

Aplicação da escória de cobre em matrizes cimentícias: Uma revisão sistemática

Jonathan Simões Roque¹,
César Augusto Casagrande²,
Lidiane Fernanda Jochem³

Resumo: Nos últimos anos, vem sendo frequente o aumento da preocupação da geração de resíduos nos ciclos produtivos de diversos setores da sociedade, nesta perspectiva a construção civil tem um grande potencial para a reutilização desses materiais, inclusive a escória de cobre, que apesar do aumento da taxa do seu reaproveitamento, a grande quantidade de sua produção anual até o momento é muitas vezes descartada em lixões ou depósitos. Desta forma, realizou-se uma revisão sistemática da utilização da escória de cobre em matrizes cimentícias por meio da análise de 30 artigos publicados entre os anos de 2015 e 2020, avaliando-se o slump, resistência à compressão e tração aos 28 dias. Verificou-se que o limite potencial de utilização é de 35% de escória de cobre quando a substituição é no agregado miúdo, obtendo-se aumentos de 25,9% e 3,38% na resistência à compressão e tração, respectivamente. Para substituições no cimento, o limite potencial é de 5% de escória de cobre. A partir de um teor de escória de 70% a resistência à compressão e tração foram inferiores à mistura de controle. A massa específica da escória de cobre mostrou-se mais elevada em comparação aos agregados miúdos geralmente utilizados, resultando assim em concretos com maiores massas específicas.

Palavras-chave: Escória; cobre; concreto; argamassa; resíduos.

Application of copper slag in cementitious matrices: a systematic review

Abstract: In recent years, there has been frequent concern about the generation of waste in the productive cycles of different sectors of society. In this perspective, civil construction has a great potential for the reuse of these materials, including copper slag, which despite the increase in rate of reuse, the large amount of its annual production to date is oftentimes discarded in dumps or deposits. Thus, this work performs a systematic review of the use of copper slag in cementitious matrices through the study of 30 articles published between the years 2015 and 2020, performing analyzes in relation to slump, compressive strength, and tensile strength at 28

¹ Engenheiro Civil, Universidade Federal de Pernambuco, jonathansimoes1@hotmail.com.

² Doutor em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, cezarcasagrande@utfpr.edu.br.

³ Doutora em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, lidiane@utfpr.edu.br.

days. It was found that the ideal limit of use occurs in 35% copper slag in matrices in which the substitution occurred in the fine aggregate, obtaining an increase of 25,9% and 3,38% in the compression and tensile strength, respectively. For cement substitutions, this limit occurs at 5%. From a slag content of 70%, the compressive and tensile strengths were lower than the control mixture. The specific gravity of the copper slag was shown to be higher compared to the fine aggregate generally used, resulting in concretes with higher specific gravity.

Keywords: Slag; copper; concrete; mortar; waste.

Introdução

A busca por eficiência energética e as constantes problemáticas ambientais direcionam os pesquisadores na direção do desenvolvimento sustentável, dessa forma a quantidade de subprodutos provenientes das mais variadas atividades industriais se caracterizam como um empecilho e conseqüentemente necessitam de soluções viáveis em relação a sua correta destinação (RESENDE, 2009).

Um desses recursos é a escória de cobre, que representa o resíduo produzido durante a atividade piro metalúrgica do metal cobre, sendo então necessária a busca pela sua correta destinação (GORAI, JANA e PREMCHAD, 2003).

Neste cenário, é importante ressaltar que o ramo da construção civil se apresenta como a solução ideal de destinação desse material, devido principalmente ao grande volume de matéria prima que consome. Este reaproveitamento já vem ocorrendo há alguns anos, a escória de cobre vem sendo utilizada em matrizes cimentícias, podendo ser aplicada de duas formas: incorporação das escórias industriais ao cimento Portland e como substituição ao agregado na argamassa e/ou ao concreto, podendo ser uma substituição parcial ou completa (MOURA, GONÇALVES e LEITE, 2009).

Estes estudos já foram realizados por diversos pesquisadores, por exemplo, Moura, Gonçalves e Leite (2009) concluíram que a utilização da escória de cobre como parte do agregado miúdo em até 40% em volume, proporcionou melhor desempenho do concreto avaliado quanto às propriedades mecânicas avaliadas, já para valores acima de 50%, as resistências mostraram-se inferiores a mistura de referência. Já Al-Jabri *et al.* (2011) estudou o

efeito da substituição de escória de cobre como substituto aos agregados miúdos na resistência das argamassas, constatando que a mistura com 50% de escória de cobre rendeu a maior média de resistência à compressão em 28 dias. Além da substituição no agregado miúdo, é possível realizar em relação ao cimento, como estudado por Al-Jabri et al. (2006), em que os resultados indicaram que o uso de 5% de escória de cobre no lugar do cimento Portland produz um desempenho semelhante a mistura de controle, especialmente em baixas proporções de água.

Desta forma, o presente trabalho realizou uma revisão sistemática sobre o tema proposto para que se tenha uma visão clara e abrangente dos estudos disponíveis sobre a aplicação da escória de cobre em matrizes cimentícias. A revisão sistemática ajuda a identificar lacunas na pesquisa de um determinado tema, algo que não seria observado facilmente em um estudo individualizado de artigos. Destacam também pontos críticos do estudo, possibilitando o aprimoramento dos trabalhos futuros na área temática, além de identificarem questões para as quais as evidências disponíveis fornecem respostas claras e, portanto, pesquisas adicionais são menos necessárias (PERIČIĆ e TANVEER, 2019).

Neste trabalho realizou-se uma revisão sistemática com a escolha de 30 artigos publicados entre os anos de 2015 e 2020 que sobre o uso de escória de cobre em matrizes cimentícias (concreto, argamassa ou pasta de cimento) e realizaram análises em relação ao ensaio de *slump* da mistura, resistência a compressão ou tração aos 28 dias.

Materiais e método

O trabalho consistiu em uma pesquisa científica com um processo bem definido para identificar, selecionar, coletar dados relevantes, e descrever os resultados obtidos em cada um dos artigos analisados, permitindo assim organizar as informações de forma objetiva e consequentemente facilitando a discussão do tema.

O método de pesquisa deste trabalho teve quatro etapas principais: definição dos parâmetros de pesquisa (envolve a seleção das palavras chaves, limitação de artigos por ano de

publicação e definição do banco de dado a ser utilizado), análises (determinação das informações principais a serem extraídas de cada artigo), síntese (organização de todas a informações obtidas) e por fim, tem-se a etapa de escrita dos resultados obtidos. Na Figura 1 é apresentado um esquema idealizado das quatro etapas do método para esta pesquisa.

