

REJEITOS DE MINERAÇÃO EM CIMENTO E CONCRETO PARA CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS

LUCAS ZOCA DA COL
UNIPAMPA | UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA.

Palavras Chave

Rejeitos, Mineração, Sustentabilidade

Agradecimento a órgão de fomento

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Coordenação e a Comissão de Bolsas, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral (PPGEM) da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) – Programa de Auxílio aos Estudantes dos Programas de Pós-graduação da Unipampa (PAPG/PROPI) 01_22 .

REJEITOS DE MINERAÇÃO EM CIMENTO E CONCRETO PARA CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS

RESUMO

Uma das vantagens do cimento e da indústria de concreto cimentício na sustentabilidade é a capacidade de utilizar grandes quantidades de resíduos sólidos industriais, como cinzas volantes e escória granulada de alto-forno moída. Os rejeitos são resíduos sólidos do processo de beneficiamento do minério na indústria extrativa e estão disponíveis abundantemente No Brasil. Este estudo analisa o potencial de utilização de rejeitos como substitutos de agregados miúdos, como Materiais Cimentícios Suplementares (MCSs) em argamassa ou concreto, e na produção de clínquer de cimento. Embora os rejeitos possam ser usados como substitutos tanto do agregado miúdo quanto do cimento, a trabalhabilidade da argamassa ou do concreto sofre redução. Além disso, em uma proporção constante de água para cimento, a resistência à compressão do concreto aumenta com os rejeitos como agregado miúdo. No entanto, a resistência à compressão do concreto diminui à medida que o teor de reposição dos rejeitos aumenta, mesmo quando os rejeitos são moídos em partículas menores. Poucas pesquisas se dedicam à durabilidade do concreto com rejeitos, mas há uma concordância em relação ao fato de que os metais pesados nos rejeitos se estabilizam/solidificam no concreto. O clínquer pode ser produzido usando os rejeitos, mesmo que tenham baixo teor de SiO_2 . A utilização de rejeitos em cimento e concreto será benéfica para o meio ambiente tanto no processamento de resíduos sólidos quanto no uso de materiais virgens na indústria da construção. Mas é interessante manter os metais pesados dos rejeitos para estabilizar/solidificar no concreto.

Palavras-chave: Rejeitos; Mineração; Sustentabilidade.

Abstract

One of the advantages of cement and cementitious concrete industry in sustainability is the ability to use large amounts of industrial solid waste, such as fly ash and granulated blast furnace slag. Tailings are solid residues of the ore processing process in the extractive industry and are abundantly available in Brazil. This study analyzes the potential use of tailings as substitutes for young aggregates, such as Supplementary Cement materials (MCSs) in mortar or concrete, and in the production of cement clinker. Although tailings can be used as substitutes for both the kid aggregate and cement, the workability of mortar or concrete is reduced. In addition, in a constant proportion of water to cement, the compressive strength of concrete increases with tailings as a kid's aggregate. However, the compressive strength of the concrete decreases as the replacement content of the tailings increases, even when the tailings are ground into smaller particles. Few studies are dedicated to the durability of concrete with tailings, but there is agreement in relation to the fact that heavy metals in tailings stabilize/solidify in concrete. Clinkin can be produced using tailings, even if they have low SiO_2 content. The use of waste in cement and concrete will be beneficial to the environment both in the processing of solid waste and in the use of virgin materials in the construction industry. But it is

interesting to keep the heavy metals from the tailings to stabilize/solidify in the concrete.

Keywords: Rejects; Mining; Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma indústria fundamental no desenvolvimento das economias de muitos países ao redor do mundo. No entanto, durante os processos de mineração e metalurgia, são gerados resíduos sólidos, que incluem principalmente estéril, rejeitos e escórias, prejudiciais ao meio ambiente.

Os rejeitos são subprodutos dos processos de beneficiamento do minério. Depois que minerais ou metais de valor são extraídos do minério, são descarregados como rejeitos com a água utilizada no processo, contendo produtos químicos. São então bombeados através de uma tubulação, do concentrador para as instalações de armazenamento mais próximas, que incluem vales transversais, barragens em encostas, aterros/represamentos elevados e empilhamento a seco de espessados em terra.

Os rejeitos depositados em lagoas são separados da água do processo sob filtro de pressão ou gravidade e a água é reciclada no processo de extração. No entanto, com a moagem eficiente dos minérios, os tamanhos das partículas de rejeitos estão se tornando cada vez mais finas, juntamente com certos minerais argilosos que absorvem água em sua estrutura interna, tornando-se extremamente difícil separar os rejeitos da água.

