

**Utilização dos rejeitos de minério de ferro na construção civil: uma análise  
cienciométrica**

**Using iron ore waste in civil construction: a scientiometric analysis**

**Uso de relaves de mineral de hierro en la construcción civil: un análisis cientiometrico**

Recebido: 20/02/2020 | Revisado: 02/03/2020 | Aceito: 09/03/2020 | Publicado: 20/03/2020

**Fabiana Lopes Lage**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8167-3677>

Fundação Comunitária de Ensino Superior de Itabira, Brasil

E-mail: [fabiana\\_lage55@yahoo.com](mailto:fabiana_lage55@yahoo.com)

**Kelly de Moura Gonçalves**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3635-6431>

Fundação Comunitária de Ensino Superior de Itabira, Brasil

E-mail: [kelmour@hotmail.com](mailto:kelmour@hotmail.com)

**Juni Cordeiro**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9371-8385>

Fundação Comunitária de Ensino Superior de Itabira, Brasil

E-mail: [juni.cordeiro@funcesi.br](mailto:juni.cordeiro@funcesi.br)

**Maria Auxiliadora Lage**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8628-2923>

Fundação Comunitária de Ensino Superior de Itabira, Brasil

E-mail: [mauxiliadora.lage@funcesi.br](mailto:mauxiliadora.lage@funcesi.br)

**Resumo**

A demanda do mercado internacional por minério de ferro gera um crescimento nas indústrias mineradoras, aumentando o volume de rejeitos gerados, que são depositados em barragens de contenção cada vez maiores. Entretanto, diversos acidentes ocorridos mundialmente com barragens indicam a necessidade de um plano de gestão dos rejeitos provenientes da mineração. Assim, este trabalho objetivou a avaliação da evolução espaço-temporal de artigos associados ao uso de rejeitos de mineração de ferro na construção civil. Para tal, foi realizada uma pesquisa documental, de abordagem quali-quantitativa, através da ciênciometria, que resultou em uma amostra de 98 artigos publicados entre os anos de 1960 e 2018. Os dados obtidos indicam um crescimento exponencial de trabalhos científicos publicados, sendo que os países com maior

número de artigos referentes ao tema estudado foram China (41%), Índia (11%) e Brasil (9%). As áreas de conhecimento com maior número de publicações foram a Engenharia com (28,1%), Ciências dos Materiais (24,1%) e Tecnologia de Construção (15,3%). Os materiais que mais comumente utilizaram rejeito em sua composição foram o concreto, citado em 34 artigos e cimento, citado em 11 publicações. As técnicas de análises mais citadas nos artigos foram os testes mecânicos, químicos, físicos e morfológicos. Ressalta-se que o reaproveitamento de rejeitos provenientes da mineração na construção civil reduz impactos ambientais negativos associados à disposição desses materiais, além de contribuir para a redução da demanda por recursos naturais.

**Palavras-chave:** Barragens de rejeito; Beneficiamento mineral; Impactos ambientais; Mineração; Reaproveitamento de rejeito.

### **Abstract**

International market demand for iron ore generates growth in mining industries, increasing the volume of tailings generated, which are deposited in ever-increasing containment dams. However, several accidents involving dams worldwide indicate the need for a mining tailings management plan. Thus, this study aimed to evaluate the spatiotemporal evolution of articles associated with the use of iron mining tailings in civil construction. For this purpose, a qualitative and quantitative documentary research was carried out through the scientific method, which resulted in a sample of 98 articles published between 1960 and 2018. The data obtained indicate an exponential growth of published scientific works, and the countries with the largest number of articles on the theme studied were China (41%), India (11%) and Brazil (9%). The areas of knowledge with the largest number of publications were Engineering with (28.1%), Materials Science (24.1%) and Construction Technology (15.3%). The materials that most commonly used tailings in their composition were concrete, cited in 34 articles and cement, cited in 11 publications. The analysis techniques most cited in the articles were mechanical, chemical, physical and morphological tests. It is noteworthy that the reuse of mining waste in civil construction reduces negative environmental impacts associated with the disposal of these materials, in addition to contributing to the reduction of demand for primary natural resources.

**Keywords:** Tailings dams; Mineral processing; Environmental impacts; Mining; Reuse of waste.

### **Resumen**

La demanda del mercado internacional de mineral de hierro genera crecimiento en las industrias mineras, aumentando el volumen de residuos generados, que se depositan en represas de contención cada vez más grandes. Sin embargo, varios accidentes que ocurren en todo el mundo con presas indican la necesidad de un plan de manejo de relaves de la minería. Por lo tanto, este trabajo tuvo como objetivo

evaluar la evolución espaciotemporal de los artículos asociados con el uso de relaves de minería de hierro en la construcción civil. Con este fin, se realizó una investigación documental, con un enfoque cualitativo y cuantitativo, a través de la ciencia, que resultó en una muestra de 98 artículos publicados entre los años 1960 y 2018. Los datos obtenidos indican un crecimiento exponencial de los trabajos científicos publicados, siendo que Los países con mayor número de artículos sobre el tema estudiado fueron China (41%), India (11%) y Brasil (9%). Las áreas de conocimiento con el mayor número de publicaciones fueron Ingeniería con (28.1%), Ciencia de Materiales (24.1%) y Tecnología de la Construcción (15.3%). Los materiales que más comúnmente usaron relaves en su composición fueron el concreto, mencionado en 34 artículos y el cemento, mencionado en 11 publicaciones. Las técnicas de análisis más citadas en los artículos fueron pruebas mecánicas, químicas, físicas y morfológicas. Es de destacar que la reutilización de relaves de la minería en la construcción civil reduce los impactos ambientales negativos asociados con la eliminación de estos materiales, además de contribuir a reducir la demanda de recursos naturales.

**Palabras clave:** Presas de relaves; Procesamiento de minerales; Impactos ambientales; Minería; Reutilización de residuos.

## 1. Introdução

Os recursos minerais são materiais rochosos utilizados pelo homem, garantindo a promoção do bem-estar e qualidade de vida da população, compondo a base da sociedade industrial moderna. Dentre as principais substâncias minerais utilizadas no cotidiano, pode-se destacar o ferro (Fe).

A crosta terrestre é formada por aproximadamente 5% de Fe, fazendo com que este corresponda a um dos elementos mais abundantes na Terra. De modo geral, os minérios de ferro são as principais fontes para a obtenção do ferro, material fundamental para a produção do aço, amplamente utilizado pelas indústrias e siderúrgicas (United States Geological Survey - USGS, 2019).