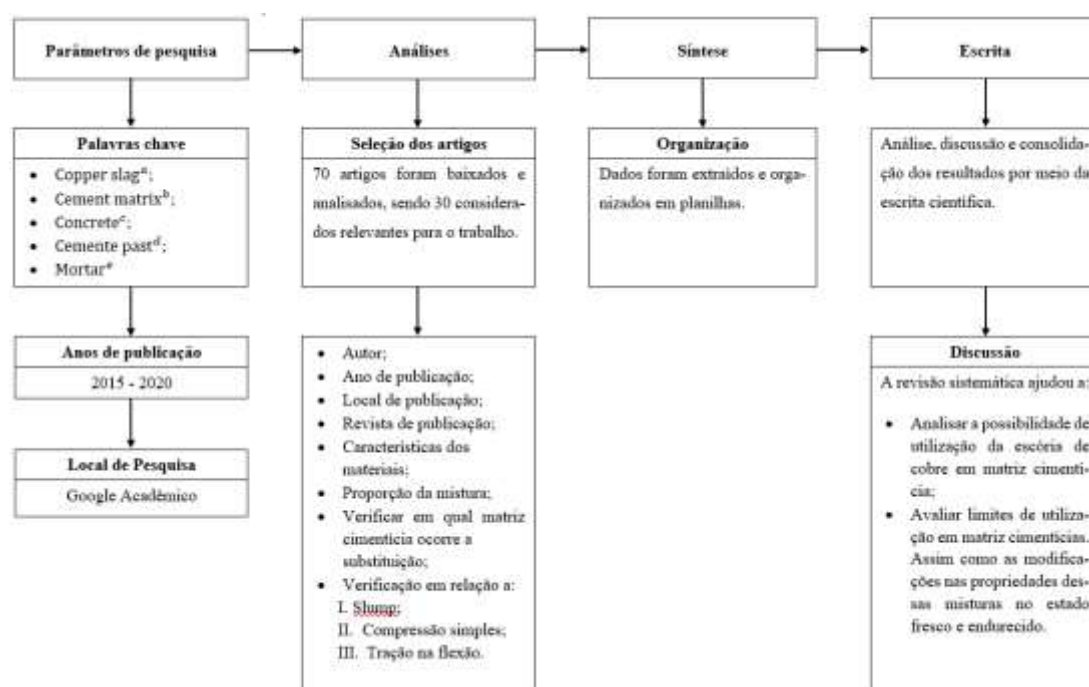


Figura 1. Etapas da revisão sistemática adotada

^a Escória de cobre, ^b Matriz cimentícia, ^c Concreto, ^d Pasta de cimento, ^e Argamassa

A pesquisa para a seleção dos artigos foi realizada na plataforma do Google Acadêmico, sendo utilizado as seguintes palavras-chave: *Copper slag*, *cement matrix*, *concrete*, *cement past* e *mortar*, em que todas as palavras são provenientes da língua inglesa, devido ao fato da escassez de artigos brasileiros relacionados ao tema durante o período analisado (2015-2020).

Foram selecionados 70 artigos relacionados ao tema e entre esses, somente 30 atenderam aos critérios de inclusão da pesquisa, que foram:

- I. Artigos que apresentaram resultados referentes à ensaios somente da escória de cobre em matrizes cimentícias (Concreto, argamassa e pasta), dessa forma artigos que apresentaram a adição de outros componentes foram excluídos;
- II. A análise dos resultados da escória de cobre nas matrizes cimentícias deveriam ao menos abordar um dos pontos a seguir: slump da mistura analisada, resistência a compressão ou à tração aos 28 dias.

Foram extraídos, dos 30 artigos selecionados, as seguintes informações: autor, ano, local e revista de publicação, características físicas da escória de cobre, proporção da mistura, verificação em qual matriz cimentícia ocorre a substituição e por fim, resultados referentes aos ensaios de slump, compressão simples e tração na flexão ou por compressão diametral. Realizado este passo, organizou-se todos os dados em uma planilha criada com o objetivo de facilitar a leitura e interpretação das informações obtidas dos artigos.

Por fim, realizou-se a análise, interpretação e discussão através da escrita científica, em que foi possível verificar a possibilidade de utilização da escória de cobre em matrizes cimentícias e avaliar os limites de utilização, assim como as modificações nas propriedades que ocorrem na mistura no estado fresco e endurecido.

Resultados e discussões

Um dos objetivos desta pesquisa foi analisar o cenário da produção científica sobre a utilização de escória de cobre em matrizes cimentícias no mundo nos últimos anos, dessa forma mostra-se imprescindível a análise entre os artigos selecionados em relação ao ano de publicação.

Na Figura 2 é apresentada a quantidade de artigos por ano de publicação, de acordo com o período estabelecido para a pesquisa (2015-2020). Verificou-se que o ano de 2015 foi o período com a maior produção científica sobre o tema, com 10 artigos. É importante ressaltar a diminuição na quantidade de artigos no ano de 2020, que pode ser relacionado ao cenário

mundial de pandemia devido ao COVID-19, em que laboratórios de construção civil em quase todos os países provavelmente estavam fechados, dificultando a produção científica relacionada a estudos experimentais. Já os anos de 2016, 2018 e 2019 apresentaram 4 artigos, entre os selecionados para a pesquisa. E por fim, no ano de 2017 ocorreu um pequeno aumento, apresentando 6 artigos.

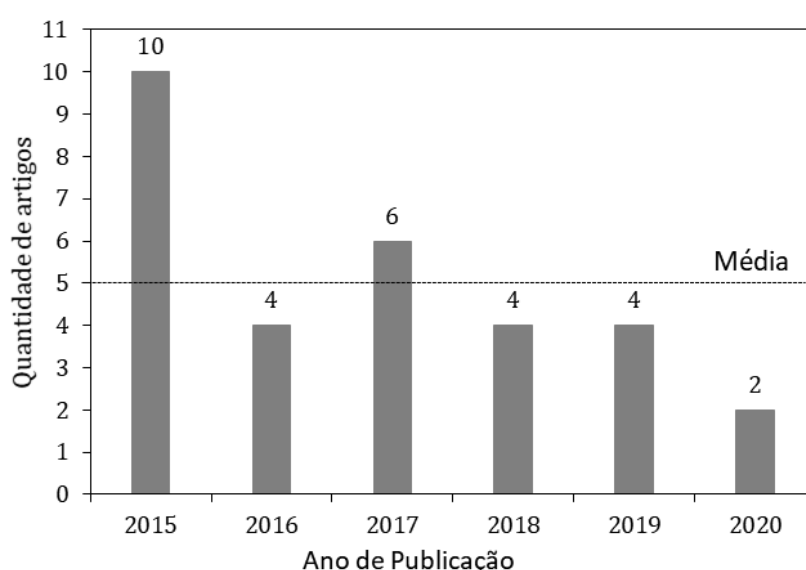


Figura 2. Quantidade de artigos por ano de publicação

Assim como foi verificado os artigos em relação ao seu período de publicação, faz-se necessário estudar os locais em que esses artigos estão inseridos, possibilitando então identificar os países/continentes com maiores interesses na utilização da escória de cobre em matrizes cimentícias durante o período analisado.

Nas Figuras 3A e B são apresentadas a distribuição dos artigos analisados pelos países e continentes nos quais estão inseridos. Percebe-se que durante o período analisado, o continente Asiático demonstrou um interesse elevado na utilização deste tipo de escória em matrizes cimentícias, sendo 25 artigos pertencentes a este continente. A América do Sul, com 3 artigos e a Europa com 2 artigos, completam os restantes dos 30 artigos analisados.



A grande quantidade de artigos pertencentes a Ásia, se deu principalmente por artigos publicados na Índia, com 22 artigos e 3 artigos publicados no Irã. O Chile com 2 artigos, e o Brasil, Inglaterra e Eslováquia com 1 artigo cada, completam os artigos restantes.

