https://doi.org/10.4322/CBPAT.2022.015

Congresso Brasileiro de Patologia das Construções

AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DE CONCRETOS CONFECCIONADOS COM ADIÇÃO DE REJEITOS

Carolina Fonseca de Farias[1]*, Maria Teresa Barbosa[1]
*Autor de contato: carolina.fonseca@estudante.ufjf.br
teresa.barbosa@engenharia.ufjf.br

[1] Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil

RESUMO

A incorporação de rejeitos na estrutura do concreto é uma iniciativas usual no contexto de sustentabilidade na construção civil. Diante do tema em questão, o presente estudo buscou, por meio de uma revisão bibliográfica, compreender a influência dos resíduos empregados na confecção do concreto tendo como principal parâmetro a durabilidade, vida útil e o comportamento do material em sua estrutura. Foram selecionados pesquisas onde se substitui, de forma parcial ou total, os agregados convencionais pelos rejeitos, a saber: rejeitos de mineração, rejeitos da construção civil, rejeitos de manganês, lodo de estação de tratamento de água, borracha de pneu, lama residual de usinas de concreto e porcelana elétrica. Os parâmetros utilizados nos estudos variam desde caracterizações físico-químicas à ensaios de resistência a compressão axial e tração por compressão diametral, resistência a flexão, elasticidade e absorção de água. Foi observada uma melhoria na durabilidade e vida útil dos produtos com rejeitos de mineração e porcelana, enquanto a adição de rejeitos de manganês, de borracha e lama residual apresentaram melhorias parciais em alguns parâmetros. Os rejeitos da construção civil e o lodo não apresentaram resultados satisfatórios, nos quesitos avaliados.
Palavras-chave: sustentabilidade; rejeitos; concreto.

ABSTRACT

The incorporation of tailings in the concrete structure is a usual initiative in the context of sustainability in civil construction. In view of the subject in question, the present study sought, through a literature review, to understand the influence of waste used in the manufacture of concrete, having as main parameter the durability, useful life and behavior of the material in its structure. Researches were selected where conventional aggregates are partially or totally replaced by tailings, namely: mining tailings, civil construction tailings, manganese tailings, water treatment plant sludge, tire rubber, residual sludge from electric porcelain and concrete plants. The parameters used in the studies range from physicochemical characterizations to tests of resistance to axial compression and traction by diametral compression, resistance to bending, elasticity and water absorption. An improvement in the durability and useful life of the products with mining and

porcelain tailings was observed, while the addition of manganese tailings, rubber and residual mud showed partial improvements in some parameters. The civil construction waste and sludge did not present satisfactory results, in the evaluated items.
Keywords: sustainability; waste; concrete.

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais características da construção civil moderna é a eficiência de projetar, desenvolver e construir com os recursos disponíveis, buscando oferecer o melhor serviço com o menor custo possível, e, se possível, com materiais duráveis e com valores acessíveis. Desta forma, ao se elaborar um projeto, busca-se atentar a importância da relação preço/vida útil, dos materiais utilizados. Ao se observar as diversas fontes alternativas de matéria-prima disponíveis, para além dos recursos naturais convencionais, pode-se encontrar soluções para os altos custos das obras, reduzindo gastos com atividades extrativistas e reutilizando resíduos já presentes no cotidiano de diversos sistemas produtivos. Entretanto, o estudo da qualidade dos materiais alternativos faz-se necessário, para que, além da redução dos custos, a qualidade dos insumos seja preservada (SILVEIRA, 2010).

Nas últimas décadas, tal conceito de construção civil convencional foi substituído por uma visão sustentável e amigável, tanto ao ambiente quanto ao social, ambos diretamente afetados pela exploração desenfreada e sem planejamento do passado. Desta forma, meios sustentáveis de construir e produzir são constantemente buscados, contribuindo em diversas esferas da sociedade e do meio ambiente (LEITE, 2001).

Tendo a sustentabilidade e a proteção ambiental (ou impactos mínimos aos biomas) como alguns dos objetivos a serem buscados em um projeto, foram desenvolvidas formas eficientes de reaproveitar resíduos de diversos setores industriais, incorporando-os, principalmente na produção de concreto e argamassas, reduzindo a necessidade de exploração de recursos naturais e diminuindo o volume de materiais descartados em aterros e afins. Desta forma, reaproveitando estes materiais, antes inservíveis, na cadeia de produção, como matéria prima, alia-se a sustentabilidade dos sistemas humanos com uma compensação pelos danos ambientais de outrora (PINTO e SOUZA, 2020).

Cabe mencionar que a indústria da construção civil é um dos setores que mais agregam resíduos que possibilitam a confecção de produtos ecoeficentes e que agregam os conceitos de sustentabilidade (RODRIGUES, 2014). Do ponto de vista mercadológico, a comercialização de produtos de base sustentável e ambientalmente amigável, possui um grande apelo e potencial para crescimento, sendo, na maioria dos casos, economicamente viável, para as empresas e atrativo para parte do público. Posto isso, este mercado, de sustentabilidade na construção civil, auxilia na reformulação da cadeia produtiva, fazendo com que a mesma se redirecione aos centros urbanos, onde se encontram a maior parte destes resíduos, e intervenham com menor frequência em recursos naturais e afins (COIMBRA *el al*., 2004).

