

ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DO RESÍDUO ESCÓRIA DE CHUMBO PARA FABRICAÇÃO DE BLOCOS PARA PAVIMENTO INTERTRAVADO

Leticia Akari Inoue Rafaeli¹
Jhulis Marina Carelli²
Maiara Foiato³

Resumo

O desenvolvimento de métodos para reaproveitamento de resíduos é alvo de estudo, pois estes melhoram a qualidade ambiental, uma vez que transformam resíduos em subproduto para novos processos fabris. O resíduo escória de chumbo, proveniente da reciclagem de baterias usadas e da extração e refino do chumbo secundário, atualmente tem sido armazenado e descartado em aterros devido à falta de tecnologias alternativas para sua reciclagem. Tecnologias limpas a custo competitivo têm feito que empresas revejam suas políticas priorizando essas soluções. Neste estudo foi realizada a confecção de peças de concreto para pavimentação que constituem o pavimento intertravado, onde foi utilizado cimento Portland V-ARI, buscando o melhor traço de concreto com substituição do agregado miúdo pelo resíduo escória de chumbo em três teores, 10%, 20% e 30%. Realizou-se traços com inserção de aditivo e sem aditivo, foram realizados ensaios no estado fresco e no estado endurecido para avaliação de todos os traços. No estado fresco foram realizados o ensaio de abatimento de tronco de cone para obter os resultados do *slump* de cada traço e ensaio de massa específica para posterior avaliação do custo-benefício dos traços. Já no estado endurecido foram realizados ensaio de resistência à compressão, absorção de água, avaliação dimensional e inspeção visual. Os resultados permitiram avaliar que a mistura do traço com aditivo e 10% do resíduo escória de chumbo atingiu resistência característica à compressão de 28,1 MPa. Segundo a normativa que regulamenta as peças de concreto para pavimentação, as peças destinadas ao tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha devem atender a resistência característica à compressão ≥ 35 MPa, sendo que os lotes com idade inferior a 28 dias devem apresentar no mínimo 80% do F_{pk} , sendo então de 28 MPa. Quanto aos parâmetros de absorção de água, avaliação dimensional e inspeção visual o traço E10-CA apresentou resultados positivos, indicando o potencial uso da escória na fabricação de blocos de concreto para pavimento intertravado. Ainda, quanto a avaliação do custo-benefício da incorporação do resíduo escória de chumbo, apresentou economia em relação ao traço referência. Conclui-se que as empresas de reciclagem de chumbo secundário devem continuar os

¹ Engenheira Civil, *campus* de Joaçaba, e-mail: leticia.rafaeli@unoesc.edu.br.

² Professora Mestre, Universidade do Oeste de Santa Catarina, e-mail: jhulis.carelli@unoesc.edu.br.

³ Professora Mestre, Universidade do Oeste de Santa Catarina, e-mail: maiara.foiato@unoesc.edu.br.

estudos em relação ao uso do resíduo escória de chumbo na fabricação de blocos de concreto para pavimentação, dando ênfase a estudos de lixiviação das peças, visto que a o resíduo contém concentrações de chumbo, para então poderem contar com uma tecnologia viável para reciclagem do resíduo com menor custo e segurança ambiental. Palavras-chave: Resíduo escória de chumbo; Pavimento intertravado; Concreto.

1 INTRODUÇÃO

O pavimento intertravado possui vários pontos positivos, como bom desempenho, versatilidade e economia quando comparado a outras pavimentações, por isso cada vez garante mais seu espaço na construção civil. Além disso, assuntos atuais como sustentabilidade e preocupação com o meio ambiente, proporcionaram um destaque para este tipo de pavimentação, devido à seu uso apresentar obras mais limpas e facilitar a permeabilidade local, permitindo a drenagem das águas pluviais, por essa razão muitas prefeituras têm investido na pavimentação com blocos intertravados. Também vale ressaltar a facilidade de instalação e manutenção, o que torna a relação de custo-benefício ainda mais atrativo (TETRACON, 2017).

Os requisitos exigíveis e métodos de ensaio para a aceitação das peças de concreto para os pavimentos intertravados são prescritos pela NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). As peças de concreto são assentadas sobre uma camada de areia e travados entre si por contenção lateral, e quando há necessidade de manutenção pode ser realizada somente no local específico, sendo de ajustes fáceis e ótimo reaproveitamento. São comercializadas em vários formatos, cores e espessuras que variam de acordo com o uso em que serão destinados. As aplicações variam como em ruas, pátios, calçadas, estacionamentos entre outros locais (TETRACON, 2017).

Na engenharia civil há a preocupação com o gerenciamento e redução do volume de resíduos gerados. Os resíduos apresentam-se como um dos principais problemas nas áreas urbanas, pois sua geração, descarte e disposição inadequados provocam diversos impactos sociais, econômicos e de saúde pública. Em vista disso, salienta-se a importância de as empresas estabelecerem estratégias que possam reduzir o impacto do volume desses resíduos. Com isso, temos o constante avanço no desenvolvimento de novos materiais e o aproveitamento de resíduos de outros setores produtivos como subprodutos de valor agregado na construção civil.

Nesse contexto cita-se o resíduo escória de chumbo, um material pulverulento de coloração terrosa que é proveniente do processo de fundição e refino do chumbo de baterias usadas da empresa Pioneiro Ecometais, situada no oeste de Santa Catarina. Diante disso, o objetivo principal da pesquisa foi avaliar a influência da substituição do agregado miúdo pelo resíduo escória de chumbo no concreto para a confecção de blocos para pavimento intertravado quanto à resistência à compressão, absorção de água, avaliação dimensional e inspeção visual.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PAVIMENTO INTERTRAVADO

Conforme descreve a NBR 15953 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011), o pavimento intertravado é um pavimento flexível com estrutura composta por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por uma camada de revestimento constituída por peças de concreto pré-fabricados. A camada de revestimento é a responsável por receber diretamente a ação de rolamento dos veículos, tráfego de pedestres ou suporte das cargas, composta por blocos de concreto travados entre si, de modo que resistam a deslocamentos individuais, sejam verticais, horizontais, rotação ou giração, em relação às peças próximas.

