



## *A ilusão dos indicadores de segurança na indústria de mineração*

**Raoni Rocha, Eugênio Paceli Hatem Diniz, Mário Parreiras & Ildeberto Almeida**

**Para citar este artigo:** Rocha, R., Paceli Hatem Diniz, E., Parreiras, M., & Almeida, I. (2025). The illusion of safety indicators in the mining industry. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/10803548.2025.2580782>

**Para acessar o artigo original (em inglês):** <https://doi.org/10.1080/10803548.2025.2580782>



Published online: 24 Nov 2025.



Submit your article to this journal



Article views: 84



View related articles



View Crossmark data





## A ilusão dos indicadores de segurança na indústria de mineração

Raoni Rocha <sup>a</sup>, Eugênio Paceli Hatem Diniz <sup>b</sup>, Mário Parreiras <sup>c</sup> and Ildeberto Almeida <sup>d</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Engenharia de Produção, Administração e Economia, Universidade Federal de Ouro Preto (Ufop), Brasil; <sup>b</sup> Secretaria Estadual Avançada, Fundação Jorge Duprat Figueiredo para a Saúde e Segurança Ocupacional (Fundacentro), Brasil; <sup>c</sup> Superintendência Regional do Trabalho e Emprego de Minas Gerais, Ministério do Trabalho e Previdência Social, Brasil; <sup>d</sup> Faculdade de Medicina de Botucatu, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Unesp), Brasil

### RESUMO

*Objetivos.* Este estudo avalia a eficácia dos indicadores de segurança no setor de mineração, questionando sua capacidade de representar com precisão os riscos de acidentes graves e catastróficos. Indicadores como a taxa de frequência, a taxa de gravidade e a pirâmide de Bird sugerem uma correlação entre eventos de gravidade variável, criando a percepção de um ambiente seguro quando suas métricas são baixas. No entanto, desastres como as explosões na refinaria da BP Texas e na plataforma Deepwater Horizon ocorreram apesar de indicadores de segurança aparentemente ideais. Apesar da relevância do tema, há poucas investigações sistemáticas sobre a eficácia desses indicadores, particularmente na indústria de mineração. *Métodos.* Para preencher essa lacuna, o estudo analisou dados públicos e privados de quatro empresas do setor, utilizando uma abordagem de métodos mistos para examinar a relação entre eventos frequentes e menos graves e incidentes raros e mais graves. *Resultados.* Não foi indicada nenhuma correlação significativa entre esses eventos, contradizendo a lógica da pirâmide de Bird. Além disso, os dados de segurança analisados apresentam vieses que comprometem sua confiabilidade. *Conclusão.* Este estudo sugere a substituição dos indicadores tradicionais por novas métricas de gestão e a incorporação da análise de atividades para melhorar a prevenção de acidentes e minimizar riscos catastróficos.

### PALAVRAS-CHAVE

Indicadores de segurança; pirâmide de Bird; gestão da segurança; confiabilidade; mineração

### 1. Introdução



Em diferentes contextos de mineração ao redor do mundo, estudos recentes revelaram tanto a diversidade e a complexidade dos riscos ocupacionais quanto as várias estratégias empregadas para mitigá-los. Na África, onde predomina a mineração artesanal e de pequena escala, Ajith et al. [1], por meio de questionários e entrevistas, identificaram a influência de fatores laborais, institucionais e sociais na ocorrência de lesões graves nas minas do Quênia. Da mesma forma, Kyeremateng-Amoah et al. [2], ao analisar 72 casos de acidentes em minas ganesas, destacaram fraturas e contusões causadas por desabamentos e quedas como os tipos mais frequentes de lesões, evidenciando deficiências nos sistemas de registro e monitoramento. Em países com mineração em grande escala e estruturas regulatórias sólidas, como a Austrália, Jackson [3] mapeou 51 incidentes graves em minas de carvão e metal, identificando falhas de controle, comunicação e supervisão como fatores-chave contribuintes. Também na Austrália, Rubin et al. [4] examinaram como a cultura e o clima de segurança influenciam os comportamentos de risco, enquanto Knights e Yeates [5] enfatizaram a liderança do país na automação de processos de mineração, observando ganhos significativos em produtividade e segurança, mas também desafios contínuos na integração tecnológica. Esses exemplos mostram que, apesar das diferenças nos contextos de produção e regulamentação, existem padrões recorrentes de vulnerabilidade e oportunidades de melhoria.

No Brasil, compreender essas especificidades à luz das experiências internacionais é essencial para orientar estratégias mais eficazes de prevenção e gestão da segurança. A indústria de mineração enfrentou, nas últimas décadas, desafios significativos na gestão da segurança. Os desastres causados pelo rompimento de barragens de rejeitosem Mariana (em 2015) e Brumadinho (em 2019) expuseram fragilidades nos modelos de gestão adotados, levantando dúvidas sobre sua eficácia na prevenção de acidentes. Um dos principais pontos de debate nesse campo diz respeito à validade dos indicadores de segurança utilizados, ou seja, se esses indicadores refletem verdadeiramente as condições de trabalho e a segurança real dos trabalhadores. Os principais indicadores de segurança utilizados na indústria contemporânea incluem: a taxa de frequência (TF),

Esses indicadores sugerem uma correlação entre eventos de diferentes níveis de gravidade, reforçando a percepção de um ambiente seguro quando a FR e a SR são baixas ou a base da pirâmide de Bird é reduzida. No entanto, eles podem não refletir adequadamente o controle de riscos, especialmente para os perigos mais críticos. Eventos catastróficos, como as explosões na refinaria da British Petroleum no Texas ou na plataforma Deepwater Horizon, destacam essa limitação [6]. Apesar disso, existem poucos estudos que analisam sistematicamente a eficácia desses indicadores, particularmente na indústria de mineração [7].

Este estudo aborda essa lacuna, apresentando uma análise de dados empíricos que verifica a correlação entre eventos de diferentes níveis de gravidade, com base em quatro estudos de caso que abrangem longos períodos na indústria de mineração. Dois desses casos envolvem a Vale S.A. e a Samarco Mineração S.A., grandes mineradoras e exportadoras brasileiras de minério de ferro associadas às piores tragédias ambientais e humanitárias do país. Em 2015, o rompimento da Barragem do Fundão, em Mariana (Minas Gerais, Brasil), operada pela Samarco, resultou em 19 mortes e foi considerado o pior desastre ambiental do Brasil. Em 2019, a barragem da mina Córrego do Feijão (Brumadinho, Minas Gerais, Brasil), de propriedade da Vale, também rompeu, causando 270 mortes, três desaparecidos e danos ambientais incalculáveis. Os outros dois estudos de caso envolvem indústrias siderúrgicas brasileiras que também operam minas de minério de ferro. Devido à inclusão e e de dados públicos e privados, mantemos o anonimato dessas empresas, referindo-nos a elas como Indústria X e Indústria Y.

Realizamos análises qualitativas e quantitativas de relatórios públicos da Samarco e da Vale ao longo de 15 e 18 anos, respectivamente, bem como dados públicos e privados das Indústrias X e Y cobrindo períodos de 18 e 21 anos. O estudo tem como objetivo examinar a relação entre os indicadores de segurança, as taxas geradas por essas empresas e os eventos ocorridos, proporcionando assim uma análise aprofundada do assunto. Por fim, discutimos a necessidade de avanços no desenvolvimento de indicadores e na prevenção de acidentes, enfatizando a importância de integrar a análise de atividades e a complexidade do trabalho nesse processo.

**CONTACT** Raoni Rocha  raoni@ufop.edu.br  Universidade Federal de Ouro Preto Escola de Minas, Campus Morro do Cruzeiro s/n, 35400-000, Ouro Preto, MG, Brazil

© 2025 Central Institute for Labour Protection – National Research Institute (CIOP-PIB)

que relaciona o número de acidentes com as horas trabalhadas; a taxa de gravidade (TG), que considera dias perdidos, transferidos ou debitados; e a pirâmide de Bird (PB), que correlaciona incidentes, quase acidentes e acidentes. Além disso, muitas empresas exibem registros de dias sem acidentes em painéis informativos.

## 2. Referencial teórico

### 2.1. Indicadores tradicionais de segurança

A FR e a SR são taxas de prevalência de acidentes calculadas em relação ao número total de ocorrências e à população exposta. Essas taxas, baseadas no número total de horas-trabalhador em um determinado período, são frequentemente utilizadas para projetar a probabilidade de acidentes quando uma empresa atinge 10-horas-trabalhador de exposição ao risco. Nesse modelo, presume-se que quanto mais próximas essas taxas estiverem de zero, menor será a probabilidade de acidentes e mais segura será a empresa [8].

A pirâmide de Bird, inicialmente desenvolvida por Heinrich [9], baseia-se na premissa de que acidentes graves são estatisticamente precedidos por incidentes e quase acidentes. Com uma proporção de 1 lesão grave para 29 lesões leves e 300 incidentes sem lesões, Heinrich argumentou que “a lesão grave pode resultar do primeiro acidente ou de qualquer outro acidente do grupo” [9, p.27]. A suposição é que eventos de alta gravidade e baixa gravidade compartilham causas semelhantes, o que significa que um aumento nos acidentes leves indicaria, por correlação, um aumento nos acidentes graves, sugerindo uma relação preditiva entre eles.

Essa abordagem foi refinada por Bird e Germain [10], que analisaram 1.753.498 acidentes relatados por 297 empresas e estabeleceram uma nova proporção: 1 lesão grave ou grave (topo da pirâmide) para 10 lesões leves (terceiro nível da pirâmide) para 30 incidentes com danos materiais (segundo nível da pirâmide) para 600 incidentes sem lesões ou danos visíveis (primeiro nível da pirâmide). A proporção 1:10:30:600 foi amplamente adotada em ambientes empresariais como um modelo de prevenção (Figura 1).