O grande interesse pelo tema demonstrado na Índia é justificado pela crescente demanda da construção civil nos últimos anos no país e a baixa disponibilidade de agregados, principalmente agregado miúdo. Sendo necessário a partir de 2017 a importação desta matéria prima de outros países em vários estados, como Tamil Nadu, um estado do sul da Índia. Então tornou-se fundamental a busca por materiais alternativos, como por exemplo a utilização da escória de cobre, um subproduto proveniente das mais variadas atividades industriais com o cobre, que apresenta características adequadas para ser utilizada como substituta parcial ao agregado miúdo em argamassas e concretos. Desta forma, vários pesquisadores buscam realizar estudos experimentais buscando obter os limites de utilização para que se tenha os melhores resultados no estado fresco e endurecido nestas misturas (DOWN TO EARTH, 2018).

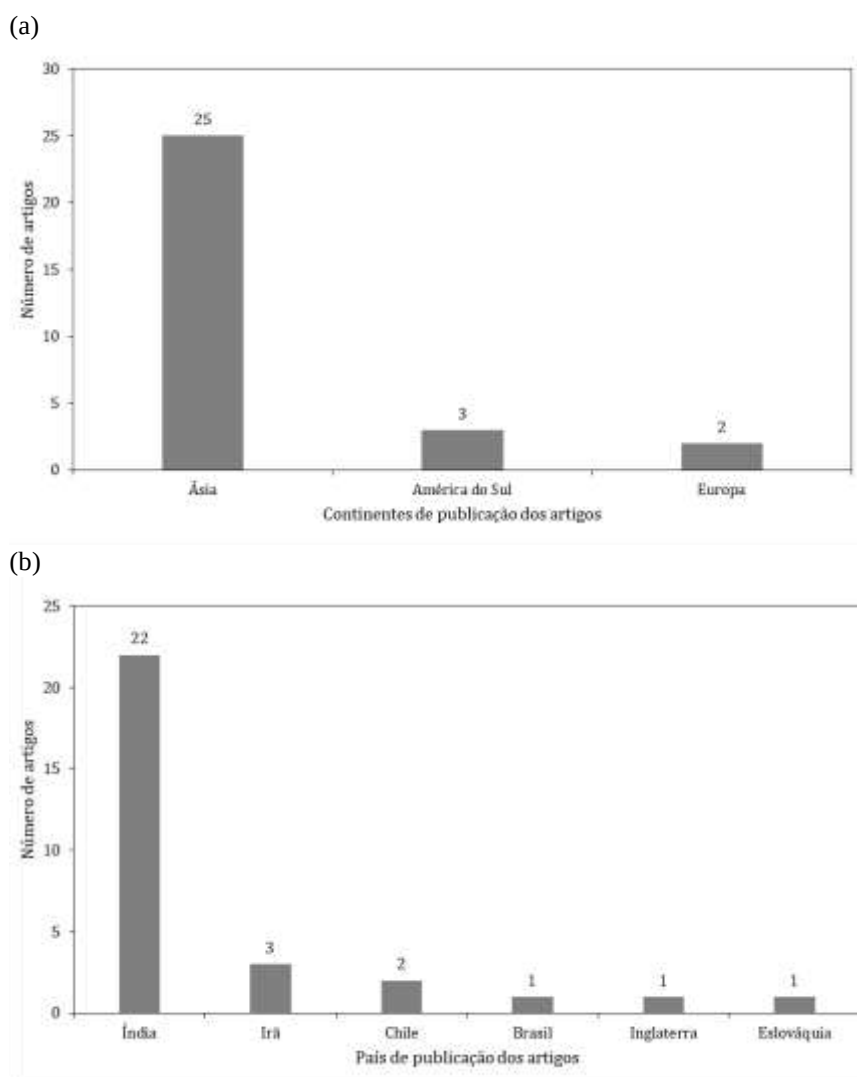


Figura 3. Distribuição dos artigos ao redor do mundo. (a) Continentes; (b) Países.

Também é importante a análise inicial dos artigos em relação a matriz cimentícia na qual ocorre o estudo da utilização da escória de cobre, pois assim tem-se ideia da matriz no qual o interesse de substituição é maior no contexto da construção civil. Na Figura 4 é apresentada a quantidade de artigos em função do tipo de matriz estudada, verificou-se que entre os artigos selecionados, 27 realizaram o estudo no concreto, 4 realizaram na argamassa e nenhum artigo abordou a utilização de escória de cobre em pastas cimentícias. Importante ressaltar que um dos

artigos analisados, realizou a pesquisa em concretos e argamassas, demonstrando assim 31 análises no total.

Pode-se associar a menor utilização em pastas cimentícias devido que nestas misturas a possibilidade de utilização da escória de cobre está na substituição parcial do cimento e mesmo que a escória de cobre apresente propriedades pozolânicas. O gasto energético para realizar a moagem deste material é muito superior em comparação com sua utilização em substituição à agregados miúdos em concretos e argamassas, em que sua composição granulométrica se mostra ideal, não necessitando assim de nenhum processo adicional (MOURA, 2000).

A utilização da escória de cobre, principalmente em concretos, mostra-se expressiva, principalmente pela utilização desta matriz no cenário da construção civil no mundo, sendo considerado o produto mais utilizado elaborado pelo homem, sendo produzido aproximadamente 4,4 bilhões de toneladas por ano. Logo a análise nesta matriz mostra-se relevante para a sociedade, pois a adição de resíduos industriais, tal como a escória de cobre, pode gerar economia na produção desta mistura, mostrando-se uma opção para países em desenvolvimento (THE ARCHITECT'S NEWSPAPER, 2016).

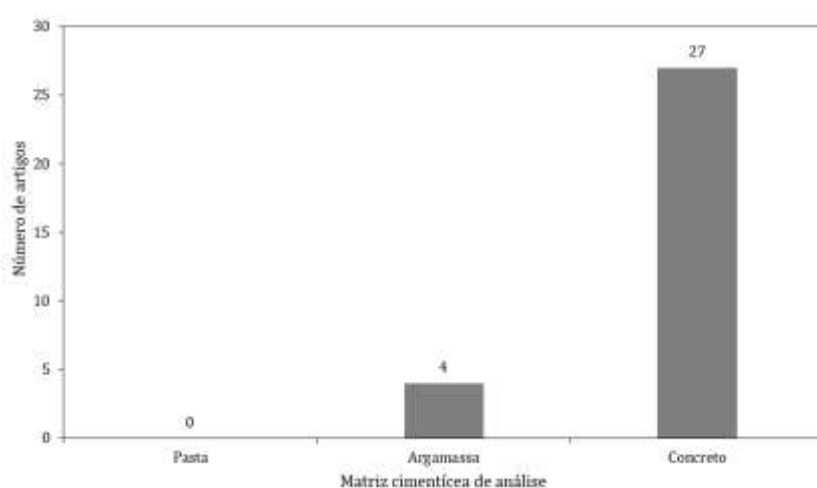


Figura 4. Matriz cimentícia de estudo

Outro ponto importante a ser analisado, é o conhecimento em qual componente das matrizes cimentícias ocorre a substituição pela escória de cobre, pois desta forma tem-se compreensão do elemento de maior interesse de substituição. Na Figura 5, entre os artigos analisados verificou-se que os estudos ocorreram em maior quantidade na substituição do agregado miúdo ($<2,4$ mm) (26 artigos), implicando que as análises no aglomerante hidráulico (cimento) foram inferiores, resultando em 5 artigos. Por fim nenhum artigo abordou a substituição de agregados graúdos ($>2,4$ mm) por escória de cobre. Importante destacar, que um artigo realizou o estudo substituindo o agregado miúdo e o cimento analisando-os separadamente, por isto das 31 análises no total.