A demanda por produtos minerais está aumentando e mais minérios são extraídos. Porém, os teores de minério estão mais baixos do que antes, a escala de beneficiamento do minério está se tornando maior. Por isso, mais rejeitos são produzidos.

Cerca de 14 bilhões de toneladas de rejeitos são produzidos anualmente em todo o mundo. Alguns dos rejeitos na forma de lama contêm metais, mineralização de sulfetos e produtos químicos de processamento, que afetam as águas subterrâneas e superficiais por infiltração. Além disso, rejeitos secos empilhados ocupam muita área de terra e podem afetar a qualidade do ar espalhado pelo vento. O rompimento das barragens de rejeitos, também constituem

um sério problema ambiental, como ocorreu em Brumadinho, podendo levar a sérias consequências, com o comprometimento de vidas humanas e recursos naturais.¹

No entanto, nem todos os rejeitos são resíduos perigosos e podem ser um recurso interessante, pois possuem muitos constituintes úteis. Foram realizadas pesquisas sobre como usar rejeitos como componente para todos os tipos de materiais. O *Cement Paste Backfill* (CPB) pode ser aterrado em minas a céu aberto abandonadas ou servir de suporte de solo em minas subterrâneas. A tecnologia de CPB pode utilizar o armazenamento de até 60% dos rejeitos, mas os outros 40% dos rejeitos ainda permanecerão e, portanto, um método alternativo de reaproveitamento deve ser encontrado.²

Os pesquisadores buscam uma forma de promover a recuperação dos metais por meio do processamento dos rejeitos, porque mesmo após a recuperação dos metais a quantidade de rejeitos armazenada continua elevada. No intuito, de fazer Uso Sustentável, pesquisas indicam o aproveitamento desses resíduos para produzir materiais de construção, como tijolo, concreto aerado autoclavado cerâmica, geopolímeros/materiais ativados por álcalis, entre outros.

De fato, o concreto de cimento Portland ainda é um dos materiais de construção mais importantes do mundo, pois a produção de cimento subiu para 4,1 bilhões de toneladas em 2017. Estima-se que mais de 10 bilhões de m³ de concreto são produzidos em todo o mundo, conforme a produção de cimento, e enquanto isso, a inovação dos componentes do cimento e da mistura de concreto oferece a chance de reutilizar ou reciclar resíduos sólidos.³

Se os resíduos sólidos dos rejeitos forem utilizados em cimento e concreto, será reduzida a quantidade de rejeitos armazenados, favorecendo o desenvolvimento sustentável da indústria de cimento e concreto.

Diante disso, esse estudo tem por objetivo avaliar o potencial de utilização de rejeitos para a produção de clínquer de cimento e as oportunidades e

¹ KUHN, Caiubi Emanuel Souza; PEREIRA, Gustavo Gomes; MOREIRA, Rafael Marques. Educação em Geociências, desenvolvimento sustentável e mineração. **Revista Corixo De Extensão Universitária**, n. 5, 2016.

² DE AZEVEDO, Gislaine Handrinelly; VITAL, Adriana de Fátima Meira. Aproveitamento do rejeito das indústrias de beneficiamento do caulim para a produção de tinta ecológica à base de terra. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 15, n. 3, p. 242-247, 2018.

³ LIMA, Jaciel Cardoso de. **Obtenção, caracterização e aplicação de um compósito de matriz cimentícia e cargas de rejeitos**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

desafios da aplicação em Materiais Cimentícios Agregados ou Suplementares (MCSs) em cimento e concreto, para ajudar a melhor reutilizar e/ou reciclar rejeitos.

2 PROPRIEDADES DOS REJEITOS

Rejeitos são apenas um termo geral, e incluem, mas não se limitam a: rejeitos metálicos de processamento de ferro, cobre, ouro, chumbo, zinco; e rejeitos não metálicos de areia betuminosa, quartzo, fosfato, processamento de forsterita de acordo com seu depósito de minério.⁴

Quanto à tipologia podem ser classificados conforme os métodos de refino dos minerais, quais seja: rejeitos por gravidade, de flotação, magnéticos e químicos na indústria extrativa. No entanto, as respectivas composições químicas são altamente variáveis, conforme o tipo.⁵

