

RICARDO ANDRÉ FIOROTTI PEIXOTO
MARIA TERESA GOMES BARBOSA
(Organizadores)

ambiente construído

ciudades resilientes e
sua sustentabilidade

AMBIENTE CONSTRUÍDO

CIDADES RESILIENTES E SUA SUSTENTABILIDADE



UFOP

Universidade Federal
de Ouro Preto

Reitora

Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Hermínio Arias Nalini Jr.



editora **UFOP**

Diretor Executivo

José Rubens Lima Jardimino

Coordenador Editorial

Daniel Ribeiro Pires

Assessor da Editora

Alvimar Ambrósio

Diretoria

Francisco José Daher Jr. (Coordenador de Comunicação Institucional)

Paulo de Tarso Amorim Castro (Presidente do Conselho Editorial)

Marcos Eduardo Carvalho Gonçalves Knupp (Proex)

Sérgio Francisco Aquino (Propp)

Tânia Rossi Garbin (Prograd)

Daniel Ribeiro Pires (Representante TAE)

Conselho Editorial

Prof. Dr. Adriano Medeiros da Rocha

Prof. Dr. Douglas da Silva Tinti

Prof. Dr. Flávio Pinto Valle

Prof. Dr. Paulo de Tarso Amorim Castro

Ricardo André Fiorotti Peixoto
Maria Teresa Gomes Barbosa
(Organizadores)

AMBIENTE CONSTRUÍDO

CIDADES RESILIENTES E SUA SUSTENTABILIDADE

1ª edição

Ouro Preto
2023



© EDUFOP

Coordenação Editorial

Daniel Ribeiro Pires

Capa

Varnei Rodrigues

Diagramação

Propagare Comercial Ltda.

Revisão

Tikinet

Ficha Catalográfica

(Elaborado por: Elton Ferreira de Mattos - CRB6-2824, SISBIN/UFOP)

A492 Ambiente construído : cidades resilientes e sua sustentabilidade / Ricardo André Fiorotti Peixoto, Maria Teresa Gomes Barbosa (Organizadores).
1. ed. – Ouro Preto : Editora UFOP, 2023.
270 p. : il. : color; grafs; tabs.

1. Desenvolvimento sustentável. 2. Sustentabilidade 3. Planejamento urbano. I. Peixoto, Ricardo André Fiorotti. II. Barbosa, Maria Teresa Gomes.

CDU: 711.4

ISBN 978-65-89785-20-0

Todos os direitos reservados à Editora UFOP. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida, arquivada ou transmitida por qualquer meio ou forma sem prévia permissão por escrito da Editora. A originalidade dos conteúdos e o uso de imagens são de responsabilidade dos autores da obra.

Obra aprovada no Edital Geral - 01/2019 e publicada apenas no ano de 2023 em decorrência dos prejuízos operacionais causados pela PANDEMIA DO COVID-19.

EDITORA UFOP

Campus Morro do Cruzeiro

Centro de Comunicação Institucional, 2º andar

Ouro Preto / MG, 35400-000

www.editora.ufop.br / editora@ufop.edu.br

(31) 3559-1463

SUMÁRIO

9 PREFÁCIO

CAPÍTULO 1

13 MANUTENÇÃO E MANUTENIBILIDADE NA NORMA BRASILEIRA DE
DESEMPENHO - NBR 15575

13 Introdução

15 Manutenção das edificações

20 A manutenção e a norma de desempenho

27 Considerações finais

28 Agradecimentos

29 Referências

CAPÍTULO 2

35 CONSIDERAÇÕES SOBRE A SUSTENTABILIDADE DAS ESTRUTURAS
EM CONCRETO ARMADO

35 Introdução

36 Estruturas de concreto armado

49 Propostas de solução

51 Considerações finais

53 Referências

CAPÍTULO 3

57 SUSTENTABILIDADE E GESTÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DA
CONSTRUÇÃO CIVIL

57 Introdução

59 Gerenciamento de resíduos da indústria construção civil

62 Classificação e composição gravimétrica de resíduos da indústria
da construção

64 Resíduos de construção e demolição

69 Resíduos de concreto gerados em centrais dosadoras

73 Considerações finais

74 Referências

CAPÍTULO 4

83 ESCÓRIA DE ACIARIA PARA CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

83 Introdução

86 Caracterização da escória

90 Estabilização de solos

91 Concreto com escória de aciaria

93 Utilização da escória de aciaria na substituição do cimento

95 Elementos pré-moldados produzidos com escória de aciaria

99 Viabilidade técnica e econômica do beneficiamento da escória de aciaria

100 Conclusões gerais

101 Referências

CAPÍTULO 5

111 REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE BARRAGEM DE MINÉRIO DE FERRO EM CONSTRUÇÃO CIVIL E INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA

111 Introdução

114 RBMF como agregado para matrizes cimentícias

121 RBMF na produção de cerâmica vermelha

123 RBMF como pigmento para materiais de construção

127 RBMF na produção de geopolímeros

129 RBMF na infraestrutura rodoviária

131 Considerações finais

133 Referências

CAPÍTULO 6

141 RESILIÊNCIA URBANA E A QUALIDADE DAS ÁGUAS DE ABASTECIMENTO: O DESASTRE DE BRUMADINHO-MG

141 Introdução

142 Minas Gerais e a mineração

148 Materiais e métodos

151 Análise após rompimento da Barragem B1 – Brumadinho-MG

152 Resultados e discussão

155 Análise após rompimento da Barragem B1 – Brumadinho-MG:

160 Considerações finais

161 Referências

CAPÍTULO 7

- 171 SEGURANÇA NO TRÂNSITO: A ZONA DE TRANSIÇÃO ENTRE OS TRECHOS RURAL E URBANO EM RODOVIAS QUE CRUZAM CENTROS URBANOS
- 171 Introdução
- 174 Estudo dos espaços
- 177 Perímetro urbano
- 179 Zona De Transição
- 192 Considerações finais
- 194 Referências

CAPÍTULO 8

- 199 A BICICLETA COMO TRANSPORTE SUSTENTÁVEL E OS DESAFIOS PARA AS SMART CITIES
- 199 Introdução
- 201 Smart cities
- 205 Entraves, questionamentos e o novo conceito de “Smart Sustainable City”
- 207 As novas tendências no uso da bicicleta
- 216 Considerações finais
- 217 Referências

CAPÍTULO 9

- 223 EFICIENCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE
- 223 Introdução
- 224 Desenvolvimento sustentável na iluminação pública
- 228 Percepção e processamento visual humano
- 230 Visão mesópica
- 231 Adaptação da fotometria para a condição mesópica
- 233 Simulações em software
- 237 Considerações finais
- 238 Referencias

CAPÍTULO 10

- 245 DEFINIÇÃO DE TIPOLOGIAS REPRESENTATIVAS PARA A DETERMINAÇÃO DO EFEITO DE MEDIDAS DE REABILITAÇÃO ENERGÉTICA À ESCALA DE BAIRRO
- 245 Introdução
- 248 Abordagem metodológica
- 254 A habitação social em Portugal e o caso de estudo do bairro de Santa Tecla
- 256 Definição de tipologias representativas no bairro de Santa Tecla
- 265 Considerações finais
- 266 Referências

- 269 SOBRE OS ORGANIZADORES

PREFÁCIO

Por onde começar?... essa foi a pergunta que me veio a cabeça logo após tomar conhecimento desta responsabilidade, e... continuo sem resposta pelos últimos dois meses. Fiquei meio embaraçado por não saber ao certo como dissertar, em meio aos textos que reúnem de forma tão diversa a temática; sustentabilidade e cidades.

Busco em algum lugar, inspiração que me sirva, respiro fundo e me lanço nesta tarefa com uma reflexão sobre quão difícil seria reunir opiniões de pesquisadores de formação tão diversa e com a mesma dedicação a um tema onde indivíduos, cidades, meio ambiente e desenvolvimento sustentável me parecem integrar uma equação com um sem número de variáveis que mudam em função do tempo e do espaço.

Os capítulos sugerem importante reflexão sobre assuntos que permeiam a prática da engenharia, a vida cotidiana e todos os aspectos que nos afetam de forma direta ou mesmo indireta, trazendo à tona informações que buscam ser aderentes e que possam ser incorporadas à realidade que atualmente vivemos. E, nem de longe, as ideias colocadas neste volume teriam a pretensão de encerrar o assunto, mesmo contando com tão ilustres colaboradores brasileiros e do “além-mar”, mas sim criar ambiente favorável para que o assunto esteja a disposição e amadureça.

Muito honrado pelo convite recebido, apresento-lhes o livro *Ambiente Construído: Cidades Resilientes e Sustentabilidade*, como material importante para construção de um fértil substrato, capaz de motivar argumentos e discordâncias, tão essenciais a construção de um ambiente sustentável e uma sociedade mais justa.

Ricardo Fiorotti.

