importante observar que nas usinas semi-integradas, com uso de aciaria elétrica (FEA - rota adotada no Sidac no processo de produção do vergalhão de aço), não há a etapa de preparação de carga (coqueria e sinteria) e a etapa de redução (alto-forno) comuns ao uso de aciaria à oxigênio (BOF/LD). Nas usinas semi-integradas, o carbono consumido é basicamente como energético e ajustes de composição e, portanto, a quantidade é inferior ao consumido em uma usina integrada, gerando menores índices de emissão de CO₂. A maior parte das emissões do processo de fabricação do aço bruto ocorre na etapa de redução (alto-forno), sendo o restante resultado de transporte de insumos, geração de energia elétrica e calor, como uso de óleo diesel, óleo combustível e gás natural. As emissões referentes às etapas posteriores à aciaria são insignificantes diante do processo produtivo total (MCTI, 2015).

O relatório de sustentabilidade do Instituto Aço Brasil (IABR, 2018) indica a emissão de 1,80 a 1,90 kg CO₂/kg aço bruto, embasadas em dados do IPCC e da Worldsteel Association, considerando processo por usina integrada. A Worldsteel Association⁴ apresenta de 1,81 a 1,89 kg CO₂/kg aço bruto (entre anos de 2018 a 2020), mas ressalta que este valor é majorado segundo o volume de produção por aciaria BOF/LD e aciaria FEA.

Em Policarpo (2012) a faixa de emissão é de 1,50 a 2,0 kg CO₂/kg aço bruto em usinas integradas a coque. A etapa de redução (alto-forno) corresponde a 85% das emissões em usinas integradas a coque, portanto, é possível calcular entre 1,27 a 1,70 kg CO₂/kg ferro gusa a partir da faixa apresentada por ele. Mas segundo Melfi *et al.* (2016), a etapa de redução corresponde a 70% das emissões, o que, a partir da mesma faixa, calcularia entre 1,05 a 1,40 kg CO₂/kg ferro gusa. Já o MCTI (2015) informa que a produção do ferro gusa em alto-forno gera até 75% das emissões de CO₂, ou seja, o cálculo desta faixa ficaria entre 1,12 e 1,50 kg CO₂/kg ferro gusa.

A EPE (2009) apresenta dados que demonstram faixa de emissão de 1,45 a 1,56 kg CO₂/kg ferro gusa, com valor mínimo de 1,16 kg CO₂/kg ferro gusa. E o Sindifer⁵ informa que a produção de ferro gusa emite cerca de 1,75 kg CO₂/kg ferro gusa em usina a coque.

Na comparação dos dados é possível ver que a faixa de emissão de CO₂ para ferro gusa apresentada pelo Sidac compreende parte das faixas das demais referências (Figura 13). Vale ressaltar que o processo do Sidac majora entre a produção de ferro gusa em alto-forno com uso de carvão/coque mineral e carvão vegetal. Também, as simplificações feitas no Sidac, como substituir o consumo de gás de coqueria e aciaria por gás natural⁶ e o uso apenas de energia elétrica pública em lugar da energia autogerada, podem ter influenciado na faixa de emissão. Outro ponto a observar é que no processo do Ferro processado gerado pelo Sidac, constam as emissões das etapas de mineração, pelotização e sinterização. As duas primeiras etapas normalmente são contabilizadas pela indústria de processamento mineral e apenas a sinterização é contabilizada pela indústria siderúrgica. Além disso, devido à ausência de informações nacionais, foram utilizadas informações internacionais para compor os fluxos das etapas de pelotização, sinterização e redução em alto-forno.

⁴ Disponível em: <https://worldsteel.org/steel-by-topic/sustainability/sustainability-indicators/>

⁵ Disponível em: <http://sindifer.com.br/sndfr/gusa-verde/>

⁶ Carbono no material (tC/t): Gás de coqueira: 0,47; Gás de aciaria: 0,35; Gás natural: 0,73. Fonte: MCTI (2020)

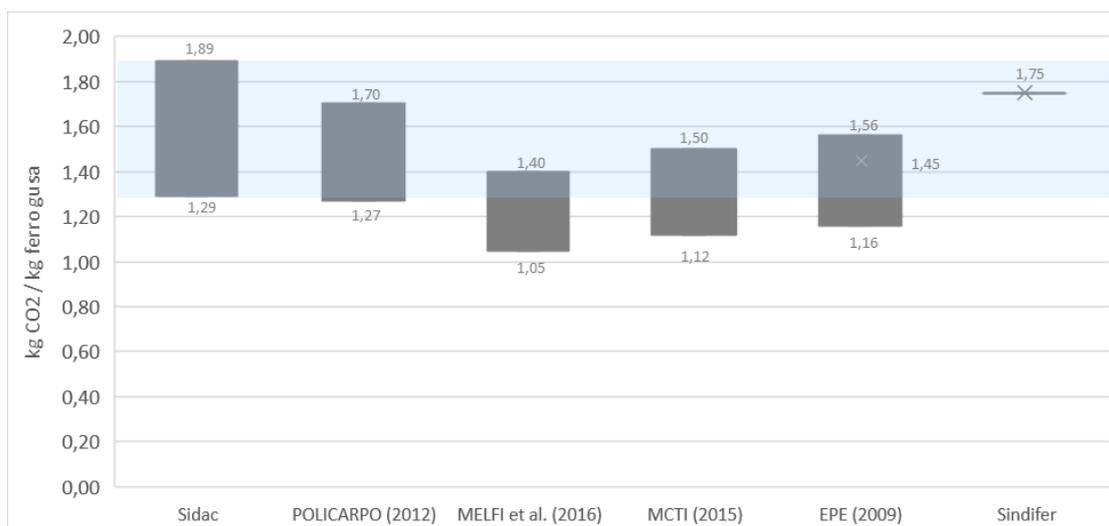


Figura 13. Comparação entre resultados de emissão de CO₂ na produção de 1kg de ferro gusa