Os recursos naturais são limitador ou estão reduzindo devido ao uso excessivo de várias indústrias para utilização na construção civil, principalmente em países em desenvolvimento. Portanto, a introdução de materiais residuais, como a escória de cobre em substituição ao agregado miúdo, pode ser vital para salvar o meio ambiente e justifica o grande interesse por parte dos estudos analisados.

Já a menor quantidade de trabalhos no qual ocorreu a substituição do cimento pela escória de cobre, pode-se relacionar ao maior gasto energético que é necessário devido principalmente a moagem do material, além da notável preferência dos pesquisadores em realizar a substituição no agregado miúdo.

Nenhum estudo demonstrou os efeitos da substituição da escória de cobre em relação aos agregados graúdos, assim como Sharifi *et al.* (2020) constatou em seu estudo que realmente a quantidade de artigos que abordam este tipo de substituição é muito menor em comparação ao agregado miúdo e cimento. Desta forma, pode-se pressupor algumas hipóteses do motivo deste fato, sendo principalmente relacionado a granulometria da escória de cobre que se assemelha muito mais ao agregado miúdo do que ao agregado graúdo, então torna-se quase que intuitivo que este tipo de substituição apresente menor interesse por parte dos pesquisadores.

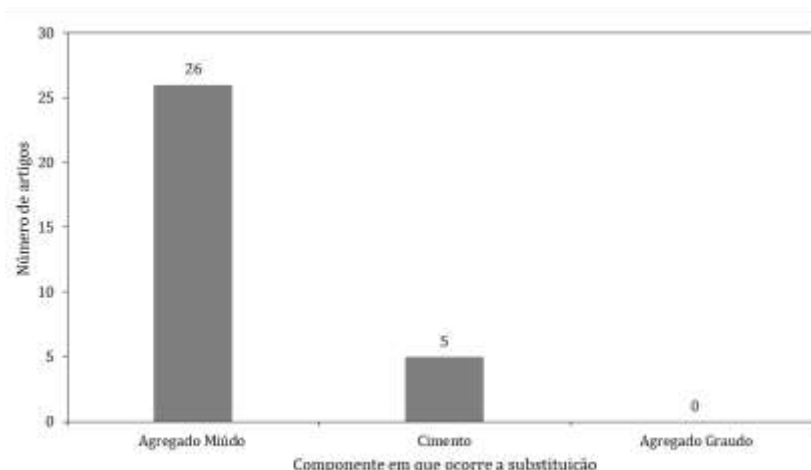


Figura 5. Quantidade de artigos pelo tipo de substituição

Além da verificação inicial da matriz cimentícia de estudo e em qual elemento ocorre a substituição pela escória de cobre, é primordial que seja realizado um estudo compreendendo as características físicas deste material. Na Figura 6 são apresentados os valores de massa específica aparente de escórias de cobre utilizadas nos artigos analisados. A variabilidade dessa propriedade é alta, variando entre $3,12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ e $4,45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Nota-se também que os valores mais comuns relacionados a massa específica foram $3,51 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ e $3,85 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, sendo cada uma pertencente a três artigos diferentes, e os valores $3,3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, $3,68 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ e $3,91 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, pertencentes a dois artigos diferentes, já os outros valores foram apresentados por um artigo cada. Importante salientar que 5 artigos não informaram os valores referentes a massa específica da escória de cobre na qual realizaram o estudo da sua utilização em matrizes cimentícias, sendo então identificados como “NI” na Figura 6.

Como regra geral, pode-se afirmar que a massa específica da escória de cobre aumenta com a quantidade de ferro na sua composição, sendo comum apresentarem valores entre $2,8$ a $3,8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, isto é, superior ao agregado miúdo convencional utilizado em argamassas e concretos (RESENDE, 2009). Então, percebe-se que desconsiderando os 5 artigos que não informaram a massa específica, 18 dos 25 artigos restantes apresentaram valores dentro do intervalo indicado anteriormente. Esta variação é compreensível, dada a variabilidade do

processo de produção do cobre e a alterabilidade inerente à constituição química do próprio minério de cobre.

Nesta perspectiva, como a massa específica da escória de cobre é elevada, a sua utilização como parte do agregado miúdo tem influência significativa sobre a massa específica do compósito, quanto maior for o teor de substituição por escória, maior será a massa específica do compósito. Este fato pode ser uma restrição em certas aplicações, principalmente no que se refere ao transporte e lançamento do concreto e ao dimensionamento de formas e escoramentos da estrutura. Entretanto existem situações em que um concreto com elevada massa específica é fundamental. Por exemplo, para construção de estruturas de contenção por gravidade, salas de radiologia, transporte de substâncias perigosas, e outras diversas aplicações.

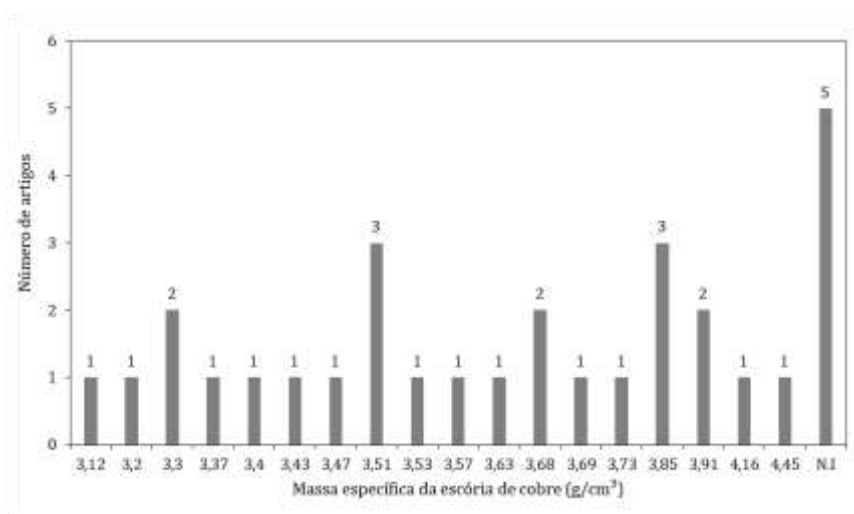


Figura 6. Massa específica da escória de cobre dos artigos analisados

Além da caracterização física da escória de cobre especificada anteriormente, faz-se necessário compreender as propriedades referentes as misturas utilizadas nos artigos analisados, como: a relação água/cimento (a/c) que está apresentada na Figura 7.

A a/c apresentou uma variabilidade grande entre os artigos utilizados, entre 0,26 e 0,73. Existe um intervalo que apresentou uma maior tendência de utilização por parte dos pesquisadores, sendo entre 0,4 e 0,63, representando 42 das 52 misturas totais analisadas.