Como exemplo destes, podem ser citados os Resíduos de Construção e Demolição (RCD), sendo os mais comuns nesta área, desde o século passado, mais especificamente no período pós Segunda Guerra, na Alemanha, onde parte das cidades atingidas foi reconstruída utilizando os escombros, como forma de suprir a consequente escassez de insumos da época. Sendo assim, pode-se

considerar este episódio da humanidade como um dos protótipos do sistema de reaproveitamento de resíduos na construção civil, mais especificamente na composição do concreto (LEITE, 2001).

O concreto é um dos produtos com maior demanda de consumo no mundo, sendo necessário para a grande maioria das atividades ligadas a construção civil. Sua produção é de cerca de 10 bilhões de metros cúbicos ao ano, tendo uma parcela de 70 a 80% constituída por agregados. Diante disto, observa-se um interesse, não apenas sustentável, mas também econômico/financeiro, em utilizar resíduos como material agregado para sua produção (MEDEIROS *et al*., 2011).

É de interesse comum às empresas de materiais de construção civil, o oferecimento de produtos de boa qualidade e com alta durabilidade e vida útil. Sendo assim, a inserção destes resíduos na cadeia de produção também demanda o atendimento das necessidades básicas deste mercado, garantindo competitividade e preço, diante dos diversos produtos oferecidos (ROCHA e CHERIAF, 2005).

A durabilidade de um concreto é avaliada a partir do desempenho de suas estruturas diante das ações de tração e compressão fornecidas pelo ambiente, sendo observadas se as funções previstas são atendidas. Ao manter esta resistência durante um determinado tempo, é possível avaliar sua vida útil, tendo em vista que este período é finito, reparos e manutenções promovem seu prolongamento (RODRIGUES, 2014).

O comportamento de uma estrutura de concreto também é influenciado pelo ambiente onde está inserida, sendo assim, para além da técnica de construção empregada e da mistura utilizada, atenta-se para a ação das intempéries locais no material constituinte. Tendo em vista que, a água, o gás carbônico e o oxigênio podem causar danos consideráveis em estruturas de concreto, sendo os mesmos, observáveis após um período de tempo (SILVEIRA, 2010).

A durabilidade do concreto depende de fatores, como a facilidade ou dificuldade de penetração dos fluídos em sua estrutura, o que é diretamente influenciado pela permeabilidade da mesma, a distância de recobrimento e a vida útil estimada (MEDEIROS *et al*., 2011).

Atualmente, o concreto constituído de rejeitos ainda é empregado, majoritariamente, em obras de pavimentação, alvenaria não estrutural, casas populares e afins, entretanto, sua utilização pode ganhar espaço em empreendimentos cada vez mais complexos, uma vez que, estudos de resistência, durabilidade e vida útil, são desenvolvidos e materiais dos mais variados tipos podem ser adotados. Desta forma, a atenção dos estudos nesta área está voltada a qualidade do agregado adicionado ao concreto, sendo este, o responsável pela elevação ou queda nos coeficientes de durabilidade e vida útil do material (PINTO e SOUZA, 2020).

Baseando-se no tema em questão, o presente estudo objetiva avaliar, por meio de uma revisão bibliográfica, a durabilidade e a vida útil de concretos confeccionados com agregados provenientes do reaproveitamento de rejeitos, sendo estes, de tipos variados e origens diversas, através de um estudo comparativo entre os mesmos, possibilitando a compreensão do comportamento de cada material em sua composição.

2. AGREGADOS EMPREGADOS NA CONFECÇÃO DE CONCRETO

De acordo com a NBR 9935/05 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2005), os agregados definem-se por materiais de origem mineral, sólidos e inertes, cuja granulometria média, quando adequada para uso, são empregados na confecção de insumos diversos na construção civil,

através da mistura com aglomerantes de ativação hidráulica (para concretos e argamassas) e/ou ligantes betuminosos (para asfalto).

Cerca de 3/4, ou uma média entre 70 e 80%, do volume do concreto é constituído por agregados, assim, observa-se a importância da qualidade do material escolhido na composição do produto, influenciando diretamente em sua resistencia mecânica, desempenho estrutural, durabilidade e consequente vida útil. Os agregados têm sua qualidade classificada de acordo com sua origem, as dimensões (passadas pelas peneiras, conforme a NBR 7211/83), massa unitária e composição mineralógica (RODRIGUES, 2014).

A composição mineralógica dos agregados influem diretamente na qualidade final do concreto, desta forma, faz-se necessária a observância de sua origem, como proveniência de rochas estáveis, ou mistura de minerais com qualidades similares, além das dimensões granulométricas, posteriores ao teste com peneiras. Pelo fato de a areia e o cascalho serem originados, na maioria dos casos, por processos de decomposição de rochas, estes já mostram-se muito mais resistentes a intempéries, tendo sua origem de rochas de quartzo, arenitos silicificados e quartzitos (MALOTRA e METHA, 1996).