A estrutura do pavimento constituída após a terraplenagem e recebimento da camada de revestimento com os blocos de concreto, segundo a NBR 15953 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011) é destinada a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos dos veículos; melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança; resistir aos esforços horizontais que atuam nesta estrutura, tornando mais durável a superfície de rolamento.

Ainda para a implantação desse tipo de pavimento, o projeto qual é seguido durante a execução deve estabelecer premissas em função da utilização, condições e características do leito, estimativa de carregamento, definir padrão de assentamento dos blocos de concreto, detalhando o alinhamento da primeira fiada e possíveis interferências.

2.2 PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO

Para a confecção dos blocos pré-moldados utilizam-se materiais como cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, sendo permitido o uso de aditivos e pigmentos. Segundo a NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) pode ser utilizado qualquer tipo e classe do cimento Portland e os agregados podem ser naturais, industriais ou reciclados.

Para Rodrigues (1995) a consolidação dos blocos de concreto depende da produção de peças de boa qualidade e com resistência adequada. Por essa razão, torna-se imperativo que a tecnologia de fabricação de tais elementos garanta todos os requisitos técnicos exigidos.

2.2.1 Requisitos específicos

De cada lote formado pelo conjunto de blocos de concreto com características iguais, devem ser retiradas peças inteiras que representem a amostra para a realização dos ensaios de aceitação, realizados em laboratórios.

2.2.1.1 Inspeção visual

Os blocos devem ser inspecionados visualmente, possibilitando a identificação de peças com defeitos que possam prejudicar o desempenho do pavimento, as peças devem ter aspecto homogêneo, arestas regulares, ângulos retos livres de rebarbas (NBR 9781; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

2.2.1.2 Absorção de água

Segundo a NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), as amostras dos blocos devem apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6 %, não sendo permitido nenhum valor individual maior do que 7 %.

2.2.1.3 Resistência à compressão

A NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) determina que a resistência característica à compressão deve atender à resistência característica à compressão (f_{pk}) mínima, aos 28 dias, de 35 MPa para solicitação de tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha e de 50 MPa para tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados.

Entretanto a NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 11), salienta que:

Os lotes de peças de concreto entregues ao cliente com idade inferior a 28 dias devem apresentar no mínimo 80% do f_{pk} especificado, no momento de sua instalação, sendo que aos 28 dias ou mais de idade de cura, o f_{pk} deve ser igual ou superior ao especificado.

2.3 CONCRETO PARA PEÇAS DE PAVIMENTAÇÃO

Conforme os estudos de Toniolo (2018), entre os materiais apropriados para a confecção dos blocos estão o cimento CPV – ARI, que possibilita um curto período de cura e desforma. Também se emprega o uso de agregados miúdos como areia e agregado graúdo como o pedrisco.

2.3.1 Concreto dormido

As peças pré-moldadas podem ser produzidas de diversas maneiras durante o processo de fabricação. Segundo Fernandes (2016), destacam-se pelo menos três processos bem distintos: processo dormido, processo virado ou batido e o processo prensado. Durante o processo utilizado, o dormido, o concreto permanece dentro do molde de um dia para o outro. Observa-se um menor consumo de cimento em relação aos outros processos de

fabricação. Os pontos fracos são a produtividade, que é muito pequena e a necessidade de uma base bem executada, pois como as peças são muito lisas o intertravamento fica prejudicado.

2.4 RESÍDUO ESCÓRIA DE CHUMBO

O processo de reciclagem de chumbo é de grande importância, visto que no Brasil não possuem reservas efetivas do metal e ele pode ser reciclado seguidas vezes, obtendo-se um metal secundário similar ao primário. As baterias de chumbo-ácido são universalmente usadas como fonte de energia em veículos automotores, sistema contínuo de fornecimento de energia elétrica e produtos eletrônicos de consumo geral. Quando essas baterias chegam ao seu fim de vida útil devem ser coletadas e enviadas para unidades de fundição secundária para a recuperação e reciclagem de seus constituintes. As baterias dos automóveis retornam as empresas por meio de logística reversa (ANDRADE, 2011).

Na reciclagem de baterias chumbo-ácido, durante a etapa de fundição, no momento em que o chumbo é recuperado na sua forma metálica, uma grande quantidade de resíduo sólido é gerada. As impurezas presentes nas matérias-primas, juntamente com outros materiais adicionados para promover as reações necessárias ao referido processo, formam a escória proveniente de fornos de fundição de chumbo. Essa escória é um resíduo de alta alcalinidade, sendo essencialmente constituída de ferro e com concentrações de enxofre, sódio e chumbo. Há outros metais, que estão como impurezas nas matérias-primas, que também podem ser encontrados em menores concentrações. Aproximadamente 15 a 30% em massa de todo material que entra no forno de redução formam a escória (GOMES, 2006).

Ainda conforme Gomes (2006), a geração e disposição final da escória de chumbo está diretamente ligada ao custo econômico e a problemas ambientais, sendo estas as razões principais para que ela fosse abordada no presente trabalho. A minimização da quantidade e da periculosidade da escória gerada, bem como o seu possível reaproveitamento, têm grande importância ambiental e econômica.

Santana (2015) reforça que é na etapa da fundição que as indústrias de produção de chumbo secundário geram altas concentrações de escória. Segundo ele, "o chumbo pode ser reciclado seguidas vezes desde que seja utilizada uma tecnologia apropriada. Em termos mundiais, a reciclagem de chumbo chega a aproximadamente 60%."