Certos aspectos desses estudos merecem atenção. Em primeiro lugar, a proporção observada foi estabelecida por meio de análise de documentos e entrevistas com trabalhadores, levando em consideração suas percepções. Assim, os autores reconheceram que a proporção da pirâmide pode variar entre as empresas: “Não significa necessariamente que a proporção será idêntica para qualquer grupo ocupacional ou organização em particular” [10, p. 5].

Além disso, o modelo propõe uma correlação causal entre a base e o topo da pirâmide, sugerindo que a prevenção de eventos graves (no topo) requer o tratamento de eventos menores (na base):



Figura 1. Pirâmide de segurança [10].

As relações 1–10–30–600 na proporção indicam claramente como é insensato direcionar nossos principais esforços apenas para os relativamente poucos que resultam em lesões graves ou incapacitantes, quando há tantas oportunidades significativas que fornecem uma base muito maior para um controle mais eficaz das perdas totais por acidentes. [10, p. 5].

Assim, embora as pirâmides de Heinrich e Bird não definam uma proporção fixa entre seus níveis, ambas sugerem uma correlação entre acidentes graves, acidentes menores, danos materiais e incidentes sem ferimentos ou danos visíveis. Essa relação tornaria a ferramenta útil para avaliar o desempenho geral da gestão de segurança das empresas [8].

### 2.2. Perspectivas críticas sobre os indicadores tradicionais

Apesar da popularidade dessas taxas, é essencial avaliar a relação entre as estatísticas de acidentes e a segurança real do sistema [11]. Nesse sentido, FR, SR e BP têm enfrentado críticas desde a década de 1990. Copping [12] apontou que o número de dias sem acidentes não reflete a verdadeira segurança do ambiente. Da mesma forma, Hale [13] argumenta que a noção de que a prevenção de acidentes menores reduz os acidentes graves carece de suporte empírico, enfatizando a necessidade de abordagens específicas para compreender as causas dos acidentes.

As explosões na fábrica da Esso em Langford, Austrália (1998, resultando em duas mortes) e nas instalações da BP no Texas (2005, resultando em 15 mortes e quase 200 feridos) exemplificam essa lógica. Hopkins [14] destaca o erro estratégico cometido pela Esso, que considerou seu processo seguro devido ao FR ser inferior à média do setor entre 1990 e 1998. Da mesma forma, a comissão independente liderada pelo grupo Baker, que investigou o acidente nas instalações da BP no Texas, revelou que a empresa comemorou três anos de queda nos FRs antes do desastre. O relatório concluiu que “a BP interpretou erroneamente a melhoria nas taxas de lesões pessoais como uma indicação de desempenho aceitável em termos de segurança do processo em suas refinarias nos Estados Unidos” [15, p. 59].

Assim como TF e TG, a pirâmide de Bird também é criticada por sua lógica de aplicação. Muitos acidentes graves ou fatais ocorreram quando o número de incidentes menores era baixo, por exemplo, as explosões na refinaria Tesoro, na mina Massey Energy e nas instalações da BP, todas nos EUA em 2010 [16]. O caso da plataforma Deepwater Horizon é ainda mais emblemático: em 2010, a empresa operava sem acidentes há 7 anos quando uma explosão resultou em 11 mortes e no maior derramamento de óleo da história dos EUA. Sete horas antes do desastre, quatro gerentes seniores visitaram a plataforma “para parabenizar a tripulação por essa conquista e identificar quaisquer lições e es que pudessem ser transferidas para outras embarcações da frota” [6, p. 1422].

### 2.3. Evidências empíricas e controvérsias em curso

Apesar dos exemplos e das inúmeras críticas aos indicadores, poucos estudos investigaram sistematicamente sua relação com eventos reais e, entre aqueles que o fizeram, os resultados são controversos. Por um lado, Gallivan et al. [17] identificaram variações significativas nas proporções da pirâmide de Bird em estudos sobre acidentes de trânsito e ambientes hospitalares entre 1993 e 2003. Da mesma forma, Bellamy [18], ao analisar aproximadamente 23.000 acidentes graves na Holanda entre 1998 e 2009, concluiu que a correlação entre incidentes e acidentes graves ocorre apenas em eventos com riscos semelhantes. Por outro lado, Marshall et al. [8] analisaram dados de mais de 50.000 empresas chilenas ao longo de 28 meses e concluíram que, na prática, a pirâmide de Bird continua válida. Segundo os autores, “a ocorrência de acidentes menores é um sinal útil para avaliar e prever o desempenho geral de segurança de uma empresa” [8, p. 180].

Se as pesquisas sobre indicadores clássicos de segurança são escassas e controversas, os estudos focados na indústria de mineração são ainda mais raros. Yorio e Moore [7] analisaram dados de uma empresa de mineração entre 2000 e 2012 e concluíram que a redução de incidentes de baixa gravidade não afeta a probabilidade de fatalidades. Como limitação, os autores destacam o uso de dados de uma única empresa e sugerem que estudos futuros possam explorar se há ou não causas comuns no contexto dos estabelecimentos de mineração entre incidentes de SST e fatalidades [7].

## 3. Métodos

Este estudo adotou uma abordagem de métodos mistos, analisando dados quantitativos e qualitativos de quatro empresas do setor de mineração durante longos períodos de tempo.

### 3.1. Acesso aos dados

Vale S.A. e a Samarco Mineração S.A. apresentam seus resultados em relatórios disponíveis em seus sites (por exemplo, 19–22). Analisamos dados públicos abrangendo 18 anos para a Vale, incluindo Relatórios de Sustentabilidade (2006-2019) e Relatórios Integrados (2020-2023), e 15 anos para a Samarco, usando Relatórios de Sustentabilidade (2009-2023).

Os dados das Indústrias X e Y são predominantemente privados. Embora ambas publiquem relatórios, muitos têm registros ausentes ou incompletos.

A maioria das informações foi obtida diretamente de relatórios internos de tratamento de anomalias, acessados por meio de projetos de pesquisa realizados nessas indústrias. O estudo abrange um período de 18 anos (2006–2023) para a Indústria X e 21 anos (2003–2023) para a Indústria Y.

Os dados publicados pela Vale incluem apenas a taxa de frequência de acidentes (correspondente ao terceiro nível da pirâmide de Bird) e os números absolutos de lesões de alto potencial (HPIs) e/ou fatalidades (correspondentes ao topo da pirâmide). Portanto, no caso da Vale, a comparação será feita entre uma taxa e um número absoluto, o que difere das outras empresas estudadas. Em contrapartida, a Samarco publica números absolutos para incidentes ou quase acidentes (primeiro nível da pirâmide), acidentes leves (terceiro nível da pirâmide) e lesões graves ou mortes (topo da pirâmide). Uma pequena parte dos dados não estava disponível e foi estimada com base na média dos dados restantes. Para as Indústrias X e Y, foram acessados dados completos para todos os quatro níveis da pirâmide: incidentes ou quase acidentes (primeiro nível), danos materiais (segundo nível), acidentes leves (terceiro nível) e lesões graves ou fatalidades (topo da pirâmide).

Todos os dados publicados abrangem registros de eventos envolvendo tanto os funcionários das próprias empresas quanto os trabalhadores contratados.

A Tabela 1 resume as fontes, os períodos e a integridade dos dados obtidos para cada empresa analisada. O estudo combina relatórios disponíveis publicamente e registros internos privados, com algumas estimativas aplicadas onde os dados estavam incompletos. Esta visão geral fornece a base para a análise de métodos mistos subsequente descrita na Seção 3.2.

### 3.2. Análise de métodos mistos

Para investigar a correlação entre eventos menores e maiores, foi realizada uma análise documental para cada uma das quatro empresas examinadas, com tabulação de dados com base na pirâmide de Bird, permitindo análises qualitativas e quantitativas. A análise qualitativa envolveu uma avaliação descritiva do comportamento dos dados ao longo dos anos. Enquanto isso, a análise quantitativa foi baseada na avaliação das linhas de tendência nas séries temporais das variáveis, bem como no teste estatístico de Spearman para identificar possíveis correlações entre elas.

Antes da análise de correlação, o conjunto de dados foi limpo, eliminando valores ausentes e garantindo que as variáveis comparadas tivessem o mesmo número de observações. Nenhuma normalização de dados foi realizada, uma vez que o coeficiente de Spearman é baseado em classificações e não é afetado pela escala de medição original. Da mesma forma, nenhum tratamento específico de outliers foi aplicado, pois o processo de classificação mitiga sua influência na correlação. Os coeficientes de correlação foram calculados seguindo o procedimento padrão: classificando as observações de cada variável, atribuindo classificações médias em caso de empates e calculando a correlação de Pearson entre essas classificações. Para testar a hipótese nula de ausência de correlação monotônica, foram calculados os valores  $p$ , e a hipótese foi rejeitada quando  $p < 0,05$ . Além disso, os intervalos de confiança de 95% para os coeficientes de correlação foram estimados usando a transformação  $z$  de Fisher [23] com o ajuste do erro padrão proposto por Bonnett e Wright [24]. Todos os cálculos foram realizados usando o Minitab versão 19.

Em uma relação monotônica, os valores de duas variáveis tendem a mudar juntos sem exigir variação a uma taxa constante, como visto em uma correlação linear. O coeficiente de Spearman varia de  $-1$  a  $+1$ , com a força

da correlação aumentando à medida que o coeficiente se aproxima de qualquer extremo. Um valor positivo indica que as variáveis aumentam ou diminuem juntas, enquanto um valor negativo sugere que, à medida que uma variável aumenta, a outra tende a diminuir. A ausência de correlação é representada por um coeficiente próximo de zero.

Para determinar se existia uma correlação entre os níveis da pirâmide de Bird em cada empresa, foi testada a hipótese nula de não haver correlação monotônica entre esses níveis. Essa hipótese foi rejeitada se o valor  $p$  associado ao teste estatístico fosse inferior a 5% ( $p < 0,05$ ).