Levando em consideração a origem dos agregados, estes podem ser divididos de três diferentes formas, os naturais, os artificiais e os industrializados. Os naturais são obtidos na forma ideal diretamente na natureza, possuem uma resiliência maior a intempéries, por já serem advindos de processos de decomposição mineral, como a areia, cascalho, seixos rolados e pedregulhos. Os de origem artificial são obtidos através do britamento de rochas estáveis ou misturas, como o pedrisco e a pedra britada. E, por fim, os industrializados, que possuem esta nomenclatura devido a sua forma de obtenção, e não sua composição, podendo ser obtidos através de manufaturas de tipos minerais, como a argila expandida e a escória britada, também compreendendo parte dos agregados de reuso, como o RCD (ROCHA e CHERIAF, 2005).

3. METODOLOGIA

Utilizando-se de bases de dados do Google Acadêmico, Scientific Eletronic Library Online (SciELO) e repositórios de Universidades Federais, foram selecionados estudos e pesquisas que abordem o caráter sustentável desta iniciativa e avaliem tecnicamente as características dos materiais produzidos, buscando por qualidade e sustentabilidade. Tendo por característica principal a adição de resíduos, antes inservíveis, como agregado no concreto, o principal parâmetro de seleção dos artigos foi a abordagem dos aspectos técnicos e econômicos da utilização destes materiais, em substituição aos produtos convencionais.

Para realização da pesquisa acerca do tema em questão, foram utilizadas as palavras-chave: sustentabilidade na construção civil, materiais alternativos, concreto de rejeitos, agregados de concreto, *tailings concrete, concrete aggregates, sustainability in civil construction, alternative materials*.
Foram selecionados artigos, cuja premissa parte do emprego destes materiais como agregados no concreto, substituindo, seja em parte ou em sua totalidade, os materiais convencionais. Desta forma, objetiva-se avaliar, por meio da pesquisa bibliográfica e dos resultados apresentados nos estudos que compõem o referencial teórico, a durabilidade e a vida útil do concreto de rejeitos, bem como sua aplicabilidade e viabilidade econômica. Posterior a análise técnica destes materiais, buscou-se analisar a sustentabilidade destas iniciativas, bem como suas contribuições socioambientais.

4. RESULTADOS

4.1. Rejeitos de mineração como agregados na produção de concreto

Franco *et al*. (2014) objetivou verificar a aplicabilidade dos rejeitos de minério de ferro, advindos da lama do barramento, como alternativa ao agregado para produção de concreto. Utilizou-se rejeitos em seu estado bruto, sem que sua fração ferrosa fosse segregada, realizando, posteriormente, sua caracterização químico-ambiental, e ensaios de resistência a compressão axial e resistência a tração na flexão.

O estudo dividiu os experimentos em três classes de resistencia mecânica, utilizando traços experimentais de classe C20, C30 e C40. Os três traços contavam com dosagens de 0,5, 5, 10 e 50% de rejeitos de mineração, em substituição ao agregado miúdo convencional e três com adição, totalizando seis amostras para cada traço, além de uma amostra controle sem nenhuma adição e/ou substituição do material alternativo.

Para o ensaio de resistência axial, utilizaram-se corpos de prova cúbicos de 40x40x40 mm, com diferentes idades de ruptura (3, 7 e 28 dias), seguindo a normatização da NBR 13279/2005 (ABNT, 2005). E, para os ensaios de resistência a tração na flexão, foram utilizados corpos de prova em formato prismáticos de 40x40x160 mm com diferentes idades de ruptura (3, 7 e 28 dias), sendo rompidos seguindo as recomendações da NBR 12142/1991 (ABNT, 1991).

Para as amostras com adição e substituição de 5 e 10% foram observados os melhores desempenhos nos ensaios de resistência mecânica à compressão, em todos os traços utilizados. As amostras com 28 dias possuíam, em seus corpos, partículas ultrafinas do rejeito de minério, alcançando 50 MPa de resistência a compressão axial, atendendo aos parâmetros mínimos da norma. Nos ensaios de resistência à tração na flexão, os corpos de prova com adição de rejeitos apresentaram melhor desempenho em todas as dosagens, principalmente, se comparado à amostra de controle e às dosagens com substituição parcial. Isto decorre em consequência da redução dos poros e pela presença de finos, constituindo um maior coeficiente de homogeneidade à estrutura do concreto, garantindo maior isotropia ao material.

4.2. Rejeitos da construção civil para blocos de concreto

A pesquisa de Costa *et al*. (2017) buscou analisar o desempenho de blocos de concreto, confeccionados utilizando rejeitos da construção civil. Estes blocos de concreto foram utilizados em alvenaria de vedação, tendo, em sua empregabilidade, uma menor exigência de alta resistência, sendo, em muitos casos, buscada apenas uma maior durabilidade e vida útil do material, evitando desgastes e reformas constantes. Foram realizados ensaios de resistência à compressão e comparativos entre os blocos convencionais e os produzidos à partir de rejeitos da construção civil.