Os principais minérios de ferro explorados pertencem à classe dos óxidos, caracterizados por elevado teor em ferro, como a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) que possui 72,4% de Fe e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) com 69,9% de Fe. Também podem ser considerados minérios a siderita ( $\text{FeCO}_3$ ), pertencente à classe dos carbonatos e a pirita ( $\text{FeS}_2$ ) e pirrotita ( $\text{FeS}$ ), ambos sulfetos. Destaca-se que a hematita é o principal mineral das jazidas de ferro da Austrália e do Brasil (Quaresma, 2009).

Há depósitos de minério de ferro em diversos países, sendo que a China, Austrália, Brasil, Índia, Rússia, Ucrânia, África do Sul, Estados Unidos, Canadá e Irã correspondem aos

dez países detentores das maiores reservas de minério de ferro no mundo (Chemale Jr. & Takehara, 2013).

De acordo com Sant'Ana Filho (2013), a vasta demanda do mercado internacional gera um crescimento nas indústrias mineradoras, aumentando assim o volume de rejeitos gerados, que são depositados em barragens de contenção cada vez maiores. Neste sentido, destaca-se que a cada três décadas o volume dos rejeitos de uma barragem aumenta em torno de 10 vezes. Além disso, a área de armazenamento desse rejeito aumenta aproximadamente cinco vezes nesse mesmo período de tempo, o que remete a uma preocupação relacionada às dimensões que essas estruturas podem atingir, visto que quanto maior o seu volume, mais difícil controlar e mitigar os efeitos e danos possíveis caso ocorra um rompimento (Robertson, 2017).

Diversos acidentes envolvendo barragens ocorreram em todo o mundo, resultando em significativos impactos ambientais negativos e danos à sociedade. Dessa forma, podem ser citados os acidentes ocorridos na Rússia em 1981, em que houve um deslocamento de rejeito em torno de 1,3 km, causando diversos danos ambientais; os acidentes ocorridos nas cidades de Huangmeishan em 1986, Taoshi em 2008, e na província de Hubei em 2017, todos na China; em maio de 2011 no Canadá; e novamente na China, em setembro de 2018, este último resultando em 277 vítimas fatais e 33 feridos (Wise Uranium, 2019).

No Brasil, podem ser destacados os rompimentos recentes da Barragem de Fundão e da Barragem I, localizadas no Estado de Minas Gerais. A Barragem de Fundão localizada em Mariana (MG) se rompeu no dia 05 de novembro de 2015, destruindo o distrito de Bento Rodrigues, causando mortes de 19 pessoas e contaminando os recursos hídricos da Bacia do Rio Doce. Já a Barragem I da Mina Córrego do Feijão, localizada no município de Brumadinho, sofreu colapso no dia 25 de janeiro de 2019, destruindo a área administrativa da Vale S. A. e vitimando 270 pessoas, dentre mortos e desaparecidos (Wise Uranium, 2019).

Os diversos acidentes ocorridos mundialmente com barragens indicam a necessidade de novas tecnologias de beneficiamento a seco e elaboração de um plano de gestão de rejeitos da mineração. Neste sentido, Fontes (2013) ressalta a importância da utilização do rejeito de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento, já Apaza (2018), relata o uso do minério de ferro como matéria-prima para infraestrutura asfáltica, enquanto Nociti (2011) relata o uso do minério de ferro na produção de cerâmica vermelha.

Dessa forma, este trabalho visou avaliar a evolução espaço-temporal acerca da utilização dos rejeitos das barragens de minério de ferro na construção civil, através de artigos indexados no banco de dados *Web of Science*.

## 2. Metodologia

Para a realização deste estudo foram utilizadas as abordagens qualitativa e quantitativa. Segundo Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa qualitativa é utilizada para esclarecer um problema de pesquisa, permitindo um melhor entendimento das informações que não podem ser compreendidas através de números, pois não são empregados dados estatísticos. Já a pesquisa quantitativa, segundo Cardoso (2007), utiliza técnicas estatísticas para a quantificação dos dados obtidos, medindo numericamente as hipóteses levantadas, sendo que os dados coletados são apresentados geralmente em gráficos e tabelas.

Assim, a abordagem quantitativa foi utilizada para quantificar estatisticamente as informações contidas nas publicações sobre a temática “utilização de rejeitos de minério de ferro na construção civil”; enquanto a abordagem qualitativa foi empregada para a compreensão dos resumos e análise dos artigos mais citados.

O método de pesquisa utilizado neste trabalho foi a ciênciometria. De acordo com Chapula (1998), este é um método que aborda de forma quantitativa os fenômenos estudados, sendo uma ferramenta importante no quesito sociológico. Já Vanti (2002) salienta que este método é capaz de mensurar o conhecimento científico tornando-o assim importante no setor acadêmico.

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos através de pesquisa documental que conforme Sá-Silva, Almeida e Guindani (2009) é baseada no uso de documentos já existentes, dos quais podem ser extraídas informações. Já Botelho e Cruz (2013) ressaltam que os documentos podem ser classificados como primários, correspondendo àqueles que não receberam nenhum tratamento analítico, ou secundários, que são documentos já publicados em algum veículo de comunicação.

Dessa forma, a pesquisa documental utilizada neste trabalho correspondeu às planilhas obtidas no banco de dados *Web of Science*, que disponibiliza periódicos de diversos assuntos e autores.

A amostra deste trabalho compreendeu 98 artigos obtidos através de pesquisa das palavras-chave “*construction aggregate iron*” (agregado de ferro para construção) OR “*concret iron ore*” (concreto de minério de ferro) OR “*paviment iron ore*” (pavimento de minério de ferro) realizada no *Web of Science*.

Esta pesquisa, utilizou como instrumento de dados, a análise documental, que segundo Prodanov e Freitas (2013), é elaborada a partir de materiais que não receberam tratamento analítico. Assim, nesta pesquisa, foram analisadas as planilhas obtidas no banco de dados *Web*

*of Science* que continham informações associadas, por exemplo, aos resumos dos artigos publicados e países responsáveis pelos trabalhos.