Todas as premissas do teste de correlação de Spearman foram verificadas. As variáveis foram escalonadas em proporção, e a inspeção visual dos gráficos de dispersão confirmou a presença de relações monotônicas.

As dimensões das amostras ( $n$ ) para cada correlação emparelhada são apresentadas nas tabelas de resultados (ver tabelas 3, 5, 7 e 9 mais adiante). Não foi aplicada qualquer correção para testes múltiplos (por exemplo, Bonferroni), dado o número relativamente pequeno de correlações e o papel complementar da análise estatística neste estudo de métodos mistos.

**Tabela 1.** Resumo do processo de acesso e seleção de dados.

Empresa/setor	Tipo de dados	Fonte dos dados	Período analisado	Níveis da pirâmide de Bird disponíveis	Observações
Vale S.A.	Público	Relatórios de Sustentabilidade e Relatórios Integrados do site	2006–2023 (18 anos)	xa de frequência de acidentes (terceiro nível), números absolutos de lesões/fatalidades de alto potencial lesões/mortes (nível superior)	Comparação entre taxa e número absoluto; alguns dados estimados
Samarco Mining	Relatórios	Relatórios de Sustentabilidade do site	2009–2023 (15 anos)	Incidentes ou quase acidentes (primeiro nível), acidentes menores (terceiro nível), ferimentos graves ou mortes (nível superior)	Pequena parte dos dados estimada; números absolutos disponíveis
Industry X	Privado	Relatórios internos de tratamento de anomalias acessados por meio de projetos de pesquisa	2006–2023 (18 anos)	Todos os níveis da pirâmide (primeiro ao quarto nível)	Dados completos para todos os níveis
Industry Y	Privado	Relatórios internos de tratamento de anomalias acessados por meio de projetos de pesquisa	2003–2023 (21 anos)	Todos os níveis da pirâmide (primeiro ao quarto nível)	Dados completos para todos os níveis

**Tabela 2.** Taxas de acidentes de trabalho e números absolutos de lesões ou fatalidades de alto potencial na Vale (2006–2023).

Ano	Taxa de acidentes de trabalho	Número de HPis ou fatalidades <sup>a</sup>
2006	12.3	5
2007	11.6	14
2008	8	9
2009	5.7	12
2010	3.9	11
2011	3.3	15
2012	2.8	15
2013	2.6	7
2014	2.1	8
2015	2.2	5
2016	1.9	5
2017	2	5
2018	2.3	68
2019	3.48	309
2020	1.97	48
2021	1.41	31
2022	1.12	18
2023	1.06	21

<sup>a</sup>Para o período 2006-2017, os dados referem-se apenas ao número absoluto de mortes. Para o período 2018-2023, os dados incluem o número absoluto de ferimentos de alto potencial (HPis), além das mortes..

## 4. Resultados

### 4.1. A Vale e seu histórico de eventos

A Vale fornece dados correspondentes a dois níveis da Pirâmide de Bird: taxas de frequência de acidentes (ou taxas de acidentes ocupacionais), que se alinham com o terceiro nível da pirâmide; e números absolutos de HPis ou fatalidades, que correspondem ao topo da pirâmide. Esses dados abrangem os anos de 2006 a 2023, conforme apresentado na Tabela 2.

É evidente que os dois níveis da pirâmide de Bird representados nos dados da Vale não exibem tendências comportamentais semelhantes. Para facilitar a compreensão desses dados, dividiremos a análise em quatro períodos (de 2006 a 2014; de 2015 a 2018; 2019; e de 2020 a 2023):

- Entre 2006 e 2014, é evidente uma redução contínua e progressiva na taxa de acidentes. No entanto, isso não resultou em uma tendência semelhante para as mortes durante esse período, particularmente nos anos de 2007 ( $n = 14$ ), 2009 ( $n = 12$ ), 2010 ( $n = 11$ ), 2011 ( $n = 15$ ) e 2012 ( $n = 15$ ).
- Entre 2015 e 2018, as taxas de acidentes foram inconsistentes, começando em 2,2 em 2015, diminuindo para 1,9 em 2016, subindo para 2 em 2017 e atingindo 2,3 em 2018. Em contrapartida, as mortes permaneceram constantes em cinco entre 2015 e 2017, antes de diminuir para duas em 2018. Neste último ano, a empresa também começou a divulgar os números absolutos de HPis, relatando 66 naquele ano.
- O ano de 2019 foi atípico devido à tragédia do rompimento da barragem em Brumadinho. Até a data de publicação deste artigo, os números atualizados relatados eram de 270 mortes e três pessoas desaparecidas. No entanto, os registros da empresa estão desatualizados, mostrando 252 mortes, uma taxa de acidentes de 3,48 e HPis.
- Entre 2020 e 2023, a taxa de acidentes diminuiu progressivamente (de 1,97 para 1,41, para 1,12 e para 1,06). Em contrapartida, embora os números absolutos de HPis e mortes tenham diminuído de 2020 a 2022 (de 48 para 31 para 18), eles não seguiram essa tendência em 2023, subindo para 21.

Os dados geram linhas de tendência marcadamente distintas entre as taxas de frequência de acidentes e os números absolutos de ferimentos graves ou mortes. Enquanto as taxas totais de acidentes seguem um

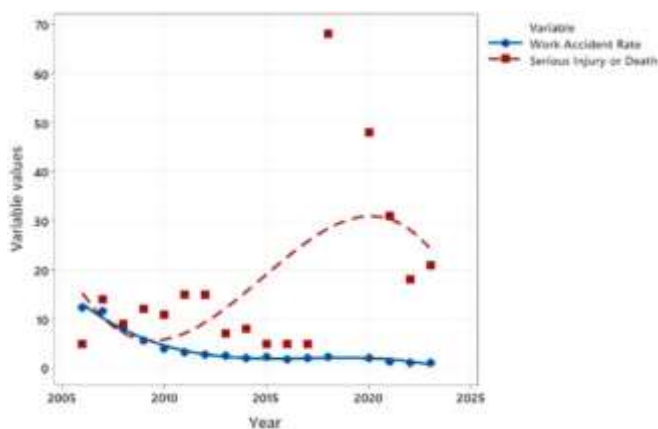
padrão de redução ao longo dos anos, o número de ferimentos graves ou mortes exibe padrões que alternam entre diminuição e aumento (Figura 2). O coeficiente de Spearman calculado para essas variáveis foi de  $-0,296$ , com  $p = 0,248$  ( $\geq 0,05$ ), confirmando a hipótese formulada e demonstrando a ausência de uma correlação estatisticamente significativa entre as taxas totais de acidentes e o número de ferimentos graves ou mortes (Tabela 3).

O coeficiente de Spearman foi negativo ( $\rho = -0,296$ ), mas não estatisticamente significativo ( $p = 0,248$ ;  $n = 17$ ). Isso indica que a frequência geral de acidentes não prediz lesões graves ou fatalidades na Vale. Em termos práticos, a redução das taxas de acidentes ao longo do tempo não correspondeu a uma redução nas ocorrências graves, sugerindo que outros fatores podem levar a eventos catastróficos.

### 4.2. Samarco e seu histórico de acidentes de 2009 a 2023

A Samarco fornece dados correspondentes a três níveis da pirâmide de Bird para os anos de 2006 a 2023: números absolutos e incidentes/quase acidentes, que correspondem ao primeiro nível; acidentes menores, que correspondem ao terceiro nível; e ferimentos graves/fatais, que correspondem ao topo da pirâmide (Tabela 4).

De uma perspectiva qualitativa, os três níveis da pirâmide de Bird representados nestes dados não exibem tendências comportamentais semelhantes. Os acidentes menores mostram dois períodos de declínio progressivo (de 2009 a 2011 e de 2012 a 2016), uma fase de variação irregular (de 2017 a 2023) e um aumento acentuado em 2023. Lesões graves ou fatalidades não seguem esse padrão, apresentando crescimento entre 2009 e 2011 e novamente de 2012 a 2015, com um pico notável no ano do rompimento da barragem de Mariana. Entre 2016 e 2020, os ferimentos graves ou mortes permaneceram relativamente estáveis, com um ligeiro aumento em 2021, seguido por um declínio em 2022 e 2023. Por fim, os incidentes e quase acidentes apresentam variação significativa entre 2009 e 2023, sem refletir os padrões observados nos outros dois níveis.



**Figura 2.** Tendências na série temporal para as taxas totais de acidentes e o número de ferimentos graves ou mortes na Vale entre 2006 e 2023.

**Tabela 3.** Coeficiente de correlação de Spearman para o número de acidentes na Vale (2006-2023).

Variável 1	Variável 2	Tamanho da amostra	Correlação de Spearman	Intervalo de confiança de 95% para a correlação de Spearman	Variável 1
Número de ferimentos graves ou mortes	Taxa de acidentes de trabalho (%)	17	-0,296	[-0,686, 0,226]	Número de ferimentos graves ou mortes

<sup>a</sup>The year 2019, being an outlier, was not considered in this calculation

**Tabela 4.** Número de incidentes ou quase acidentes, acidentes menores e ferimentos graves/fatais registrados na Samarco (2009–2023).

Ano	Incidentes ou quase acidentes	Acidentes menores	Lesões graves/fatais
2009	8088	55	1
2010	7892	34	3
2011	10, 479	38	4
2012	10, 788	57	3
2013	8887	56	5
2014	6082 <sup>a</sup>	13	6
2015	NA	NA	14
2016	6082 <sup>a</sup>	4	2
2017	6082 <sup>a</sup>	8	1
2018	635	6	1
2019	1999	9	2
2020	3132	7	2
2021	6082 <sup>a</sup>	12	4
2022	6082 <sup>a</sup>	10	0
2023	3841	31	2

<sup>a</sup>Estimativa baseada na média aritmética dos dados disponíveis sobre incidentes ou quase acidentes. Nota: NA, não aplicável/dados não divulgados.