CAPÍTULO 1

MANUTENÇÃO E MANUTENIBILIDADE NA NORMA BRASILEIRA DE DESEMPENHO - NBR 15575

Vitor Dias Lopes Nunes; Maria Aparecida Steinherz Hippert¹

Universidade Federal de Juiz de Fora/ Brasil

Introdução

As edificações têm um valor fundamental na sociedade uma vez que são o suporte físico, direto ou indireto, para a realização de todas as atividades produtivas. Além disso, diferente de produtos comuns, elas são construídas para atender seus usuários por muitos anos, devendo sempre apresentar condições adequadas para o uso (NBR 5674 :2012).

É inviável economicamente e inaceitável ambientalmente considerar as edificações como produtos descartáveis, passíveis de substituição quando seu desempenho não é mais adequado (NBR 5674: 2012). Além disso, há uma grande dificuldade em manter as condições adequadas do que foi edificado para atender as exigências dos usuários ao longo dos anos, exigindo serviços de manutenção que garantam o seu desempenho e aumente a sua vida útil.

Maran (2011) afirma que a falta de preocupação com as ações de manutenção resulta, em sua maioria, em um aumento substancial do custo global da edificação. Resende (2004) destaca que a fase de produção de uma edificação afeta diretamente o seu modo de uso, a maneira de realizar a sua manutenção e conseqüentemente, a sua vida útil.

Considerando-se a necessidade se fazer manutenção periódica na edificação a NBR 15575: 2013 define o termo manutenibilidade como o

¹dias.vitor36@gmail.com; aparecida.hippert@ufjf.br

“grau de facilidade de um sistema, elemento ou componente de ser mantido ou recolocado no estado no qual possa executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sobre condições determinadas, procedimentos e meios prescritos.”

Entretanto, os agentes envolvidos no processo construtivo apresentam uma tendência em desconsiderar a interdependência entre as fases compreendidas neste processo, buscando um menor custo inicial de produção, em detrimento do custo global da edificação. Nesse sentido, além da economia, a manutenibilidade deve proporcionar, sobretudo, benefícios para a etapa de uso da edificação, facilitando as ações de manutenção.

A norma brasileira de desempenho, a NBR 15575: 2013 aborda manutenção como uma maneira de garantir a capacidade funcional da edificação, devendo ser realizada ao longo de toda a vida do edifício, de forma a prolongar a sua vida útil, atendendo às necessidades dos usuários e mantendo sua segurança. Estabelece, também, o conceito de desempenho por meio da definição de requisitos (qualitativos), critérios (quantitativos ou premissas) e métodos de avaliação, sempre considerando a mensuração clara do seu cumprimento. A norma tem o foco nos requisitos dos usuários para o edifício habitacional e seus sistemas, quanto ao seu comportamento em uso e não na prescrição de como os sistemas são construídos. Nessa perspectiva, a manutenibilidade de uma edificação deve ser pensada desde a fase de projeto.

Esse capítulo tem por objetivo analisar os estudos que envolvem a manutenção e a manutenibilidade a partir da NBR 15575: 2013. Para isso, partiu-se de uma revisão sistemática da literatura (RSL) e utilizou-se o método bola de neve, a fim de se alcançar os trabalhos relevantes na área.

A RSL foi proposta inicialmente com o objetivo de identificar, classificar e analisar os trabalhos referentes à norma de desempenho de maneira a responder à seguinte questão motivadora: qual o panorama da produção científica referente à norma NBR 15575 desde o seu lançamento?

As bases de dados buscadas foram: Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (i), o Centro de Referência e Informação em Habitação (InfoHab) (ii), o catálogo de teses

e dissertações da CAPES (iii), a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) (iv) e o Google Acadêmico (v).

Inicialmente definiu-se as palavras chaves da busca, optando por utilizar o descritor: “NBR 15575” ou “NBR 15.575”. O recorte temporal utilizado foi entre os anos de 2008 e 2018. Os arquivos deveriam, necessariamente, ter acesso integral ao conteúdo na data da pesquisa, sendo válidos: artigos de anais de eventos, artigos de periódicos, dissertações de mestrado e teses de doutorado.

Durante a primeira etapa do processo, buscou-se nos títulos dos trabalhos a presença do termo de pesquisa ou algum dos requisitos presentes na norma (segurança estrutural, segurança contra o fogo, segurança no uso e na operação, estanqueidade, desempenho térmico, desempenho acústico desempenho lumínico, saúde, higiene e qualidade do ar, funcionalidade e acessibilidade, conforto tátil e antropodinâmico, durabilidade, manutenibilidade, impacto ambiental, e requisitos gerais). Em seguida, avaliou-se o resumo, em busca do termo de referência; de forma que foram selecionados apenas os trabalhos que tratavam da norma de desempenho.

Após a execução dessas etapas, foram obtidos 329 trabalhos, sendo que deste total, 14 foram agrupados devido a sua relação com a manutenibilidade. Esses trabalhos passaram por uma análise qualitativa do seu conteúdo, de forma que, 10 trabalhos foram considerados como relevantes, uma vez que tratam especificamente do requisito de manutenibilidade. Além disso, buscou-se informações complementares através da metodologia bola de neve, utilizando os trabalhos iniciais como sementes. Assim, cada uma das referências utilizadas pelos autores gera novas referências em potencial, que, por conseguinte, gera novas referências.

Manutenção das edificações

Waeywnbweg e Pintelon (2002) discutem a evolução do conceito de manutenção e como ela foi tratada ao longo dos anos e dividiram o histórico em 4 fases:

- Até os anos 1950: a manutenção era realizada apenas após a falha, sendo realizada por mão de obra simples, e era definida como um “mal necessário”.
- 1950 a 1975: início da criação do setor de manutenção, porém de forma isolada, ou seja, “eu quebro, você conserta”. A mecanização tornou o tema um pouco mais técnico, levando à manutenção preventiva.
- 1975 aos anos 2000: a manutenção deixou de ser uma função isolada, para integrar esforços com a produção. A automação complexa permitiu monitoramento e controle dos equipamentos, de modo que a manutenção fosse realizada quando os componentes estivessem com uma vida útil comprometida associada a manutenção preventiva. Percebeu-se que a atividade contribui para a redução dos custos, e contribui para o lucro.
- A partir dos anos 2000: as tecnologias de comunicação e informação aumentaram a integração entre as equipes de manutenção, controle e produção. A manutenção passa a ser associada a um conceito de otimização e, muitas vezes, atribuído a uma empresa terceirizada.

Desta forma, a manutenção evoluiu de acordo com as mudanças do setor produtivo, passando a ser tratada como uma questão técnica e aliada ao processo de produção e, suas ações devem ter como objetivo que o edifício não sofra deterioração precoce, diminuição dos desgastes naturais e desvalorização, afim de se manter competitivo no mercado imobiliário. O Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE (2015) assegura que é de extrema importância que os custos de manutenção sejam previstos no processo de produção de uma edificação, devido ao seu impacto em relação à vida útil.

A maneira pela qual a intervenção nos equipamentos, sistema ou instalação é realizada caracteriza os vários tipos de manutenção. A normatização brasileira, NBR 14037:2011, NBR 5674:2012 e NBR 15575:2013a, decla-

ram que a manutenção de uma edificação deve englobar as manutenções preventivas e as manutenções corretivas, sendo descritas como se segue:

a) *Manutenção corretiva* é a atividade voltada para a correção no sistema que sofreu alguma falha, impacto ou apresenta um desempenho abaixo do esperado. Sua principal função consiste em corrigir ou restaurar. Nesse sentido, a manutenção corretiva é acionada perante duas condições: na ocorrência de falha do sistema ou na detecção de desempenho deficiente, antes de um colapso (KARDEC; NASCIF, 2009).

A manutenção corretiva não planejada caracteriza-se pela ação após um fato já ocorrido, ou seja, atua de forma a corrigir uma falha de um sistema de maneira aleatória, uma vez que sua necessidade partiu de um fato inesperado, sem preparação prévia para a realização do serviço (KARDEC; NASCIF, 2009).

A manutenção corretiva planejada é a ação tomada para corrigir o desempenho abaixo do esperado, ou a correção por uma decisão gerencial. A decisão de correção ocorre através de acompanhamento ou pela operação do mesmo, antes que seja observada qualquer falha. Esse processo leva a menores custos de realização, maior rapidez no processo, maior segurança e maior qualidade, quando comparada com a manutenção corretiva não planejada. Além disso, aumenta a qualidade da informação, devido ao acompanhamento do funcionamento do sistema (MARAN, 2011).

b) *Manutenção preventiva* é a ação realizada de forma a reduzir ou evitar a falha ou queda no desempenho, obedecendo a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos. A manutenção preventiva proporciona um conhecimento prévio das ações a serem tomadas, permitindo o gerenciamento das atividades e recursos, de modo a se tornar mais conveniente e aumentando a simplicidade das tarefas (KARDEC; NASCIF, 2009).

A normatização brasileira recomenda que desde o início do projeto sejam feitas indicações das medidas de inspeção e manutenção de modo a assegurar a vida útil de projeto e garantir a funcionalidade da obra. Segundo Viana (2006) um plano de manutenção preventiva é baseado em um conjunto de atividades, que são regularmente executadas com o objetivo de manter o sistema e seus componentes em seu melhor estado

operacional. A NBR 5674: 2012 recomenda uma programação das atividades de manutenção contendo a periodicidade das ações, responsáveis pela execução, documentos e normas de referência e recursos necessários.