Destaca-se que alguns artigos utilizaram mais de uma a/c, e outros cinco artigos não informaram esta relação, sendo estes representados na Figura 7 como “NI”.

A relação água/cimento é o principal fator da qualidade final da do compósito, em que água em excesso, ou seja, a que não foi utilizada no processo de hidratação do cimento gera vazios na estrutura na matriz na forma de poros e capilares, sendo eles os principais responsáveis pela permeabilidade no compósito, que por sua vez é um dos fatores que faz o concreto ser mais ou menos durável. Na prática, isso quer dizer que o excesso de água aumenta a permeabilidade do concreto, diminui a durabilidade e sua resistência final. Assim como quando há falta de água, as reações de hidratação não ocorrem de forma completa, gerando um concreto de baixa qualidade e sobrando cimento anidro em sua estrutura, além de diminuir a trabalhabilidade e consequentemente dificultar a mistura dos componentes da matriz cimentícia. Portanto, pode-se concluir que os pesquisadores buscaram uma relação a/c que possibilitasse uma maior facilidade na mistura dos materiais, mas que não prejudicasse a resistência final da argamassa ou do concreto analisado.

Um dos principais objetivos do presente trabalho foi avaliar primeiramente a possibilidade de utilização da escória de cobre nas matrizes cimentícias e posteriormente estabelecer os limites ideais que irão proporcionar os melhores benefícios na mistura, por isto deve ser analisado a quantidade de substituição mais utilizadas nos artigos. Na Figura 8 são apresentadas as porcentagens de substituição por escória de cobre abordadas nos artigos analisados. Os artigos tiveram uma preferência na utilização de substituição no intervalo de 20%, o que é justificado observando a quantidade de artigos que utilizaram as porcentagens 20, 40, 60, 80 e 100%, que foram respectivamente 25, 20, 20, 13 e 15 misturas.

Outros artigos tiveram uma abordagem um pouco diferente, analisando os teores de substituição a cada 5% ou 10% e de forma geral observou-se que estes artigos não realizaram o estudo até os 100% de substituição, o que pode ser explicado devido a uma quantidade de trabalho maior a ser executado ou também indicações prévias de limites ideais de utilização obtidos em outras bibliografias.

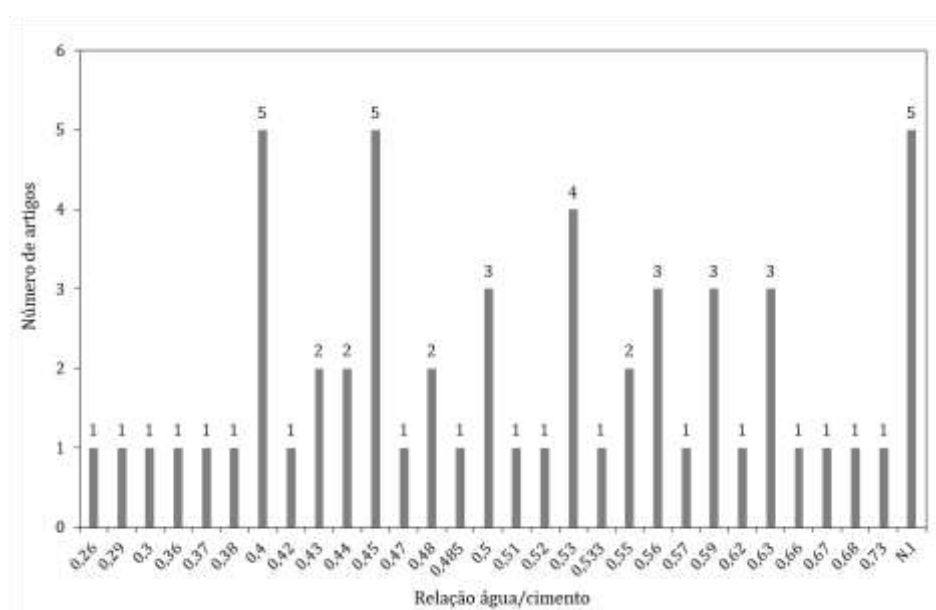


Figura 7. Quantidade de artigos pela relação água/cimento

E por fim, um único artigo teve um procedimento discrepante, no qual foi realizado misturas com porcentagens de substituição de 16 e 33%. Importante ressaltar que todos os artigos apresentaram a mistura de controle, isto é, com 0% de substituição, com objetivo que esta mistura seja comparada as demais.

As porcentagens mais experimentadas entre os artigos são de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 e 100% de escória de cobre, pois nestes teores mais de 10 misturas foram analisadas entre os artigos estudados.

Para avaliar os limites de utilização da escória de cobre em matrizes cimentícias, faz-se necessário que se realize o estudo em relação as propriedades no estado fresco da mistura em função da porcentagem de escória adicionada, para isto, apresentam-se na Figura 9 a média da variação do *slump* em relação a mistura de controle, isto é, aquela em que não realizou-se substituição.

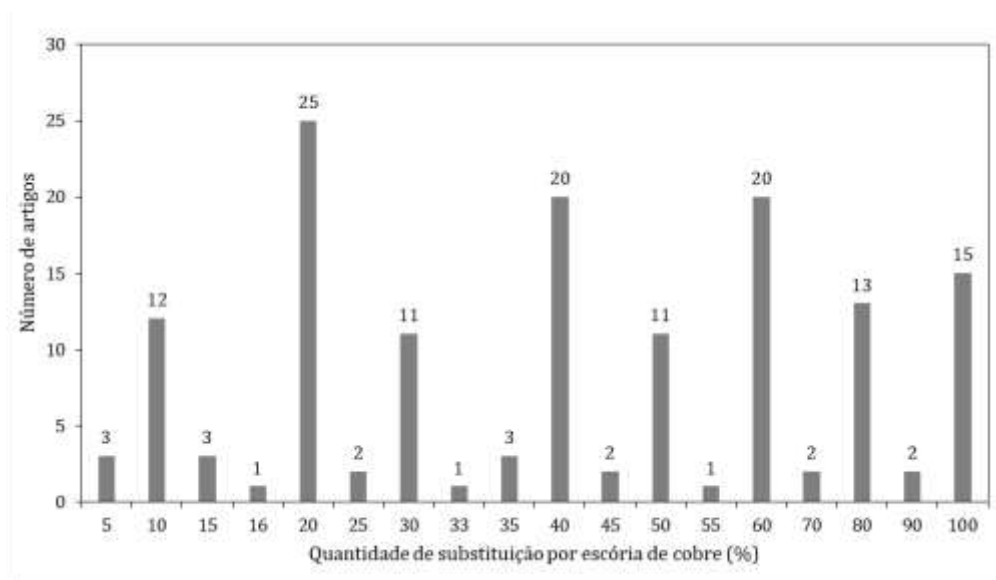


Figura 8. Teor de substituição por escória de cobre utilizado nos artigos

Verificou-se que há um aumento do *slump* ao utilizar escória de cobre na mistura. Para baixos teores de substituição, o aumento da variação do *slump* não foi expressivo, ficando abaixo dos 10% até uma porcentagem de substituição de 25%. partir de 30% de substituição, o *slump* da mistura ultrapassa os 20% de aumento em relação a mistura de referência, salvo a porcentagem de substituição de 40%, em que teve 14,20% de aumento no *slump*. A média mais elevada de aumento do *slump* ocorreu aos 50% de substituição de escória, apresentando 35,61%.