A Figura 3 apresenta as linhas de tendência para as três variáveis. Em todos os casos, os padrões flutuam entre períodos de aumento e diminuição ao longo dos anos. Notavelmente, as linhas de tendência para incidentes/quase acidentes e acidentes menores exibem comportamentos semelhantes, com um aumento inicial até 2010 ou 2011, um declínio até 2019 ou 2020 e uma tendência ascendente subsequente. Em contrapartida, a linha de tendência para lesões graves/fatais segue uma trajetória diferente, mostrando um aumento até 2014, seguido por um declínio até 2021 e, em seguida, uma nova tendência ascendente.

O coeficiente de Spearman indica uma forte correlação monotônica positiva ( $p = 0,802$ ,  $p = 0,001$ ) entre incidentes/quase acidentes e acidentes menores, o que significa que, à medida que o número de acidentes menores aumenta, o número de incidentes/quase acidentes também tende a aumentar, embora não de maneira constante. Ao mesmo tempo, não há correlação significativa entre lesões graves/fatais e incidentes/quase acidentes ( $p = 0,131$ ) ou entre lesões graves/fatais e acidentes menores ( $p = 0,088$ ) (Tabela 5).

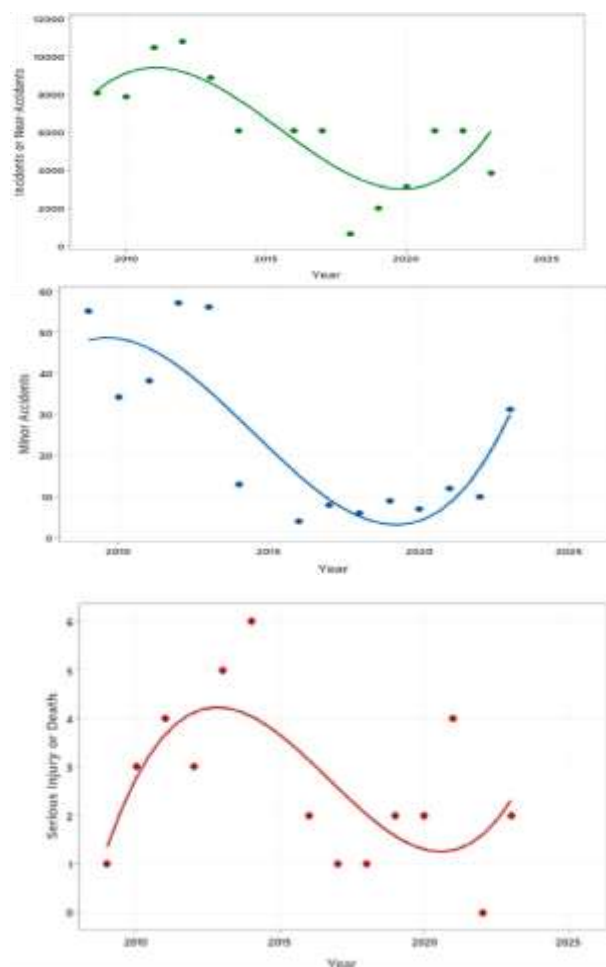
Foi observada uma correlação positiva forte e significativa entre acidentes menores e incidentes/quase acidentes ( $p = 0,802$ ;  $p = 0,001$ ;  $n = 14$ ), indicando que, à medida que os acidentes menores aumentam, os incidentes também aumentam. No entanto, lesões graves/fatalidades não se correlacionaram significativamente com nenhum dos indicadores. Isso sugere que, embora o monitoramento de eventos menores possa ajudar a controlar resultados menos graves, não é suficiente para prever ou prevenir acidentes graves.

#### 4.3. Indústria X: histórico de acidentes de 2006 a 2023

Os dados foram coletados de todos os quatro níveis da pirâmide de Bird para a Indústria X: números absolutos de incidentes ou quase acidentes

(primeiro nível), danos materiais (segundo nível), acidentes menores (terceiro nível) e ferimentos graves ou mortes (quarto nível), de 2006 a 2023 (Tabela 6).

De uma perspectiva qualitativa, os dados dos quatro níveis da pirâmide de Bird na Indústria X não apresentam tendências semelhantes. Por exemplo, entre 2007 e 2010, o número de ferimentos graves/mortes aumentou progressivamente, enquanto o número de acidentes menores diminuiu. Os dados sobre danos materiais e incidentes/quase acidentes são mais variáveis. Entre 2013 e 2016, houve uma redução progressiva no número de ferimentos graves/fatalidades, mas esse padrão não se refletiu nos outros três níveis. Entre 2018 e 2022, observou-se um novo declínio progressivo nos ferimentos graves/fatalidades, mais uma vez sem um padrão correspondente nos outros níveis, que exibiram comportamentos variados.



**Figura 3.** Ajustes das tendências para a série temporal do (a) número total de incidentes ou quase acidentes, (b) acidentes menores e (c) ferimentos graves ou fatalidades ocorridos na Samarco entre 2009 e 2023.

**Tabela 5.** Coeficientes de correlação de Spearman para o número de acidentes na Samarco entre 2009 e 2023.

Variável 1	Variável 2	Tamanho da Amostra	Correlação de Spearman correlacionada( $\rho$ )	95% intervalo de confiança para $\rho$	$p$
Número de acidentes menores	Número de incidentes/quase acidentes	14	0.802	[0.402, 0.945]	0.001
Número de ferimentos graves/mortes	Número de incidentes/quase acidentes	14	0.423	[-0.164, 0.789]	0.131
Número de ferimentos graves/mortes	Número de acidentes leves	14	0.472	[-0.110, 0.813]	0.088

As linhas de tendência dos dados mostram comportamentos distintos entre o número de incidentes/quase acidentes e eventos envolvendo danos materiais. Enquanto os incidentes/quase acidentes mostram uma tendência de queda ao longo dos anos, os eventos envolvendo danos materiais apresentam flutuações entre tendências de crescimento e declínio durante o mesmo período (Figura 4).

A Figura 5 mostra que as tendências entre o número de acidentes menores e o número de ferimentos graves/fatalidades também divergem. Enquanto os acidentes menores mostram uma tendência de queda até 2020, seguida por um aumento, os ferimentos graves/fatalidades demonstram um aumento até 2013, seguido por uma tendência de queda (Figura 5).

Por fim, o coeficiente de Spearman revela uma forte correlação monotônica positiva ( $\rho = 0,709$  e  $p = 0,001$ ) entre acidentes menores e incidentes/quase acidentes. Isso indica que, quando uma dessas variáveis aumenta, a outra tende a aumentar também, embora não de forma consistente. No entanto, como o valor  $p$  foi maior ou igual a 0,05, não há correlação significativa entre as outras combinações de dados (Tabela 7).

A única correlação significativa foi entre acidentes menores e incidentes/quase acidentes ( $\rho = 0,709$ ;  $p = 0,001$ ;  $n = 18$ ). Nenhuma outra associação estatisticamente significativa foi encontrada, incluindo lesões graves/fatais. Isso destaca que, nessa empresa, as estratégias de prevenção de acidentes focadas exclusivamente na redução de eventos menores podem ter efeito limitado na prevenção de acidentes graves.

#### 4.4. Indústria Y: histórico de acidentes de 2003 a 2023

A Indústria Y apresenta dados relacionados aos quatro níveis da pirâmide de Bird: número de incidentes/quase acidentes (primeiro nível), danos materiais (segundo nível), acidentes menores (terceiro nível) e ferimentos graves/fatalidades (quarto nível), para o período de 2003 a 2023 (Tabela 8).

Os dados da Indústria Y indicam que os quatro níveis da pirâmide de Bird não apresentam padrões de comportamento semelhantes. Por exemplo, entre 2003 e 2008, os danos materiais aumentaram progressivamente, enquanto esse padrão não se repetiu nos outros três níveis, que apresentaram comportamentos variados. Além disso, entre 2016 e 2021, houve uma redução progressiva nos danos materiais, mas esse padrão não foi observado nos outros níveis, cujos comportamentos foram inconsistentes.

Os gráficos de tendências mostram resultados distintos entre incidentes/quase acidentes e eventos envolvendo danos materiais. Os incidentes/quase acidentes mostram uma tendência decrescente até 2017, enquanto os danos materiais apresentam pouca flutuação após 2010 (Figura 6).

As tendências para acidentes leves e ferimentos graves/fatais também parecem distintas. Enquanto os primeiros oscilam entre tendências de crescimento e declínio ao longo dos anos (Figura 7(a)), os segundos exibem um padrão decrescente até 2013, seguido por uma tendência de crescimento (Figura 7(b)).

Por fim, o coeficiente de Spearman não indica uma correlação estatisticamente significativa ( $p \geq 0,05$ ) entre qualquer combinação de dados da Indústria Y (Tabela 9).

Não foram identificadas correlações estatisticamente significativas ( $p \geq 0,05$ ;  $n = 21$ ). Isso reforça a ausência de uma relação preditiva entre eventos de baixa gravidade e alta gravidade, sugerindo que as suposições da pirâmide de Bird não se aplicam neste caso.

**Tabela 6.** Número de acidentes abrangendo os quatro níveis da pirâmide de Bird registrados na Indústria X de 2006 a 2023.

Ano	Incidentes/quase acidentes	Danos materiais	Acidentes menores	Ferimentos graves ou mortes
2006	10, 961	2780	772	16
2007	11, 996	1021	943	8
2008	9175	2577	797	13
2009	8433	3032	764	21
2010	10, 521	3431	659	31
2011	12, 805	1190	660	18
2012	13, 388	3412	707	44
2013	9422	2054	648	36
2014	7490	3359	479	31
2015	6833	1038	432	17
2016	8219	1273	504	16
2017	6905	975	505	24
2018	5190	1244	485	30
2019	7401	1829	325	13
2020	5688	2491	423	12
2021	4543	1912	516	10
2022	5073	1790	495	5
2023	4743	2033	454	13

## 5. Discussão

### 5.1. Indicadores distantes da realidade

Os resultados deste estudo divergem daqueles encontrados na literatura original sobre indicadores de segurança, bem como de alguns estudos mais contemporâneos e das práticas de gestão das empresas analisadas.