Rocha (2007) declara que nas edificações os trabalhos programados de manutenção preventiva consistem, na maioria dos casos, em inspeções e verificações que, apesar de aparentemente simples, podem evitar altos custos de reforma. E, em outros casos, a realização de serviços de limpeza, utilizando produtos e equipamentos adequados, aumenta seguramente a vida de sistemas e materiais de acabamentos. Além disso, o autor declara que procedimentos regulares e programados de manutenção são essenciais para a conservação e eficácia da destinação da edificação, evitam o surgimento de problemas graves e deteriorações inesperadas, permitindo previsão segura de gastos periódicos.

A falta de um projeto adequado de manutenção, carência de formação técnica, falta de informação e recursos financeiros, faz com que o processo de manutenção do edifício seja dificultado, podendo levar a degradação precoce dos seus sistemas.

Sitter (1984) demonstra que o custo de manutenção é influenciado pelas fases do ciclo de vida do imóvel, e que o custo das intervenções para manutenção aumenta ao longo do ciclo de vida dos edifícios. A Lei de Sitter afirma que os custos de manutenção corretiva são 5 vezes maiores que os custos de manutenção preventiva, sem considerar fatores como desconforto e aborrecimento do usuário durante o processo.

Sanches e Fabrício (2008a) afirmam que a qualidade do projeto é fator determinante nas atividades de manutenção de uma edificação. E, portanto, os projetistas devem ter conhecimento técnico e normativo ao projetar, para que o edifício atinja o conceito de manutenibilidade ao público a que se destina.

Nesse sentido, Sanches e Fabrício (2008b) diferenciam o processo projeto “de manutenção” para um projetar “para manutenção”, sendo o último integrador das ações de concepção do projeto, englobando todas as fases do empreendimento, para que essas informações sejam capazes de fornecer material para se elaborar um projeto de manutenção da

edificação, integrando as características da construção e utilização do edifício. Ainda segundo os autores, as decisões tomadas desde a fase de concepção, desenvolvimento e detalhamento do projeto devem passar por um processo de análise e validação no que se refere a manutenção e a manuntenabilidade para passar para as próximas etapas.

As facilidades e dificuldades de manutenção dos componentes, sistemas e equipamentos do edifício, são analisadas, objetivando uma diminuição das incidências e custo de manutenções. Dessa forma, as ações de manutenção da edificação são validadas na etapa de concepção do projeto – como anteprojeto, projeto legal e projeto executivo e a documentação técnica da obra – gerando uma compreensão e amadurecimento técnico e operacional, aumentando o grau de manutenibilidade e fornecendo diretrizes e subsídios para o projeto de manutenção (SANCHES; FABRÍCIO, 2008a). A questão da integração entre as etapas do ciclo de vida do edifício exige o desenvolvimento de uma interface eficiente entre o projeto, a edificação construída e o programa de manutenção (NBR 14037: 2011).

Embora o conceito de manutenção tenha evoluído, sendo preocupação desde a concepção de projeto, autores como Hippert, Mattos e Cândido (2015) e Silva (2018) declaram que além das medidas tomadas pelo corpo técnico da construção civil torna-se necessário criar uma cultura de manutenção nos usuários. Mesmo os projetos bem executados, acabam sendo entregues para usuários que não estão preparados tecnicamente para receber, utilizar, operar e executar as devidas manutenções para a edificação manter o pleno desempenho, da forma como foi projetado.

Os proprietários, síndicos, gestores prediais e também as autoridades públicas devem estar cientes dos riscos e responsabilidades decorrentes da negligência com as condições técnicas das edificações, e não podem abster-se da obrigatoriedade das inspeções prediais periódicas, visando à boa manutenção e, conseqüentemente a segurança e proteção da população (IBAPE, 2012).

A manutenção e a norma de desempenho

A manutenção é tratada na norma de desempenho a partir do “Manual de uso, operação e manutenção”, instrumento garantidor das condições de projeto pós entrega da edificação. Sendo de responsabilidade das empresas a elaboração do manual contendo as informações de periodicidade e forma de manutenção dos sistemas da edificação. É responsabilidade do usuário seguir as instruções do manual de uso, operação e manutenção e recomendações técnicas das inspeções prediais (NBR 15575: 2013a).

A Manutenção deve ser considerada concomitantemente à durabilidade em função de sua intrínseca relação, retratada a partir do próprio conceito de durabilidade (ZANOTTO *et al.*, 2015). A NBR 15575: 2013a define a durabilidade como a “capacidade do edifício ou de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas, até um estado limite de utilização.” Assim, a durabilidade da edificação depende da existência de serviços de manutenções planejadas ao longo de sua vida útil.

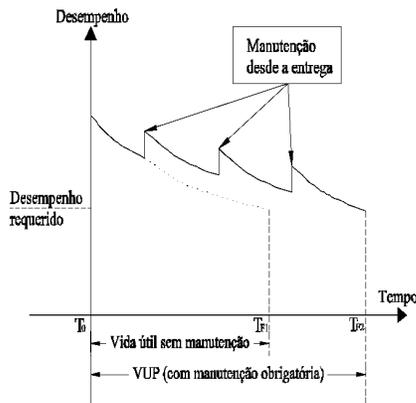
A durabilidade da edificação e de seus sistemas está diretamente associada ao custo global do imóvel, se tornando uma exigência econômica do usuário. A durabilidade de um produto acaba quando ele já não cumpre mais as funções que lhe são atribuídas, seja por obsolescência funcional ou por degradação ao nível insatisfatório de desempenho. Com isso, o período de tempo entre o início da operação e/ou uso do produto, até o fim da sua durabilidade é chamado de vida útil (NBR 15575: 2013a). É necessário manter uma manutenção da edificação para recuperar ou conservar a sua capacidade funcional e de seus sistemas, a fim prolongar ou atingir a vida útil de projeto (VUP) – período de tempo estimado que um sistema é projetado para atender aos requisitos de desempenho estabelecidos na norma.

Esse processo, como pode ser visto na figura 1, demonstra que o desempenho de uma edificação reduz ao longo do tempo, sendo necessária a realização de manutenções periódicas para mantê-la num nível de desempenho acima do requerido, até atingir a vida útil de projeto. No

caso de ausência de manutenção, a edificação irá se desgastar com maior rapidez, tendo sua vida útil reduzida.

Normalmente a solução de menor custo global não é a de menor custo inicial, nem o de maior durabilidade, mas sim uma intermediária que procure estabelecer uma melhor relação custo-benefício. A vida útil de projeto, deve ser resultado de um processo de otimização do custo global da edificação; sendo a manutenção preventiva e a corretiva aspectos fundamentais para atingir a VUP (NBR 15575: 2013a).

Figura 1 – Desempenho da edificação ao longo da sua vida útil.



Fonte: Adaptado de NBR 15575: 2013a.

A NBR 15575: 2013a-f estabelece como critérios de avaliação da manutenabilidade: facilidade ou meios de acesso, considerando que o projeto deve favorecer as condições de acesso para inspeção predial. Com isso, a edificação deve ser planejada levando em consideração a sua manutenção ao longo de toda a sua vida útil, prevendo facilidade de acesso, limpeza e inspeção dos sistemas. A tabela 1 apresenta um resumo da norma que aborda o requisito de manutenabilidade.

Galvão e Ornstein (2010) propõem procedimentos para a elaboração e calibragem de um roteiro a fim de diagnosticar as potencialidades e limitações de edificações antigas nas adaptações às novas exigências normativas e demandas domésticas contemporâneas através de um modelo de

avaliação em forma de *check-list* baseado na NBR 15575: 2013a-f. Assim, a calibragem se mostrou eficaz para melhoria da qualidade do modelo.

Já Sanches e Fabrício (2012) buscando avaliar a manutenção e a manutenibilidade, desenvolveram uma metodologia aplicável a sistemas e produtos construtivos inovadores, através de requisitos e critérios, inclusive os apresentados NBR 15575: 2013a-f. Os autores avaliaram quatro categorias: durabilidade, adequação ao uso, qualidade na operação, uso e manutenção e flexibilidade, de modo a analisar todas as interfaces relacionadas ao produto inovador que possam interferir na manutenibilidade e no desempenho da unidade habitacional como um todo. Os autores reafirmam a importância da utilização de produtos inovadores com objetivo de aumentar a manutenibilidade das edificações, sendo, também, necessária a realização da análise da facilidade das ações de manutenção durante o processo de desenvolvimento dos produtos, quando estes ainda podem sofrer alterações e ajustes.

Zanotto *et al.* (2015) propõem diretrizes para atendimento ao requisito de manutenibilidade no processo de projeto e realizam um estudo de caso em uma edificação. Observaram uma falta de gestão da manutenção e que cerca de 15% das falhas no condomínio, causadas por mal-uso, poderiam ser evitadas a partir da elaboração e consulta adequada aos Manuais de Uso e Ocupação. Os autores ainda criticam a norma de desempenho ao afirmar que ela trata apenas da facilidade de acesso e à necessidade de prover informações aos usuários, porém não avalia a qualidade desta informação. Por fim, na tabela 2 sintetiza as necessidades para o atendimento ao requisito de manutenibilidade em cada fase do projeto.