O aumento da trabalhabilidade da mistura ao adicionar escória de cobre deve-se principalmente a:

- I. Granulometria da mistura (areia + escória de cobre), que é mais grossa em relação a utilização somente da areia como agregado miúdo;
- II. Superfície lisa dos grãos da escória que permitem um deslizamento mais fácil entre partículas;
- III. Elevada massa específica da escória de cobre que ocasiona uma mistura com densidade maior.

Os valores do *slump* das misturas para uma mesma porcentagem de substituição de escória de cobre mostraram-se bastantes divergentes entre os artigos analisados, entretanto pode-se relacionar este fato as diferentes características da escória de cobre e das misturas presente nos artigos analisados, como por exemplo, a a/c da mistura, dimensão máxima característica do agregado, granulometria, forma e textura da escória.

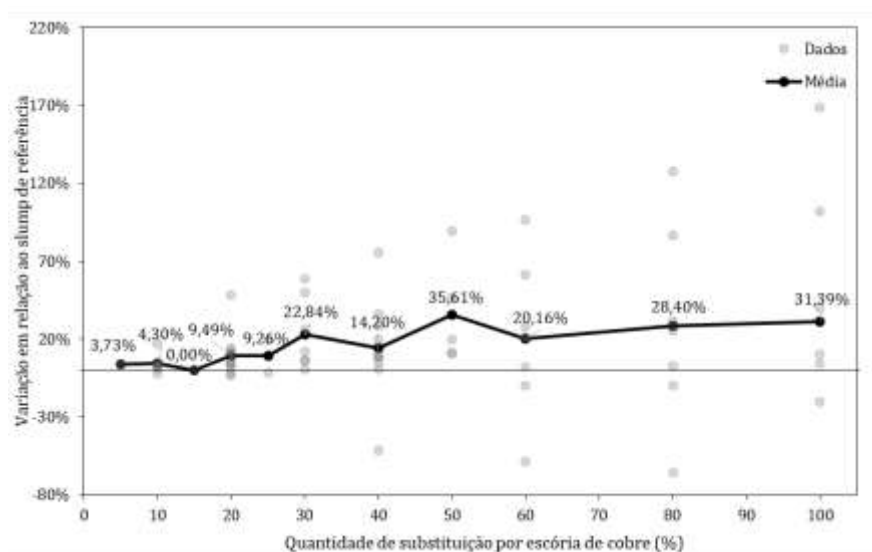


Figura 9. Variação do slump da mistura em função do teor de escória de cobre

Assim como foi realizada a análise das propriedades da mistura com adição de escória de cobre no estado fresco, faz-se importante realizar também o estudo das propriedades mecânicas no estado endurecido da matriz cimentícia. Na Figura 10 é apresentada a variação da resistência a compressão em relação a mistura de controle em função da porcentagem de substituição da escória de cobre.

Verificou-se o aumento da resistência à compressão até os 70% de substituição, salvo as porcentagens de 15% e 25%, que apresentaram uma diminuição na resistência de -9,0% e -32,6%. Já para teores de substituição maiores que 70% verificaram-se que ocorreu a diminuição na resistência a compressão de -7%, -4,5% e -9,7% para 80%, 90% e 100% de substituição de escória de cobre, respectivamente. A média mais elevada foi obtida com 35% de substituição,



sendo obtido 25,9% de aumento na resistência a compressão, em que 3 artigos abordaram o estudo experimental com esse teor de substituição, como apresentado na Figura 8.

Com 25% de substituição da escória de cobre, obteve-se a maior diminuição na resistência a compressão em relação a referência, em que neste teor de substituição somente 2 artigos realizaram a análise, Fadaee *et al.* (2015); Afshoon e Sharif (2017), sendo utilizado a escória de cobre como substituto ao cimento em ambos. E como foi visto na Figura 5, somente 5 artigos, incluindo os citados acima, abordaram a substituição do cimento pela escória de cobre e como esperado, ao aumentar o teor de substituição do cimento a resistência a compressão diminuiu nestes artigos, devido ao aumento da relação água/cimento da mistura. O mesmo ocorreu com a porcentagem de substituição de 15%, que foi abordada por 3 artigos e em todos foi realizada a substituição parcial do cimento pela escória, resultando em uma diminuição na resistência a compressão, como descrito anteriormente.

A partir de 70% de substituição ocorreu uma redução na resistência a compressão da matriz cimentícia, devido principalmente às características de baixa absorção de água da escória de cobre em comparação com a areia, o que ocasiona mais água livre permanente após hidratação.

Outra análise que deve ser realizada em relação as propriedades mecânicas da matriz no estado endurecido é o estudo da variação da resistência a tração em função do teor de escória de cobre adicionada, como apresentado na Figura 11.

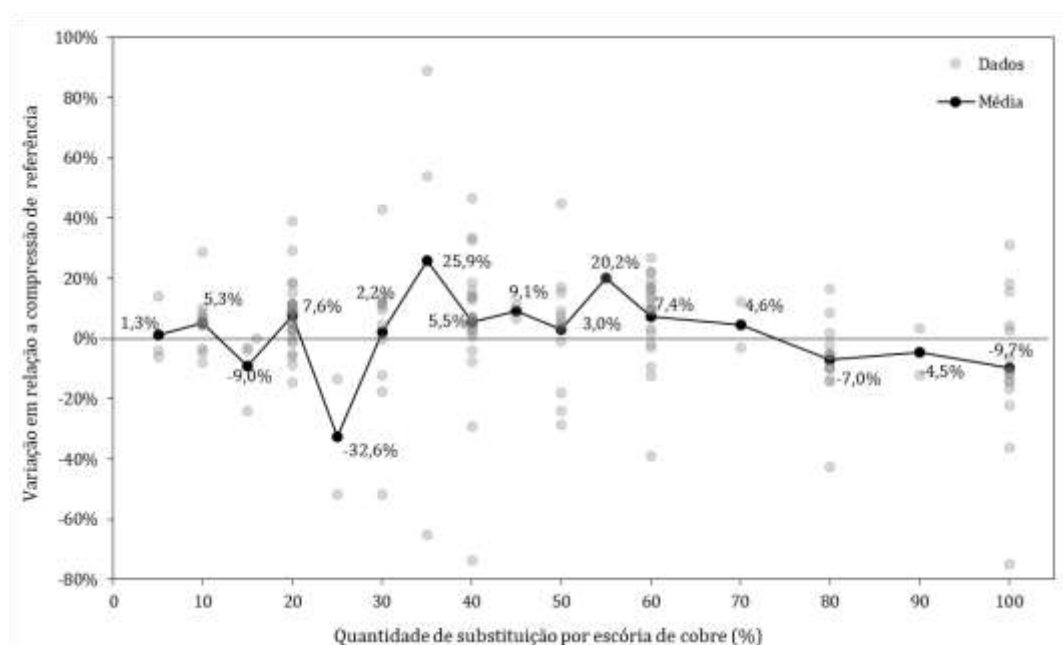


Figura 10. Variação da resistência à compressão em relação a mistura de referência

Na Figura 11 verifica-se um aumento da resistência à tração até os 60% de substituição, salvo as porcentagens de 15% e 25%, que apresentaram uma redução na resistência de -6,81% e -14,58%, assim também como foi observado uma redução em relação a resistência a compressão nestes mesmos teores de substituição, de acordo com a Figura 10. E para uma proporção de escória de cobre acima dos 60%, nota-se uma redução na resistência de -1,84%, -8,49%, -10,63% e -9,85% para 70%, 80%, 90% e 100% de substituição, respectivamente. As médias mais elevadas foram obtidas com 45% e 55% de substituição de escória de cobre, sendo 31,37% e 28,98%, respectivamente.