O tratamento de dados obtidos ocorreu através da estatística descritiva e da análise de conteúdo. De acordo com Barbetta (1998), a estatística descritiva baseia-se na compreensão das informações através de representações gráficas, possibilitando a organização das informações e/ou dados obtidos. Já a análise de conteúdo é um procedimento de extração de ideias principais do material analisado, permitindo a análise das informações e facilitando assim a sua interpretação (Appolinário, 2006).

A análise de conteúdo foi utilizada nesta pesquisa para descrever as informações publicadas sobre a temática “utilização de rejeitos de minério de ferro na construção civil”; enquanto a estatística descritiva foi utilizada para avaliar, dentre outros aspectos, a evolução espaço-temporal do número de publicações, área de concentração dos artigos e idioma desses.

### **3. Resultados e discussão**

De acordo com Chaves (2002), a busca por bens minerais aliada ao desenvolvimento tecnológico e econômico, tornam viável o aproveitamento de minérios com baixo teor. Nestas situações, faz-se necessário o beneficiamento dos materiais, ocorrendo um aumento expressivo no volume de rejeitos gerados, os quais são comumente dispostos em barragens.

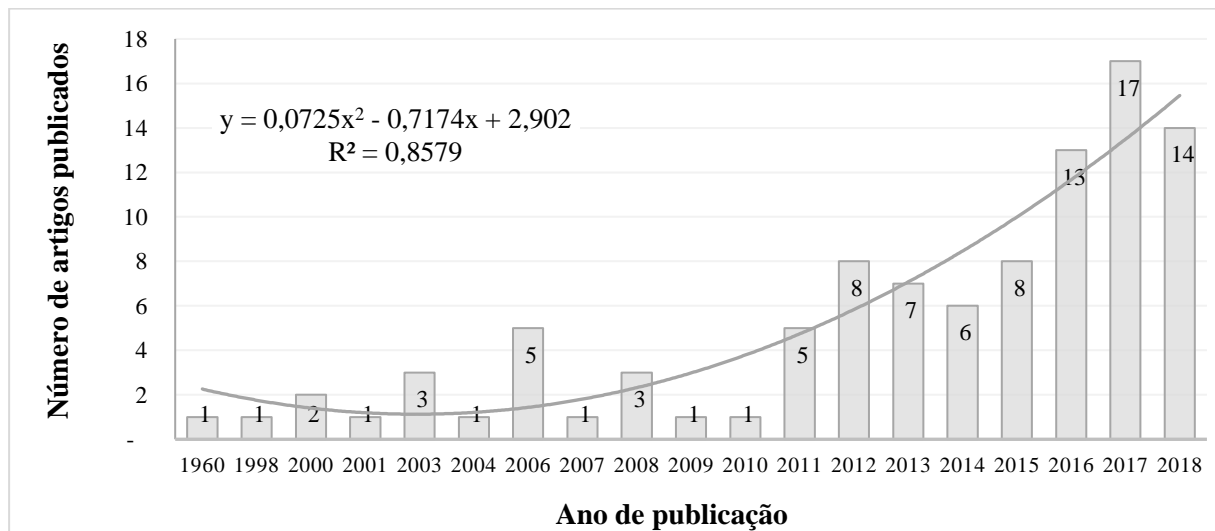
Neste contexto, o reaproveitamento desses rejeitos na produção de materiais para uso na construção civil corresponde à uma alternativa para reduzir a necessidade relacionada ao emprego de barragens para contenção desses materiais.

Quando considerada a evolução temporal dos trabalhos publicados sobre a utilização de rejeito de minério de ferro na construção civil, observa-se na Figura 1, que o maior número de publicações ocorreu no ano de 2017 (correspondendo a 17 artigos). Por outro lado, os anos de 1960, 1998, 2001, 2004, 2007, 2009 e 2010 possuem apenas 1 artigo publicado.

Salienta-se que o ano de referência de início de pesquisa dos artigos publicados foi delimitado pela disponibilidade daqueles indexados no banco de dados *Web of Science* e pelas palavras-chaves utilizadas.

Quando analisada a possibilidade de tendência de crescimento do número de publicações ao longo do tempo, verifica-se uma relação estatística significativa ( $y = 0,0725x^2 - 0,7174x + 2,902$ ;  $R^2 = 0,8579$ ), indicando um crescimento exponencial de trabalhos científicos publicados.

Figura 1 – Evolução temporal dos artigos publicados sobre a utilização do rejeito de minério de ferro na construção civil entre os anos de 1960 e 2018.



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

Destaca-se que o aumento do número de artigos publicados a partir de 2016 pode ser associado aos acidentes envolvendo as barragens que ocorreram em Mariana (MG), em novembro de 2015, e na China, em março de 2017.

Com relação às publicações relacionadas ao rompimento da Barragem de Fundão, Facury *et al.* (2019) catalogaram e analisaram 199 trabalhos científicos, publicados com participação de 91 diferentes instituições, indicando que o acidente provocou uma movimentação relevante na comunidade científica visando compreender suas causas e consequências ambientais, sociais ou econômicas.

Quando considerados os três artigos mais citados, apresentados no Quadro 1, nota-se que o maior número de citações (73) está associada ao trabalho desenvolvido por Alp *et al.* (2008) e publicado no periódico *Journal of Hazardous Materials*.

O artigo de Alp *et al.* (2008) ressalta a utilização da escória de cobre para a fabricação de cimento Portland como um processo vantajoso, uma vez que a cada tonelada de cobre fabricada são geradas 2,2 toneladas de escória. Desse modo, considerando a grande quantidade de resíduos gerados, assim como o potencial contaminador desses materiais e a necessidade de uma gestão ambiental complexa e de alto valor econômico, a utilização da escória de cobre na produção do cimento mostra-se interessante.

Os estudos realizados por Alp *et al.* (2008) demonstraram que a performance mecânica das argamassas preparadas a partir dos clínqueres de escória de cobre foram semelhantes

àquelas dos clínqueres de minério de ferro, possuindo as propriedades desejadas para os cimentos industriais, sendo, dessa forma, viável a sua utilização.

Quadro 1 - Artigos mais citados em estudos científicos envolvendo a utilização de rejeitos de minério de ferro na construção civil.