Tabela 1– Critérios e métodos de avaliação do requisito de manutenibilidade.

Parte da norma	Critério	Método de avaliação
Requisitos gerais (ABNT, 2013a)	Favorecer o acesso através da instalação de suportes para fixação de andaimes, balancins ou outro meio que possibilite a realização da manutenção.	Análise de projeto: o projeto deve ser concebido para favorecer as inspeções prediais e a manutenção. A incorporadora/ construtora deve fornecer manual do usuário de acordo com a ABNT NBR 14037. A gestão da manutenção deve atender a NBR5674
Sistema estrutural (ABNT, 2013b)	O Manual de operação, uso e manutenção deve conter recomendações gerais de prevenções de falhas e acidentes, periodicidade de inspeções e manutenção e metodologia de manutenção.	Verificação do manual de operação, uso e manutenção das edificações ao atendimento às diretrizes das ABNT: NBR 5674, NBR15575-1 e NBR 14037.
Sistema de pisos (ABNT, 2013c)	Não há critérios de manutenção ou manutenibilidade.	
SVVIE (ABNT, 2013d)	As manutenções devem ser realizadas em obediência ao manual de operação, uso e manutenção.	Análise do manual de operação, uso e manutenção das edificações, verificando o atendimento a NBR 5674 e a NBR 14037.
Sistema de cobertura (ABNT, 2013e)	As manutenções devem ser realizadas em obediência ao manual de operação, uso e manutenção.	Análise do manual de operação, uso e manutenção do sistema de cobertura, que deve atender à ABNT NBR 5674.
Sistema hidrossanitário (ABNT, 2013f)	Devem ser previstos dispositivos de inspeção em tubulações de esgoto e águas pluviais segundo a NBR 8160 e NBR 10844.	Verificação do projeto ou inspeção em protótipo.
	Especificar as condições de uso, operação e manutenção, incluindo o “como construído” no manual uso, operação e manutenção.	Análise do manual de uso, operação e manutenção.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15575:2013a, b, c, d, e, f.

Tabela 2 – Atendimento ao critério de manutenibilidade
ao longo do processo de projeto.

Planejamento do empreendimento	Análise dos riscos e condições ambientais de exposição que possam impactar a durabilidade e a manutenibilidade dos sistemas, materiais e componentes da edificação.
Estudo preliminar	Análise do projeto a fim de verificar espaços e acessos visando facilidade de manutenção. Especificação da vida útil de projeto para materiais, sistemas e componentes conforme NBR15575.
Anteprojeto	Análise de custos ao longo da vida útil na especificação de materiais, componentes, sistemas e equipamentos da edificação.
Projeto legal	(Não identificado)
Projeto executivo	Especificação de materiais considerando a sua durabilidade dentro das condições de exposição, bem como as suas características de manutenção. Especificação e escolha de equipamentos com menores custos de manutenção.
Acompanhamento de obra	Elaboração de projetos <i>as built</i> . Elaboração Manual de uso, operação e manutenção. Acompanhamento da execução visando garantir a correta aplicação dos materiais e execução dos serviços obedecendo às especificações de projeto e boas práticas de execução.
Acompanhamento em uso	Elaboração de Programa de Manutenção Preventiva (PMP) e realização de inspeções prediais periódicas.

Fonte: Zanotto *et al.* (2015).

Avaliando o conteúdo dos manuais e as solicitações de manutenção de uma edificação em um estudo de caso, Hippert, Mattos e Cândido (2015) observaram falta de informações no manual do usuário, o que aumenta e dificulta o processo de manutenção, apesar de ter ocorrido uma melhora na qualidade e quantidade de informações neste tipo de documento. Os autores destacam a falta de um programa de manutenção, com informações referentes às manutenções necessárias, com seus respectivos períodos e de uma metodologia de manutenção dos sistemas da edificação, como é exigido pela norma. Portanto, eles recomendam a seguinte estrutura do manual de uso, operação e manutenção para o atendimento à norma:

- a) Apresentação (índice, introdução, definições);
- b) Garantias e assistência técnica, memorial descritivo, fornecedores (relação de fornecedores, relação de projetistas, serviços de utilidade pública);
- c) Operação, uso e limpeza (sistemas hidrossanitários, sistemas eletroeletrônicos);
- d) SPDA, sistemas de incêndio, fundações e estruturas, vedações, revestimentos internos e externos, pisos, coberturas, jardins, paisagismo e áreas de lazer, esquadrias e vidros;
- e) Manutenção (programa de manutenção preventiva, registros de manutenção, inspeções de manutenção);
- f) Informações complementares (meio ambiente e sustentabilidade, segurança, operação dos equipamentos e suas ligações, documentação técnica legal, elaboração e entrega do manual, atualização do manual).

Objetivando avaliar os impactos da manutenção para habitações de interesse social, Silva (2018) realizou um estudo de caso em um condomínio na cidade de São Paulo, com 324 unidades habitacionais. O autor observou que as solicitações de manutenção se concentram no sistema de telefonia, hidráulico e elétrico. Além disso, a maioria das solicitações poderiam ter sido evitadas com a utilização correta do manual do usuário, já que 45% consistem em mau uso – como perfurações de elementos para colocação de moveis, obstrução de eletrodutos ou rompimento de cabos em uso – e outros 30% dos problemas foram derivados de falta de manutenção. Além disso, observou uma falta de cultura de manutenção, em que quando há necessidade os serviços são realizados pelos próprios moradores que não consideram viável economicamente a realização da manutenção preventiva.

Considerando a manutenção de fachadas Santos Filho, Sposto e Melo (2014) fizeram um estudo de caso, objetivando elaborar e apresentar uma

ferramenta em forma de *check-list* para auxílio no projeto em função da manutenibilidade, tendo em vista os aspectos da norma de desempenho. Os autores observaram que as dificuldades operacionais são as que mais influenciam na manutenção da edificação, sendo que fissuração e deslocamento/ deslocamento de peças foram as patologias mais encontradas. Além disso, apenas 25% das edificações estudadas realizaram algum tipo de manutenção nos 5 anteriores ao estudo. Assim, a partir dos resultados os autores elaboraram um *check-list* para auxílio no projeto de manutenibilidade de fachadas, que pode ser usado por projetistas no processo de projeto, e pelas construtoras/incorporadoras para verificação e controle de qualidade. Também considerando a manutenção de fachadas, Santos Filho, Sposto e Caldas (2015) propuseram diretrizes para a realização de projetos de ancoragem na edificação de modo a facilitar as manutenções. Após a realização do projeto em uma edificação, obteve-se 99,7% da fachada acessível por balancins, facilitando a operação de manutenção.

Santos Junior (2016) estabelece uma metodologia para planejamento das operações de manutenção de fachadas, tendo por base as rotinas de inspeção, visando atender aos critérios de desempenho e vida útil das edificações. O autor estabelece uma rotina para a proposição das diferentes atividades necessárias ao planejamento de um plano de manutenção de fachadas, evidenciando a caracterização, vistoria e inspeção, de modo a atender os critérios de desempenho, durabilidade e vida útil do sistema. E por fim, comprova a eficiência da ferramenta através de um estudo de caso em um edifício residencial em Brasília.

Buscando garantir manutenção preventiva nas vedações verticais externas do sistema plataforma em madeira, Pizzoni (2017) sistematizou as medidas de manutenção, resultando na explicitação das ações a serem tomadas, com as suas respectivas responsabilidades para cada requisito de desempenho. Além disso, o autor observou que a norma brasileira de desempenho não contempla requisitos importantes relacionados ao uso, como o comportamento humano e o desempenho ao longo do tempo.

Ao propor diretrizes para a elaboração de um programa de manutenção, elencando os dados de entrada necessários, as ferramentas, técnicas

e tecnologias disponíveis, recomenda-se a utilização de BIM (Building Information Model) destacando ser necessário elaborar um programa de manutenção com as informações necessárias da edificação, tais como: manuais, projetos, memoriais descritivos, planilhas, fotos e considerar, ainda, a possibilidade de utilização de tecnologias de escaneamento de edificações. Considerando o volume de informação, os dados devem organizados de maneira criteriosa.

Observa-se, portanto, que os estudos referentes à manutenibilidade buscavam maneiras e possibilidades de melhor avaliá-la. Outros trabalhos propõem soluções para garantir o atendimento do requisito da norma desde a fase de projeto, com abordagens metodologias e ferramentas, sugeridas a fim de garantir a manutenibilidade e otimizar as ações de manutenção da edificação, gerando informações úteis para todos os agentes envolvidos no processo. Além de recomendações na abordagem do manual do usuário e criação do plano de manutenção.