A escória utilizada é caracterizada como escória alcalina. Este tipo de escória é conhecido pelo seu potencial de se tornar pó se armazenada em condições adequadas de umidade. Este fator é importante uma vez que a escória ácida precisaria ser moída antes de poder ser utilizada para substituição de agregados no concreto, aumento potencialmente os custos envolvidos na produção dos blocos (TRINDADE, 2020).

2.5 ESTUDO EM BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO

Entre os resultados obtidos no estudo de blocos de concreto realizado por Trindade (2020), a substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo escória de chumbo ao traço de concreto obtiveram resultados positivos no comportamento das misturas, monitoradas a partir dos ensaios de resistência a compressão. Foram executados traços com substituição de 10% e 20%, sendo que ambos os traços obtiveram resultados atingiram valores superiores ao mínimo aos 14 dias. A NBR 6136 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016) estabelece os requisitos para produção e aceitação de blocos vazados de concreto simples, destinados à execução de alvenaria com ou sem função estrutural. Conforme a norma a resistência característica à compressão deve ser superior a 3 MPa, resultado atingido e superado no estudo, visto que os traços com escória tiveram resistência elevada em relação ao traço referência, sendo que o valor atingido chega a ser 54% mais resistente.

As técnicas analíticas foram de fundamental importância na avaliação do desempenho dos materiais avaliados. Por meio da análise química determinou-se a composição das amostras do extrato lixiviado e solubilizado, sendo que ambas, não tiveram interferência na qualificação dos resíduos oriundos da adição da escória. A análise foi realizada em comparação do extrato de referência com os extratos dos blocos com 10% e 20% de escória, na Tabela 1 é possível observar que o resíduo escória de chumbo não causou interferência para o extrato de lixiviação para o parâmetro chumbo na produção nos blocos, atestando a segurança ambiente do projeto e salienta que as empresas de reciclagem de chumbo secundário podem contar com uma tecnologia viável, segura e de baixo custo para dar um destino a escória (TRINDADE, 2020).

Tabela 1 - Resultados do extrato lixiviado e solubilizado

Lixiviação				
Amostra	Parâmetro	Resultado	NBR 10004	Conclusão
Bloco de referência		< 1,00 mg/L	1 mg/L	Adequado
Bloco com 10% de resíduo	chumbo	< 1,00 mg/L	1 mg/L	Adequado
Bloco com 20% de resíduo		< 1,00 mg/L	1 mg/L	Adequado
Solubilidade				
Amostra	Parâmetro	Resultado	NBR 10004	Conclusão
Bloco de referência		< 0,20 mg/L	0,3 mg/L	Adequado
Bloco com 10% de resíduo	Ferro total	< 0,20 mg/L	0,3 mg/L	Adequado
Bloco com 20% de resíduo		< 0,20 mg/L	0,3 mg/L	Adequado
Bloco de referência		13,8 mg/L	200 mg/L	Adequado
Bloco com 10% de resíduo	Sódio	56,2 mg/L	200 mg/L	Adequado
Bloco com 20% de resíduo		174 mg/L	200 mg/L	Adequado

Fonte: adaptado Trindade (2020).

A NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004) estabelece os critérios de classificação e os códigos para a identificação dos resíduos de acordo com suas características. Ainda, a normativa define os limites máximos no extrato obtido no ensaio de lixiviação e solubilização.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais empregados para a confecção das peças e a metodologia seguida durante a execução dos ensaios para a obtenção dos resultados. Para a realização dos ensaios utilizou-se o Laboratório de Materiais da Universidade do Oeste de Santa Catarina – Unoesc, localizado em Joaçaba – SC.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1 Cimento Portland, agregados graúdo e miúdo

Para este estudo o aglomerante utilizado foi o CP V – ARI, da marca Supremo, e de acordo com o fabricante a massa específica para o lote utilizado era de 3,12 g/cm³.

O agregado graúdo utilizado foi o pedrisco, cujos os ensaios relacionados foram realizados seguindo as prescrições normativas baseadas na: distribuição granulométrica (NBR NM 248; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003) e a determinação do teor de material pulverulento (NBR NM 46; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

O agregado miúdo utilizado foi a areia média, também seco em estufa e armazenado em tonéis no laboratório, cujos os ensaios relacionados foram realizados seguindo as prescrições normativas baseadas na: distribuição granulométrica (NBR NM 248; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003) e a determinação do teor de material pulverulento (NBR NM 46; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

3.1.2 Resíduo escória de chumbo

O resíduo escória de chumbo, fornecido pela empresa Pioneiro Ecometais, foi a mesma utilizada por Trindade (2020), coletada diretamente do aterro da empresa (Fotografia 1 – a). Inicialmente, a escória ficou armazenada em baldes com tampa no Laboratório de Materiais da Universidade do Oeste de Santa Catarina – UNOESC (Fotografia 1 – b). Para utilizá-lo durante o estudo, levou-se o material para a estufa com temperatura de 110 ± 5 °C, mantendo esta condição por 24 h.

Fotografia 1 - Resíduo no aterro (a); Armazenamento após a coleta (b)



Fonte: os autores.