Para a produção do aço bruto em usinas semi-integradas com uso de FEA, Policarpo (2012) apresenta a faixa de emissão entre 0,45 e 0,60 kg CO₂/kg aço bruto. A EPE (2009) indica a faixa entre 0,36 e 0,42 kg CO₂/kg aço bruto, mas com um valor mínimo de 0,28 kg CO₂/kg aço bruto. A declaração ambiental de produtos da ArcelorMittal Brasil (2021) apresenta como resultado da categoria de aquecimento global para a etapa de produto (A1-A3) a emissão de 0,88 kg CO₂eq./kg vergalhão de aço.

A faixa de emissões de CO₂ apresentada pelo Sidac compreende os resultados de Policarpo (2012) e de ArcelorMittal Brasil (2021), mas está acima dos resultados de EPE (2009) (Figura 14). Importante observar que o processo do Sidac considera a produção do ferro gusa em alto-forno, produção do aço em FEA e a conformação mecânica em vergalhão, o que pode explicar a faixa de emissões mais ampla que as duas primeiras referências, uma vez que estas podem configurar apenas a etapa de produção do aço em FEA.

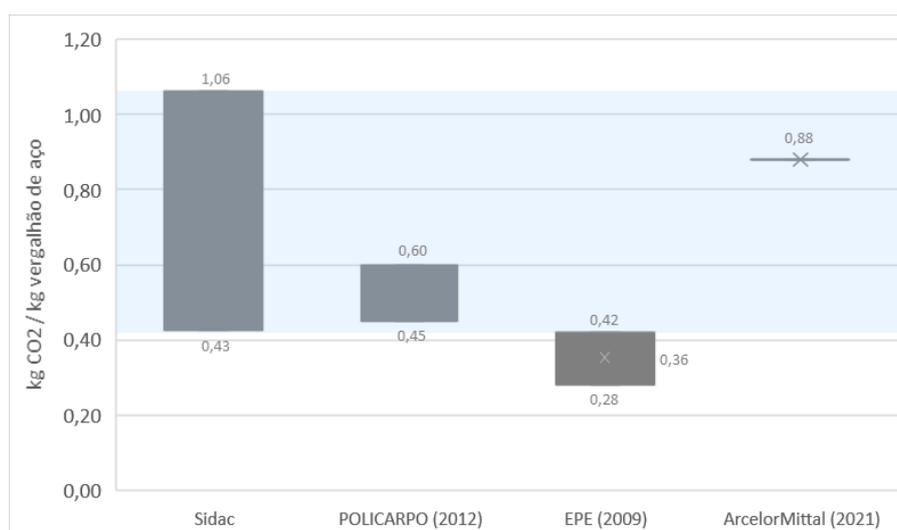


Figura 14. Comparação entre resultados de emissão de CO₂ na produção de 1kg de vergalhão de aço

Alguns dados nacionais de emissão específica para produção do aço nos anos de 1990 apresentam resultados diferenciando a rota tecnológica adotada (Tabela 10). Mas por serem anteriores ao período de dados utilizados para os processos do Sidac, não serão confrontados

diretamente com os resultados obtidos. Porém, apenas para conhecimento, podemos observar que os valores para as usinas semi-integradas com uso apenas de FEA estão em torno de 0,16 kg CO₂/kg aço, enquanto que para usinas que fazem redução direta + uso de FEA o valor está em torno de 0,77 kg CO₂/kg aço. Neste inventário, foram desconsideradas emissões por calcinação, por consumo de combustível de transporte de matérias-primas, pela dessulfurização do ferro e pelo processo de coqueria.

Tabela 10. Emissão específica de CO₂ do setor siderúrgico por grau de integração, de 1990 a 1998. Fonte: MCTI (2002)

Emissão específica (t CO ₂ /tab)								
Total do setor								
1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
1,2200	1,2976	1,2752	1,2742	1,2560	1,3260	1,3166	1,2903	1,3439
Usinas integradas								
1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
1,4951	1,5161	1,5020	1,5051	1,4840	1,5309	1,5508	1,5393	1,5884
Usinas semi-integradas								
1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
0,1600	0,1692	0,1585	0,1609	0,1631	0,1721	0,1679	0,1657	0,1679
Redução direta								
1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
0,7785	0,7774	0,7788	0,7778	0,7612	0,8851	0,8229	0,7161	0,7923

Legenda:

Rotas tecnológicas para produção de aço:

- Integradas: Alto-forno + Aciaria LD
- Redução direta: Redução direta + Forno a arco elétrico (FEA)
- Semi- Integradas: Forno a arco elétrico (FEA)

O processo apresentado na declaração ambiental de produtos da ArcelorMittal Brasil (2021) considera desde a produção do ferro gusa em alto-forno até a conformação final do vergalhão de aço, ou seja, o mesmo adotado pelo Sidac. O resultado de emissão condiz com os dados nacionais dos anos 1990, quando observa a junção de um processo de redução do ferro com o processo de refino em FEA.