Um tópico citado por vários autores é a fato do requisito da NBR 15575:2013 não abordar todos os aspectos envolvidos no processo de manutenção e manutenibilidade da edificação. A falta de cultura de manutenção por parte dos usuários, por exemplo, ainda é um desafio, uma vez que a manutenção preventiva ainda é vista como algo dispendioso e com poucas vantagens. E essa falta de cultura leva a muitas falhas possivelmente evitáveis na edificação através de consulta do manual de uso, operação e manutenção, contendo as informações, como recomendada pelas normas.

Considerações finais

Quanto à metodologia, a RSL se mostrou eficaz para delimitação de um tema, levando de um contexto global para resultados mais específicos. A sequência de processos bem definida e estruturada diminui a subjetividade das revisões tradicionais. O método bola de neve, apesar de ser um

método não probabilístico, trouxe outros trabalhos relevantes na área, uma vez que é observada uma repetição de referências com maior impacto.

A manutenção é um processo inevitável na indústria da construção civil, principalmente quando se considera a longa vida útil das edificações. Assim, deve ser um processo pensado desde a fase de concepção do edifício, incorporando o conceito de manutenibilidade, de forma a facilitar as atividades de manutenção. Quando associado ao tema desempenho, tem crescido de importância no Brasil, após a publicação da NBR 15575 – Norma de desempenho.

Apesar de serem temas de extrema importância, a manutenção e manutenibilidade ainda não são discutidos o suficiente, quando relacionados à norma de desempenho. A norma trata manutenção relacionando diretamente com durabilidade e vida útil, e recomenda que seja pensado nos projetos desde a sua concepção. Incluindo a entrega de um manual de uso, operação e manutenção para garantir as informações necessárias para a criação de um plano de manutenção e as ações de manutenção sejam executadas corretamente.

Os trabalhos que discutem o requisito de manutenibilidade, em geral, buscam verificar o seu atendimento através de estudos de casos, e a definição de ferramentas e metodologia para melhorar ações de manutenção. Além disso, é observado a manutenção de maneira adequada para garantir o desempenho da edificação e aumentar a sua vida útil, de forma que ainda é preciso efetivar a manutenibilidade como uma exigência de projeto.

Agradecimentos

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - pelo apoio a esta pesquisa.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5674: Manutenção de edificações: requisitos para o sistema de gestão da manutenção. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14037: Diretrizes para a elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações: requisitos para a elaboração e apresentação dos conteúdos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações habitacionais: desempenho. Parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações habitacionais: desempenho. Parte 2: requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações habitacionais: desempenho. Parte 3: requisitos para os sistemas de pisos. Rio de Janeiro: ABNT, 2013c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações habitacionais: desempenho. Parte 4: sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações habitacionais: desempenho. Parte 5: requisitos para sistemas de coberturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações habitacionais: desempenho. Parte 6: sistemas hidrossanitários. Rio de Janeiro: ABNT, 2013f.

GALVÃO, W. J. F.; ORNSTEIN, S. W. Roteiro para análise do potencial de recuperação de edifícios de apartamentos antigos: procedimentos para desenvolvimento e calibragem. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 13, 2010, Canela. *Anais [...]*. Porto Alegre: AN-TAC, 2010.

HIPPERT, M. A. S.; MATTOS JR, V. H. C.; CÂNDIDO, L. R. Qualidade e desempenho: a contribuição do manual do usuário. In: Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção - Inovação e Sustentabilidade 9, Encontro Latinoamericano de Gestão e Economia da Construção 6, 2015, São Carlos. *Anais [...]*. Porto Alegre: ANTAC, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS DE ENGENHARIA - IBAPE. Inspeção predial: guia da boa manutenção. 3 ed. São Paulo: IBAPE, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS DE ENGENHARIA. Inspeção Predial: a saúde dos edifícios. São Paulo: IBAPE, 2015.

KARDEC, A.; NASCIFI, J. Manutenção: função estratégica. 3 ed. São Paulo: Qualitymark, 2009.

MARAN, M. *Manutenção baseada em condição aplicada a um sistema de ar condicionado como requisito para sustentabilidade de edifício de escritórios*. 2011. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil* – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

PIZZONI, C. P. *Vedações verticais externas do sistema plataforma em madeira: medidas para manutenção*. 2017. *Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo* - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

RESENDE, M. M. *Manutenção preventiva de revestimentos de fachada de edifícios: limpeza de revestimentos cerâmicos*. 2004. *Dissertação de Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana* – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

ROCHA, H. F. Importância da manutenção predial preventiva. *Holos*, v. 2, n. 23, p. 72–77, 2007.

SANCHES, I. D. A.; FABRICIO, M. M. Projeto para manutenção. In: *Workshop Brasileiro: Gestão do Processo de Projetos na Construção de Edifícios*, 8, 2008. São Paulo. *Anais [...]* São Paulo: POLI-USP, 2008 a.

SANCHES, I. D. A.; FABRÍCIO, M. M. A importância do projeto na manutenção de HIS. In: *Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção*, 6, João Pessoa, 2008. *Anais [...]*, Porto Alegre: ANTAC, 2008 b.

SANCHES, I. D.; FABRICIO, M. M. Desenvolvimento de critérios para avaliação da manutenção e homologação de sistemas construtivos inovadores. In: *Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, 14, 2012, Juiz de Fora. *Anais [...]*. Porto Alegre: ANTAC, 2012.

SANTOS FILHO, V. M.; SPOSTO, M. R.; MELO, J. S. Ferramenta para projetos de vedações verticais externas com base nas exigências da norma de desempenho. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, Goiânia, v. 8, n. 3, p. 51-62, 2014.

SANTOS FILHO, V. M.; SPOSTO, R. M.; CALDAS, L. R. Proposta de diretrizes normativas para projetos de fachada à luz da manutenibilidade. In:

Congresso Internacional de Recuperação, Manutenção e Restauração de Edifícios, 4, 2015, Rio de Janeiro. *Anais [...]*. Rio de Janeiro: UFRJ, 2015.

SANTOS JÚNIOR, W. B. dos. *Desempenho, durabilidade, degradação e vida útil: aspectos técnicos no desenvolvimento do plano de manutenção de fachadas*. 2016. *Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil* – Universidade de Brasília. Brasília, Distrito Federal, 2016.

SILVA, L. F. de A. *O impacto da manutenção no ciclo de vida da habitação de interesse social: o estudo de caso do conjunto habitacional Heliópolis I*. 2018. *Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo* - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2018.

SITTER, W.R. Costs for service life optimization. The “Law of Fives”. In: CEB-RILEM Durability of Concrete Structures. Copenhagen, 18-20 May 1983. *Proceedings [...]*, Copenhagen: CEB, 1984.

VIANA, H. R. G. PCM – Planejamento e Controle de Manutenção. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2006.

WAEYENBERGH, G; PINTELON, L. A Framework for maintenance concept Development. *International Journal Production Economics*, v. 77, p. 299-313, 2002.

ZANOTTO, G.; LANTELME, E.; COSTELLA, M.; LAVAL, L. G. Atendimento ao requisito manutenibilidade da NBR 15575:2013 em um empreendimento habitacional. In: Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção - Inovação e Sustentabilidade, 9, 2015, São Carlos. *Anais [...]*. Porto Alegre: ANTAC, 2015.

CAPÍTULO 2

CONSIDERAÇÕES SOBRE A SUSTENTABILIDADE DAS ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO

Ana Kyzzy Fachetti , Robson Luiz Gaiofatto²
Universidade Católica de Petrópolis/ Brasil

Introdução

De forma geral, o século XX nos trouxe uma nova forma de estruturar nossas construções, com o advento e confiança obtidos com a ampliação e generalização do uso de estruturas sustentadas pelo material concreto armado. Desde o final do século XIX, diversos edifícios, pontes e outros componentes do ambiente construído passaram a ser sustentados por esta “nova” tecnologia, que foi sendo definida e conhecida ao longo dos anos 1900 e continua, no desenrolar do século XXI, avançando em conhecimento e desenvolvimento, embora, até hoje, longe de ter seu comportamento, propriedades e possibilidades suficientemente conhecidos.

Inicialmente, o concreto armado foi visto por seus utilizadores como sendo um material de longa durabilidade, por muitos, inclusive, como “eterno”. Entretanto, ao longo dos anos, na medida que o conhecimento sobre o comportamento do material foi avançando e, portanto, as estruturas foram sendo mais arrojadas e mais econômicas, foi sendo observado e constatado que o concreto armado poderia apresentar muitos problemas de deterioração e conseqüentemente de comprometimento da segurança, resultando também no comprometimento de durabilidade.

Durante bastante tempo, as estruturas de concreto armado, que apresentavam problemas, mesmo após pouco tempo de uso, eram simplesmente

² ana.fachetti@ucp.br; robson.gaiofatto@ucp.br

demolidas e reconstruídas integralmente. Estas operações resultam em grande quantidade de entulhos, na maioria dos casos, de longo período de deterioração e conseqüente poluição ambiental intensa.

Do ponto de vista da sustentabilidade, estas operações são sempre muito negativas. Entretanto, pior do que isto é a necessidade de se consumir novos insumos, considerando, de forma especial, que todos os componentes do concreto armado ocasionam consumo de materiais que de alguma forma agredem o ambiente em que vivemos. Desta forma, o processo de demolição e reconstrução pode ser considerada uma solução absolutamente inadequada para os problemas inerentes à durabilidade do concreto armado.