Quanto à composição química, consistem principalmente em SiO_2 , Al_2O_3 , CaO e Fe_2O_3 , e assim por diante. No entanto, os teores de todos os óxidos apresentam variação nos diferentes tipos de rejeitos. Por exemplo, o teor de SiO_2 nos rejeitos de fosfato é de 2,1, em contraste com os 75,23 dos rejeitos de minério de ferro.⁶

Todos os rejeitos de chumbo-zinco ou rejeitos de minério de ferro, apresentam teor de variação de SiO_2 equivalente a em média 15,50-69,92 nos rejeitos de chumbo-zinco ou 24,19-75,23 nos rejeitos de minério de ferro. De forma sumária, a classificação ocorre em virtude do que se denomina corpos de minério ou pelos métodos de refino, insuficiente para que os pesquisadores de materiais compreendam a natureza complexa dos rejeitos em sua totalidade e para serem utilizados adequadamente.⁷

Os rejeitos também são muito diversos nas fases minerais, mesmo os de chumbo-zinco, cujas fases minerais incluem calcita, dolomita, quartzo, caulinita, galena, pirita e gesso. Há fundamentalmente dois tipos diferentes de rejeitos de

⁴ BATISTA, Suely Vieira. **Utilização de rejeitos de mineração na construção civil com ênfase na infraestrutura rodoviária**. 2022.

⁵ COLTURATO, Luis Felipe Dornfeld Braga; FERREIRA, Guilherme B.; DE ARAÚJO, Armando Corrêa. **Aproveitamento de rejeitos gerados no beneficiamento de minério de ferro**.

⁶ GOMES, Ana Cláudia Franca. **Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração**. 2016.

⁷ CRUZ, ANDREA BORGES DE SOUZA et al. Arquitetura pós-desastre e a sustentabilidade: os parâmetros socioculturais, ambientais e econômicos para a reconstrução de mariana, MG. **Revista FÓRUM PATRIMÔNIO: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável**, v. 10, n. 1, 2019.

chumbo-zinco – um tipo tem quartzo, ortoclásio, barita, albita e clorita como principais fases minerais; e o outro tem dolomita, calcita, barita e quartzo. As fases minerais de rejeitos de pirita incluem caulinita e pirita, mas as principais fases minerais dos rejeitos fosfatados são a dolomita e a apatita.⁸

Quanto às propriedades físicas, são menos diversificadas em comparação com as composições químicas e fases minerais. As frações de tamanho dos rejeitos são classificadas como “areia”, “silte” e “argila” com base em uma variedade de métodos e padrões de mineração. Mesmo que os rejeitos sejam usados como agregados, o tamanho máximo que apresentam pode ser inferior a 1 mm em algumas literaturas.⁹

Em geral, possuem superfície altamente rugosa e irregular, pois a moagem de várias fases minerais difere em cada tipo de rejeito. Devido às fases minerais, eles têm densidade e absorção de água variadas, notavelmente afetados pelo tamanho das partículas.¹⁰

2.1 REJEITOS DE MINERAÇÃO COMO AGREGADO

Em geral, o concreto inclui agregado graúdo e agregado miúdo, mas os rejeitos são utilizados apenas como substitutos parciais ou totais do agregado miúdo, uma vez que suas partículas são finas, com diâmetro menor que 1 mm. As propriedades físicas dos rejeitos têm um impacto significativo na trabalhabilidade, densidade, estabilidade dimensional, resistência e durabilidade do concreto. Os rejeitos metálicos podem conter metais pesados deletérios, que causam preocupações ambientais ou modificam os processos de hidratação e durabilidade das misturas de argamassa ou concreto.¹¹

2.2 REJEITOS DE MINERAÇÃO COMO MATERIAL CIMENTÍCIO COMPLEMENTAR

⁸ OLIVEIRA, Werley Cristiano de. **Uso de análise envoltória de dados para avaliação de modelos com e sem restrição aos pesos: um estudo de caso para análise de alternativas de reaproveitamento de rejeito de minério de ferro na construção civil.** 2019.

⁹ AZEVEDO, Gislaine Handrinelly de; VITAL, Adriana de Fátima Meira. Use of the reply of caulim's benefiting industries for the production of earth-based ecological ink/aproveitamento do rejeito das indústrias de beneficiamento do caulim para a produção de tinta ecológica à base de terra. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 15, n. 3, p. 242, 2018.

¹⁰ SILVEIRA, Marina Duque. **Utilização de resíduos de mineração na construção civil.** 2015.