As conclusões estatísticas fornecem insights práticos sobre a gestão da segurança. As correlações positivas significativas identificadas entre incidentes e acidentes menores (na Samarco e na Indústria X) indicam que medidas preventivas direcionadas a eventos cotidianos podem contribuir para reduzir lesões menos graves. No entanto, a ausência de associações significativas entre indicadores gerais e acidentes graves em todos os casos demonstra que resultados catastróficos seguem dinâmicas distintas daquelas capturadas pelos indicadores tradicionais. Portanto, as empresas não devem confiar apenas na lógica da pirâmide de Bird, mas devem desenvolver estratégias preventivas específicas para lidar com riscos de alta gravidade.

Na Vale, nenhum dos métodos de análise utilizados neste estudo indicou uma correlação entre os dados publicados. Na Samarco, a análise qualitativa e os gráficos de tendências não mostraram correlação, enquanto o coeficiente de Spearman indicou correlação apenas entre incidentes/quase acidentes e acidentes menores, sem evidências em outras combinações de dados. Na Indústria X, tanto a análise qualitativa quanto os gráficos de tendências não indicaram correlação e, embora o coeficiente de Spearman tenha identificado uma correlação monotônica positiva entre acidentes menores e incidentes/quase acidentes, nenhuma correlação significativa foi encontrada em outras combinações. Finalmente, na Indústria Y, nenhum dos métodos – análise qualitativa, gráficos de tendências ou coeficiente de Spearman – detectou correlação entre os dados.

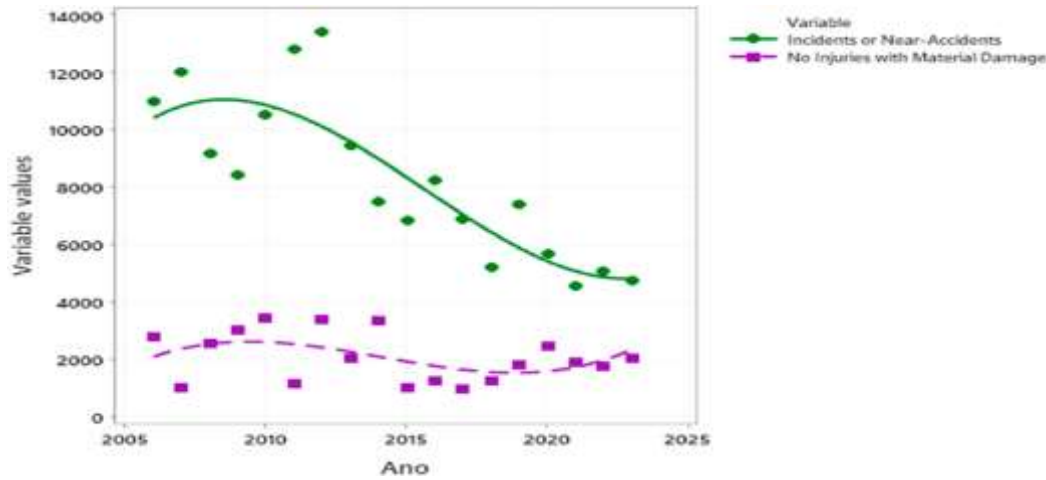


Figura 4. Tendências para a série temporal do número total de incidentes/quase acidentes e eventos com danos materiais ocorridos na Indústria X entre 2006 e 2023.

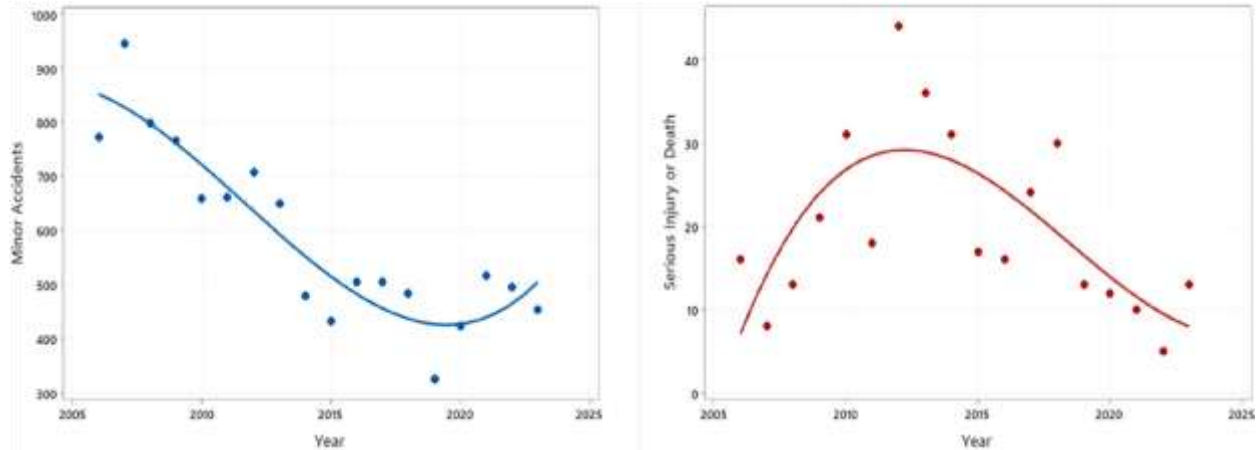


Figura 5. Tendências para a série temporal do (a) número total de acidentes menores e (b) número de ferimentos graves/mortes ocorridos na Indústria X entre 2006 e 2023.

Assim, os argumentos originais [4,5] ou contemporâneos [8] sobre a validade da pirâmide de Bird e a correlação entre eventos menores e maiores não foram confirmados de forma consistente em nenhum dos casos analisados neste estudo.

Essa discrepância entre a teoria e os dados observados nas empresas estudadas é ainda mais enfatizada pelos eventos reais registrados e pelas práticas de gestão e divulgação de indicadores adotadas.

Um exemplo disso pode ser visto nas empresas Vale e Samarco, que comemoraram seus indicadores de segurança supostamente positivos nos anos que antecederam o rompimento de suas barragens. Em 2011, a Samarco destacou que encerrou o ano “com a menor taxa de frequência de acidentes registrada na história da empresa, passando de 0,93 em 2010 para 0,49 em 2011” [19, p.5]. Alguns anos depois, a empresa afirmou que “em 2015, os indicadores de segurança apresentaram uma tendência de redução até 5 de novembro” [20, p.56], data do rompimento da barragem em Mariana.

Da mesma forma, a Vale comemorou reduções anuais em seu FR, que caiu de 0,6 em 2013 para 0,45 em 2016, três anos antes da tragédia em Brumadinho [25,26]. Essa lógica se repete em todos os relatórios analisados, a partir de 2006, quando a empresa afirmou que “graças aos esforços realizados, a taxa de acidentes que resultam em licenças por milhão de horas trabalhadas vem diminuindo continuamente, de 4,7 em 2003 para 1,9 em 2006” [21, p.11], até 2023, quando registrou “a menor taxa de frequência de acidentes da nossa história” [22, p.3]. Apesar das significativas tragédias humanas e ambientais causadas pela empresa, seus indicadores reativos continuam a transmitir a percepção de um ambiente seguro.

Além das consequências catastróficas causadas por indicadores que não refletem a realidade, conforme discutido neste artigo, essa situação também pode afetar negativamente a saúde mental dos profissionais de segurança responsáveis pela produção desses indicadores. Le Coze [27] denomina esse fenômeno de “blues dos profissionais de segurança”, uma insatisfação crescente expressa desde meados da década de 2010 em várias publicações de especialistas na área.

Esses trabalhos convergem na identificação de fatores como causalidade simplista, uma visão reducionista da segurança como mera prioridade, foco excessivo no comportamento individual e dependência de indicadores tradicionais, como a pirâmide de Bird, como fontes de sofrimento psicológico para esses profissionais. Segundo o autor, esse cenário resulta da tensão entre a evolução das práticas de segurança e a formação profissional tradicional, bem como da lacuna entre a produção acadêmica e a aplicação prática.

## 5.2. Diferentes tipos de vieses de dados

Este estudo analisa o comportamento de dados públicos e privados de quatro setores. No entanto, como acontece com o registro de indicadores em qualquer setor, não há informações sobre quem coletou os dados ou quais métodos foram empregados. Consequentemente, os dados podem estar sujeitos a vários vieses, conforme descrito por Huff [28], incluindo vieses de amostragem, omissão, heterogeneidade e vieses de correlação, que serão discutidos nas seções a seguir.

### 5.2.1. Viés de amostragem

Os dados utilizados para alimentar os indicadores de segurança apresentam frequentemente vieses de amostragem. Os operadores podem abster-se de comunicar problemas por receio de punição ou por falta de confiança na resposta da administração, resultando num ambiente de comunicação pouco envolvente [29]. Da mesma forma, os gestores podem omitir ou não registrar incidentes e acidentes para evitar sanções legais e financeiras ou para preservar a imagem da empresa perante os investidores e a sociedade civil [30].