<b>Autores</b>	<b>Título do artigo</b>	<b>Periódico</b>	<b>Ano</b>	<b>Total de citações</b>
Alp, I.; Deveci, H.; Sungun, H.	<i>Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production</i>	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	2008	73
Zhao, Sujing; Fan, Junjiang; Sun, Wei	<i>Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high-performance concrete</i>	<i>Construction and Building Materials</i>	2014	60
Yellishetty, Mohan; Karpe, Vanda; Reddy, E. H.; Subhash, K. N.; Ranjith, P. G.	<i>Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study</i>	<i>Resources Conservation and Recycling</i>	2008	48

Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

Além disso, os ensaios de lixiviabilidade indicaram que a argamassa composta pelos clínqueres de escória de cobre não apresentavam problemas ambientais, contribuindo ainda para a redução dos impactos ambientais negativos decorrentes da disposição inadequada dos resíduos (Alp *et al.*, 2008).

O segundo trabalho com maior número de citações (60) foi desenvolvido por Zhao *et al.* (2014) e publicado no periódico *Construction and Building Materials*. De acordo com Zhao *et al.* (2014), a indústria de ferro e aço é uma das principais indústrias da China. Com o surgimento de novas tecnologias, as demandas por recursos naturais aumentam, causando impactos ambientais como a geração de resíduos e o descarte inadequado de resíduos perigosos, podendo contaminar o solo, os recursos hídricos, além de acarretar danos à saúde humana.

Neste sentido destaca-se que levantamentos estatísticos realizados em 2008, demonstraram que dos 0,6 bilhões de toneladas de rejeito de minério de ferro gerados na China, menos de 7% foram reaproveitados. Dessa forma, o estudo desenvolvido por Zhao *et al.* (2014) aborda a possibilidade de utilizar os rejeitos de minério de ferro para substituir um agregado natural na produção de concreto de ultra alto desempenho, que além de contribuir para a redução da exploração dos recursos naturais, iria diminuir significativamente a questão do espaço para disposição desses rejeitos.



Neste artigo Zhao *et al.* (2014) realizaram testes substituindo 100% dos agregados naturais pelo rejeito de minério de ferro. Os resultados obtidos indicaram uma redução significativa na resistência do material, sendo necessária a realização de novos testes a partir dos quais foi possível notar que, quando a substituição dos agregados não ultrapassava o limite de 40%, o resultado era satisfatório.

O trabalho de Yellishetty *et al.* (2008), publicado no periódico *Resources Conservation and Recycling* foi citado em 48 artigos. Destaca-se que a atividade mineradora na Índia contribui significativamente para a economia do país, correspondendo a 2% do produto interno bruto (PIB), posicionando-o entre os cinco maiores países com reservas de minério de ferro e carvão, além de empregar milhões de pessoas (Ministério de Relações Exteriores, 2012).

Entretanto, de acordo com Yellishetty *et al.* (2008), um dos principais problemas enfrentados está relacionado à falta de espaço para dispor esses resíduos, além da contaminação do solo por metais pesados. Assim, visando minimizar esses impactos, estudos foram realizados a fim de verificar a viabilidade de utilizar os rejeitos de minério na construção civil. Para tal, foram coletadas amostras de rejeitos de vários pontos das barragens.

Através das análises de partículas notou-se que o tamanho dos grãos está situado entre 12,5 – 20 mm, sendo apropriado para utilização como agregado. Dessa forma, pode-se aproveitar entre 50 - 60% do volume total dos resíduos, contribuindo para a redução da extração de matéria-prima, além de reduzir as áreas ocupadas com a disposição do rejeito (Yellishetty *et al.*, 2008).

Quanto aos países de origem dos artigos analisados nesta pesquisa, nota-se na Figura 2 que a China (41%), Índia (11%), Brasil (9%) e Estados Unidos (8%), foram os países que mais publicaram trabalhos sobre a utilização de resíduos de minério de ferro na construção civil. A categoria “outros” corresponde aos países que tiveram percentual de publicações inferior a 2%, tais como Canadá, França, Japão e México.

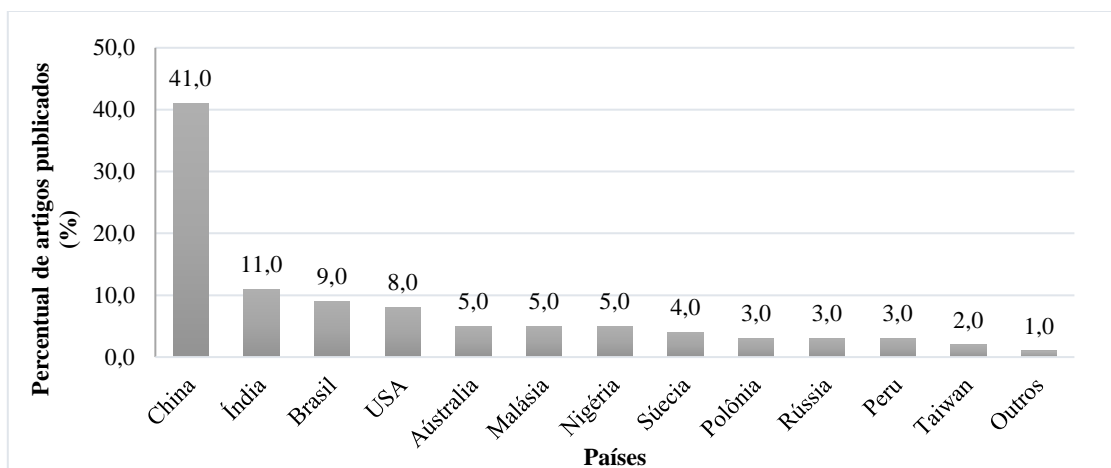
O número significativo de publicações da China (41%) pode ser relacionada à importância econômica do minério de ferro para o país (Zhao *et al.*, 2014). Entretanto, apesar das reservas relativamente abundantes, o minério de ferro possui baixa qualidade, levando à geração de grande volume de rejeitos que são depositados em barragens (Li, 2018).

Já a Índia, que se destaca com 11% do total de publicações, possui reservas relevantes de minério de ferro, podendo-se salientar o Estado minerador de Goa, responsável por 98% da produção de minério de ferro do país (Yellishetty *et al.*, 2008).

Com relação ao Brasil, responsável por 9% dos artigos publicados, ressalta-se que o país ocupa a segunda posição no ranking das reservas mundiais de minério de ferro (USGS, 2019).

Além disso, os acidentes recentes com barragens, principalmente o rompimento da Barragem de Fundão, em 2015, podem justificar o interesse do país em estudos nessa área.

Figura 2 – Percentual de artigos científicos publicados por países, entre os anos de 1960 a 2018.