¹¹ KUHN, Caiubi Emanuel Souza; PEREIRA, Gustavo Gomes; MOREIRA, Rafael Marques. Educação em Geociências, desenvolvimento sustentável e mineração. **Revista Corixo De Extensão Universitária**, n. 5, 2016.

O processo de produção de cimento consome muita energia e emite uma quantidade significativa de CO₂. Para diminuir essas quantidades, todos os tipos de resíduos sólidos industriais contendo sílica são usados para substituir o cimento como Materiais Cimentícios Suplementares (MCSs) em misturas de cimento.¹²

Quanto à composição química, alguns rejeitos possuem alto teor de sílica, sendo o tamanho das partículas aproximadamente do mesmo tamanho das partículas de cimento, e por tais propriedades são utilizados para substituição parcial do cimento.¹³

2.3 TRATAMENTO DE REJEITOS

Os Materiais Cimentícios Suplementares (MCSs) são pozolânicos, cimentícios ou cimentícios e pozolânicos. No entanto, devido à sua baixa propriedade cimentícia, devem passar por várias etapas de tratamento antes da utilização no concreto, como: secagem, moagem e/ou calcinação. Rejeitos secos ao ar podem ser depois peneirados, em peneira de furo quadrado de 45µm como método de tratamento antes de serem usados.¹⁴

A moagem como um método de tratamento sugere a distribuição de tamanho de partícula representativas dos rejeitos. Com o tamanho Reduzido das partículas e o aumento da área superficial específica após a moagem, a estrutura interna e as propriedades físicas e/ou químicas do agregado podem sofrer alterações. Além disso, rejeitos misturados com alguns ativadores químicos e moídos juntos, são ativados química e fisicamente.¹⁵

Já através do processo de calcinação, alguns dos minerais dos rejeitos se decompõem e as estruturas cristalinas dos minerais são destruídas, enquanto surgem minerais amorfos, que possuem alta atividade pozolânica. Os rejeitos agregados podem ser misturados com outros resíduos sólidos e, calcinados juntos,

¹² DE AZEVEDO, Gislaine Handrinelly; VITAL, Adriana de Fátima Meira. Aproveitamento do rejeito das indústrias de beneficiamento do caulim para a produção de tinta ecológica à base de terra. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 15, n. 3, p. 242-247, 2018.

¹³ LIMA, Jaciel Cardoso de. **Obtenção, caracterização e aplicação de um compósito de matriz cimentícia e cargas de rejeitos**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

¹⁴ BATISTA, Suely Vieira. **Utilização de rejeitos de mineração na construção civil com ênfase na infraestrutura rodoviária**. 2022.

¹⁵ COLTURATO, Luis Felipe Dornfeld Braga; FERREIRA, Guilherme B.; DE ARAÚJO, Armando Corrêa. **Aproveitamento de rejeitos gerados no beneficiamento de minério de ferro**.

constituem o novo tipo de cimento de rejeitos com propriedades diferentes. A moagem e a calcinação podem ser utilizadas em conjunto para o tratamento de rejeitos.¹⁶

2.4 EFEITO NAS PROPRIEDADES FRESCAS

A trabalhabilidade (facilidade de transporte, colocação, compactação e acabamento da mistura) é uma propriedade importante das argamassas frescas ou misturas de concreto. O fluxo de argamassa diminui com o aumento dos níveis de substituição de rejeitos, porque a distribuição de tamanho de partículas mais finas eleva a área superficial específica total dos agregados miúdos, o que se aplica também ao concreto. A redução do abatimento até a inclusão de 100% de substituição de rejeitos como agregado miúdo pode ser atribuída ao tamanho das partículas e à textura da superfície dos rejeitos, que podem exigir mais água e, portanto, reduzir a trabalhabilidade.¹⁷

O tempo de pega da argamassa aumenta com rejeitos incorporados em substituição ao agregado miúdo, pois os metais pesados retardaram a hidratação do cimento formando uma camada de baixa permeabilidade ao redor dos grãos não hidratados de clínquer. Em tais casos, também ocorre o aumento da densidade das misturas frescas, atribuído à maior gravidade específica que os rejeitos apresentam em comparação com a areia natural. Além disso, há o aumento do empacotamento dos grãos devido ao maior teor de grãos finos nas misturas compostas por rejeitos.¹⁸

2.5 DUCTILIDADE

Semelhantemente às misturas de argamassa fresca ou concreto, há um aumento nas densidades das misturas endurecidas quando na composição há rejeitos de minério de ferro, de chumbo-zinco e de cobre, em substituição ao

¹⁶ GOMES, Ana Claudia Franca. **Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração**. 2016.