6 Considerações finais

O presente trabalho elaborou inventário de ciclo de vida para o vergalhão de aço CA-50 produzido no Brasil, com base em dados extraídos da literatura nacional, com o objetivo de calcular os indicadores de demanda de energia primária e emissão de CO₂, do berço ao portão para inserção no Sidac. Embora tenham sido obtidos poucos dados em comparação com a quantidade de usinas que atua no país, buscou-se fazer o máximo uso possível das informações disponíveis para estimar uma faixa de valores para cada um dos insumos que compõem o inventário do processo produtivo.

Sendo assim, recomenda-se que o setor de siderurgia faça uma coleta de dados primários setorial, junto às usinas brasileiras, contemplando o consumo de insumos através das diferentes rotas tecnológicas e os respectivos resíduos/rejeitos gerados, e complementando com outros itens que poderão compor outros indicadores em futura atualização do Sidac, como consumo de água. A realização de uma coleta de dados padronizada e em grande escala permitirá a revisão dos inventários inseridos por ora no Sidac, com base em informações verificadas e confiáveis, e produzirá um *benchmark* efetivo de desempenho ambiental para o vergalhão de aço utilizado na construção civil brasileira.

7 Referências

ABNT. **NBR 7480 - Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira De Normas Técnicas, 2007.

ANM. **Anuário mineral brasileiro: principais substâncias metálicas**. Brasília: Agência Nacional de Mineração, 2020. *E-book*. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuário-mineral/anuário-mineral-brasileiro/amb_2020_ano_base_2019_revisada2_28_09.pdf

ARAÚJO, E. Q. Balanço energético global 2016 - GERDAU Ouro Branco. *In*: 2017, São Paulo, SP. **38º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades**. São Paulo, SP: ABM Proceedings, 2017. p. 268–313. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/balanco-energetico-global-2016-gerdau-ouro-branco>

ARCELORMITTAL BRASIL. Declaração ambiental do produto: Vergalhões em Barras e Rolos Categorias CA50/CA60/CA25 - Unidade Juiz de Fora. p. 1–2, 2018 a. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/certificados-politicas>

ARCELORMITTAL BRASIL. Declaração ambiental do produto: Barras de Aço Reforçado. Cariacica, Itaúna, João Monlevade, Juiz de Fora e Piracicaba, p. 1–8, 2018 b. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/certificados-politicas>

ARCELORMITTAL BRASIL. Declaração ambiental do produto: Barras de Aço Destinadas a Armadura para Estruturas de Concreto Armado - Unidade Piracicaba. Piracicaba, p. 2, 2019. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/certificados-politicas>

ARCELORMITTAL BRASIL. Environmental Product Declaration. p. 8, 2021. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/certificados-politicas>

AYRES, E. L. P. **LOGÍSTICA DE ABASTECIMENTO DE MINÉRIO DE FERRO A UMA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA**. 2011. - Universidade Federal de Minas Gerais, [s. l.], 2011. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9C4HTG/1/monografia_rev_02.pdf

BARBOSA, M. R. **Caracterização geoambiental da escória de aciaria de cinco estados brasileiros**. 2013. - Universidade Federal de Ouro Preto, [s. l.], 2013. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3317>

BITTENCOURT, J. P. V. **Influência de diferentes vazões de oxigênio e tempos de lança nos parâmetros de processo de um forno elétrico a arco**. 2015. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/133119>

BRAGA JUNIOR, M. M. **Efeito do scalping de quartzo grosso na flotação catiônica reversa de minério de ferro**. 2010. - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, [s. l.], 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/MAPO-88NQ75>

BRISSAC ET. AL. **Complexo minerador de MG**. Itabira: Arte/Cidade e PUC-SP, 2004. *E-book*. Disponível em: https://www.pucsp.br/artecidade/mg_es/portugues/pesquisa.htm

CÂNDIDO, M. R. **Aplicação da transformada Wavelet na análise da qualidade de energia em fornos elétricos a arco**. 2008. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.2008.tde-09022009-181024>

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. **Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética e competitividade**. Rio de Janeiro: BNDES, 2015. v. 41 *E-book*. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/428>

DE PAULA, A. F. S.; PEREIRA, M. A.; CARVALHO, G. L. Influência da Qualidade do Pellet Feed para Dosagem de Insumos na Pelotização. **Semana Acadêmica - Revista Científica**, p. 1–13, 2016. Disponível em: https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/ana_flavia_-_atcc_-_influencia_da_dosagem_de_insumos_na_usina_de_pelotizacao.pdf

DHUP DIRECTION DE L'HABITAT DE L'URBANISME ET DES PAYSAGES. Appel à contribution relatif aux règles de comptabilisation des impacts environnementaux des laitiers de haut fourneau Table des matières. Paris, France, p. 1–11, 2021. Disponível em: Comunicação pessoal