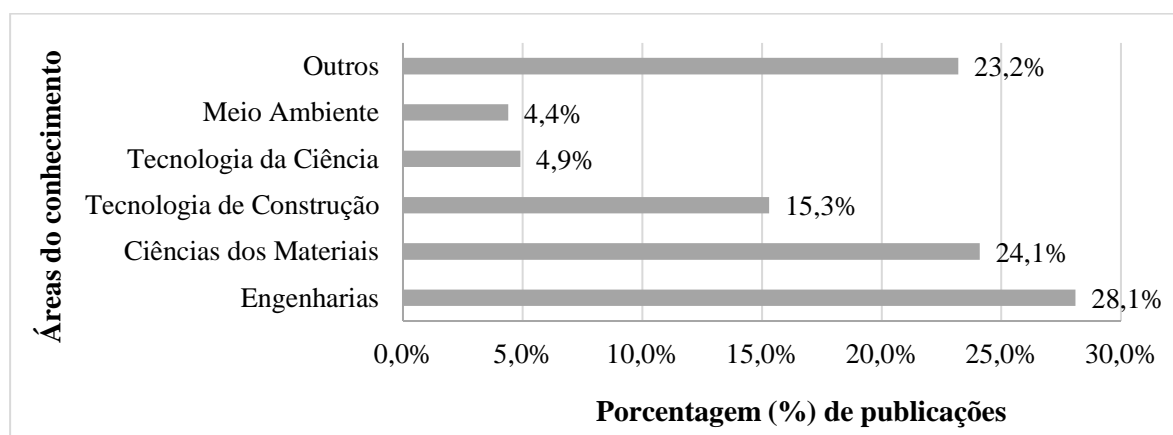
Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

As publicações provenientes dos Estados Unidos (8%) podem ser justificadas pelo fato do país possuir aproximadamente 110 bilhões de toneladas de minério de ferro, sendo em sua maioria um minério de baixa qualidade do tipo taconito, que necessita do beneficiamento para agregar valor ao produto mineral (USGS, 2019).

Quanto aos idiomas dos artigos, verificou-se que 98% dos artigos utilizavam inglês, 1% francês e 1% servo. Tal fato pode ser associado à pesquisa realizada com palavras em inglês. Além disso, conforme Ferreira e Targino (2010), a fim de ampliar o alcance das publicações, tem-se empregado o inglês tendo em vista que este é o idioma mundialmente utilizado.

A utilização de rejeito de minério de ferro na construção civil, tem sido objeto de estudos científicos em diferentes áreas (Figura 3). Dentre as 203 áreas de pesquisa que publicaram trabalhos com esta temática, 28,1% correspondem à área de Engenharia; 24,1% estão relacionados às Ciências dos Materiais; 15,3% estão associados à área de Tecnologia de Construção; 4,9% à Tecnologia da Ciência e 4,4% à área de Meio Ambiente. As categorias restantes, perfazendo 23,2% das publicações, estão relacionadas às áreas de Química, Geologia, Processamento Mineral e Metalurgia, caracterizadas por publicações inferiores a 3%.

Figura 3 - Percentual de artigos científicos publicados por área de conhecimento, entre os anos de 1960 a 2018.



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

Ressalta-se que os estudos envolvendo a utilização de minério de ferro na construção civil citam diversos materiais como blocos, concretos, argamassa e asfalto.

### 3.1. Utilização do rejeito de minério de ferro em materiais da construção civil

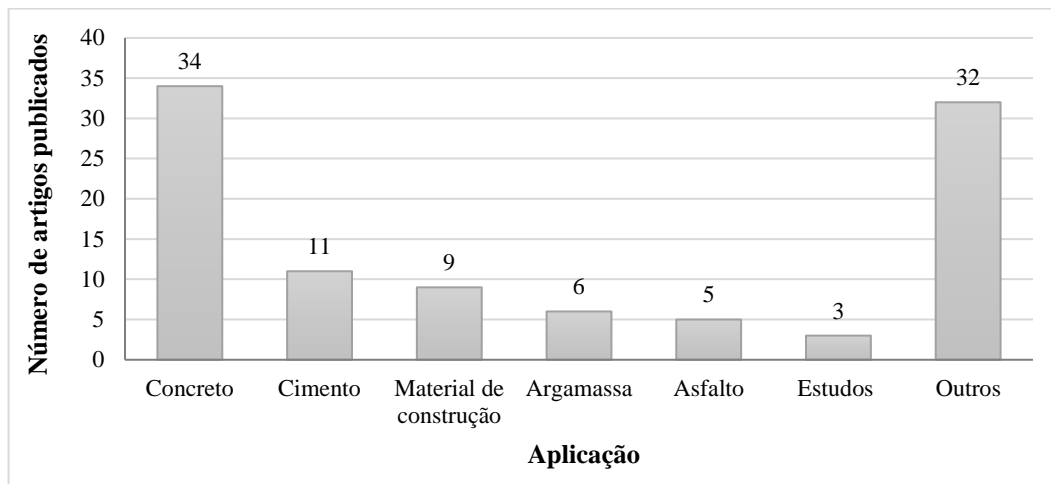
Segundo Cunha *et al.* (2017), a indústria de construção civil consome um número relevante de recursos naturais, fazendo necessária a realização de pesquisas objetivando a utilização de recursos alternativos que, além de atenderem ao setor, reduzam os impactos ambientais negativos e os custos. Neste sentido, o rejeito proveniente da mineração pode ser reutilizado na construção civil em diferentes materiais.

Os artigos publicados indicavam a utilização do rejeito de minério de ferro em diversas áreas da construção civil como, por exemplo, o concreto (citado em 34 artigos), argamassa (notado em 6 artigos) e asfalto (indicado em 3 artigos), conforme pode ser notado na Figura 4.

De modo geral, o concreto é composto por cimento, agregados como rochas britadas e água, podendo ser utilizados aditivos em sua composição (Neville, 2016). Contudo, ainda de acordo com Neville (2016), faz-se necessária a realização de diversas análises para agregar qualquer substância ao concreto, uma vez que este precisa apresentar, dentre outras propriedades, resistência e durabilidade.

De acordo com Bauer (2012), a utilização do rejeito como agregado no concreto depende mais do tamanho das partículas do que a composição química, visto que a presença de óxidos de ferro na quantidade adequada confere ao concreto alta densidade e resistência.

Figura 4 - Aplicações do rejeito de minério de ferro na construção civil, citadas nos artigos pesquisados.