A escória utilizada neste estudo é classificada como Classe II – não inerte, informação baseada no estudo de Trindade (2020), conforme a NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), norma responsável pela caracterização de resíduos de sólidos. Pertencem a essa classe resíduos que não apresentam periculosidade, portanto podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Para os ensaios relacionados ao resíduo, foram seguidas as prescrições normativas para a verificação da distribuição granulométrica (NBR NM 248; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), da massa específica (NBR 16605; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017) e determinação do teor de material pulverulento (NBR NM 46; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

3.1.3 Aditivo

Na segunda etapa de confecção dos blocos de concreto para pavimento intertravado, foram realizados traços com aditivo *FortFlow*, segundo o fabricante o peso específico deste líquido é de $1,10 \pm 0,02$ g/cm³. Trata-se de um aditivo superplastificante a base de polímeros modificados com acelerador de pega inicial, a função de repulsão eletrostática sobre os grãos de cimento possibilita a fabricação de concretos com baixo consumo de água, fácil adensamento e alta resistência inicial, obtendo ganhos significativos das resistências mecânicas iniciais e finais.

3.2 DOSAGENS DE REFERÊNCIA

Para o traço referencial a ser utilizado foi escolhido conforme os estudos realizados anteriormente por Toniello (2018). O traço referência é composto de 1:2,18:2,82 (cimento CPV-ARI, areia e pedrisco). A partir deste traço, foram utilizadas as substituições de agregado miúdo por escória de chumbo, nas porcentagens de 10%, 20% e 30%. A relação água-cimento foi definida a partir do *slump* definido de 12 ± 2 cm.

3.3 CONCRETO COM RESÍDUO

Durante a execução dos traços foi realizado sem adição de aditivos e os traços com aditivo, o resíduo escória de chumbo foi dosado em massa nos teores de 10%, 20% e 30% pela substituição do agregado miúdo nos traços de referência. A Tabela 2 apresenta cada traço executado e sua respectiva nomenclatura. Nos traços com aditivo foi utilizada a quantidade de 1% sobre a massa de cimento.

Tabela 2 - Identificação de cada traço

Nome do traço	Nomenclatura
Traço de referência sem aditivo	REF-SA
Traço de referência com 10% de resíduo e sem aditivo	E10-SA
Traço de referência com 20% de resíduo e sem aditivo	E20-SA
Traço de referência com 30% de resíduo e sem aditivo	E30-SA
Traço de referência com aditivo	REF-CA
Traço de referência com 10% de resíduo e com aditivo	E10-CA
Traço de referência com 20% de resíduo e com aditivo	E20-CA
Traço de referência com 30% de resíduo e com aditivo	E30-CA

Fonte: os autores.

3.4 ENSAIOS NO CONCRETO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

Após a confecção dos traços com o concreto no estado fresco avaliou-se a consistência da mistura através do ensaio de abatimento de tronco de cone conforme descreve os procedimentos normativos da NBR NM 67 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998) e para a determinação da massa específica do concreto foi utilizada a NBR 9833 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009) como referência, com o objetivo de se ter conhecimento dos consumos dos materiais constituintes da mistura, para em seguida calcular o custo dos traços.

Para a moldagem das peças, utilizou-se formas plásticas de dimensões 10x20x6cm, utilizando óleo lubrificante como desmoldante. Durante a moldagem foram realizadas duas camadas de concreto sendo vibradas sobre uma mesa vibratória por 20s cada.

Após a moldagem, as formas foram cobertas com plástico e somente após 24h foram desformadas e mantidas a cura ambiente até o dia anterior ao dia do rompimento, pois em consonância com a NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) as peças foram saturadas em tanque com água por no mínimo 24 horas antes do ensaio de resistência à compressão.

Em relação aos ensaios executados no concreto, no estado endurecido, foram separadas 6 peças para realizar o ensaio de resistência à compressão e 3 peças para o ensaio de absorção de água conforme descreve a NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). Os dois ensaios foram realizados aos 10 dias de idade. Em acordo ao que descreve a NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), antecedente a realização do ensaio de resistência à compressão, realizou-se o capeamento da superfície de carregamento de todas as peças de concreto submetidas ao ensaio com argamassa de traço 1:2:0,5:0,01 (cimento Portland II, areia fina, água e aditivo plastificante). O capeamento foi feito sobre uma borracha nivelada, revestida com óleo lubrificante como desmoldante para facilitar posterior retirada das peças, utilizado duas régua como referência para nivelar toda a camada de concreto com a mesma espessura.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

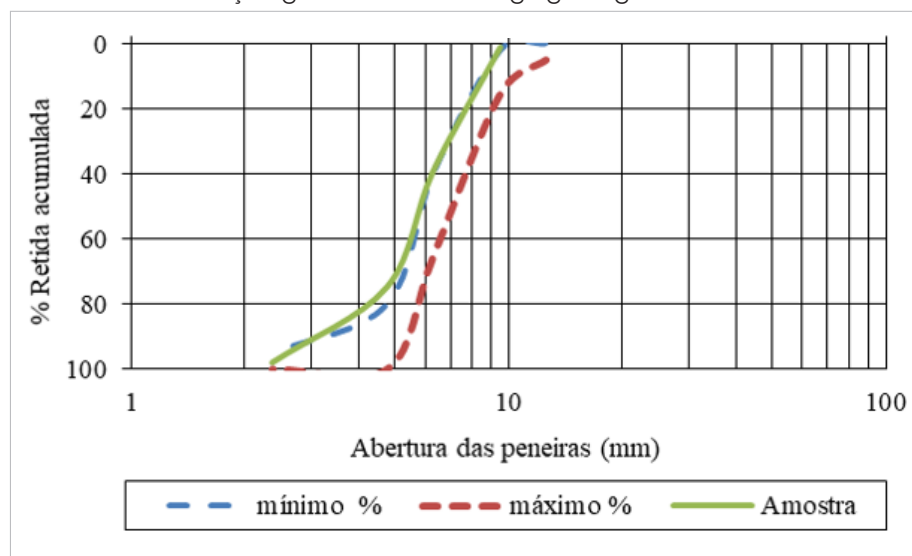
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Quanto aos agregados utilizados neste estudo, foram realizados ensaios especificados por normas para a caracterização dos mesmos, sendo disposto abaixo os resultados destes ensaios.