Para realização dos ensaios, foram utilizadas as recomendações da NBR 6136/2014 (ABNT, 2014), que, por sua vez, dispõe sobre os requisitos para confecção de blocos vazados de concreto simples para alvenaria. Foi utilizado um valor de substituição do agregado convencional pelo rejeito de 30% no traço do concreto, e seu período de secagem para ruptura foi de sete dias. Posteriormente foi realizado o ensaio de esforço à compressão, e a comparação com os blocos convencionais.

O traço utilizado para confecção das amostras foi o de 1:2, 5:2, 5:1 (1 de cimento, 2,5 de pó de pedra, 2,5 de areia comum e 1 de rejeitos). As dimensões dos cinco corpos de prova são de 140x190x390 mm, segundo a NBR 6136/2014, o bloco é de classe D, sem função estrutural, tendo seu uso limitado a alvenaria de vedação acima do nível do solo.

De acordo com o prescrito na NBR 6136/2014 devem possuir uma resistência característica igual ou superior a 2 MPa. Para os testes de resistência à compressão foi utilizada a média *fbk/est* da NBR 6136/2014, tendo como valor mínimo 2 MPa. Após os testes foi observada a média de 1,95 MPa nas amostras, demonstrando a inviabilidade do uso destes rejeitos para confecção do material em questão. Ao se analisar a composição granulométrica para o traço em questão, observa-se que o maior volume de comento nos traços eleva a resistência à compressão das amostras. Fatores como a granulometria adequada dos resíduos e o traço utilizado, podem ter influenciado diretamente no experimento, resultando na inviabilidade no uso do material.

4.3. Blocos de concreto com resíduos de borracha de pneu e resíduo de concreteira

O trabalho de Pereira *et al*. (2021) objetivou avaliar a utilização de resíduos de borracha de pneu e o rejeito cimentício advindo de usinas de concreto. O pneu, quando ainda em seu formato usual, pode ser reutilizado de diversas formas, ou reciclado, em processos de recauchutagem ou reaproveitado em contenções de taludes, hortas sustentáveis, incorporados em meios de recreação, entre outros. Quando encaminhado para a recauchutagem, o pneu, já utilizado e desgastado, onde ocorre a raspagem de diversas partes do mesmo, gerando um resíduos de borracha fina, sendo este um dos produtos alvo da pesquisa.

Além do resíduo de borracha, a presente pesquisa buscou incorporar os rejeitos de usinas de concreto, também chamada de lama residual, ambos como substitutos parciais no traço do concreto para confecção de blocos de alvenaria. Os autores buscaram incorporar ambos os materiais de forma conjunta, utilizando o resíduo de borracha para substituir o agregado convencional e a lama residual seca como substituta ao cimento.

Foram realizados ensaios de caracterização química (análise da composição química elementar do cimento, do granulado de borracha e da areia artificial e ensaio de difração de raios X dos materiais), física (ensaio de densidade de partículas) e ensaios de compressão e absorção de água dos corpos de prova. O período de cura dos corpos de prova é de 28 dias, sendo utilizados 14 corpos de prova, sendo um como amostra de controle (com 0% de substituição) e os demais variando em 3,4, 11,7, 20 e 23,5% de substituição, tanto para o resíduo de borracha quanto a lama residual.

Observou-se, a partir dos ensaios, uma resistência a compressão superior à 3 MPa, atendendo as recomendações das NBR 7170:1983, 8491:2012 e 6136:2014, utilizadas como embasamento normativo para o estudo em questão. Desta forma, foi observado, para uma resistência a compressão adequada, um valor máximo de substituição de 8% para os resíduos de borracha de pneu e de 15% para a lama residual de concreto. Também foi observada uma queda na resistência a compressão considerável em corpos de prova com maior adição de borracha, principalmente após os 28 dias de cura. A substituição do cimento por lama residual teve pouca influência na absorção de água, quando comparada a borracha, isto ocorre devido, principalmente, a fraca coesão entre a borracha e o cimento, o que favorece o aumento de vazios na estrutura do concreto, elevando sua capacidade de absorção de água.

Em amostras que utilizaram uma maior porcentagem de substituição de lama residual nos traços foi observado um aumento na capacidade de absorção de água nos blocos de concreto, devido à baixa formação de cristais na pasta endurecida, pelo fato de o material já encontrar-se demasiadamente hidratado quando utilizado, resultando em microestruturas com um volume excessivo de vazios. Para redução no volume de vazios, os autores reavaliaram o tempo de vibração e compactação do concreto, dobrando-os, buscando uma redução significativa em sua porosidade, para atender aos parâmetros limites de absorção média de água, de acordo com a NBR 6136, de 10 e 12%.