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

A utilização de rejeitos como agregado em cimento correspondeu a 11 artigos analisados. De acordo com Cunha *et al.* (2017), o cimento é um dos materiais mais importantes em uma obra, correspondendo a um pó fino com propriedades ligantes que endurece com adição de água.

O asfalto, citado em 5 artigos, é usado na pavimentação, sendo obtido através da refinação do petróleo. De modo geral, é caracterizado por alta viscosidade, com propriedades impermeabilizantes e adesivas, não volátil, podendo ser de cor preta ou marrom, composto por asfaltenos, resinas e hidrocarbonetos de natureza aromática, solúveis em tricloroetileno (Petrobras, 2015).

A aplicação do rejeito na construção civil, mostra-se viável, ressalta-se, porém, a necessidade de realização de diversos tipos análise, como química, mecânica, física e morfológica, visando uma melhor aplicação desses materiais.

### 3.2. Análises mais citadas nos artigos analisados

As amostras são submetidas a diferentes ensaios, incluindo testes físicos (como densidade, flotação e separação magnética), ensaios mecânicos (cisalhamento, compressão, tração e torção), químicos e mineralógicos (tais como a difratometria de raios-X e microfluorescência de raios-X) e morfológicos (Andrade, 2014).

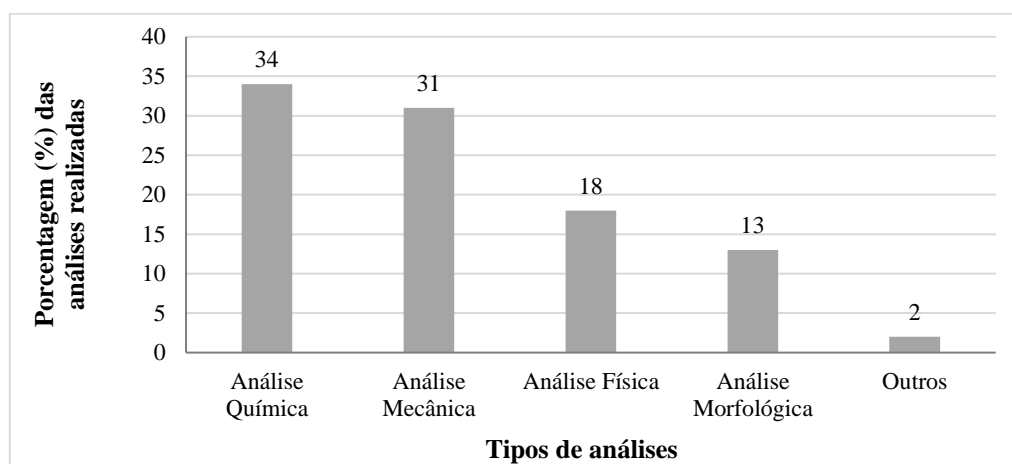
As análises mais citadas nos trabalhos analisados foram os testes químicos, verificados em 34% dos artigos; testes mecânicos, observados em 31% das publicações, testes físicos

citados em 16% dos trabalhos e análise morfológica, correspondendo a 13% das citações. Outras análises que não apresentaram um número significativo, tais como a análise termogravimétrica, foram representadas por “outros” na Figura 5, correspondendo a 6% das análises citadas.

Os testes de composição química e mineralógica, citados em 34% dos artigos, empregaram a microfluorescência de raios-X (correspondendo a 26,5% dos trabalhos) e a difratometria de raios-X (citada em 29,4% dos artigos). Entretanto, 44,1% dos artigos não citaram o método de análise química utilizado.

A microfluorescência de raios-X, segundo Licht *et al.* (2007), é muito utilizada pela indústria mineral no controle de processos, tanto na exploração como no beneficiamento, permitindo a análise semi-quantitativa dos minerais presente na amostra analisada. De forma semelhante, a difratometria de raios-X permite a análise quantitativa e semi-quantitativa dos minerais contidos na amostra (Andrade, 2014).

Figura 5 - Análises realizadas nos rejeitos de minério de ferro verificadas nos artigos publicados no banco de dados *Web of Science*



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

Segundo Licht *et al.* (2007), a detecção de óxidos pelo método de microfluorescência de raios-X é realizada aplicando raios-X na superfície da amostra na forma dissolvida. Quando os íons retornam ao estado fundamental a análise da fluorescência é realizada. Já na difratometria de raios-X é emitido um feixe de raios-X sobre uma lâmina, contendo a amostra a ser analisada, gerando padrões de difrações de acordo com as distâncias interplanares dos cristais presentes na amostra.

A análise morfológica, citada em 13% dos artigos, segundo Andrade (2014), é realizada através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), a fim de se obter uma identificação química e mineralógica dos constituintes da amostra e tamanho das partículas, demonstrando assim, os aspectos associados à microestrutura dos rejeitos.

A análise mecânica, observada em 31% dos artigos, segundo Zolin (2010), permite que sejam reveladas propriedades necessárias para a construção civil, como a resistência e durabilidade, sendo possível escolher o material que melhor se adapta a um determinado projeto e a influência nos processos de fabricação. As análises podem ser destrutivas, que inutilizam as amostras, e não destrutivas. Os ensaios destrutivos compreendem os testes de tração, dureza, torção, cisalhamento e compressão, enquanto os ensaios não destrutivos visam caracterizar as discontinuidades e defeitos nos materiais.

Os ensaios de cisalhamento foram citados em 4% dos artigos analisados. Destaca-se que nesta análise, segundo Brunetti (2008), uma força é aplicada em uma determinada área, correspondendo, assim, à análise da força tangencial por unidade de área a fim de determinar a resistência do material.

Já os ensaios de tração, observados em 8,2% dos artigos analisados, visam provocar uma ruptura na peça. Ainda segundo Brunetti (2008), o ensaio de tração também é utilizado para verificar a resistência do material, que é tracionado e se deforma até a ruptura.

Por sua vez, os ensaios de compressão, citados em 16% dos trabalhos, são utilizados para avaliar a tensão à qual o material pode resistir, possibilitando a certificação da qualidade da estrutura em que esse material será utilizado (Gibrão & Santos, 2015).

Quando consideradas as análises físicas, as mais citadas foram a análise de condutividade térmica, verificada em 5,1% dos trabalhos; densidade, também observada em 5,1% dos artigos; flotação citada em 4,8% dos trabalhos e a análise granulométrica e a separação magnética, citadas, cada uma, em 2,4% dos artigos.