**Tabela 7.** Coeficientes de correlação de Spearman para o número de acidentes na Indústria X entre 2006 e 2023.

Variável 1	Variável 2	Tamanho da amostra	Spearman correlacionada	Intervalo de confiança de 95% para a correlação de Spearman	$\rho$
Número de danos materiais	Número de incidentes/quase acidentes	18	0,269	[-0,235, 0,659]	0,280
Número de acidentes menores	Número de incidentes/quase acidentes	18	0,709	[0,309, 0,896]	0,001
Número de ferimentos graves ou mortes	Número de incidentes/quase acidentes	18	0,425	[-0,074, 0,754]	0,078
Número de acidentes menores	Número de danos materiais	18	0,197	[-0,302, 0,611]	0,433
Número de feridos graves ou mortos	Número de danos materiais	18	0,361	[-0,143, 0,717]	0,141
Número de ferimentos graves ou mortes	Número de acidentes leves	18	0,101	[-0,385, 0,544]	0,689

**Tabela 8.** Número de eventos nos quatro níveis da pirâmide de Bird registrados no setor Y entre 2003 e 2023

Ano	Incidentes/quase acidentes	Danos materiais	Acidentes menores	Ferimentos graves ou mortes
2003	13, 329	871	130	37
2004	15, 826	1301	235	28
2005	18, 419	1455	236	32
2006	14, 721	3450	201	26
2007	20, 411	3841	291	19
2008	14, 912	3965	121	34
2009	9512	2888	62	25
2010	8397	3780	206	28
2011	10, 744	4095	264	18
2012	8904	3499	135	18
2013	12, 781	2058	51	13
2014	7485	3102	136	23
2015	9485	4931	153	27
2016	12, 953	5067	77	30
2017	5944	4623	83	15
2018	8400	4502	82	19
2019	10, 396	3944	46	19
2020	14, 593	3071	36	24
2021	12, 945	2846	90	12
2022	10, 547	3749	65	30
2023	11, 566	3844	115	28

Os relatórios públicos da Vale e da Samarco não fornecem dados completos. Primeiro, as informações estão dispersas pelos documentos, exigindo um esforço metódico de sistematização e tabulação. Além disso, no caso da Vale, apenas dois níveis da pirâmide de Bird puderam ser analisados, pois os dados publicados incluem apenas a taxa de acidentes – sem números absolutos – e o número total de ferimentos graves ou mortes. Para a Samarco, três dos quatro níveis da pirâmide de Bird estavam disponíveis, mas com lacunas que exigiram estimativas para complementar o conjunto de dados.

### 5.2.2. Viés de ocultação

Os indicadores de segurança também estão sujeitos ao viés de ocultação. Enquanto a maioria dos sistemas de gestão se baseia em indicadores positivos, como lucro, número de clientes e participação no mercado, os indicadores de segurança tradicionalmente adotados refletem falhas – eventos indesejáveis que as organizações buscam minimizar. Consequentemente, seja devido à omissão de relatos de incidentes por parte dos operadores ou à omissão deliberada de registros por parte dos

gestores, grande parte dos dados de segurança divulgados publicamente pode estar subnotificada [30].

Embora o presente estudo não se aprofunde nas dinâmicas de poder que influenciam os indivíduos a se manifestarem ou permanecerem em silêncio diante do risco, é razoável supor que a administração sempre relutará em divulgar os dados reais de acidentes para evitar sanções legais, financeiras ou mesmo morais da sociedade. Essa relutância parece ainda mais evidente após as tragédias em Mariana e Brumadinho.

### 5.2.3. Viés de heterogeneidade

Os indicadores de segurança também estão sujeitos a um viés de heterogeneidade, o que significa uma variedade significativa nos tipos e na natureza dos dados, o que pode afetar a interpretação dos resultados.

TF, TG e PB combinam dados de diferentes naturezas, como segurança ocupacional e segurança de processos [31]. A segurança ocupacional diz respeito a acidentes relacionados às condições de trabalho, caracterizados por alta frequência e baixa gravidade, como quedas no mesmo nível ou contusões. Em contrapartida, a segurança de processos está ligada ao processo de produção, envolvendo acidentes de baixa frequência, mas alta gravidade, por exemplo, vazamentos, explosões ou perdas devido à liberação descontrolada de energia.

As causas subjacentes a esses dois tipos de acidentes são distintas. Uma investigação detalhada das causas dos acidentes de trabalho frequentemente revela contribuições de fatores gerenciais e organizacionais incorporados à história do sistema [27]. Combinar esses dados em um único indicador, como feito pelas quatro empresas analisadas neste estudo, pode levar a dados tendenciosos, distorcendo a realidade e dificultando uma análise precisa.

### 5.2.4. Viés de correlação

Ainda mais problemático do que agrupar dados de naturezas diferentes é estabelecer correlações positivas entre eles, como observado nas quatro empresas analisadas neste estudo, que tentam prevenir acidentes graves gerenciando indicadores de eventos menores.

Alguns estudos, como o de Bellamy [18], sugerem que, em indústrias com riscos específicos, pode haver uma relação não linear entre acidentes de baixa gravidade e acidentes de alta gravidade. Por exemplo, um vazamento de gás pode inicialmente se manifestar como um incidente, mas também pode se transformar em uma explosão. No entanto, na maioria dos casos, acidentes menores não são precursores de acidentes graves ou fatais [17]. Portanto, concentrar-se na redução de eventos na base da pirâmide sem identificar aqueles que realmente têm o potencial de causar danos graves não garante uma diminuição de incidentes graves e fatais.

Outros estudos indicam que pode até haver uma correlação negativa entre o número de incidentes registrados e as taxas de mortalidade em certos setores, como construção [32] e aviação civil [33]. Isso sugere que, nessas indústrias, as organizações que registraram um número maior de incidentes menores foram aquelas com menos acidentes fatais.

### 5.3. Mitigação de vieses e abordagens alternativas para a produção de indicadores de segurança

Para mitigar os vieses nos dados, muitos estudos defendem a padronização dos métodos de coleta e processamento de dados. Aven [34] analisa os “cisnes negros” – eventos raros e imprevisíveis com alto potencial de impacto – e critica as limitações das abordagens tradicionais de avaliação de risco ao lidar com tais incertezas. Ele propõe que a gestão de riscos considere a complexidade dos sistemas, indo além da mera quantificação de probabilidades e impactos, sugerindo a inclusão de métricas relacionadas à

resiliência organizacional, capacidade de resposta a crises e eficácia das estratégias de mitigação, expandindo assim a capacidade de monitorar e melhorar a segurança em contextos incertos. Complementando essa perspectiva, Jackson [3] destaca a necessidade de incorporar métricas que reflitam essas dimensões críticas na gestão da segurança, ampliando o escopo dos indicadores convencionais para incluir aspectos qualitativos.

No contexto da mineração artesanal e de pequena escala, Ajith et al. [1] identificam determinantes contextuais de lesões graves e argumentam que indicadores eficazes devem ser construídos com base na realidade local, uma vez que a adoção de indicadores tradicionais da mineração industrial não leva em consideração as condições de trabalho, os recursos disponíveis e o grau de informalidade característico desse setor. Mensah et al. [35] reforçam essa ideia, destacando a importância de melhorar a sistematização e o uso de métricas de segurança para promover melhorias efetivas na saúde

ocupacional na mineração artesanal. Eles enfatizam aspectos qualitativos e quantitativos que afetam os indicadores, especialmente em contextos informais e desafiadores, por exemplo, uso inadequado de equipamentos de proteção, exposição a agentes tóxicos e condições de trabalho inseguras. Além disso, eles enfatizam a necessidade de um melhor monitoramento e regulamentação do setor, o que implica no fortalecimento dos sistemas de coleta de dados e no desenvolvimento de indicadores que reflitam com precisão a realidade das condições de trabalho e os riscos enfrentados pelos mineiros

Alguns estudos oferecem abordagens pragmáticas para lidar com vieses nos indicadores de segurança. Ajith et al. [1], por exemplo, enfatizam que indicadores robustos

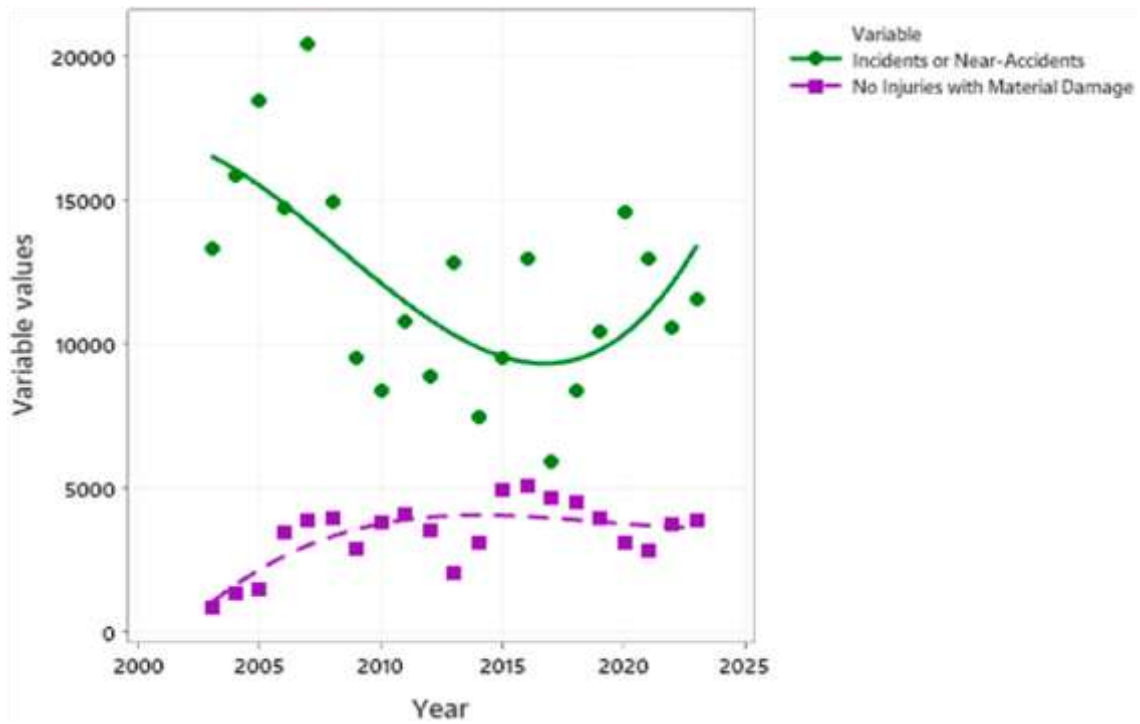


Figura 6. Tendências para a série temporal do número total de incidentes/quase acidentes e eventos com danos materiais na Indústria Y entre 2003 e 2023.