O crescimento da quantidade de estruturas que apresentavam problemas de deterioração precoce foi se tornando muito intenso, ocasionando o desenvolvimento de estudos. Em um primeiro momento, estes estudos foram voltados para se conhecer e se entender os mecanismos de deterioração e como evitá-los; e como solucioná-los em uma segunda fase.

Estruturas de concreto armado

Os estudos sobre o comportamento do material concreto armado, ainda em desenvolvimento nos dias atuais e, ao que se pode inferir, com desenvolvimento infinito, envolvem um conjunto de frentes que se interligam, de forma que o conhecimento de uma das questões envolvidas pouco ou nada representa no conjunto, ou seja, é necessário que se tenha um conhecimento geral, incluindo mudança no modo de ver e compreender o material, por parte dos profissionais envolvidos - desde os projetistas de estruturas, os tecnólogos, os engenheiros de execução e aqueles responsáveis pela manutenção das estruturas em utilização -, que precisam abrir os olhos para as novas descobertas, novas tecnologias e se desvincular de vez de crenças do passado.

O domínio do conhecimento do material concreto, tem se mostrado ser uma das etapas mais difíceis e complexas, quanto mais se avança no

conhecimento do material, mais complexo este se torna, uma vez que o concreto envolve uma microestrutura especialmente difícil de ser entendida. Até o momento, não é possível um entendimento claro do material e, portanto, suficiente quanto ao seu comportamento. A própria evolução de seus componentes, como o cimento, agregados e adições, torna o conhecimento do concreto um problema de elevadas proporções, como por exemplo, do ponto de vista ambiental, as areias naturais tendem a ser eliminadas na confecção dos concretos, com fortes tendências a ser substituída pelas areias industriais, resultantes da produção dos agregados graúdos (britas), fato que altera o comportamento e conseqüentemente o entendimento e conhecimento do comportamento do material resultante, ou seja, do concreto.

Além do concreto e suas complexidades, a combinação deste com o aço, seja o aço na condição passiva – concreto armado – ou ativa – concreto protendido, também envolve questões em constante aprendizado, uma vez que o próprio desconhecimento do comportamento exato do concreto afeta o domínio sobre o entendimento quanto à aderência entre os materiais, fundamental em vários modelos de dimensionamento. A única alternativa que não depende do fator aderência é a protensão, onde o cabo de aço não se adere ao concreto, pois passa através das mono cordalhas engraxadas posicionadas no interior de tubos de Poliestireno de Alta Densidade (PEAD). Entretanto, também esta solução ainda envolve incertezas na definição dos modelos utilizados no dimensionamento das estruturas. De forma geral, o concreto protendido, isto é, sob tensões prévias, tem resultado num melhor e mais adequado comportamento das estruturas.

A partir do conhecimento dos materiais, que embora ainda esteja longe de ser suficientemente dominado, ocorreram grandes evoluções nos últimos 50 ou 60 anos, permitindo um melhor entendimento dos processos que resultam no inadequado comportamento do concreto estrutural, em especial quando exposto aos ambientes com alguma ou muita agressividade. Desta forma, é possível afirmar que a porosidade inerente ao concreto, associada à exposição a agentes externos, como a

água e o próprio ar, são as principais causas de deterioração do concreto. Aparentemente causas naturais, mas que devem ser evitadas através de procedimentos criteriosos de produção do concreto, escolha dos componentes e mesmo da implantação de sistemas de revestimento que protegem o concreto dos agentes externos. Contudo, muitas estruturas apresentam dificuldade de serem protegidos e/ou estão expostas a ambientes de elevada agressividade, onde revestimentos muitas vezes se tornam insuficientes na tarefa de bloquear os poros do concreto, ou mesmo, de proteger a sua superfície do contato com materiais de maior agressividade.

Todos os estudos e conhecimentos adquiridos ao longo dos últimos anos, aparentemente deveriam já ser suficiente para a produção de concretos de elevada durabilidade à exposição ambiental durante o seu período de vida útil, porém, na maioria dos casos, mesmo com todos os cuidados, resultantes da aplicação de toda a tecnologia disponível, ainda é possível observar o surgimento de problemas variados que comprometem a durabilidade das estruturas, muitas vezes em tempo incompatível com o custo e importância das estruturas implementadas.

Existem ainda outros fatores, também pouco conhecidos, que acabam comprometendo a durabilidade das estruturas de concreto armado, como a chamada fluência tardia, um importante fator, quase que integralmente desprezado nos projetos estruturais. Este fenômeno resulta em deformações similares às da fluência, porém, ocorrendo em idades avançadas, superiores aos 20 anos, quando elementos estruturais ficam expostos a ciclos alternados de molhagem e secagem. Na prática, a fluência tardia ocasiona o surgimento de deformações significativas, mas de quantificação totalmente desconhecida, o que impede o seu eventual controle. Além da importância da efetiva proteção dos elementos estruturais, o único fator que pode minimizar este fenômeno é um controle mais intenso do nível de tensões a que um elemento estrutural fica exposto. As versões mais atuais das normas para projetos de estruturas de concreto têm dado sinais de uma preocupação maior nesta direção, seja pela limitação da altura da linha neutra nos elementos submetidos a esforços de flexão, ou pela

adoção de coeficientes adicionais no dimensionamento de elementos em balanço, portanto, também submetidos a flexão.

A observação, acompanhada da análise de muitas destas estruturas que apresentam problemas precocemente, mostra que a causa também está associada ao comportamento destas, ou seja, não depende predominantemente dos materiais, como a maioria dos estudos desenvolvidos até os dias atuais nos leva a acreditar. A complexidade do comportamento das estruturas é muito elevada, exigindo maior consciência das dificuldades que constituem o seu estudo, que é ainda mais complexo associado ao conhecimento do comportamento do material concreto, quando submetido a níveis mais elevados de tensões.

O desenvolvimento do conhecimento do concreto vem permitindo, de forma contínua ao longo do tempo, a obtenção de resistências cada vez mais elevadas. Até pouco mais de 30 anos concretos de elevada qualidade atingiam 30 MPa, hoje, com facilidade se projeta concretos da ordem dos 100 MPa, sendo conhecida e bem dominada a técnica que nos permite obter concretos acima dos 250 MPa. Este fato tem permitido que os modelos de projetos estruturais considerem a ocorrência de tensões mais elevadas, entretanto, este avanço deve ser considerado com muito cuidado pelos projetistas, uma vez que fortes dúvidas ainda existem quanto ao comportamento destes concretos “mais evoluídos”, quando submetidos a estas tensões por longos intervalos de tempo.

Em relação ao sistema, ao longo do tempo, os engenheiros também têm tentado obter conclusões quanto ao comportamento das estruturas. Tradicionalmente a engenharia procura definir modelos, ou seja, simplificações quanto ao comportamento estrutural que nos permitam desenvolver projetos com um mínimo de velocidade e segurança. A reunião destes conhecimentos, comprovados pela observação de adequado comportamento das estruturas, resulta na elaboração das normas ou regulamentos técnicos. Estes regulamentos são focados na segurança, na economia e mais recentemente (em especial após a publicação do código modelo de 1990 pela atual FIB – Federação Internacional do Concreto) na durabilidade. Estas regulamentações procuram envolver a maior quantidade possível

de estruturas, entretanto, o simples atendimento a estes regulamentos não é suficiente para a garantia de adequado comportamento estrutural. Esta afirmação se sustenta pela observação da quantidade de estruturas projetadas, e mesmo construídas, em conformidade com os regulamentos e que apresentam problemas de deterioração muito mais rápido do que o previsto.

A escolha do modelo mais adequado pelo projetista estrutural é fundamental para o bom comportamento da estrutura às ações a que estará exposta durante sua vida útil. Esta escolha, no entanto, é bastante complexa e exige muito entendimento por parte do projetista estrutural de quais e quantas serão as solicitações a que determinada estrutura deverá apresentar para o seu adequado comportamento.

As “patologias” (termo utilizado na engenharia civil para descrever os problemas de comportamento da estrutura ou dos materiais, semelhante a “doenças” das estruturas) resultam de associações entre materiais inadequados, no seu mau uso e comportamento estrutural não previsto de forma suficiente ou correta, ou seja, na escolha de modelos incompletos para cada caso.

Considerando-se que a parte dos materiais apresenta boa bibliografia, que permite o entendimento das situações de mau comportamento do concreto, em especial quanto à escolha dos componentes, na proporção do uso de cada um deles, na forma da mistura, no lançamento, adensamento e sobretudo na cura dos concretos, geralmente, não nos aprofundaremos neste texto. Outro fator fundamental para o mau comportamento das estruturas de concreto armado está relacionada à forma de execução, onde as armações (o aço) são posicionados de forma inadequada em relação àquela prevista nos projetos, sendo os problemas mais comuns aqueles relacionados à falta de cobrimento correto ou ao afundamento das armaduras que deveriam estar posicionadas na parte superior dos elementos – especialmente nas lajes – e que por falhas executivas acabam mudando de posição durante as operações de concretagem.