EPE. **Caracterização do uso da energia no setor siderúrgico brasileiro - Estudos setoriais - Nota técnica DEA 02/09**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2009. *E-book*. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/20090430_2%5B1%5D.pdf

EPE. **Análise da eficiência energética em seguimentos industriais selecionados - Segmento cadeia siderúrgica**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2018. *E-book*. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-314/topico-407/Produto 5 - Relatorio da cadeia siderúrgica.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-314/topico-407/Produto%205%20-%20Relatorio%20da%20cadeia%20siderurgica.pdf)

GERDAU AÇOS LONGOS S. A. Declaração Ambiental do Produto: Vergalhão CA 50 - Unidade Araçariguama. p. 2, 2021. Disponível em: [https://www2.gerdau.com.br/sites/default/files/downloadable_files/Declaração Ambiental_UI Araçariguama_jul 2022.pdf](https://www2.gerdau.com.br/sites/default/files/downloadable_files/Declaração%20Ambiental_UI%20Araçariguama_jul%202022.pdf)

GERDAU AÇOS LONGOS S. A. Declaração Ambiental do Produto: Vergalhão CA 50 e outros - Unidade Aço Norte. p. 2, 2022 a. Disponível em: [https://www2.gerdau.com.br/sites/default/files/downloadable_files/Declaração Ambiental_UI Açonorte_jul 2022.pdf](https://www2.gerdau.com.br/sites/default/files/downloadable_files/Declaração%20Ambiental_UI%20Açonorte_jul%202022.pdf)

GERDAU AÇOS LONGOS S. A. Declaração Ambiental do Produto: Vergalhão CA 50 e outros - Unidade Cearense. p. 1, 2022 b. Disponível em: [https://www2.gerdau.com.br/sites/default/files/downloadable_files/Declaração Ambiental_UI Cearense_jun 2022.pdf](https://www2.gerdau.com.br/sites/default/files/downloadable_files/Declaração%20Ambiental_UI%20Cearense_jun%202022.pdf)

GERDAU AÇOS LONGOS S. A. Declaração Ambiental do Produto: Vergalhão CA 50 e outros - Unidade Riograndense. p. 2, 2022 c. Disponível em: [https://www2.gerdau.com.br/sites/default/files/downloadable_files/Declaração Ambiental_UI Riograndense_jul 2022.pdf](https://www2.gerdau.com.br/sites/default/files/downloadable_files/Declaração%20Ambiental_UI%20Riograndense_jul%202022.pdf)

GERDAU AÇOS LONGOS S. A. Declaração Ambiental do Produto: Vergalhão CA 50 e outros - Unidade Divinópolis. p. 2, 2022 d. Disponível em: [https://www2.gerdau.com.br/sites/default/files/downloadable_files/Declaração Ambiental_UI Divinópolis_jul 2022.pdf](https://www2.gerdau.com.br/sites/default/files/downloadable_files/Declaração%20Ambiental_UI%20Divinopolis_jul%202022.pdf)

GERDAU AÇOS LONGOS S. A. Declaração Ambiental do Produto: Vergalhão CA 50 e outros - Unidade Cosigua. p. 3, 2022 e. Disponível em: [https://www2.gerdau.com.br/sites/default/files/downloadable_files/Declaração Ambiental_UI Cosigua_jul 2022.pdf](https://www2.gerdau.com.br/sites/default/files/downloadable_files/Declaração%20Ambiental_UI%20Cosigua_jul%202022.pdf)

Cosigua_jul 2022.pdf

IABR. **Relatório de Sustentabilidade 2014**. [S. l.]: Instituto Aço Brasil, 2014. *E-book*. Disponível em: [https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2019/08/Relatorio de Sustentabilidade_2014_web.pdf](https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2019/08/Relatorio_de_Sustentabilidade_2014_web.pdf)

IABR. **Relatório de Sustentabilidade 2018**. [S. l.]: Instituto Aço Brasil, 2018. *E-book*. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade2018/assets/pdfs/Aco-Brasil-Completo.pdf>

IABR. **Mercado Brasileiro do Aço: Análise setorial e regional. Séries históricas até 2019**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2020 a. *E-book*. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2020/08/MBA_Edição-2020.pdf

IABR. **Relatório de Sustentabilidade 2020**. [S. l.]: Instituto Aço Brasil, 2020 b. *E-book*. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/assets/pdf/PDF-2020-Relatorio-Aco-Brasil-COMPLETO.pdf>

IABR. **Informações complementares: banco de dados do Instituto Aço Brasil - Ano Base 2020**. [S. l.]: Instituto Aço Brasil, 2022. *E-book*. Disponível em: Comunicação pessoal

IBGE. Pesquisa Industrial Anual (PIA) – Produto, Anos de 2015 a 2019. Indústria e construção – dados estatísticos. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9044-pesquisa-industrial-anual-produto.html?=&t=downloads>

ISO. **14044 - Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines**. Switzerland: ISO, 2006.