Destaca-se que a condutividade térmica, segundo Incropera *et al.* (2008), fornece uma indicação da taxa de transferência da energia pelo processo de difusão, que depende da estrutura física da matéria atômica e molecular. Assim, por exemplo, o aumento da pressão em substâncias sólidas metálicas poderá distorcer a estrutura cristalina e induzir uma resistência, diminuindo a condutividade térmica em componentes químicos como o ferro, cobre, prata, níquel, platina, bismuto e do antimônio, e aumentar no caso do chumbo, do estanho, do cádmio e do zinco.

A análise de densidade, citada em 5,1% dos artigos, é medida através da massa da amostra analisada e o seu volume. Este tipo de análise mostra-se relevante uma vez que a

utilização de agregados afeta diretamente as propriedades mecânicas e físicas do material como, por exemplo, a sua resistência e a absorção (Carrijo, 2005).

A flotação, citada em 4,8% dos trabalhos, consiste na separação de misturas heterogêneas, sólidas e líquidas através da introdução de bolhas de ar, permitindo a separação da parte útil daquelas consideradas de valor secundário ou estéril, tornando possível a análise individual de cada um desses produtos (Fonseca, 2017).

O avanço das tecnologias possibilita o desenvolvimento de métodos para minimizar os impactos negativos provenientes da mineração. Neste sentido, podem ser destacados o beneficiamento mineral a seco e os estudos relacionados ao reaproveitamento dos rejeitos, possibilitando dessa forma a redução do número de barragens bem como a diminuição dos impactos ambientais negativos decorrentes do uso dessas estruturas.

#### **4. Considerações finais**

A exploração do minério de ferro é uma atividade importante para o desenvolvimento econômico dos países que possuem esse recurso. Entretanto, este processo desencadeia diversos impactos ambientais negativos, dentre os quais pode ser destacada a geração de rejeitos. De modo geral, esses rejeitos são frequentemente dispostos em barragens, que em caso de rompimento, causam danos aos meios físico, biológico e socioeconômico algumas vezes irreversíveis.

Desse modo, esta pesquisa visou analisar a evolução espaço-temporal dos trabalhos científicos publicados e indexados no banco de dados *Web of Science* relacionados ao uso do rejeito de minério de ferro na construção civil.

Os dados obtidos permitiram notar um crescimento exponencial do número de artigos publicados entre os anos de 1960 e 2018. Ressalta-se que o crescimento do número de publicações observado a partir de 2016 pode estar associado aos recentes acidentes envolvendo barragens de contenção de rejeitos ocorridos no Brasil e na China, os quais tiveram ampla divulgação mundial.

Destaca-se que os países com maior número de publicações foram a China, Índia e Brasil. De modo geral, estas publicações podem estar associadas às grandes reservas minerais e produção mineral expressiva verificadas nestes países, as quais exigem medidas alternativas relacionadas à destinação dos rejeitos.

Com relação às áreas de conhecimento que mais publicaram artigos, pode ser ressaltada a construção civil, dada a demanda por matéria-prima e, conseqüentemente, a realização de

pesquisas por substâncias alternativas; e a área ambiental, relacionada aos recentes acidentes com barragens e a dificuldade associada à definição de locais para a disposição desses resíduos. Além disso, ressalta-se que o idioma inglês predominou nos artigos analisados, por ser a língua mundialmente falada.

Dentre os materiais da construção civil que mais comumente utilizaram o rejeito de minério de ferro, destacam-se o concreto, a argamassa, o asfalto e o cimento. Verificou-se que o emprego do rejeito pode ser associado à semelhança entre as propriedades químicas e físicas destes com a matéria-prima utilizada para a produção desses produtos. Além disso, de modo geral, a utilização de rejeito é responsável por conferir aos produtos alta densidade e resistência.

Nota-se assim que o reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro como subprodutos da construção civil pode reduzir os impactos associados à disposição desses materiais, além de contribuir para diminuir a demanda por recursos naturais primários. Apesar disso, recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas na área do beneficiamento a fim de conseguir um maior aproveitamento das substâncias minerais.

As análises mais citadas nos artigos abrangeram a caracterização física, que permite conhecer a resistência, granulometria e a plasticidade do material; a caracterização química que identifica a composição mineralógica presente nessas substâncias; a caracterização mecânica, para avaliação da resistência; e a caracterização morfológica dos rejeitos, que permite uma identificação química e mineralógica mais precisa de seus constituintes. Ressalta-se que todas essas análises são fundamentais para indicar a viabilidade da reutilização dos rejeitos de acordo com a sua finalidade.

Por fim, sugere-se a continuidade de pesquisas visando a obtenção de tecnologias que viabilizem o uso dos resíduos da mineração em diferentes produtos, contribuindo, assim, para a redução dos impactos negativos associados à disposição desses resíduos no meio ambiente. Além disso, recomenda-se a criação pelas mineradoras, de um plano de Gestão de Resíduos, a fim de se encontrar soluções para o rejeito do minério de ferro e um maior investimento nas técnicas de beneficiamento a seco.

## **Referências**

Alp, I.; Deveci, H. & Sungun, H. (2008). Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 159, n. 2–3, 30, p. 390 - 395.



Andrade, L. C. R. (2014). *Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil*. Tese. (Pós-graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 112 p.

Apaza, F. R.; Guimarães, A. C. R.; Sousa, M. A. S. & Castro, C. D. C. (2018). Estudo sobre a utilização de Resíduo de Minério de Ferro em microrrevestimento asfáltico. *Revista Transporte*, v. 26, n. 2, p. 118 – 138. DOI:10.14295/transportes.v26i2.1254.

Appolinário, F. (2006). *Metodologia da ciência: filosofia e prática da pesquisa*. São Paulo: Pioneira.

Barbetta, P. A. (1998). *Estatística Aplicada às Ciências Sociais*. Florianópolis: Editora da UFSC.

Bauer, L. A. F. (2012). *Materiais de Construção*. vol. 1. 5ª edição. Editora Livros Técnicos e Científicos: Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

Botelho, J. M. & Cruz, V. A. G. (2013). *Metodologia científica*. São Paulo: Pearson Education do Brasil.

Brunetti, F. (2008). *Mecânica dos fluidos*. 2ª. ed. rev, São Paulo: Pearson Prentice Hall.