4.1.1 Agregado graúdo

A classificação do agregado graúdo foi determinada através da comparação da composição granulométrica obtida embasado na NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009) e as faixas granulométricas especificadas pela NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), como pode-se observar no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo



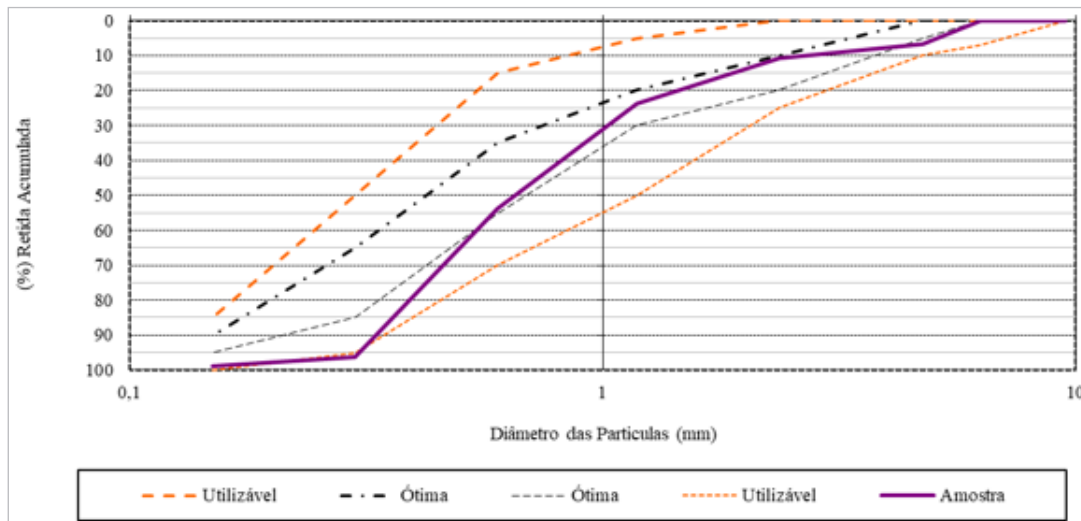
Fonte: os autores.

Pode-se observar a partir do Gráfico 1 que o agregado apresenta valores próximos à zona granulométrica 4,75/12,5, podendo ser classificado como pedrisco. Ainda, no ensaio de granulometria foi possível determinar que o agregado graúdo apresenta dimensão máxima característica de 9,5 mm e módulo de finura de 3,11.

4.1.2 Agregado miúdo (areia natural)

A curva granulométrica está apresentada no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo



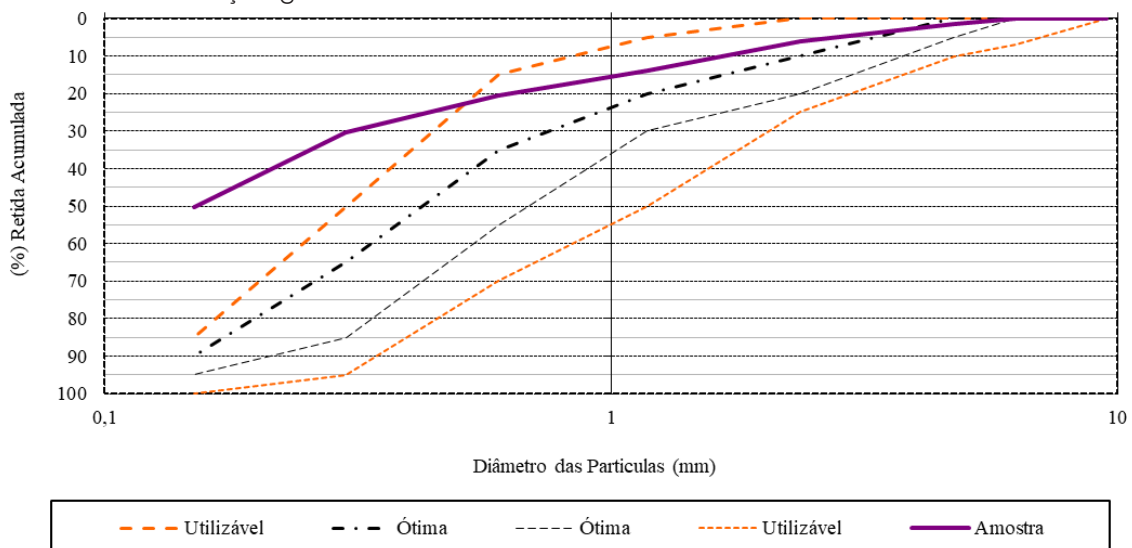
Fonte: os autores.

Constatou-se que a curva granulométrica do material ensaiado ficou dentro da zona utilizável e a ótima. Entre as peneiras 0,6 a 4,75 mm a curva enquadrou-se dentro da zona ótima estabelecida pela NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009) e concluiu que é permissível a utilização desse material como agregado miúdo para a dosagem do concreto. A dimensão máxima característica do agregado foi de 6,3 mm, módulo de finura obtido foi de 2,90 e teor de material pulverulento de 2,37%.

4.1.3 Resíduo escória de chumbo

Para caracterizar o resíduo foram realizados ensaios granulometria, massa específica e teor de material pulverulento. A curva granulométrica está apresentada no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Distribuição granulométrica do resíduo escória de chumbo



Fonte: os autores.

Na distribuição granulométrica do resíduo escória de chumbo foi obtida a dimensão máxima característica e o módulo de finura, sendo eles 4,75 mm e 2,01, respectivamente. O resíduo tem grande quantidade de material fino, como pode-se observar no Gráfico 3 entre as peneiras 0,15 à 0,6 mm a curva enquadrou-se fora da zona utilizável estabelecida pela NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), no entanto, no restante dos peneiras a amostra enquadrou-se dentro da zona utilizável.