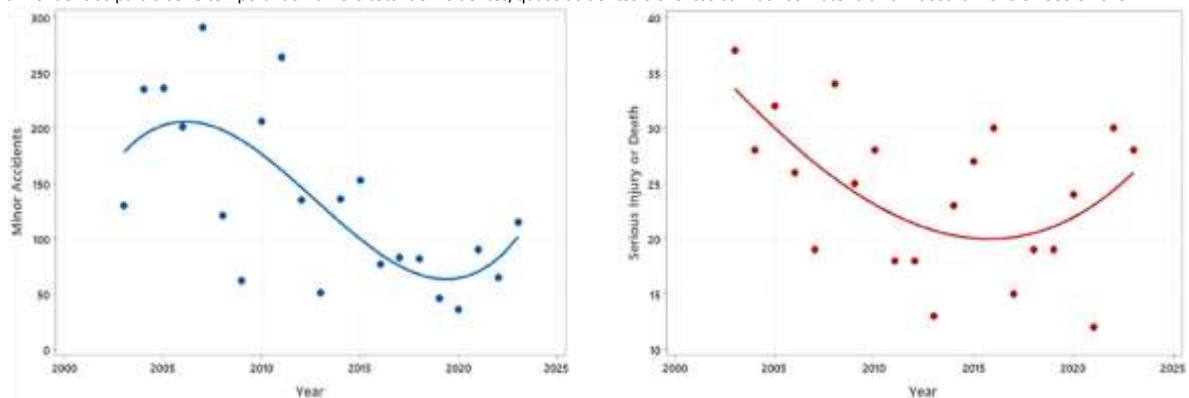


Figura 7. Tendências para a série temporal do (a) número total de acidentes menores e (b) ferimentos graves/fatais na Indústria Y entre 2003 e 2023.

Tabela 9. Coeficientes de correlação de Spearman para o número de acidentes na Indústria Y de 2003 a 2023.

Variável 1	Variável 2	Tamanho da amostra	Correlação de Spearman correlacionada	Intervalo de confiança de 95% para a correlação de Spearman	$p$
Número de danos materiais	Número de incidentes/quase acidentes	21	-0,386	[-0,709, 0,072]	0.084
Número de acidentes menores	Número de incidentes/quase acidentes	21	0,252	[-0,209, 0,621]	0.271
Número de ferimentos graves ou mortes	Número de incidentes/quase acidentes	21	0,374	[-0,085, 0,702]	0.095
Número de acidentes menores	Número de danos materiais	21	-0,052	[-0,473, 0,389]	0.823
Número de ferimentos graves ou mortes	Número de danos materiais	21	-0,096	[-0,507, 0,351]	0.680
Número de ferimentos graves ou mortes	Número de acidentes leves	21	0,162	[-0,293, 0,557]	0.484

devem combinar dados quantitativos, como o número e a gravidade dos acidentes, com evidências qualitativas, incluindo relatórios de incidentes, percepções de risco e observações diretas.

Hopkins [36] propõe a criação de três grupos distintos de indicadores: processuais e ocupacionais; operacionais e gerenciais; e proativos e reativos. Nesse sentido, vários autores defendem a priorização do foco gerencial, dos recursos e do tempo em incidentes de alto potencial (ou processuais), em vez de eventos ocupacionais, que tendem a ser menos graves e mais frequentes [7,28]. Deve-se dar prioridade a esses eventos de alto potencial que geram indicadores de processo, por exemplo, taxas de incidentes ou intervenções envolvendo máquinas específicas, vazamentos ou falhas de equipamentos [37]. Ao mesmo tempo, é essencial desenvolver indicadores que não se limitem à força de trabalho (indicadores operacionais), mas também abranjam a gestão da segurança (indicadores gerenciais). Herrera [31] sugere indicadores gerenciais, como a porcentagem de trabalhadores treinados em segurança, o número de reuniões do comitê de segurança, situações de risco identificadas e tratadas pela gerência, feedback fornecido à equipe operacional e realização de diálogos diários sobre segurança. Por fim, há um esforço significativo para identificar indicadores proativos capazes de gerar sinais que antecipem acidentes [37]. A principal vantagem desses indicadores é sua capacidade de fornecer feedback sobre o desempenho do sistema antes que ocorram danos. Exemplos incluem a porcentagem de intervenções bem-sucedidas, o número de problemas resolvidos, a frequência de manutenção preventiva e o número de inspeções realizadas [31], bem como a frequência de treinamento, o uso eficaz de equipamentos de proteção individual (EPI) e inspeções preventivas, complementando as métricas reativas tradicionais [34].

Portanto, os indicadores TF, TG e PB são reativos — refletindo apenas eventos negativos passados — e operacionais, pois se referem exclusivamente ao comportamento dos trabalhadores da linha de frente na cadeia de produção, combinando dados de segurança ocupacional com dados de segurança de processos. Para avançar neste campo, é essencial desenvolver indicadores proativos e orientados para a gestão que distingam claramente entre dados de segurança ocupacional e dados de segurança de processos.

#### 5.4. Além dos indicadores: análise de atividades para promover a prevenção de acidentes

As medidas preventivas de um sistema não podem se limitar a indicadores, pois os números não refletem a qualidade dos dados [38]. Além disso, é essencial buscar abordagens mais abrangentes para a prevenção de acidentes.

Correntes mais avançadas no campo da segurança, por exemplo, engenharia de resiliência [39], segurança II [30] e organizações de alta confiabilidade [40], buscam promover a prevenção por meio do aprendizado do “trabalho normal”, ou seja, o trabalho realizado diariamente sem situações excepcionais ou acidentais. Embora algumas dessas abordagens empreguem os conceitos de trabalho como imaginado (trabalho planejado) e trabalho como realizado (trabalho efetivamente executado), elas não se aprofundam na análise das diferenças entre esses aspectos, nem na complexidade do trabalho ou da atividade humana.

Nesse contexto, a análise da atividade de trabalho da perspectiva da ergonomia francófona oferece uma compreensão detalhada das situações reais, contribuindo para a criação ou aprimoramento de possibilidades de melhoria do trabalho [41,42]. Nesse campo, um sinal precursor pode ser considerado fraco, por exemplo, devido à dificuldade de ser percebido e interpretado ou porque ainda não se manifestou como um sinal claro para o operador do sistema de produção. A análise da atividade permite a identificação dos elementos dessa interação e das razões pelas quais certos sinais não são percebidos pelos indivíduos [43].

A análise de atividades também envolve a participação dos trabalhadores na construção da segurança, pois busca criar espaços dentro das organizações onde reflexões possam surgir e se transformar em impulsos para mudanças mais eficazes e duradouras [44]. Pesquisas recentes em indústrias de alto risco demonstraram o valor desses espaços na captura de sinais fracos e elementos da atividade real de trabalho.

Nascimento e Falzon [45], em seu estudo sobre hospitais em Paris, mostram que equipes médicas que discutem abertamente os erros podem adaptar regras e procedimentos, resultando em serviços de maior

qualidade. Rocha et al. [46] analisaram a cultura de segurança em uma indústria energética francesa e identificaram que aprender sobre práticas de trabalho — tanto individualmente quanto coletivamente — em ambientes protegidos é essencial para promover uma cultura de segurança eficaz. Eydieux et al. [47] enfatizam a importância do debate e da negociação na indústria nuclear, destacando que os gerentes e os trabalhadores da linha de frente devem articular suas expectativas para desenvolver soluções viáveis.

Investir na análise de atividades e na discussão de sinais fracos de maneira aberta e sem sanções é crucial para tornar a gestão da segurança mais preventiva do que corretiva. Essa abordagem envolve a compreensão da atividade em si, das interações dentro do sistema sociotécnico e de sua relação com o risco [48]. Em outras palavras, significa incorporar a complexidade das situações do mundo real à gestão da segurança por meio de abordagens ecológicas que examinam de perto o trabalho real e se aprofundam na atividade humana.

Esse processo facilita análises preventivas de situações pré-acidentais e revela como falhas podem surgir em atividades aparentemente normais. Assim, a análise de atividades se torna uma referência fundamental para compreender o comportamento dos trabalhadores e o erro humano [43], contribuindo, em última instância, para o desenvolvimento de sistemas de indicadores mais eficazes para a prevenção de acidentes.

## 6. Conclusão

A indústria contemporânea, particularmente no setor de mineração, carece de estudos suficientes sobre a eficácia dos indicadores de segurança. TF, TG e PB, que são populares na gestão da segurança devido à sua aparente facilidade de uso, não representam com precisão as condições reais de segurança na indústria de mineração. Nossas descobertas desafiam os estudos clássicos, bem como alguns mais modernos, ao demonstrar a complexidade envolvida na aplicação desses indicadores de maneira a produzir previsões precisas.

Os indicadores de segurança estão sujeitos a inúmeros vieses que podem distorcer significativamente sua relação com a realidade vivida pelos trabalhadores na linha de frente do processo de produção. A apresentação desses dados pelas empresas é frequentemente inconsistente, com informações ausentes nos obrigando a correlacionar taxas com números absolutos (no caso da Vale) ou estimar dados ausentes (no caso da Samarco). Além disso, um aumento no registro de eventos pode indicar um sub-relato anterior, em vez de um aumento real nos eventos. Assim, as análises realizadas são condicionadas por esse contexto. No entanto, este estudo demonstrou, por meio de análises quantitativas e qualitativas, como os dados produzidos e registrados divergem dos eventos reais, que muitas vezes são catastróficos.