MCTI. **Primeiro Inventário Brasileiro De Emissões E Remoções Antrópicas De Gases De Efeito Estufa - Relatórios De Referência: Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais e por uso de solventes**. Brasília: Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação, 2002. *E-book*. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>

MCTI. **Terceiro Inventário Brasileiro De Emissões E Remoções Antrópicas De Gases De Efeito Estufa - Relatórios De Referência: Setor Processos Industriais, Produção De Metais**. Brasília: Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação, 2015. *E-book*. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>

MCTI. **Quarto Inventário Nacional De Emissões E Remoções Antrópicas De Gases De Efeito Estufa - Relatórios De Referência: Setor Processos Industriais e Uso de Produtos**. Brasília: Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação, 2020. *E-book*. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>

MELFI, A.; MISI, A.; CORDADNI, U.; CAMPOS, D. **Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. *E-book*. Disponível em: <http://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-7006.pdf>

MME. **Anuário estatístico 2021 - Setor Metalúrgico Brasileiro**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2021. *E-book*. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario->

estatistico-do-setor-metallurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos

MONTEIRO, M. de A. **Siderurgia e carvoejamento na Amazônia: drenagem energético-material e pauperização regional**. 1996. - Universidade Federal do Pará, [s. l.], 1996. Disponível em: http://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/2957/1/Dissertacao_SiderurgiaCarvoejamentoAmazonia.pdf

MOURÃO, J. M. **Aspectos conceituais relativos à pelotização de minério de ferro**. Vitória ES: ABM - Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2017. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/2594-357x-30064>

MTPAC. **Corredores Logísticos Estratégicos: Complexo de Minério de Ferro**. Brasília: Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil, 2018. *E-book*. Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/relatorio_corredores_logisticos_minerio_v1-1.pdf

POLICARPO, F. F. **Minério de ferro: desafios para as indústrias mineral e siderúrgica**. 2012. - Universidade Federal de Minas Gerais, [s. l.], 2012. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9CAH4A/1/monografia__vers_o_final__fl_vio_ferreira_policarpo.pdf

RAMOS, R. A. **Caracterização do pó de aciaria elétrica e estudo da viabilidade de processos de aproveitamento**. 2013. - Universidade Federal do Ceará, [s. l.], 2013. Disponível em: <https://www.repositoriobib.ufc.br/000021/0000212b.pdf>

REMUS, R.; ROUDIER, S.; AGUADO-MONSONET, M. A.; DELGADO SANCHO, L. **Best available techniques - iron and steel production**. [S. l.: s. n.]. v. BREF-ISE-book. Disponível em: <https://doi.org/10.2791/97469>

SAADE, M. R. M. **Influência da alocação de impactos na indústria siderúrgica sobre a avaliação de ciclo de vida de cimentos**. 2013. - Universidade Estadual de Campinas, [s. l.], 2013. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/258517>

SABLOWSKI, A. R. M. **Balanço de materiais na gestão ambiental da cadeia produtiva do carvão vegetal para produção de ferro gusa em Minas Gerais**. 2008. - Universidade de Brasília, [s. l.], 2008. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/811>

SILVA, J. N. S. **Siderurgia**. Belém: UFSM, 2011. *E-book*. Disponível em: http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_ctrl_proc_indust/tec_metal/siderurgia/161012_siderurgia.pdf

TAVARES, S. F. **METODOLOGIA DE ANÁLISE DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS BRASILEIRAS**. 2006. - Universidade Federal de Santa Catarina, [s. l.], 2006. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/teses/TESE_Sergio_Fernando_Tavares.pdf

VALE S.A. Formulário 20-F: Relatório anual, de acordo com a seção 13 ou 15(d) da Lei de mercado de capitais de 1934. Rio de Janeiro, p. 213, 2020. Disponível em: http://www.vale.com/PT/investors/information-market/annual-reports/20f/20FDocs/Vale_20-F_FY2020_Final_Version_pt.pdf

VASCONCELOS, J. A.; GOMES DE JESUS, R.; DE SOUZA SANTOS, Y. C. Panorama do consumo

energético na produção brasileira de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero. **Latin American Journal of Energy Research**, v. 8, n. 2, p. 37–48, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.21712/lajer.2021.v8.n2.p37-48>

WANDEKOKEN, T. P. **Análise da adição de gusa líquido em FEA através de dados operacionais e balanço térmico**. 2014. - Instituto Federal do Espírito Santo, [s. l.], 2014. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/310#:~:text=Ver item-,Análise da adição de gusa líquido em FEA,dados operacionais e balanço térmico&text=RESUMO%3A As aciarias elétricas e,rota à base de sucata.>

8 Anexo – Fluxogramas detalhados do processo elementar

PROCESSO DE PRODUÇÃO USINA INTEGRADA

Rota tecnológica A

- Processo de redução indireta (Alto-forno)

- Processo de refino através de Aciaria LD (oxigênio)