Através do resultado de teor de material pulverulento, pode-se caracterizar o resíduo como um material fino, sendo que 44,16% das partículas são menores que 0,075 mm. A massa específica obtida foi de 2,81 g/cm³.

4.2 AVALIAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Conforme já descrito, optou-se por utilizar resultado de *slump test* com limite de 12±2 cm. Através da realização do ensaio de abatimento de tronco de cone obtiveram-se os resultados do *slump* de cada traço, conforme apresenta a Tabela 3.

Tabela 3 - Resultado do abatimento de tronco de cone

Nomenclatura do traço	<i>Slump</i> (cm)
REF-SA	12
E10-SA	14
E20-SA	10
E30-SA	11
REF-CA	10
E10-CA	10
E20-CA	10
E30-CA	10

Fonte: os autores.

Entre os traços sem adição de aditivo houve variação da relação água/cimento de 0,60 a 0,67, sendo que o traço com maior quantidade de resíduo escória de chumbo demandou mais água que os demais, como já esperado, devido ao resíduo ser um material fino. Já para os traços com aditivo superplastificante a relação água/cimento foi de 0,41 a 0,58, sendo, mais uma vez, o traço referência o que demandou menos água que todos os outros traços com resíduo.

Além da consistência, determinou-se também a massa específica do concreto de todos os traços executados com o objetivo de se ter conhecimento dos consumos dos materiais constituintes da mistura, os resultados estão presentes na Tabela 4.

Tabela 4 - Massa específica do concreto

Nomenclatura do traço	Resultado (kg/m ³)
REF-CA	2455,47
E10-CA	2455,47
E20-CA	2449,05
E30-CA	2426,57

Fonte: os autores.

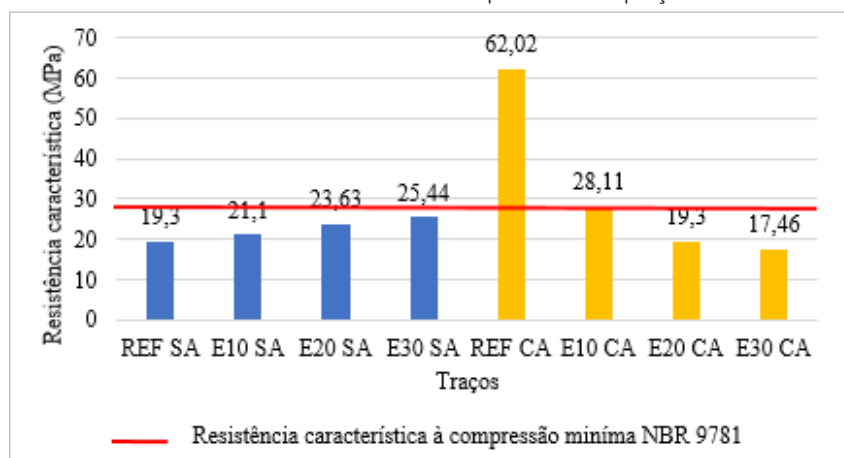
Através dos resultados apresentados na Tabela 4 pode-se observar que o traço E10-CA obteve o mesmo resultado apresentado no traço referência, no entanto, os demais traços com maior quantidade de substituição do agregado miúdo pelo resíduo escória de chumbo resultaram em valores menores de massa específica em relação ao traço de referência. Os valores menores de massa específica nos traços com resíduo escória de chumbo se devem a redução no consumo da areia, cuja massa por volume ocupado é maior que a do resíduo utilizado.

4.3 AVALIAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 Resistência à compressão

Devido à utilização do cimento CPV – ARI nos traços de concreto, que tem a característica de atingir altas resistências já nos primeiros dias de idade, as peças de concreto foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão após 10 dias de idade. Os resultados do ensaio de resistência à compressão de todos os traços estão apresentados no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Resistência característica à compressão das peças aos 10 dias



Fonte: os autores.

Segundo a NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) as peças de concreto com idades inferiores a 28 dias devem apresentar no mínimo 80% do valor da resistência característica mínima de 35 MPa, ou seja, 28 MPa. Através do Gráfico 4, pode-se visualizar que todos os traços sem aditivo não alcançaram o mínimo estipulado pela normativa, porém observou-se o ganho de resistência com o aumento da quantidade de substituição do agregado miúdo pelo resíduo escória de chumbo à mistura, obteve-se aumento de 9,3%, 22,3% e 31,6%, respectivamente para os traços E10-SA, E20-SA e E30-SA, comparados com o valor do traço referência.

Para os traços com aditivo, pode-se visualizar que apenas o referência e o traço com 10% do resíduo escória de chumbo apresentaram valores de resistência característica superior a mínima de 28 MPa. Além disso, verifica-se que todos os demais traços com a inserção de aditivo

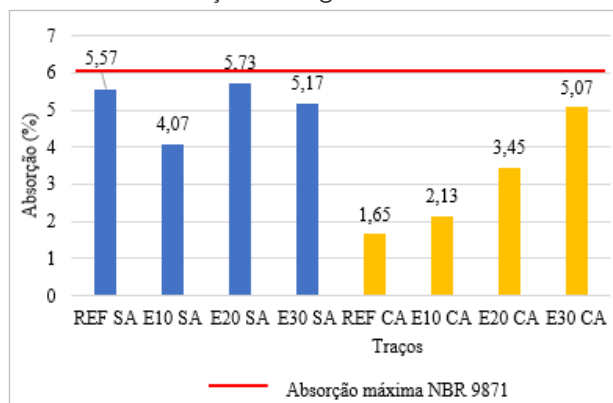
e resíduo escória de chumbo apresentaram valores de resistência à compressão inferiores em relação ao resultado do traço de referência. Conforme cita Andrade (2021) quando se utiliza aditivo em concreto podem ocorrer problemas de incompatibilidade com determinados lotes e/ou entregas dos materiais. Estes problemas de incompatibilidade dependem das interações que ocorrem entre aditivo e materiais que compõem o concreto, com destaque para cimento, adições e agregado miúdo. Conseqüentemente, podem ocorrer problemas, um deles o retardo no desenvolvimento de resistência mecânica.