¹⁷ CRUZ, ANDREA BORGES DE SOUZA et al. Arquitetura pós-desastre e a sustentabilidade: os parâmetros socioculturais, ambientais e econômicos para a reconstrução de mariana, MG. **Revista FÓRUM PATRIMÔNIO: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável**, v. 10, n. 1, 2019.

¹⁸ OLIVEIRA, Werley Cristiano de. **Uso de análise envoltória de dados para avaliação de modelos com e sem restrição aos pesos: um estudo de caso para análise de alternativas de reaproveitamento de rejeito de minério de ferro na construção civil**. 2019.

agregado. Além disso, como resultado de uma maior densidade específica, a argamassa preparada com teor de substituição fracionada de agregado por rejeitos mostrou-se eficaz na blindagem contra radiação.¹⁹

A absorção de água é uma propriedade física da argamassa ou concreto endurecido, relacionada à porosidade da argamassa e do concreto. Se contiver rejeitos como agregado miúdo apresentará maior porcentagem de absorção de água devido à capilaridade ou maior teor de grãos finos e valores de área superficial específica dos rejeitos.²⁰

Concreto com rejeitos absorveu mais água, diminuindo-se essa permeabilidade com o passar do tempo, pois os rejeitos ocuparam os macro e microporos na mistura. A absorção de água do concreto se reduz até a inclusão de 80% de substituição de rejeitos como agregado miúdo, pois os rejeitos ocuparam os poros da pasta de cimento, devido ao efeito de preenchimento. Há controvérsias quanto ao grau de porosidade total, que pode aumentar com o aumento do teor de rejeitos.²¹

Propriedades mecânicas como resistência à compressão, à flexão, à tração, adesiva etc., são comuns para o concreto endurecido e há rejeitos diversos efeitos na resistência à compressão pelo uso de agregados em argamassas e concretos. A proporção constante de água no cimento, a presença de rejeitos interfere na resistência e na compressão da argamassa ou concreto, porque as partículas mais finas de rejeitos preenchem e otimizam a estrutura dos poros, aumentando a resistência à compressão do concreto.²²

A resistência à compressão do concreto melhorou com o aumento do teor de rejeitos, mas se o teor de reposição de agregado miúdo for limitado, a resistência à compressão do concreto diminui.²³

O limite de substituição de agregado miúdo se relaciona com a relação água/cimento e com a idade. Os rejeitos precisam de mais água para atingir a

¹⁹ AZEVEDO, Gislaine Handrinelly de; VITAL, Adriana de Fátima Meira. Use of the reply of caulim's benefiting industries for the production of earth-based ecological ink/aproveitamento do rejeito das indústrias de beneficiamento do caulim para a produção de tinta ecológica à base de terra. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 15, n. 3, p. 242, 2018.

²⁰ SILVEIRA, Marina Duque. **Utilização de resíduos de mineração na construção civil**. 2015.

²¹ KUHN, Caiubi Emanuel Souza; PEREIRA, Gustavo Gomes; MOREIRA, Rafael Marques. Educação em Geociências, desenvolvimento sustentável e mineração. **Revista Corixo De Extensão Universitária**, n. 5, 2016.

²² DE AZEVEDO, Gislaine Handrinelly; VITAL, Adriana de Fátima Meira. Aproveitamento do rejeito das indústrias de beneficiamento do caulim para a produção de tinta ecológica à base de terra. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 15, n. 3, p. 242-247, 2018.

²³ LIMA, Jaciel Cardoso de. **Obtenção, caracterização e aplicação de um compósito de matriz cimentícia e cargas de rejeitos**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

mesma trabalhabilidade, então a argamassa ou concreto contendo agregados miúdos apresenta uma relação água/cimento maior, reduzindo a resistência à compressão. A utilização de 10% de agregados miúdos em argamassa ou concreto, reduz a resistência à compressão, devido ao efeito retardador de metais pesados.²⁴

Há um limite de substituição por rejeitos para uma relação água/cimento constante e a resistência à flexão aumenta com a utilização de rejeitos até 100% de substituição por agregado miúdo.²⁵

No que se refere à resistência à tração, uma substituição de 20% a 25% por agregado miúdo é a concentração ótima para a resistência à tração do concreto, sempre maior no concreto com rejeitos que no concreto tradicional. Em concentrações inferiores, a resistência à tração tende a diminuir.²⁶