Como mencionado, a escolha inadequada do modelo a ser utilizado para descrever a estrutura se constitui em uma causa importante dos pro-

blemas, que tendem a acontecer com as estruturas. Independentemente das questões de segurança, que de forma imediata não chegam a ser afetadas, um modelo incompleto ou inadequado compromete o adequado comportamento da estrutura.

Mesmo atendendo os estados limites preconizados nas metodologias de projeto, a estrutura pode não funcionar da forma esperada, permitindo que as agressões ao material concreto se intensifiquem através de fissuras, mesmo as de pequena abertura, bem como, pela alteração de parâmetros geométricos considerados nos modelos de projeto, como área e momentos de inércia, que ao serem alterados, alteram também, de forma significativa, o comportamento estrutural, desta forma, permitindo a ocorrência de conhecidos processos de deterioração, não minimizados em projeto, devido a conclusões inadequadas dos modelos adotados de forma incorreta.

Tradicionalmente, a engenharia civil adota modelos estáticos, desprezando as cargas cíclicas, cada vez mais importantes nas estruturas. A importância de se considerar as cargas cíclicas, atualmente, se dá por conta do desenvolvimento de estruturas cada vez mais esbeltas, conseqüentemente mais deformáveis, possibilitado pelo surgimento de concretos de maior resistência e a modelos de cálculo cada vez mais arrojados, resultante da evolução dos métodos computacionais (e do uso descuidado dos computadores na elaboração dos projetos estruturais). Estes fatos resultam, de forma especial, em projetos menos detalhados, que buscam, principalmente, a redução das dimensões dos elementos de concreto e a menor taxa de armação. Estes fatores permitem projetos aparentemente mais eficientes, naturalmente, adequados às solicitações previstas, mas que, na maioria dos casos, esta previsão deixa de considerar situações que provocam solicitações acima daquelas consideradas. Desta forma, as estruturas apresentam danos rapidamente, e ainda, danos que muitas vezes são de entendimento complexo, por serem resultantes de situações não previstas em projeto e, portanto, estranhas à compreensão do projetista estrutural.

Efeitos dinâmicos dos ventos, previstos para as obras mais comuns nas normas técnicas, ou através de estudos em túnel de vento, para as

obras mais esbeltas ou de maior importância, ajudam bastante na elaboração do projeto estrutural. Geralmente, são estes métodos os mais comumente considerados, embora em muitos casos, de forma simplista e inadequada à realidade das obras, em função dos locais de implantação e da forma das estruturas.

Outros fatores que ocasionam cargas dinâmicas, entretanto, são desconsiderados de forma habitual, em especial pela não percepção da importância do fenômeno, pelo desconhecimento de sua existência ou mesmo pelo desconhecimento sobre como lidar com o problema no modelo estrutural adotado. Sismos, efeitos do movimento das máquinas e mesmo esforços causados pelo tráfego de veículos na vizinhança das construções são habitualmente desconsiderados em projetos estruturais. Recalques diferenciais das fundações constituem outro importante problema habitualmente desprezado na maioria dos projetos estruturais. Efeitos de deformações ao longo do tempo, comuns aos concretos, como aqueles resultantes de retração e fluência, provocam habitualmente mau comportamento das estruturas. Detalhamento inadequado de armaduras nos projetos, cada dia mais comuns nas construções, constituem outra das mais importantes causas de comportamento estrutural inadequado.

Inclusive, erros de projeto, ocasionados especialmente pelo uso inadequado de programas comerciais, para elaboração de projetos estruturais constituem-se em um dos principais motivos da degradação precoce das estruturas de concreto armado. Os programas, na maioria dos casos, de uso aparentemente simples, são ferramentas adotadas por muito engenheiros, em especial aqueles com menor conhecimento e experiência estrutural, recém formados ou não, que veem no computador e nos programas de cálculo a solução para desenvolver projetos que são comercializados por preços reduzidos, onde desenhos gerados de forma automática são produzidos e entregues nas obras para execução. Ou seja, acreditam que o computador faz, de forma eficiente, aquilo que não sabem fazer: calcular e dimensionar corretamente uma estrutura.

Os projetos resultantes do uso inadequado destes programas, na maioria dos casos, reproduzem modelos também inadequados e in-

completos. Em geral, o “projetista” (nem sempre engenheiro) não tem conhecimento das ferramentas de configuração dos programas, ou não sabe configurá-las corretamente. Cada projeto exige que as ferramentas sejam ajustadas de forma individual, pois cada obra é um caso diferente, tem suas características próprias. Sem que isso ocorra, surgem hipóteses de carga incorretas, muitas vezes desprezando de forma integral o efeito dos ventos e de vários outras importantes solicitações, como a interação entre o solo e a estrutura, ligação entre lajes e vigas e entre vigas e pilares, consideração das fases de efetiva implantação de cargas nos pilares, etc.

Além dos problemas mencionados no parágrafo anterior, deve ser considerado que, por vezes, os programas indicam erros quando algum limite definido pela norma de referência é extrapolado. Entretanto, o fato de elementos não serem apontados como errados, não significa que estejam corretos, exigindo do projetista uma verificação extensa e contínua dos avisos emitidos pelo programa, onde muitas vezes erros graves de dimensionamento e detalhamento ocorrem e caso o operador (projetista) não corrija, o programa continua, entendendo que o aviso foi verificado e aceito pelo responsável.

Finalmente, os programas geram pranchas de elementos armados e detalhados conforme as indicações definidas nas configurações, que, como mencionado, exigem ajuste a cada projeto. A falta deste ajuste, associada à falta de detalhes específicos para situações especiais, na grande maioria dos casos, resulta em detalhamentos inadequados, incompletos e muitas vezes contendo erros grosseiros, com fortes consequências negativas ao comportamento da estrutura executada conforme as indicações destes projetos.

Todos os fatores listados acima, entre outros, constituem importantes causas de danos das estruturas e, portanto, devem ser estudados e definidos de forma que sejam eliminados em construções novas, ou que possam ser solucionados em construções existentes que apresentam consequências de sua ocorrência.

Alguns dos casos mencionados, dependendo do projeto e da forma como ocorrem, resultam em insuficiências tão graves que provocam a

ruína da estrutura durante sua execução ou logo após o início de sua utilização. Em outros casos, as consequências surgem quando características de solos são alteradas após chuvas intensas ou situações de alagamento, ou quando as solicitações se aproximam das improváveis combinações críticas de carregamento, que devem ser consideradas nos projetos, em atendimento às normas e regulamentos relativos à segurança estrutural.

A utilização de modelos adequadamente ajustados, juntamente a um detalhamento elaborado, com atenção aos casos especiais de cada construção, nem sempre passíveis de serem quantificados de forma exata nos modelos computacionais, exige forte sensibilidade do projetista estrutural, característica indispensável à elaboração de um bom e adequado projeto, geralmente associada à combinação entre o conhecimento da realidade de cada projeto, das ferramentas de projeto utilizadas, do material utilizado no projeto e à experiência, adquiridos em um longo período de tempo.

Considerando todas as questões expostas, é fácil entender porque as estruturas estão se deteriorando, aparentemente, de forma cada vez mais acelerada, exigindo uma manutenção mais intensa e conseqüentemente mais onerosa, sob pena de comprometimento dos estados limites de utilização, seguido de rápido comprometimento dos estados limites últimos.

Por meio do acompanhamento diário de diversas obras, associado à efetiva realização de verificação de conformidade de inúmeros projetos, ser percebe uma fatura de problemas que permitem concluir a importância da análise das estruturas executadas, submetidas a processos de deterioração precoce. Embora, as consequências sejam as patologias listadas nas diversas publicações disponíveis, incluindo especialmente as formas de deterioração preconizadas no texto da NBR 6118/14, idêntica à versão anterior de 2003, induzindo a um entendimento simplista de causas básicas, esta análise superficial induz a erros de avaliação e conseqüentemente à implantação de procedimentos insuficientes ou inadequados de tratamento das patologias, ocasionando o retorno dos problemas em tempo muito inferior ao que poderia ser esperado em função dos custos e inconvenientes associados.

Com maior frequência são observadas situações de construções que apresentam problemas de origem de, aparentemente, fácil de identificação. Mas, onde uma análise um pouco mais cuidadosa da estrutura mostra causas e motivações que provavelmente não foram consideradas nos projetos originais. Em muitos casos, de forma especial em obras projetadas antes do advento dos programas computacionais, as causas podem ser associadas à implantação de modelos mais simples e mesmo a critérios normativos mais brandos, que permitiam o concreto ficar submetido a níveis elevados de tensões, que conseqüentemente acabam ocasionando instabilidades no comportamento do concreto, ainda pouco conhecidas, mesmo nos dias atuais. Em obras mais recentes, geralmente simplificações nos modelos computacionais ou seu uso inadequado acabam sendo constatados e constituem as efetivas causas de infiltrações, deformações excessivas, carbonatação avançada ou mesmo surgimento de fissuras resultantes de esforços trativos em pontos inesperados nos elementos estruturais.