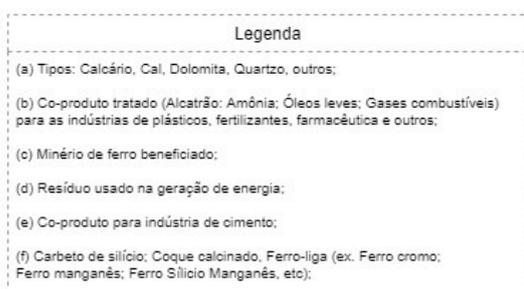
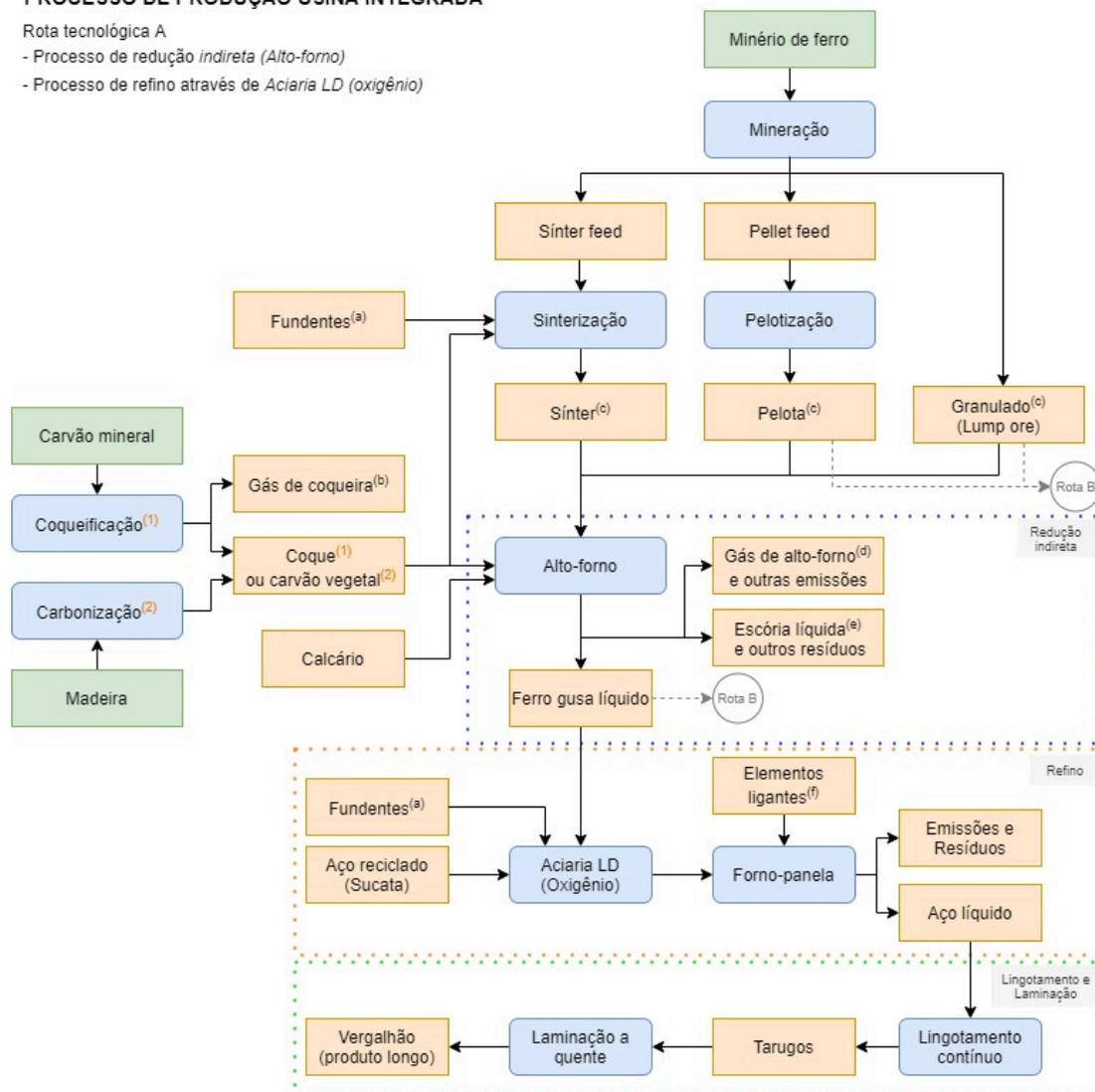


Figura 15. Fluxo de produção do vergalhão de aço em usina integrada através da rota tecnológica de Alto forno e Aciaria LD/BOF.

PROCESSO DE PRODUÇÃO USINA SEMI-INTEGRADA

Rota tecnológica B

- Processo de redução direta (DRI)

- Processo de refino através de Aciaria Elétrica (Forno a arco)