Os traços finais ideias para substituição do cimento pela lama residual foram de 15%, uma vez que, a mesma não apresentou efeitos significativos para um percentual menor e apresentou uma baixa capacidade de resistência a compressão para um percentual superior. Para o resíduo de borracha foi estabelecido um limite máximo de 8% e um mínimo de 0%, obtendo, assim, um valor intermediário ideal de 4%. Desta forma, pôde-se observar uma redução na resistência na medida em que o teor de resíduo de borracha aumenta, reduzindo em até 92% nas amostras com porcentagem de substituição superior a 8% em contraste a um aumento de até 13% no mesmo parâmetro quando a lama residual é adicionada em proporções adequadas.

4.4. Rejeitos de isolador elétrico de porcelana

Ribeiro *et al*. (2021), em seu trabalho, buscou avaliar a influência da adição de resíduos de isoladores elétricos de porcelana em substituição ao agregado do concreto permeável. Os percentuais de substituição foram de 10 e 30% nas amostras, com tempos de cura de 14 e 28 dias. Os testes foram elaborados seguindo as recomendações da NBR 16605:2017 e 248:2003, o traço adorado foi 1:4 (cimento agregado) e a relação água/cimento foi de 0,32.

Os corpos de prova para determinação do índice de vazios os apresentaram dimensões de 30 cm de altura por 15 cm de diâmetro, para determinação do coeficiente de permeabilidade foram adotadas as medidas de 60 cm de largura, 60 cm de comprimento e 20 cm de altura e para os testes de compressão axial foram utilizados corpos com 10 cm de diâmetro por 15 de altura. Pôde-se observar nos testes de resistência a compressão axial, com 14 dias, um aumento considerável (10,35 ± 0,46) MPa, em relação as amostras de prova (6,35± 0,45) MPa, nas amostras com 30% de substituição. Para os testes com 28 dias houve um aumento nas amostras de prova (8,06 ± 0,55) MPa como também uma alteração nas amostras com 30% de resíduo (10,33 ± 1,07) MPa. Para ambos os testes foi observada uma melhoria significativa no coeficiente de resistência com a adição do resíduo.

Os isoladores de porcelanas são confeccionados de material cerâmico, incialmente produzidos a frio e, logo após, submetidos a altas temperaturas em seu processo de secagem. O que torna estes materiais extremamente rígidos e com uma capacidade de resistência a compressão, ataques químicos e pontos de fusão elevados, tornando-os muito eficientes, se comparados a outros materiais similares, quando o assunto é durabilidade e vida útil.

Ao se avaliar o módulo de elasticidade do concreto, foi observado, aos 14 dias, um aumento da amostra com 30% (18,02 ± 1,25) MPa em comparação com a amostra de referência (14,11± 1,25) MPa. Aos 28 dias o módulo de elasticidade das amostras com 30% (17,99± 0,88) MPa em comparação com a amostra referencial (15,89 ± 0,88) MPa.

Nos testes para determinação dos índices de vazios foi observado um aumento de (11,89 ± 0,68) MPa nas amostras com 30% em comparação a amostra referencial (9,56 ± 0,68) MPa, com 14 dias de maturação. Aos 28 dias a amostra de 30% apresentou uma elevação no índice de vazios (13,82 ± 0,25) MPa se comparada a amostra referencial (12,59 ± 0,04) MPa. Esta elevação nos índices de vazio das amostras com resíduos (entre 10 e 14%), segundo o autor, não atingiu valores que caracterizem-nas como concreto permeável (cerca de 30%).

Os testes de coeficiente de permeabilidade, para as amostras de referência foram reduzidos de 4583,66 mm/h para 4365,39 mm/h nas amostras com 10% de resíduos em substituição.

As amostras com 30% de substituição apresentaram melhores resultados, as amostras com 10 e 30% apresentaram menor coeficiente de permeabilidade, entretanto, não foram verificadas diferenças significativas nos outros parâmetros. Os resíduos de isolantes de porcelana elétrica, apesar de apresentarem-se como bons substitutos parciais ao agregado convencional, não atenderam aos parâmetros da NBR 16416:2015, que dispõe sobre pavimentos permeáveis de concreto.

4.5. Rejeitos de manganês em substituição aos agregados de concreto

A pesquisa 722de Souza Júnior et al. (2016) visou atribuir valor aos resíduos da extração de manganês produzidos na Serra do Navio, no Amapá, realizando a substituição total dos agregados do concreto, pelos rejeitos de manganês, realizando, posteriormente, um comparativo com um corpo de prova, produzido com os componentes convencionais (concreto, seixo e areia).

A caracterização mecânica das amostras foi realizada à partir dos testes de resistência a compressão diametral e módulo de elasticidade, além da caracterização química e mineralógica do rejeito, obtida através da reação álcali-agregados, fluorescência de raio-x e difração de raio-x. Buscando avaliar a viabilidade da adoção dos rejeitos de manganês para obras comuns, substituindo totalmente os agregados convencionais, estabeleceu-se um parâmetro de trabalhabilidade com um *slump test* de 160±10 mm. O traço unitário das amostras é de 1:1, 82:2,71, com teor de 51% de argamassa. Foram divididos em grupos de amostras com 100% de agregado convencional e 100% de rejeito de manganês, em substituição ao agregado.