Há tendências de variação para a retração por secagem do concreto com agregado miúdo, conforme a proposição; as deformações de retração com 10%-80% foram maiores que no concreto tradicional; de 10% para 30% de substituição houve uma tendência decrescente no valor da deformação de retração; Por vezes, todas as retrações por secagem do concreto com rejeitos foram menores em relação ao concreto tradicional; outras vezes ainda, para argamassas com rejeitos como agregado miúdo e argamassa tradicional, apresentaram os mesmos resultados no que concerne à retração por secagem do concreto pronto.²⁷

2.6 DURABILIDADE

A resistência à abrasão do concreto às vezes se refere ao desgaste em pavimentos e pisos industriais pelo tráfego de veículos, e o teste de resistência à abrasão é feito para medir a perda de massa ou a profundidade do desgaste. A perda de massa do concreto aumenta com o aumento da porcentagem de rejeitos.²⁸

²⁴ BATISTA, Suely Vieira. **Utilização de rejeitos de mineração na construção civil com ênfase na infraestrutura rodoviária**. 2022.

²⁵ COLTURATO, Luis Felipe Dornfeld Braga; FERREIRA, Guilherme B.; DE ARAÚJO, Armando Corrêa. **Aproveitamento de rejeitos gerados no beneficiamento de minério de ferro**.

²⁶ GOMES, Ana Cláudia Franca. **Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração**. 2016.

²⁷ CRUZ, ANDREA BORGES DE SOUZA et al. Arquitetura pós-desastre e a sustentabilidade: os parâmetros socioculturais, ambientais e econômicos para a reconstrução de mariana, MG. **Revista FÓRUM PATRIMÔNIO: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável**, v. 10, n. 1, 2019.

²⁸ OLIVEIRA, Werley Cristiano de. **Uso de análise envoltória de dados para avaliação de modelos com e sem restrição aos pesos: um estudo de caso para análise de alternativas de reaproveitamento de rejeito de minério de ferro na construção civil**. 2019.

No entanto, para a substituição do agregado miúdo por 10% e 20% de rejeitos, há uma perda de massa menor que o concreto tradicional. Na razão água para cimento de 0,4 e 0,5, pode ser observada menor abrasão em uma substituição de 20% de rejeitos como agregado miúdo.²⁹

A permeabilidade, definida como a taxa de escoamento viscoso de fluidos ou outras substâncias potencialmente deletérias sob pressão através da estrutura porosa, tem um efeito importante na durabilidade do concreto.³⁰

3 CONCLUSÃO

Os rejeitos são tradicionalmente nomeados de acordo com suas fontes, o corpo do minério, por exemplo, rejeitos de minério de ferro, rejeitos de chumbo-zinco, rejeitos de cobre, rejeitos de ouro, rejeitos de areias betuminosas e assim por diante. Os pesquisadores que fazem materiais costumam usar esse método de classificação, mas ele tem algumas limitações, pois não pode refletir a natureza dos rejeitos e suas características tecnológicas. De fato, conforme as composições mineralógicas e as propriedades dos rejeitos, é útil para os pesquisadores de materiais usar rejeitos como materiais reciclados para a construção sustentável.

Em outras palavras, conforme as fases minerais dominadas, os rejeitos podem ser vagamente classificados como minerais de silicato, minerais de carbonato, minerais de feldspato, minerais de argila e assim por diante.

O tratamento de rejeitos é o primeiro passo para o uso de rejeitos como ingrediente em cimento e concreto, mas as partículas sólidas finas de rejeitos são difíceis de separar da água. Assim, é uma boa ideia usar rejeitos pré-umedecidos como substitutos do cimento para investigar o efeito dos rejeitos nas propriedades da argamassa ou concreto.

O método de moagem é utilizado como tratamento de rejeitos e consome muita energia. Não é melhor que o método de peneiramento, pois os rejeitos estão se tornando mais finos com a moagem de minério submicrométrica na indústria extrativa.

²⁹ AZEVEDO, Gislaine Handrinelly de; VITAL, Adriana de Fátima Meira. Use of the reply of caulim's benefiting industries for the production of earth-based ecological ink/aproveitamento do rejeito das indústrias de beneficiamento do caulim para a produção de tinta ecológica à base de terra. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 15, n. 3, p. 242, 2018.