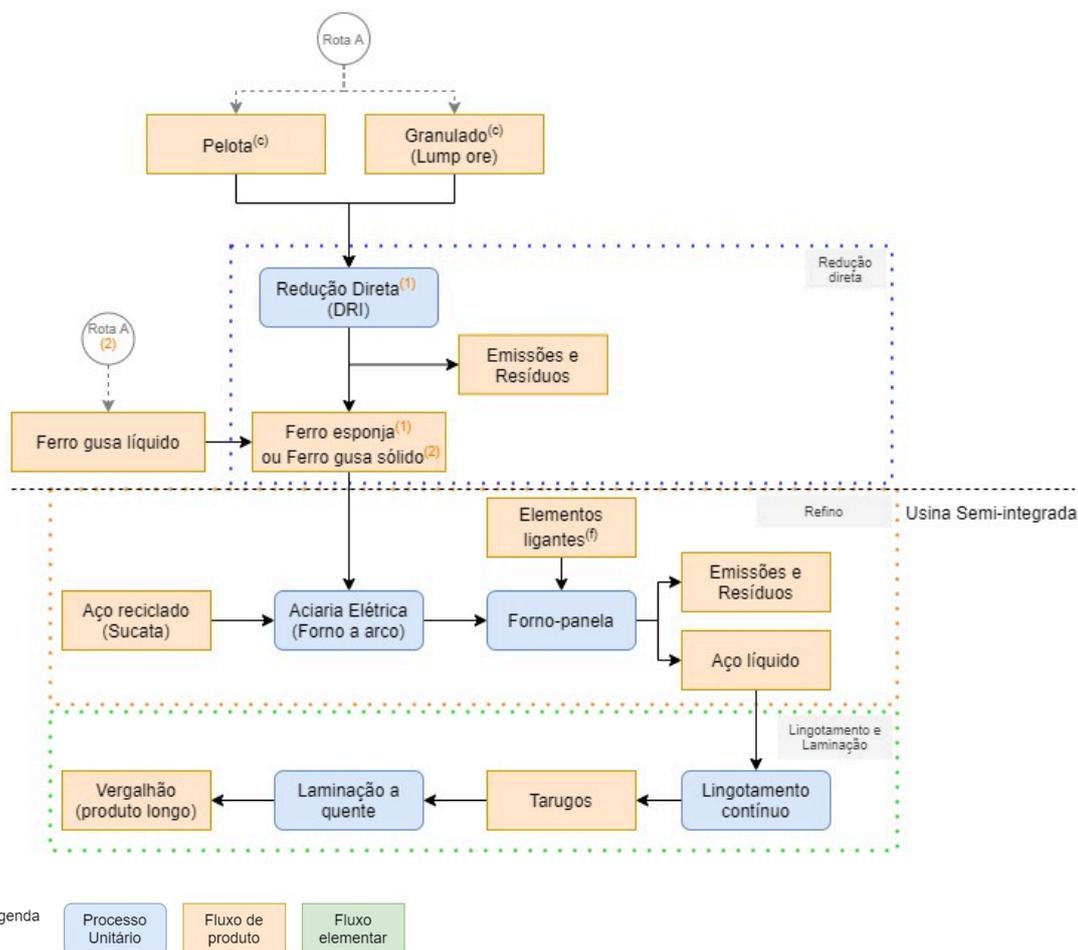


Figura 16. Fluxo de produção do vergalhão de aço em usina semi-integrada através da rota tecnológica de aciaria elétrica (forno elétrico a arco - FEA).

9 Anexo - Checagem de informações disponíveis nas referências bibliográficas

Através das tabelas a seguir é possível identificar de forma objetiva o que foi considerado para cada publicação durante o levantamento dos dados. A Tabela 11 apresenta as referências de 01 a 17. A Tabela 12 apresenta as referências de 18 a 33.

- | | | |
|-------------------------------------|------------------------------------|--|
| 1. SAADE, 2013 | 7. TAVARES, 2006 | 13. ARAÚJO, 2017 |
| 2. SABLowski, 2008 | 8. REMUS <i>et al.</i> , 2013* | 14. EPE, 2009 |
| 3. CARVALHO; MESQUITA; ARAÚJO, 2015 | 9. BRISSAC <i>et al.</i> , 2004 | 15. IABR, 2022 |
| 4. CÂNDIDO, 2008 | 10. AYRES, 2011 | 16. VASCONCELOS; GOMES DE JESUS; DE SOUZA SANTOS, 2022 |
| 5. ARCELORMITTAL BRASIL, 2018a | 11. ARCELORMITTAL BRASIL, 2019 | 17. BRAGA JUNIOR, 2010 |
| 6. ARCELORMITTAL BRASIL, 2018b | 12. GERDAU AÇOS LONGOS S. A., 2021 | |

Tabela 11. Informações oferecidas pelas referências 01 a 17

Informações que devem ser verificadas	01	02	03	04	05	06	07	08*	09	10	11	12	13	14	15	16	17
Período a que os dados se referem	2009 2010	NI	2013	2006	NI	2018	2004 2005	2006/ 7 2009	2003 2004	2011	2015	2021	2016	2007	2020	2018	2008
Local (região, cidade, estado) a que os dados se referem	NI	MG	BR	RJ	MG	ES MG SP	NI	EURO PA	ES MG	MG	SP	SP	MG	BR	BR	MG	MG
Fluxograma do processo	S	S	S	S	N	N	N	S	N	N	N	N	S	S	N	N	N
Detalhamento do processo unitário (identificação do processo produtivo)	S	S	N	S	N	N	N	S	N	N	N	N	S	S	S	S	N
Processo unitário possui diferencial (fluxos ou etapas específicas)	S	N	N	S	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Indica a representatividade dos dados	N	S	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N	S	S	S	S	S
Quantidade de empresas consultadas	1	8	29	1	1	1	0	27 países	N	1	1	1	1	NI	N	19mina 18 usina	1