E assim como observado para o caso da resistência a compressão, as porcentagens iniciais de substituição que apresentaram maiores diminuições na resistência a tração, 15% e 25%, foram abordadas por artigos que utilizaram a escória de cobre como substituto parcial do cimento na matriz. Então percebe-se que este tipo de substituição resulta em uma diminuição também da resistência à tração ao aumentar do teor da escória de cobre, devido ao aumento da relação água/cimento da mistura.

Substituições a partir de 60% escória de cobre apresentaram perda de resistência à tração, pois teores mais altos de escória resultam em excesso de água livre na matriz, tornando-a mais porosa e menos resistente.

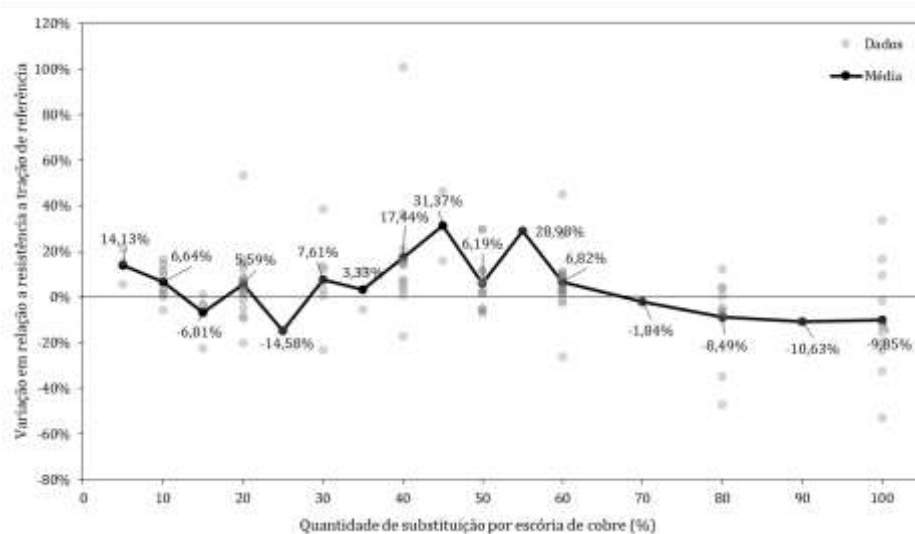


Figura 11. Variação da resistência à tração em relação a mistura de referência

Conclusões

Neste trabalho foram avaliados 30 artigos publicados entre os anos de 2015 e 2020 que utilizaram escória de cobre em matrizes cimentícias (pasta, argamassa e concreto). E a partir das análises realizadas, as conclusões a seguir podem ser estabelecidas:

- ✓ Entre 2015 e 2020, a Índia mostrou grande interesse no tema devido ao crescimento do setor da construção civil e a baixa disponibilidade de areia em seu território. Portanto países em situações semelhantes podem adotar a utilização da escória de cobre visando o suprimento deste setor, além de gerar economia na produção das matrizes cimentícias.
- ✓ A maior tendência de utilização da escória de cobre se deu no concreto e em substituição ao agregado miúdo, pois esta matriz cimentícia é um dos produtos

mais produzidos no mundo e considerado primordial para o crescimento da infraestrutura de um país, por isto que os pesquisadores buscam sempre opções de redução de custos na sua produção. Além que o uso da escória de cobre é uma alternativa muito eficiente para países que apresentam uma baixa disponibilidade de recursos naturais necessários para produção destas misturas.

- ✓ A massa específica da escória de cobre é elevada em comparação aos agregados miúdos geralmente utilizados, logo ao utilizar este tipo de escória tem-se um concreto com maior massa específica. Este fato pode ser uma limitação em certas situações, mas existem vários cenários que esta característica é fundamental no concreto.
- ✓ O *slump* da mistura tende a aumentar com o acréscimo de escória de cobre, mostrando-se assim um elemento eficaz no aumento da trabalhabilidade da matriz cimentícia.
- ✓ Foi constatado que o teor ótimo de utilização ocorreu em 35% de escória de cobre principalmente em misturas em que a substituição ocorre no agregado miúdo, pois foi obtido nesta proporção um aumento de 25,9% e 3,38% na resistência a compressão e tração, respectivamente aos 28 dias. Já para substituição no cimento, o limite ideal ocorreu em 5% de escória de cobre.

Portanto, este artigo pode auxiliar de forma mais acessível os estudos sobre o tema proposto com uma sintetização de informações obtidas através de artigos publicados nos últimos anos sobre a utilização da escória de cobre em matrizes cimentícias, possibilitando assim a realização de trabalhos futuros mais específicos sobre o assunto.



Referências Bibliográficas

ABHISHEK, R.; MURARI, K.; SINGH, A.; GANGWA, S. Copper slag, a solution and an alternative to river sand and in concrete manufacturing. **Journal of Civil Engineering and Environmental Technology**, v. 02, n. 3, p. 214-218, nov. 2015.

AFSHOON, I.; SHARIF, Y. Use of copper slag microparticles in self-consolidating concrete. **Aci Materials Journal**, v. 114, ed. 5, p. 691-699, out. 2017.

AL-JABRI K.S., TAHA R.A., AL-HASHMI A., AL-HARTHY A.S.; Effect of copper slag and cement by-pass dust addition on mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 20, n. 5, p. 322-331, jun. 2006.

AL-JABRI, K. S.; AL-SAYDY, A. H.; TAHA, R. Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 2, n. 25, p. 933-938, 2011.

AMARNAATH, M., R. PRADEEP, S.J. KAVIN, R.A. DINESH, P. HARIBASKARAN, S. A Study on Effective Replacement of Fine Aggregate using Copper Slag. **International Journal of Science Technology & Engineering**, v. 1, ed. 10, p. 227-231, abr. 2016.

BABU, K., M.; RAVITHEJA, A. Effect of copper slag as fine aggregate replacement in high strength concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 19, n. 2, p. 409-414, jul. 2019.

BABY, M.; GOWSHIK, A. JAYAPRAKASH, J.; RAJESHWAR, A.V K. Use of copper slag as a replacement for fine aggregate in concrete. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 10, n. 83, p. 244-246, set. 2015.

BHOI, A. PATIL, Y.D. PATIL, H.S. KADAM, M.P. Feasibility Assessment of Incorporating Copper Slag as a Sand Substitute to Attain Sustainable Production Perspective in Concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 1, p. 1-11, fev. 2018.

DOS ANJOS, M. A. G.; SALES, A. T. C.; ANDRADE, N. Blasted copper slag as fine aggregate in Portland cement concrete. **Journal of environmental management**, v. 196, p. 607-613, 2017.