Devido ao resultado da resistência à compressão do traço referência com aditivo (REF-CA) ter um aumento de 221% em relação ao referência sem aditivo (REF-SA), nota-se que houve incompatibilidade na interação do resíduo escória de chumbo com o aditivo *FortFlow*, portanto prejudicou a interação da mistura. Quanto ao ganho de resistência do traço REF-CA comparado com o traço REF-SA, deve-se ao uso do aditivo superplastificante, que diminui o consumo de água e ajuda no ganho de resistência mecânica inicial e final. Quanto à relação água/cimento, o traço com aditivo utilizou aproximadamente 37% de volume de água a menos que o traço sem aditivo.

4.3.2 Absorção de água

Os resultados da absorção média de água das peças de concreto estão apresentados no Gráfico 5 e o limite estabelecido pela NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) de valor médio menor ou igual a 6 %, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7 %.

Gráfico 5 - Absorção de água média



Fonte: os autores.

É possível observar no Gráfico 5 que todos os traços apresentaram valores de absorção média de água inferior a 6% e nenhum valor individual ultrapassou o limite estabelecido pela NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

Os traços sem aditivo obtiveram valores alternados entre si, sendo a maior variação entre os resultados de 29%. Fato este que deve-se a relação água/cimento ter sido alterada para cada traço, o traço E10-SA demandou maior quantidade de água e obteve resultado de *slump*

de 14 cm, sendo o que apresentou maior trabalhabilidade, ocasionando uma hidratação mais uniforme dos materiais. Já os traços com aditivo obtiveram resultados crescentes de absorção de água, conforme utilizado maior quantidade do resíduo escória de chumbo. Este fato pode ter ocorrido devido ao aumento da adição de finos no concreto.

4.3.3 Inspeção visual

As peças de todos os traços apresentaram bom acabamento visual, aspecto homogêneo, arestas regulares e ângulos retos, com poucos desvios. Não apresentaram rebarbas, defeitos, delaminação e descamação, conforme requisitos exigidos pela NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) as peças devem ser obrigatoriamente analisadas visualmente para verificação de possíveis defeitos que prejudiquem o assentamento, o desempenho estrutural ou a estética do pavimento.

No traço E30-CA observou-se a formação de sais na superfície das peças, conforme Fotografia 2, fato este que pode ser explicado pelas reações químicas, podem ser resultantes de interações químicas entre agentes agressivos presentes no meio ambiente externo e os constituintes da mistura do concreto ou podem resultar das reações internas. Segundo Lapa (2008), uma das manifestações da deterioração do concreto por reações químicas é a formação de sais solúveis. Os traços com menor teor do resíduo escória de chumbo não apresentaram nenhuma formação de sais na superfície. Essa hipótese é corroborada com os resultados de Trindade (2020), que em seu estudo de lixiviação e solubilidade para o parâmetro sódio observou-se um aumento linear nos resultados de sua concentração no extrato dos blocos com 10% e 20% de escória, sendo eles 56,2 mg/L e 174 mg/L, respectivamente. O que pode ser explicado pelo fato de ser empregado barrilha (carbonato de sódio) em processos que possuem escória alcalina. Com o teor de 30% de escória utilizado neste estudo a concentração deve ter ultrapassado o limite máximo no extrato de 200 mg/L de sódio fornecidos na NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

Fotografia 2 - Traço E30-CA



Fonte: os autores.

Os traços com a inserção da escória apresentaram coloração para a tonalidade do marrom quanto mais resíduo possuíam, conforme Fotografias 3 – a e 3 – b. No entanto, as colorações mais comuns de blocos para pavimento intertravado são: natural, grafite, marrom, vermelho e amarelo.

Passuelo (2004) cita que os concretos cromáticos podem ser produzidos de três formas: pintando sua superfície após endurecido, incorporando pigmentos dentro da mistura ou adicionando ao traço agregados graúdos e miúdos e cimentos com cores especiais. Com a utilização da escória a coloração marrom foi obtida sem a necessidade da utilização de pigmentos.

Fotografia 3 - Amostras na sombra (a); Amostras no sol (b)



Fonte: os autores.

4.3.4 Avaliação do custo-benefício

Foi calculada a massa específica de cada traço com adição do aditivo superplastificante, cujo valor foi utilizado para fazer o cálculo de consumo de materiais e por consequência o custo. Na Tabela 5 encontram-se os valores de cada material utilizado no estudo, obtidos em lojas de materiais de construção e o valor do cimento foi obtido através de uma fábrica de pré-moldados.