Os corpos de prova possuem 100 mm de diâmetro por 200 de altura, tendo como tempo de secagem entre 7 e 28 dias, seguindo as recomendações da NBR 7222/2011 (ABNT, 2011), para ensaios de resistência à tração por compressão diametral, para os ensaios de módulo de elasticidade, foi utilizada a NBR 8522/2017 (ABNT, 2017), e para o ensaio de compressão axial, foi utilizada a NBR 7215/2019 (ABNT, 2019).

O primeiro obstáculo observado no estudo foi o aumento no desvio padrão das amostras com rejeito, causado pela dificuldade de adensamento dos agregados miúdos de manganês. Foram observadas pequenas formações (ouriços), possivelmente advindos de zonas de fragilidade, sendo mais acentuados nas amostras com maior tempo de maturação (próximo aos 28 dias). O concreto de rejeitos apresentou resistência 18% menor que o convencional, possivelmente causado por estas pequenas zonas de fragilidade. Ao se observar os resultados de resistência à tração por compressão diametral, pode-se notar uma menor tensão última nas amostras com rejeito. O módulo de elasticidade para as amostras com rejeito mostrou-se superior as convencionais, possivelmente causado pela diferença granulométrica dos agregados, e sua diferente massa específica. De acordo com os testes químicos e mineralógicos, o material não pode ser considerado pozolânico, sendo

apropriado para utilização como agregado. Apesar do decréscimo de 18% na resistência à compressão, principalmente após os 28 dias de secagem, os valores alcançados no *slump test* foram satisfatórios, após adição de superplastificante.

4.6. Lodo de estações de tratamento como agregado parcial no concreto

Tafarel *et al*. (2016), em seu estudo, buscou avaliar a influência da adição de diferentes porcentagens de lodo proveniente de Estações de Tratamento de Água (ETA), em substituição parcial ao agregado miúdo no concreto convencional, tendo como parâmetros de pesquisa a resistencia à compressão, à tração por compressão diametral e absorção de água por imersão. O material produzido, tem por objetivo a produção de blocos intertravados para obras de pavimentação.

Em sua pesquisa, foram utilizados valores de substituição de 5 e 10%, e uma amostra de referência (0%). No teste de resistência axial, o corpo de prova, utilizado como referência, possui 16,45 ± 0,86 Mpa, observado em seu 7º dia de maturação, para as amostras de 5 e 10%, foi verificado um decréscimo neste índice, respectivamente, 4,19 e 37,08%. Em valores totais, o corpo de prova com 5% de adição de lodo possui uma confiabilidade similar a amostra de referência, enquanto o com 10% apresenta um decréscimo significativo em sua confiabilidade. Após 28 dias, a resistência à compressão média foi reduzida em 11,37% na amostra com 5% de lodo, no corpo de prova com adição de 10% foi verificada uma redução de 29,25%, se comparados aos valores de referência. Estatisticamente, apenas a amostra com adição de 10% teve sua confiabilidade reduzida, se comparada ao material convencional.

Para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral média, o corpo de prova de referência possui 2,05 ± 0,06 Mpa, foi verificado um aumento de 11% nestes valores para o corpo de prova com 5% de lodo, e uma diminuição de 13% na amostra com 10%. De acordo com Tafarel *et al*. (2016), a variação observada nos testes pode ter sido influenciada pelo processo de moldagem ou pela heterogeneidade dos materiais agregados. Para a absorção de água, foram observados aumentos de 12 e 32%, para, respectivamente, as amostras de 5 e 10%.

A capacidade de absorção de água total pelo concreto elevou-se à medida que foi aumentada a porcentagem de lodo de ETA na composição, possivelmente, devido a reação expansiva, causada, principalmente, pelo ataque de sulfatos na estrutura, resultando na aparição de microfissuras. Outro agente causador deste fenômeno é a solubilização da matéria orgânica, presente no lodo, quando em contato com a água, formando vazios, ao longo do processo. O aumento da porosidade do material, afeta diretamente a durabilidade e vida útil do concreto, tornando-o mais vulnerável a atritos e intempéries, que podem ocasionar o contato do interior da estrutura com agentes agressivos do ambiente e carbonatação do concreto. Estes fatores podem explicar a queda na resistência mecânica das amostras, com o aumento da adição de lodo.

5. ANÁLISES DOS RESULTADOS

Os rejeitos incorporados, parcial ou totalmente, na parcela de agregados do concreto, contribuem, em vários aspectos, para melhorias no próprio produto, aumentando sua resiliência, resistência, plasticidade, durabilidade e vida útil, a depender do tipo de material empregado. Com base nos estudos apresentados, buscou-se avaliar a durabilidade e a vida útil do concreto com adição de rejeitos, como agregados, bem como o comportamento destes materiais na composição do produto.