Informações que devem ser verificadas	01	02	03	04	05	06	07	08*	09	10	11	12	13	14	15	16	17
Publicação apresenta dados primários nacionais	S	S	N	S	S	S	N	N	S	S	S	S	S	N	N	N	S
Publicação apresenta dados estimados nacionais	N	N	S	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N	S	S	S	N
Adota algum critério de corte	N	N	N	NI	NI	NI	N	N	N	N	NI	NI	NI	NI	NI	NI	N
Especificadas as incertezas dos fluxos	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Possui fluxos de insumos materiais	S	S	N	S	S	S	N	S	N	N	S	S	S	S	S	S	N
Possui fluxos de insumos energéticos	S	S	S	S	N	N	S	S	N	N	N	N	S	S	S	S	N
Possui fluxos de água	N	S	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N	S	N	N	N	N
Possui fluxos de geração de resíduos	S	S	N	N	N	S	N	S	N	N	N	N	N	N	N	S	S
Indicada unidade de referência dos fluxos	S	S	S	S	N	S	S	S	S	S	N	N	S	S	S	S	S
Unidade de referência é a mesma da unidade declarada adotada para o Sidac	S	N	N	S	N	S	N	S	S	S	N	N	N	N	N	N	N
Especificados os fatores para conversão de unidades dos fluxos (ex.: densidades)	N	N	N	N	S	N	N	N	N	N	S	S	S	N	N	N	N
Necessário adotar fatores de conversão de unidades não especificados na publicação	S	N	S	N	N	N	S	N	N	N	N	N	S	S	S	S	N
Critério de alocação especificado na publicação	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Publicação apresenta balanço de massa	N	S	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N	N	S	N	N	N
Identificado os tipos de transporte das matérias-primas	N	N	N	N	N	S	N	N	S	S	S	S	N	N	N	N	N
Informadas as distâncias de transporte das matérias-primas até a fábrica	N	S	N	N	S	S	N	N	S	S	S	S	N	N	N	N	N

Legenda: N: Não; S: Sim; NA: Não se aplica; NI: Não Identificado

- | | | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 18. MELFI <i>et al.</i> , 2016 | 24. MONTEIRO, 1996 | 30. GERDAU AÇOS LONGOS S. A., 2022d |
| 19. MOURÃO, 2017 | 25. MTPAC, 2018 | 31. GERDAU AÇOS LONGOS S. A., 2022e |
| 20. DE PAULA; PEREIRA; CARVALHO, 2016 | 26. EPE, 2018 | 32. WANDEKOKEN, 2014 |
| 21. MME, 2021 | 27. GERDAU AÇOS LONGOS S. A., 2022a | 33. BARBOSA, 2013 |
| 22. ANM, 2020 | 28. GERDAU AÇOS LONGOS S. A., 2022b | |
| 23. VALE S.A., 2020 | 29. GERDAU AÇOS LONGOS S. A., 2022c | |

Tabela 12. Informações oferecidas pelas referências 18 a 33

Informações que devem ser verificadas	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Período a que os dados se referem	NI	NI	NI	2020	2019	2020	1995	2018	2018	2022	2022	2022	2022	2022	2012	2012
Local (região, cidade, estado) a que os dados se referem	MG	NI	NI	BR	BR	MG	PA	BR	BR	PE	CE	RS	MG	RJ	NI	SP;RJ; RS;BA
Fluxograma do processo	N	S	S	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N	N	S	S
Detalhamento do processo unitário (identificação do processo produtivo)	N	S	S	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N	N	S	S
Processo unitário possui diferencial (fluxos ou etapas específicas)	N	S	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S	S
Indica a representatividade dos dados	S	N	N	S	S	S	N	S	N	N	N	N	N	N	N	S
Quantidade de empresas consultadas	1	NI	NI	NI	1	1	NI	NA	NI	1	1	1	1	1	1	1
Publicação apresenta dados primários nacionais	S	N	N	N	S	S	S	N	N	S	S	S	S	S	S	S
Publicação apresenta dados estimados nacionais	N	N	N	S	N	N	N	S	S	N	N	N	N	N	N	N
Adota algum critério de corte	N	N	N	N	N	N	N	N	N	NI	NI	NI	NI	NI	N	N
Especificadas as incertezas dos fluxos	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

Informações que devem ser verificadas	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Possui fluxos de insumos materiais	N	S	S	S	N	S	N	N	N	S	S	S	S	S	S	S
Possui fluxos de insumos energéticos	N	S	S	N	N	N	S	N	S	N	N	N	N	N	S	N
Possui fluxos de água	N	S	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Possui fluxos de geração de resíduos	S	S	S	N	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S	S
Indicada unidade de referência dos fluxos	S	S	S	S	S	N	S	S	S	N	N	N	N	N	S	S
Unidade de referência é a mesma da unidade declarada adotada para o Sidac	N	S	S	N	N	N	S	S	N	N	N	N	N	N	S	S
Especificados os fatores para conversão de unidades dos fluxos (ex.: densidades)	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S	S	S	S	S	N	N
Necessário adotar fatores de conversão de unidades não especificados na publicação	N	N	N	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N	N
Critério de alocação especificado na publicação	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Publicação apresenta balanço de massa	N	S	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S	N
Identificado os tipos de transporte das matérias-primas	N	N	N	N	N	N	S	S	N	S	S	S	S	S	N	N
Informadas as distâncias de transporte das matérias-primas até a fábrica	N	N	N	N	N	N	S	N	N	S	S	S	S	S	N	N

Legenda: N: Não; S: Sim; NA: Não se aplica; NI: Não Identificado