³⁰ SILVEIRA, Marina Duque. **Utilização de resíduos de mineração na construção civil**. 2015.

Além disso, através do processo de peneiramento, as partículas grossas de rejeitos podem ser utilizadas como agregado e as partículas finas podem ser utilizadas como substituto do cimento ou material de enchimento em concreto, ou argamassa de cimento.

Em contraste, a calcinação é especialmente adequada para rejeitos com alto teor de caulinita porque o metacaulim, que tem uma alta atividade pozolânica, é criado pela calcinação da caulinita. Além disso, em cimento e concreto com agregados podem sofrer uma elevação no custo, já que a reciclagem implica tratamento prévio.

No entanto os benefícios sociais e ambientais da utilização de rejeitos em cimento e concreto devem ser considerados no futuro, em detrimento do custo, por constituírem uma solução eficaz em construções sustentáveis.

Geralmente, o rejeito utilizado como agregado parcial ou substituição do cimento tem efeito adverso na trabalhabilidade do concreto fresco e da argamassa devido ao aumento da área específica total. No entanto, eliminando os tamanhos mais finos, o efeito adverso na trabalhabilidade pode ser reduzido.

Conforme os resultados resumidos, a utilização de rejeitos como agregados resulta em aumento na resistência à compressão com uma relação água-cimento constante, e a principal razão desse aumento é o tamanho da partícula do rejeito, o que é mais fina, e por isso preenche os poros da argamassa do concreto.

Em comparação, para a mesma trabalhabilidade da argamassa ou concreto com rejeito como agregado miúdo, a resistência à compressão diminuiu, pois os rejeitos precisam de mais água, levando a uma maior relação água/cimento.

Com base na literatura, no concreto, é geralmente recomendado não mais que 30% de substituição de rejeitos como agregado miúdo. O efeito dos rejeitos como substituição do cimento, na resistência à compressão, é geralmente negativo devido à baixa atividade pozolânica, mesmo que sejam moídos. Em contraste, pode haver um efeito benéfico na resistência à compressão em virtude do efeito de preenchimento e por uma alta atividade pozolânica dos rejeitos calcinados, que têm alto teor de caulinita.

Apesar de não haver muito mais literatura sobre desempenho de durabilidade, a utilização de rejeitos tanto como agregados quanto como MCSs tem um efeito contrastante na durabilidade do concreto. As divergências na literatura

em relação à penetração do íon cloreto no concreto com rejeitos, alguns estudos afirmam que aumenta, e outros consideraram que a permeabilidade ao íon cloreto diminui continuamente com o uso de rejeitos. Situação semelhante persiste na resistência ao sulfato e na carbonatação de argamassa ou concreto de cimento com rejeitos. Para a quantidade lixiviada de metais pesados, considera-se que a argamassa contendo rejeitos apresenta menor lixiviação de metais pesados, mas não há literatura que confirme essa informação.

Normalmente, os rejeitos podem ser usados como matéria-prima para a produção de clínquer de cimento. Em muitos casos, como as composições químicas dos rejeitos são bastante variadas, às vezes só podem ser usados como mineralizadores para a produção de clínquer de cimento. Além disso, os rejeitos com alto teor alcalino não são considerados para essa aplicação, sendo necessárias mais pesquisas sobre o efeito do metal dos rejeitos nas fases minerais do clínquer e nos produtos de hidratação do cimento preparado com rejeitos.

É importante ressaltar que a pesquisa de rejeitos em cimento e concreto de cimento ainda está em sua fase embrionária e não há muita literatura disponível. Seguem as conclusões extraídas da revisão de literatura.

Contudo, observa-se que os estudos disponíveis são consensuais em relação ao fato de que os rejeitos devem ser caracterizados de acordo com suas composições e propriedades mineralógicas; por exemplo, minerais de silicato, minerais de carbonato e minerais de feldspato, para benefício do pesquisador de materiais, e a utilização de rejeitos em cimento e concreto deve ser realizada de acordo com essas classificações de rejeitos.

O método de tratamento por peneiramento deve ser utilizado para a maioria dos rejeitos antes de sua reutilização, e o tratamento por calcinação é adequado para rejeitos com alto teor de caulinita. Além disso, a utilização de rejeitos reduz a trabalhabilidade do concreto com rejeitos como agregado miúdo ou MCSs.