5.1. Durabilidade e vida útil

Para avaliar a durabilidade e vida útil dos concretos produzidos, foram observados os parâmetros físicos de resistência e a composição estrutural das amostras produzidas pelos autores. A tabela 1 descreve os diferentes tipos de rejeito incorporados ao concreto, as análises realizadas e os resultados obtidos nas pesquisas.

Tabela 1 – Análise dos estudos utilizados.

Material	Testes realizados	Resultados	Melhor porcentagem de rejeitos
Rejeitos de mineração	Ensaios de resistência a compressão axial e resistência a tração na flexão	Propriedades mecânicas atende parâmetros mínimos, maior resistência à tração na flexão	5 e 10% para resistência a compressão axial e resistência a tração na flexão
Rejeitos da construção civil	Ensaio de esforço à compressão	Comprometimento das propriedades mecânicas	Sem melhorias significativas nas amostras
Resíduos de borracha de pneu e resíduo de concreteira	Caracterização física e química, ensaios de compressão e absorção de água	Elevação na absorção de água e no índice de vazios	4% a 8% para o resíduo de borracha e 15% para a lama residual
Rejeitos de isolador elétrico de porcelana	Índice de vazios, coeficiente de permeabilidade e resistência a compressão axial	Não atendeu aos requisitos da NBR 16416:2015, mas apresenta boa empregabilidade em alvenarias	Amostra com 30% de rejeito
Rejeito de manganês	Testes de resistência a compressão diametral e módulo de elasticidade	Baixa resistência e ganho no módulo de elasticidade	Amostra única com 100% de rejeito
Lodo de ETA	Resistência à tração por compressão diametral média, resistência axial e absorção de água	Baixa propriedade mecânica causados pelo aumento da porosidade	Sem melhorias significativas nas amostras

O coeficiente de durabilidade foi utilizado para avaliar a vida útil das amostras, os rejeitos de mineração e de porcelana elétrica apresentaram uma redução considerável na porosidade do material, sendo os melhores resultados neste contexto, aumentando sua durabilidade, e impedindo a ação de agentes externos dentro do corpo da estrutura.

Nos estudos com resíduos de manganês foi observada uma queda no coeficiente de durabilidade das amostras, se comparados aos valores de referência. Para as amostras com rejeitos de porcelana elétrica, o resíduo agregou positivamente apenas em características pontuais, como capacidade absorção de energia, melhorias no módulo de elasticidade e maior resistência a compressão axial.

Observa-se, assim, que o rejeito de porcelana não é apropriado para confecção de concreto permeável, mas sua adição elevou consideravelmente a durabilidade e vida útil do concreto.

Para os rejeitos de borracha e lama residual, observou-se um aumento nos vazios, o que demonstra, segundo Medeiros *et al*. (2011) uma baixa adesão entre estes resíduos e os componentes do concreto. Para os rejeitos da construção civil e lodo de ETA, não foram observadas melhorias nas amostras.

5.2. Viabilidade e comportamento do material

O comportamento dos materiais (rejeitos) dentro da estrutura do concreto apresentaram mudanças significativas, tanto no aspecto positivo, quanto negativo. A tabela 2 demonstra as alterações causadas pelo materiais nas amostras.

Tabela 2 – comportamento do material na composição do concreto.

Material	Alteração (baseado na amostra de referência)	Resultado mais expressivo por amostra
Rejeitos de mineração	Maior resistência à tração na flexão	0,5, 5, 10 e 50%
Rejeitos da construção civil	Redução na capacidade de resistência a compressão axial	30%
Resíduos de borracha de pneu e resíduo de concreteira	Aumento no índice de vazios	8% para os resíduos de borracha e 15% para a lama residual
Rejeitos de isolador elétrico de porcelana	Melhorias no módulo de elasticidade e na resistência a compressão axial, redução no índice de vazios, elevando vida útil	30%
Rejeito de manganês	Redução na resistência a compressão diametral e melhoria no módulo de elasticidade	100%
Lodo de ETA	Aumento na porosidade e absorção de água, acarretando diversos problemas na estrutura da amostra	10%

Observa-se, que, os rejeitos, em sua maioria, agregam, de forma positiva, em diferentes parâmetros dos corpos de prova, isto está diretamente relacionado ao comportamento dos materiais, quando incorporados à composição do concreto. O tipo de resultado alcançado, positivo ou negativo, por muitas vezes, está ligado a porcentagem de substituição do rejeito pelo agregado convencional. Ao se observar o comportamento das amostras, pode-se considerar diferentes funções para os concretos de rejeitos, muitos atendem à demandas não estruturais, como pavimentação, acabamentos, vedação e afins. Sua viabilidade pode ser relacionada a demanda por um determinado tipo de material.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de rejeitos no concreto ainda carece de mais estudos e mais aplicações, entretanto, já é possível e já ocorre, a aplicação destes materiais em diversas funções. O tipo de rejeito a ser utilizado e sua porcentagem, ainda são parâmetros a serem definidos e estabelecidos, para que possa ocorrer uma padronização de processos, dentro deste setor.