Portanto, é essencial abandonar indicadores reativos, operacionais e baseados no trabalho e avançar para a criação de indicadores baseados em outras lógicas, por exemplo, indicadores proativos, de gestão e de processo. Simultaneamente, as organizações que visam produzir com segurança e qualidade, e que buscam antecipar a prevenção de acidentes e eventos catastróficos, devem desenvolver métodos eficazes para identificar e discutir a natureza e os riscos potenciais dos sinais observados no chão de fábrica diariamente. A análise de atividades, como método etnográfico que aprofunda a compreensão da complexidade do trabalho, pode contribuir significativamente para essa área, seja na gestão de indicadores ou na prevenção de acidentes. Assim, ainda há muito a ser feito em termos de antecipação de riscos e produção de indicadores de segurança.

## Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer a Magno Silvério Campos pela leitura cuidadosa e pelas análises estatísticas realizadas para este estudo.

## Declaração de divulgação

Nenhum conflito de interesse potencial foi relatado pelos autores.

## ORCID

Raoni Rocha  <http://orcid.org/0000-0003-1181-0132>

Eugênio Paceli Hatem Diniz  <http://orcid.org/0000-0003-0789-0416>

Mário Parreiras  <http://orcid.org/0000-0002-3496-8664>

Ildeberto Almeida  <http://orcid.org/0000-0002-8475-3805>

## Referências

- [1] Ajith MM, Ghosh AK, Jansz J. A mixed-method investigations of work, government and social factors associated with severe injuries in artisanal and small-scale mining (ASM) operations. *Saf Sci.* 2021;138:105244. doi:10.1016/j.ssci.2021.105244
- [2] Kyeremateng-Amoah E, Clarke EE. Injuries among artisanal and smallscale gold miners in Ghana. *Int J Environ Res Public Health.* 2015 Sep 2;12(9):10886–96. doi:10.3390/ijerph120910886
- [3] Jackson H. Pathways to single fatality and serious injury incidents in coal and metalliferous mining in NSW, Australia: can we learn from multiple fatality incidents to prevent serious injury? *Saf Sci.* 2023;165:106194. doi:10.1016/j.ssci.2023.106194
- [4] Rubin M, Giacomini A, Allen R, et al. Identifying safety culture and safety climate variables that predict reported risk-taking among Australian coal miners: an exploratory longitudinal study. *Saf Sci.* 2020;123:104564. doi:10.1016/j.ssci.2019.104564
- [5] Knights P, Yeates G. Progress toward zero entry mining: automation enabling safer, more efficient mining. *IEEE Ind Electron Mag.* 2021;15(3):32–38. doi:10.1109/MIE.2021.3070684
- [6] Hopkins A. Management walk-arounds: lessons from the Gulf of Mexico oil well blowout. *Saf Sci.* 2011;49(10):1421–1425. doi:10.1016/j.ssci.2011.06.002
- [7] Yorio PL, Moore SM. Examining factors that influence the existence of Heinrich's safety triangle using site-specific H&S data from more than 25,000 establishments. *Risk Anal.* 2018;38(4):839–852. doi:10.1111/risa.12869
- [8] Marshall P, Hirmas A, Singer M. Heinrich's pyramid and occupational safety: a statistical validation methodology. *Saf Sci.* 2018;101: 180–189. doi:10.1016/j.ssci.2017.09.005
- [9] Heinrich HW. *Industrial accident prevention.* New York (NY): McGraw Hill; 1941.
- [10] Bird FE, Germain GL. *Practical loss control leadership.* Loganville (GA): Det Norske Veritas (U.S.A.); 1996.
- [11] Nichols T. Problems in monitoring the safety performance of British manufacturing at the end of the twentieth century. *Sociol Rev.* 1992;42:104–110.
- [12] Copping P. Effectively measuring OHS performance using positive performance criteria. In: *Proceedings of a Conference on Strategic OHS Management;* Sydney; 1993.
- [13] Hale A. Conditions of occurrence of major and minor accidents. *Urban myths, deviations and accident scenarios.* *Tijdschr Toegep Arboretenschap.* 2002;15(3):34–40.
- [14] Hopkins A. *Lessons from Esso's gas plant explosion at Longford.* Warwick Pearse, Clare Gallagher and Liz Bluff, v. 1, 2001.
- [15] Baker JA. *The report of the BP U.S.: refineries independent safety review panel.* Washington (DC): Baker Panel; 2007.
- [16] Krause T. Accidents just happen? *Ind Saf Hyg.* 2011;45:1–34.
- [17] Gallivan S, Taxis K, Franklin BD, et al. Is the principle of a stable Heinrich ratio a myth? *Drug Saf.* 2008;31(8):637–642. doi:10.2165/00002018-200831080-00001
- [18] Bellamy LJ. Exploring the relationship between major hazard, fatal and non-fatal accidents through outcomes and causes. *Saf Sci.* 2015;71:93–103. doi:10.1016/j.ssci.2014.02.009 [19] Samarco. *Relatório Anual de Sustentabilidade.* Belo Horizonte. 2011.
- [20] Samarco. *Relatório Bienal 2015–2016.* Belo Horizonte. 2016.
- [21] Vale. *Relatório de Sustentabilidade.* Belo Horizonte. 2006.
- [22] Vale. *Relato Integrado 2023.* Belo Horizonte. 2023.
- [23] Fisher RA. *Statistical methods for research workers.* 14th ed. Edinburgh: Oliver and Boyd; 1970.
- [24] Bonett D, Wright T. Sample size requirements for estimating Pearson, Kendall and Spearman correlations. *Psychometrics.* 2000;65:23–28. doi:10.1007/BF02294183
- [25] Vale. *Formulário de Referência.* Belo Horizonte. 2014.
- [26] Vale. *Formulário de Referência.* Belo Horizonte. 2017.
- [27] Le Coze J. Understanding the 'blues of safety professionals'. *Int J Occup Saf Ergon.* 2024;30(2):351–365. doi:10.1080/10803548.2023.2298561
- [28] Huff D. *How to lie with statistics.* New York (NY): W.W. Norton; 1954.
- [29] Rodrigues V, Rocha R. Participatory ergonomics approaches to design and intervention in workspaces: a literature review. *Theor Issues Erg Sci.* 2023;24(4):413–428. doi:10.1080/1463922X.2022.2095457 [30] Dekker SWA. *The safety anarchist.* London: Routledge; 2018.
- [31] Herrera IA. *Proactive safety performance indicators: resilience engineering perspective on safety management.* Trondheim: Norwegian University of Science and Technology; 2012.
- [32] Saloniemi A, Oksanen HE. Accidents and fatal accidents, some paradoxes. *Saf Sci.* 1998;29(1):59–66. doi:10.1016/S0925-7535(98)00016-2
- [33] Barnett A, Wang A. Passenger mortality risk estimates provide perspectives about flight safety. *Flight Safety Digest.* 2000;19(4):1–12.
- [34] Aven T. On the meaning of a black swan in a risk context. *Saf Sci.* 2013;57:44–51. doi:10.1016/j.ssci.2013.01.016
- [35] Mensah SK, Siabi EK, Donkor P, et al. Assessing the safety and health practices in the artisanal and small-scale gold mining sector of Ghana: a case of Ntotroso. *Environ Chall.* 2022;6:100443. doi:10.1016/j.envc.2022.100443
- [36] Hopkins A. The limits of lost time injury frequency rates. *Positive Performance Indicators: Beyond Lost Time Injuries: Part 1 – Issues.* 1994:29–35.
- [37] Swuste P, Theunissen J, Schmitz P, et al. Process safety indicators, a review of literature. *J Loss Prev Process Ind.* 2016;40:162–173. doi:10.1016/j.jlp.2015.12.020
- [38] Hale A. Why safety indicators? *Saf Sci.* 2009;47(4):479–480. doi:10.1016/j.ssci.2008.07.018
- [39] Hollnagel E, Woods DD, Leveson N. *Resilience engineering: concepts and precepts.* London: Taylor & Francis; 2006.
- [40] Rochlin GI, La Porte TR, Roberts KH. The self-designing high reliability organization: aircraft carrier flight operation at sea. *Naval War College Review.* 1987;40:76–90.
- [41] Messias IA, Nascimento A, Rocha R. Job rotation as a legal requirement: analysis of the participatory approach in acceptance and workers' perception at a meatpacking plant. *Gest Prod.* 2022;29:e10522. doi:10.1590/1806-9649-2022v29e10522
- [42] Simões R, Daniellou F, Nascimento A. From prescribed to real rotations: a means of collective protection for the health of workers in a soft drink factory. *Work.* 2012;41(1):3136–3142.
- [43] Diniz E, Lima F, Simões R. Ergonomics contribution to occupational safety. *Rev bras saúde ocup.* 2024;49:edcinq15.
- [44] Rocha R. O debate nas Ciências do Trabalho: do que estamos falando? [Debate on Work Sciences: what are we talking about?] *Saúde e Sociedade.* 2023;32(2):e210766pt. doi:10.1590/s0104-1290202310766pt
- [45] Nascimento A, Falzon P. Producing effective treatment, enhancing safety: medical physicists? Strategies to ensure quality in radiotherapy. *Appl Ergon.* 2012;43:777–784. doi:10.1016/j.apergo.2011.11.011
- [46] Rocha R, Mollo V, Daniellou F. Contributions and conditions of structured debates on work on safety construction. *Saf Sci.* 2019;113: 192–199. doi:10.1016/j.ssci.2018.11.030
- [47] Eydieux J, Journé B, Tillement S. High-reliability organization seen through interstitial activities. *Gérer et Comprendre.* 2017;2:1–11.
- [48] Bellamy L, Sol V. *A literature review on safety performance indicators supporting the control of major hazards.* Bilthoven (Netherlands): National Institute for Public Health and the Environment, Ministry of Health, Welfare and Sport; 2012. (RIVM rapport 620089001/2012).