A resistência à compressão do concreto aumenta com os rejeitos como agregado miúdo, mas geralmente é recomendado adotar não mais que 30% de substituição de rejeitos como agregado miúdo. Altas porcentagens de substituição de rejeitos diminuem a resistência à compressão do concreto, exceto para rejeitos calcinados. Há dualidade em relação à durabilidade do concreto com rejeitos, mas é benéfica devido à solidificação de metais pesados nos rejeitos.

Constatou-se, ainda, que o clínquer pode ser produzido usando os rejeitos e, mesmo que tenham um baixo teor de SiO_2 , ainda podem ser usados para preparar o clínquer de cimento especial.

Por fim, a utilização de rejeitos em cimento e concreto será benéfica para o meio ambiente tanto no processamento de resíduos sólidos quanto na utilização de materiais virgens na indústria da construção.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, Gislaine Handrinelly de; VITAL, Adriana de Fátima Meira. Aproveitamento do rejeito das indústrias de beneficiamento do caulim para a produção de tinta ecológica à base de terra. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 15, n. 3, p. 242-247, 2018.

BATISTA, Suely Vieira. **Utilização de rejeitos de mineração na construção civil com ênfase na infraestrutura rodoviária**. 2022.

COLTURATO, Luis Felipe Dornfeld Braga; FERREIRA, Guilherme B.; DE ARAÚJO, Armando Corrêa. **Aproveitamento de rejeitos gerados no beneficiamento de minério de ferro**.

CRUZ, ANDREA BORGES DE SOUZA et al. Arquitetura pós-desastre e a sustentabilidade: os parâmetros socioculturais, ambientais e econômicos para a reconstrução de mariana, MG. **Revista FÓRUM PATRIMÔNIO: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável**, v. 10, n. 1, 2019.

GOMES, Ana Claudia Franca. **Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração**. 2016.

KUHN, Caiubi Emanuel Souza; PEREIRA, Gustavo Gomes; MOREIRA, Rafael Marques. Educação em Geociências, desenvolvimento sustentável e mineração. **Revista Corixo De Extensão Universitária**, n. 5, 2016.

LIMA, Jaciel Cardoso de. **Obtenção, caracterização e aplicação de um compósito de matriz cimentícia e cargas de rejeitos**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

OLIVEIRA, Werlley Cristiano de. **Uso de análise envoltória de dados para avaliação de modelos com e sem restrição aos pesos: um estudo de caso para análise de alternativas de reaproveitamento de rejeito de minério de ferro na construção civil**. 2019.

SILVEIRA, Marina Duque. **Utilização de resíduos de mineração na construção civil**. 2015.

GERDAU. **Sustainable House** - worldsteel.org. Disponível em: <https://worldsteel.org/steel-topics/sustainability/our-action/gerdau-sustainable-house/>. Acesso: 14/09/2022.

IBEAS.VII-051.pdf (ibeas.org.br): Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2019/VII-051.pdf> Acesso: 14/09/2022.

UFRGS. **Produção de agregados miúdos para concreto com rejeitos da mineração de carvão** (ufrgs.br). Disponível em: https://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sess%C3%B5es_B7_B8_B9/B7_ARTIGO_04.pdf Acesso: 14/09/2022.

CASAZERO. Microsoft Word - artigo_Ibracon_Luiza_R5.docx (casazero.cz). Disponível em: https://casazero.cz/wp-content/uploads/2016/01/artigo_ibracon_luiza_r5.pdf Acesso: 14/09/2022.

1LIBRARY. Etapa 3: **Rejeito de mn como agregado miúdo no concreto** (1library.org). Disponível em: <https://1library.org/article/etapa-rejeito-de-mn-como-agregado-mi%C3%BAdo-concreto.q763jpnny> Acesso: 14/09/2022.

AGRO20. **Rejeito é toda sobra que não pode ser aproveitada de forma alguma** (agro20.com.br). Disponível em: <https://agro20.com.br/rejeito/> Acesso: 14/09/2022.

VGRESIDUOS. **A diferença entre lixo, resíduo e rejeito e como é feito o seu gerenciamento**|VG Resíduos (vgresiduos.com.br). Disponível em: <https://www.vgresiduos.com.br/blog/blogdiferenca-entre-lixo-residuo-rejeito/> Acesso: 14/09/2022.

GEOSCAN. **Reaproveitamento de rejeitos na mineração**: Entenda mais sobre! (geoscan.com.br) Disponível em: <https://www.geoscan.com.br/blog/reaproveitamento-de-rejeitos-na-mineracao/> Acesso: 14/09/2022.