Iniciativas sustentáveis são de suma importância nos dias atuais, observando melhorias contínuas no mercado da construção civil. A incorporação destes materiais contribui em diversos aspectos econômicos e socioambientais.

Com base nos estudos utilizados, apenas as amostras com rejeitos de mineração, mostraram-se as mais adequados para utilização, enquanto o lodo de ETA, rejeitos da construção civil, rejeitos de manganês, resíduos de borracha de pneu e lama residual e resíduos de isoladores de porcelanas elétricas ainda não mostraram-se viáveis para emprego constante, nas atividades propostas, carecendo, possivelmente, de novos testes e diferentes empregabilidades. Foi observado um aumento na durabilidade e vida útil das amostras com rejeitos de mineração, baseando-se nos resultados dos ensaios produzidos. Para as amostras com porcelana elétrica, apesar da redução nos índices de vazios, todos os seus resultados foram positivos, o que demonstra uma maior durabilidade e vida útil dos concretos com adição deste material.

Para melhores resultados, recomenda-se, para estudos futuros, uma avaliação de vários estudos para cada um destes materiais, aumentando as possibilidades de emprego destes, e com dados mais sólidos sobre o comportamento dos materiais

7. AGRADECIMENTOS

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 9780/1987 - Método de ensaio para determinação de resistência à compressão de peças de concreto para pavimentação. Rio de Janeiro, Brasil, 1987.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 9935: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro: Abnt, 2005. 12 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7221: Agregado — Índice de desempenho de agregado miúdo contendo impurezas orgânicas — Método de ensaio. Rio de Janeiro: Abnt, 1983. 4 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM 248: Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7170: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria. Rio de Janeiro, 1983. 4 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 16605/2017: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 8491: Tijolo de solo-cimento - requisitos. Rio de Janeiro, 2012. 5 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – requisitos. Rio de Janeiro, 2014. 13 p

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: Abnt, 2005. 9 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 12142: Concreto – determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismático. Rio de Janeiro: Brasil, 1991.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. 10p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de provas cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 8522: Concreto - determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro: abnt, 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.

COIMBRA, M. A., LIBARDI, W. e MORELLI, M. R. Utilização de rejeitos de pilha zinco-carvão em argamassas e concretos de cimento Portland. **Cerâmica** [online]. 2004, v. 50, n. 316, pp. 300-307.

COSTA, T. L. *et al.* A produção de blocos de concreto confeccionados com rejeitos da construção civil para execução em alvenaria de vedação: a busca por alternativas sustentáveis. Artigo Discente. Acadêmico, Belo Horizonte, v. 7, n. 14, jul./dez. 2017.

FRANCO, L. C. *et al.* Aplicação de rejeito de mineração como agregado para a produção de concreto. 56° Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2014. IBRACOM. Ouro Preto, MG. 2014.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MALOTRA, V. M.; METHA, P.K. Pozzolanic and cementitious materials. Advances in Concrete Technology, v. 1, Gordan and Breach Publishers, 1996.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: Concreto: **Ciência e Tecnologia**. Ed. G. C. ISAIA. 1.ed. v.1. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto: IBRACON, 2011.

OLIVEIRA *et al*. Incorporação de cinza de lodo de estação de tratamento de esgoto de abatedouro de aves em cimento. **Revista Valore**, Volta Redonda, 4 (Edição Especial): 210-226. 2019.

PEREIRA, R.R.; PAULA, H.M.; BONFIM, W.B.; et al. Reciclagem de borracha de pneu e resíduo de concreteira na produção de tijolos de concreto: dosagem e otimização. **Revista Matéria**, v.26, n.3, 2021.

PINTO, M. S.; SOUZA, M. V. **Aproveitamento de rejeito da extração de minério de ferro na fabricação de argamassas: Reaproveitamento, Reutilização e Tratamento de Resíduos**. 17° Congresso Nacional do Meio Ambiente, Poços de Caldas MG, v. 17, n. V. 12, p. 1-10, 24 set. 2020.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Valorização de Resíduos Industriais na Produção de Materiais de Construção. **Revista Concreto**, Editora IBRACON. Florianópolis, SC, Janeiro/2005.

RIBEIRO *et al*. Propriedades físicas e mecânicas do concreto permeável com agregados de resíduos de isolador elétrico de porcelana. Research, Society and Development, v. 10, n.8. 2021.

RODRIGUES, L. dos S. et al. Avaliação tecnológica de cerâmicas tradicionais incorporadas com rejeito do minério de manganês. Cerâmica (online). 2014, v. 60, n. 356, pp. 580-585.

SILVEIRA, R. N. P. O. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de dois resíduos finos de pedreira para utilização em pavimentos rodoviários**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010, 161 p.

SOUZA JÚNIOR, J. Q. *et al.* Comportamento e caracterização do rejeito de Manganês da Serra do Navio/AP em substituição dos agregados no concreto. **Cerâmica Industrial**, 25(spe), 2020.

TAFAREL, N. F. *et al.* Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água. **Revista Matéria**, v.21, n.4, pp. 974– 986, 2016.