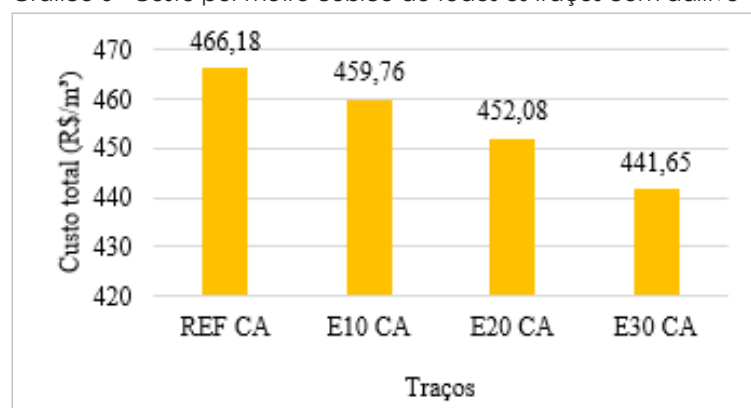
Tabela 5 - Custo por quilograma dos materiais

Material	R\$/kg
Cimento Portland V-ARI	0,80
Areia fina	0,072
Pedrisco	0,033
Aditivo	9,09

Fonte: os autores.

O resultado do custo de cada traço com aditivo encontra-se no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Custo por metro cúbico de todos os traços com aditivo



Fonte: os autores.

Desta forma, pode-se observar que o traço referência foi o que apresentou maior custo, de R\$ 466,18 por m³, visto que a escória substitui o agregado miúdo, reduzindo este valor. Comparando os resultados dos dois traços que estão dentro dos parâmetros exigidos pela NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), o traço referência (REF-CA) e o traço com 10% do resíduo escória de chumbo (E10-CA), o traço com o resíduo apresentou uma economia de 2%.

5 CONCLUSÃO

Através deste estudo foi possível avaliar a influência da substituição do agregado miúdo pelo resíduo escória de chumbo no desempenho das peças de concreto para pavimentação quanto as propriedades no estado fresco e no estado endurecido, realizando-se diferentes teores de substituição, sendo eles 10%, 20% e 30%. Os traços foram realizados com e sem adição de aditivo superplastificante, sendo sempre realizado o traço referência para que fosse possível a comparação com os demais.

No que tange as avaliações feitas no concreto no estado fresco, os resultados demonstraram uma redução na trabalhabilidade da mistura com a adição do resíduo que ocasionou um aumento da relação água/cimento. Ainda assim, a inserção do resíduo influenciou positivamente o comportamento das misturas cimentícias monitoradas a partir dos ensaios de resistência à compressão, apresentando aumento crescente nos resultados nos traços sem aditivo superplastificante, porém nenhum traço atingiu o mínimo estipulado por norma de 28 MPa, uma vez que o traço referência mostrou-se 31,1% abaixo deste parâmetro.

Quanto aos resultados de resistência característica à compressão das peças com aditivo, o traço com 10% de resíduo escória de chumbo (E10-CA) foi o único que satisfaz a recomendação mínima normativa no valor de 28 MPa, obteve-se o resultado de 28,1 MPa aos 10 dias de idade. Notou-se que os demais traços com a substituição do agregado miúdo por resíduo e com aditivo, obtiveram valores inferiores de resistência característica à compressão quando em relação ao traço referência.

Quanto aos resultados de absorção de água das peças, todos os traços apresentaram valor médio inferior a 6%, não ultrapassando o limite estabelecido na normativa.

Por fim, de modo geral, o traço E10-CA obteve todos os resultados positivos exigidos pela normativa, quanto aos ensaios de resistência característica à compressão, absorção, avaliação dimensional e inspeção visual. Ainda, esta dosagem tem um menor custo, comparado com o traço referência. Resultou-se assim uma alternativa tecnológica para disposição deste tipo de resíduo para o mercado industrial com segurança. O aproveitamento do resíduo escória de chumbo têm grande importância ambiental, traz uma opção sustentável para o destino do material, tornando-o um subproduto de valor agregado na Construção Civil, agora podendo ser empregado em novos processos fabris.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Ana Paula. et al. **Manual de utilização de aditivos químicos para concreto : aditivos para concreto**. São Paulo: Instituto Brasileiro de Impermeabilização. 2 ed. 2021. 47p.
- ANDRADE, Micheli Barbosa de. **Caracterização das escórias provenientes da reciclagem de baterias de chumbo- ácido**. Dissertação (Pós-graduação em Química) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781 – Peças de concreto para pavimentação – Especificações e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833 – Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004 – Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15953 – Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605 – Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46 – Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67 – Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248 – Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- FERNANDES, Idário D. **Blocos e Pavers – Produção e controle de qualidade**. Ribeirão Preto. 7ed. 2016, 200 p.
- GOMES, G. M. F. **Redução do Impacto Ambiental da Escória de Obtenção de Chumbo por Via Secundária**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- LAPA, José Silva. **Patologia, recuperação e reparo nas estruturas de concreto**. 2008. Monografia (Especializado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 56 p.
- PASSUELO, Alexandra. **Análise de parâmetros influentes na cromaticidade e no comportamento mecânico de concretos à base de cimento branco**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 175 p.
- RODRIGUES, Públis Penna Firme. **Fabricação de blocos pré-moldados de concreto para pavimentação – prática recomendada**. 2ª ed. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1995. 21 p. (BT-103)

SANTANA, G. P. **A Reciclagem do Chumbo da Bateria**. São Paulo. 2015. Disponível em: <http://blog.clubedaquimica.com/a-reciclagem-do-chumbo-da-bateria/>. Acesso em: 20 set. 2021.

TETRACON. **A história do paver: o pavimento intertravado pelo mundo**. 2017. Disponível em: <http://www.tetraconind.com.br/blog/historia-do-paver-o-pavimento-intertravado-pelo-mundo/>. Acesso em: 23 out. 2021.

TONIELO, Letícia Cristina. **Estudo para adição de pigmentos inorgânicos em peças de concreto para pavimentação**.

Relatório de Estágio Supervisionado II – Universidade do Oeste de Santa Catarina, Joaçaba, 2018. 107 p.

TRINDADE, Davi Graize. **Fabricação de blocos de concreto com substituição parcial do agregado miúdo por escória de fornos de fundição de chumbo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2020. 59 p.