FADAEI, M. MIRHOSSEINI, R. TABATABAEI, R. FADAEI, M. J. Investigation on using copper slag as part of cementitious materials in self compacting concrete. **Asian Journal Of Civil Engineering**, v. 16, n. 3, p. 368-381, 2015.



FAROOQ, M., U.; KUMAR, P., N. Estimating the Strength of Concrete Cube using Copper Slag in the Replacement of Fine Aggregate. **International Journal of Research in Engineering, Science and Management**, v. 1, ed. 12, p. 292-296, dez. 2018.

GOPALAKRISHNAN, R.; NITHIYANANTHAM, S. Microstructural, mechanical, and electrical properties of copper slag admixed cement mortar. **Journal of Building Engineering**, v. 31, n. 03, set. 2020.

GORAI, B. et al. Characteristics and utilisation of copper slag—a review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 39, n. 4, p. 299-313, 2003.

HILBURG, Jonathan. Concrete production produces eight percent of the world's carbon dioxide emissions. **The Architect's Newspaper**. Disponível em: < <https://www.archpaper.com/2019/01/concrete-production-eight-percent-co2-emissions/#:~:text=Currently%2C%20the%20world%20produces%204.4,to%20the%20Chatham%20House%20report.>>. Acesso em: 23 de abr. 2021.

HONNAKKALAVAR, A., H. ASIF, M. KALLAGANAD, S. F.; VINAY, R.; GANESH, S. R.; SHIVAKUMAR, B. Experimental study on concrete using copper slag as replacement material of fine aggregate. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 5, n. 5, p. 928-930, maio. 2018.

JANAKIRAMAIAH, B.; BABU, B., R.; YADAV, G., R. A Study of Concrete Using Copper Slag as a Partial Replacement of Fine Aggregate. **International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology**, v. 5, ed. 11, p. 19589-19597, nov. 2016.
K RAJASEKHAR, K.; TEJASWI, B., L. Study on strength properties of concrete with partial replacement of fine aggregate with copper slag. **International Journal of Engineering Research and Development**, v. 13, ed. 3, p. 48-56, mar. 2017.

KUKRETI, Ishan. India can rely on sand imports till the time it is viable. **Down To Earth**. Disponível em: < <https://www.downtoearth.org.in/coverage/environment/india-can-rely-on-sand-imports-till-the-time-it-is-viable-60892.>>. Acesso em: 23 de abr. 2021.

LORI, A., R.; BAYAT, A.; AZIMI, A. Influence of the replacement of fine copper slag aggregate on physical properties and abrasion resistance of pervious concrete. **Road Materials and Pavement Design**, v. 22, n. 3, p. 1-17, ago. 2019.

MAHARISHI, A. SINGH, S.P. GUPTA, L.K. SHEHNAZDEEP. Strength and durability studies on slag cement concrete made with copper slag as fine aggregates. **Materials Today: Proceedings**, v. 38, ed. 5, p. 2638-2648, set. 2020.



MAVROULIDOU, M. Mechanical Properties and Durability of Concrete with Water Cooled Copper Slag Aggregate. **Waste And Biomass Valorization**, v. 8, ed. 5, jul. 2017.

MOURA, W. A. Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto. 2000. 207 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2000.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, M. B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos contendo escória de cobre como agregado miúdo. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 2, p. 221-225, 2009.

NAIDU, T.; RAJULU, B., G.; RAMLAL, S. A study on the properties of concrete on partial replacement of cement and sand with copper slag. **International Journal of Recent Trends in Engineering & Research**, v. 3, ed. 12, p. 40-50, dez. 2017.

PATIL, M., V. Properties and effects of copper slag in concrete. **International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering**, v. 2, ed. 2, p. 46-50, abr. 2015.

PATNAIK, B.; SEKHAR, S.; RAO, S. Strength and durability properties of copper slag admixed concrete. **International Journal Of Information And Computing Science**, v. 04, n. 01, p.158-166, fev. 2015.

PAVEZ, O. RIVERA, O. SALINA, M. ARAYA, B. Copper slag from different dumps in the Atacama Region used in mortars as partial replacement of cement. **Revista Matéria**. v. 24, n. 2, jun. 2019.

PAVEZ, O.; RIVEIRA, O.; TOLEDO, I.; NAZER, A. Use of copper slag as fine aggregate and partial replacement of cement. **Holos**, v. 04, p. 31-45, nov. 2018.

PERIČIĆ, Tina Poklepović.; TANVEER, Sarah. Why Systematic reviews matter. **Elsevier**, Amsterdam, 23 de jul. de 2019. Disponível em: < <https://www.elsevier.com/connect/authors-update/why-systematic-reviews-matter>>. Acesso em: 23 de abr. 2021.

RAHUL, S.; RAFEEQ, R. M.; VADIVEL, T. S.; KANCHANA, S. Experimental study on properties and effects of copper slag in self compacting concrete. **International Journal of Science Technology & Engineering**, v. 02, n. 12, p. 455-460, jun. 2016.

RAMAN, J., V., M.; RAJESH, R.; VELSWARAN, P., S. Study on Strength of High Performance Concrete by Partial Replacement of Fine Aggregate by Copper Slag. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 14, n. 11, p. 2795-2798, 2019.



REDDY, B., P.; TANUJA, K.; NAIDU, V., D. Use of copper slag in concrete and cement mortar as replacement of sand. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 3, ed. 9, p. 254-260, set. 2016.

RESENDE, C. M. A. Estudo da viabilidade de incorporação de escória de cobre como agregado fino em produtos de construção. 2009. 118 f. Dissertação de Mestrado (Estruturas de engenharia civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2009.

SAMBHAJI, Z., K.; AUTADE, P., B. Effect of Copper Slag as a Fine Aggregate on Properties of Concrete. **International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering**, v. 3, ed. 6, p. 410-414, jun. 2016.

SHARIFI, Y.; AFSHOON, I.; ASAD-ABADI, S.; ASLANI, F. Environmental protection by using waste copper slag as a coarse aggregate in self-compacting concrete. **Journal of Environmental Management**, v. 271, p. 1-17, out. 2020.

SHARMA, R.; KHAN, R., A. Durability assessment of self compacting concrete incorporating copper slag as fine aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 155, n. 30, p. 617-629, nov. 2017.

SINGH, E., H.; BATH, E., G., S. Influence of copper slag as fine aggregate on the workability and compressive strength of concrete. **International Journal of Advanced Research in Engineering and Applied Sciences**, v. 4, n. 5, p. 68-76, maio. 2015.

SINGH, E., H.; BATH, E., G., S. Use of Copper Slag as Fine Aggregate - A case study. **International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology**, v. 2, ed. 5, maio. 2015.

TERPAKOVA, E. Studies on concrete incorporating copper slag as a fine aggregate. **Solid State Phenomena**, v. 244, n. 2, p. 114-120, out. 2015.

VENKATESWARLU, M.; KUMAR, GS. H.; BABU, B. N.; RAMESH, P. R. Strength and durability characteristics of conventional concrete by partial replacement of copper slag as fine aggregate. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 2, ed. 09, p. 2078-2087, dez. 2015.