Cardoso, T. F. (2007). *Os efeitos causados no gerenciamento de um setor de transporte público, decorrentes do uso das ferramentas de tecnologia da informação*. Monografia (Graduação em Administração). FUNCESI, Itabira.

Carrijo, P. M. (2005). *Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto*. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Chapula, C. A. M. (1998). O papel da infometria e da ciênciometria e sua perspectiva nacional e internacional, Brasília. *Ciência da Informação*, v. 27, n. 2, p. 134-140.

Chaves, A. P. (2002). *Teoria e prática do tratamento de minérios*. 2ª ed., vol.1. São Paulo: Signus Editora.

Chemale Jr., F. & Takehara, L. (2013). *Minério de Ferro: Geologia e Geometarlurgia*. São Paulo: Editora Blucher.

Cunha, A. M.; Abitante, A. L.; Lucio, C. S.; Espartel, L.; Stein, R. T. & Simionato, V. (2017). *Construção Civil*. Porto Alegre: Editora SAGH.

Facury, D. M.; Carvalho, V. B. G. B.; Cota, G. E. M. & Magalhães Junior, A. P. (2019). Panorama das publicações científicas sobre o rompimento da Barragem de Fundão (Mariana-MG): subsídios às investigações sobre o maior desastre ambiental do país. *Caderno de Geografia*, v. 29, n. 57, p. 306 – 333. 2019. DOI 10.5752/p.2318-2962.2019v29n57p306.

Ferreira, S. M. S. P. & Targino, M. G. (2010). *Acessibilidade e visibilidade de revistas científicas eletrônicas*. São Paulo: SENAC São Paulo.

Fonseca, R. R. (2017). *Monitoramento e controle avançado aplicados à flotação por ar dissolvido*. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas (SP). 159 p.

Fontes, W. C. (2013). *Utilização do rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento*. Dissertação (Pós-Graduação Engenharia Civil). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto (MG), 112 p.

Gibrão, S. S. & Santos, A. C. (2015). Ensaio à compressão do concreto – Dispersão de resultados laboratoriais. *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, n. 51, p. 63-77.

Incropera, F. P.; Dewitt, D. P.; Bergman, T. L. & Lavine, A. S. (2008). *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC).

Li, G. (2018). *Iron Ores and Iron Oxide Materials*. IntechOpen. Acesso em 20 de setembro de 2019 em <https://www.intechopen.com/books/iron-ores-and-iron-oxide-materials/the-chinese-iron-ore-deposits-and-ore-production>.

Licht, O. A. B; Mello, C. S. B. & Silva, C. R. (2007). *Prospecção Geoquímica Depósitos Minerais Metálicos, Não-Metálicos, Óleo e Gás*. Rio de Janeiro: CPRM.

Ministério das Relações Exteriores (2012). *Como exportar: Índia*. Acesso em 15 de novembro de 2019 em <http://www.investexportbrasil.dpr.gov.br>.

Neville, A. M. (2016). *Propriedades do concreto*. 5ª ed. Rio Grande do Sul: Bookman.

Nociti, D. M. (2011). *Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas*. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais). Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá (SP), 110 p.

Petrobras. (2015). *Asfalto: Informações técnicas*. Acesso em 10 de outubro de 2019 em <http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/public/downloads/Asfalto-InfoTecnicas.pdf>.

Prodanov, C. C. & Freitas, E. C. (2013). *Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico*. 2ª ed. Novo Hamburgo: Feevale.

Quaresma, L. F. (2009). *Relatório Técnico 18: Perfil da Mineração de Ferro*. Acesso em 20 de novembro de 2019 em [http://www.mme.gov.br/documents/36108/448620/P09\\_RT18\\_Perfil\\_da\\_Minerao\\_de\\_Ferro.pdf/362a62a6-04db-b739-98d0-03f7ff9f749f?version=1.0](http://www.mme.gov.br/documents/36108/448620/P09_RT18_Perfil_da_Minerao_de_Ferro.pdf/362a62a6-04db-b739-98d0-03f7ff9f749f?version=1.0).

Robertson, A. M. (2017). *Managing risk doing, checking the checkers for tallings, water and waste management*. Acesso em 19 de setembro de 2019 em <http://www.eticaeventos.net.br/sngb2017/apresentacoes/snbr/abertura.pdf>.

Sá-Silva, J. R.; Almeida, C. D. & Guindani, J. F. (2009). Pesquisa documental: pistas teóricas e metodológicas. *Revista Brasileira de História & Ciências Sociais*, n. 1, p. 1 - 15.

Sant'ana Filho, J. N. (2013). *Estudo de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para fabricação de blocos Inter travados de uso em pátios industriais e alto tráfego*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) CEFET, Belo Horizonte, 130 p.

United States Geological Survey – USGS (2019). *Mineral Commodity Summaries 2018*. Acesso em 05 de agosto de 2019 em <https://www.usgs.gov/centers/nmic/mineral-commodity-summaries>.

Vanti, N. A. P. (2002). Da Bibliometria à Webometria: uma exploração conceitual dos mecanismos utilizados para medir o registro da informação e a difusão do conhecimento, Brasília, *Ciência da Informação*, v. 31, n. 2, p. 152-162.

World Information Service on Energy (Wise) Uranium. (2019). *Chronology of major tailings dam failures*. WISE Uranium Project. Acesso em 15 de junho de 2019 em <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>.

Yellishetty, M.; Karpe, V.; Reddy, E. H.; Subhash, K.N. & Ranjith, P. G. (2008). Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study. *Resources Conservation and Recycling*, 52 (11): 1283-1289.

Zhao, S.; Fan, J. & E Sun, W. (2014). Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 50, p. 540 – 548,2014.

Zolin. I. (2010). *Curso Técnico em Automação Industrial: Ensaio Mecânicos e análises de falhas*. 3ª ed. Univerdade Federal de Santa Maria. Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 102 p. Acesso em 10 de novembro de 2019 em [http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo\\_ctrl\\_proc\\_indust/tec\\_autom\\_ind/ensaios\\_mec/161012\\_ens\\_mec\\_an\\_fal.pdf](http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_ctrl_proc_indust/tec_autom_ind/ensaios_mec/161012_ens_mec_an_fal.pdf).

#### **Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito**

Fabiana Lopes Lage – 40%

Kelly de Moura Gonçalves – 40%

Juni Cordeiro – 10%

Maria Auxiliadora Lage – 10%