Em todas as situações, são comuns a identificação de patologias efetivamente provocadas por recalques diferenciais não considerados, ou esforços dinâmicos resultantes de vibrações inesperadas ou da alteração do uso nas áreas de entorno da estrutura.

O cobrimento das armaduras é considerado nas diversas normas técnicas e na literatura como sendo uma garantia da durabilidade das estruturas, entretanto, a desconsideração de determinados esforços permite a ocorrência de fissuras, que, mesmo com pequenas aberturas, se tornam a porta de entrada dos agentes agressivos, na prática, funcionando como uma redução do cobrimento previsto, em muitos casos chegando mesmo a fissura a comprometer integralmente o cobrimento e conseqüentemente, a vida útil da estrutura.

Os esforços devido a recalques diferenciais, extremamente mais comuns do que considerado pela maioria dos projetistas de estruturas, normalmente resultantes de um estudo superficial do terreno e de um projeto de fundações ruim como conseqüência, que geralmente é calculado mediante os esforços gerados por um projeto estrutural muito

simplificado, através de modelos errados. A experiência acumulada em avaliações de conformidade de projetos permite constatar como grande parte dos projetistas estruturais simplesmente engasta a estrutura na base nos modelos computacionais, gerando esforços que não reproduzem a realidade e induzem projetistas de fundações a soluções de custo elevado e pouca efetividade estrutural.

A não consideração de esforços dinâmicos se constitui em outra grande causa de danos nas estruturas. Nestes casos, em vários pontos da estrutura ocorrem inversões de esforços, ou seja, zonas dimensionadas e detalhadas para esforços de compressão, durante os ciclos de cargas passam a estar submetidas a trações, e como não foram devidamente dimensionadas a este esforço, ocorre o surgimento de estados de fissuração, ou seja, surgem várias portas de penetração de agentes agressivos. Estes casos, em sua maioria, não conseguem sequer ser solucionados por revestimentos, uma vez que, também estes acabam sofrendo fissuras e perdendo efetividade de proteção estrutural.

As más configurações dos programas nos projetos atuais ou modelos muito simplificados e inadequados em projetos de obras de idade mais avançada, como já dito, constituem uma vasta fonte de patologias nas estruturas. Nestes casos, muitas vezes as solicitações acabam por ser subestimadas, o que resulta em tensões superiores aos elementos projetados, conseqüentemente ocorrendo deformações excessivas no aço, com fissuras no concreto tracionado, ou mesmo, fissuras em elementos que sequer estavam adequadamente armados.

Como já mencionado, as normas técnicas têm mostrado uma tendência para desenvolvimento de estudos e publicações mais preocupados com o adequado comportamento estrutural do que com a economia, ou seja, tem sido possível observar a elevação dos cobrimentos das armaduras, como foco na durabilidade, mas também tem sido observada a elevação de vários coeficientes de segurança para elementos cujo dimensionamento resultava em níveis mais elevados de tensões, como tem ocorrido com os pilares, os elementos em balanço, dentre outros.

Esta tendência de uma maior preocupação com o comportamento do concreto a longo prazo se justifica e deve ser incrementada a cada dia, em função de que, com o advento dos concretos mais resistentes, ocorre o aumento dos vãos, inclusive e especialmente, aumento dos balanços, e a redução dos elementos de sustentação, os pilares, e conseqüentemente uma maior vulnerabilidade das estruturas aos efeitos dinâmicos, com alternância de carregamentos ou mesmo com variações substanciais dos níveis de tensões atuantes, resultando em um maior risco de fadiga, fenômeno pouco conhecido nos concretos de maior resistência, com utilização mais recente.

Outro parâmetro pouco conhecido do material concreto que merece aqui uma atenção especial é o módulo de deformação longitudinal, ou módulo de elasticidade. A cada dia, este parâmetro adquire maior importância nos projetos, uma vez que projetos mais arrojados são sempre mais suscetíveis a deformações e estas estão intimamente ligadas ao módulo de elasticidade. Este número, quando multiplicado pelo momento de inércia, determina a rigidez flexional dos elementos estruturais e, portanto, o conhecimento mais preciso deste parâmetro se torna indispensável.

Do ponto de vista da prática, muito pouco se observa quanto à determinação do módulo de deformação longitudinal dos concretos. As próprias normas permitem que, em não havendo ensaios, sejam adotados valores resultantes de equações em função da resistência à compressão dos concretos. Entretanto, estas equações são empíricas e muito simplificadas, uma vez que o parâmetro depende de inúmeras variáveis, muitas vezes sequer consideradas, como por exemplo, questões térmicas, estado de tensões, composição dos concretos e materiais utilizados na dosagem. Desta forma, sabe-se que este número é estimado e o comportamento da estrutura acaba sendo dependente de uma melhor estimativa de valor. Num país com grandes dimensões como o Brasil, hoje apenas o tipo do agregado graúdo é considerado, com coeficientes que afetam o módulo entre 20 e 30% (a partir da norma NBR 6118: 2014), coeficientes claramente muito elevados para serem desprezados por tanto tempo.

A adoção de valores incorretos para o módulo de elasticidade gera consequências severas às estruturas, seja para valores superiores ou inferiores. Valores elevados resultarão na ocorrência de deformações acima das esperadas, o que compromete os estados limites de utilização, seja por deformações excessivas, mas sobretudo, pela ocorrência de elevados estados de fissuração, que comprometerão de forma efetiva a durabilidade das estruturas. Quando subestimado, o módulo ocasionará elementos de elevada rigidez que poderão sofrer fissuras quando submetidos às deformações resultantes das solicitações da utilização da estrutura, da mesma forma, comprometendo a durabilidade da estrutura.

Assim sendo, uma determinação mais cuidadosa do módulo de deformação longitudinal dos concretos deveria fazer parte do controle de qualidade do concreto. Entretanto, esta recomendação sequer é mencionada pelas principais normas internacionais, incluindo no Brasil a NBR 12655: 2015. Um maior cuidado com os valores efetivos do módulo de deformação longitudinal dos concretos poderia minorar significativamente as patologias das estruturas de concreto armado, sendo esta propriedade tratada como de importância secundária no comportamento da estrutura de concreto armado.

Entre os parâmetros que afetam a sustentabilidade das estruturas de concreto armado, ainda devem ser consideradas as formas e escoramentos, em muitos casos ainda de madeira. Estes elementos podem ter seu consumo bastante minimizado, reduzindo os danos ambientais pela escolha de soluções mais adequadas, pela aplicação de técnicas atuais e pelo estudo cuidadoso na definição das soluções a serem empregadas em cada projeto estrutural. A escolha de elementos pré-fabricados, por exemplo, onde geralmente as formas são metálicas, permitindo um substancial número de usos, bem como, soluções em concreto protendido onde é possível a redução de volumes de concreto e conseqüentemente de formas e escoramentos, são soluções que podem representar uma maior sustentabilidade neste tipo de estrutura que se renova a cada dia, permitindo continuamente o aparecimento de novas soluções, cada vez

mais eficientes, mas que, por outro lado exigem desenvolvimento e aprimoramento continuado dos engenheiros que as utilizam.

Propostas de solução

Como foram relatados nos itens anteriores, é possível observar que existe uma quantidade muito grande de fatores que afetam e, na maioria das vezes, comprometem a durabilidade das estruturas de concreto armado e, em consequência, acabam por comprometer a sustentabilidade destas estruturas, pelo consumo excessivo de materiais de reparo e mesmo pela exigência de demolição e reconstrução de muitas estruturas.

Entretanto, cuidados podem e devem ser tomados visando evitar estes processos degenerativos das estruturas e consequente comprometimento de sua integridade e segurança. Estes cuidados estão associados a um adequado desenvolvimento de projeto estrutural, que deve conter uma especificação adequada dos materiais e uma avaliação segura e consistente dos esforços a que a estrutura será submetida durante sua vida útil, de forma que o seu comportamento, associado ao comportamento dos materiais utilizados resultem em atendimento às necessidades relacionadas com as finalidades para as quais a obra está sendo projetada, ou seja, de modo que a estrutura tenha um bom desempenho.

Ainda no campo do projeto estrutural, o detalhamento das armaduras deve envolver muito cuidado, atendendo às indicações do dimensionamento resultante do modelo analisado, bem como, deve conter detalhes específicos de cada situação, onde o sentimento quanto ao comportamento do concreto armado deve ser considerado, bem como, quando o detalhamento deve transpassar o dimensionamento e atender critérios subjetivos, impossíveis de serem normatizados, mas que representa o conhecimento e a experiência do projetista. Estes parâmetros incluem a escolha da bitola das barras de aço, a posição escolhida para cada uma delas, envolvendo espaçamento e distribuição das barras dentro da zona do elemento que efetivamente combaterá as tensões indicadas pelos mo-

delos de dimensionamento, incluindo aquelas situações onde os modelos não apresentam adequada capacidade de representar. Este sentimento, ou melhor, conhecimento da real distribuição das tensões no interior, permite a elaboração de um detalhamento consistente para cada situação, permitindo um comportamento muito mais efetivo dos elementos constituintes de cada estrutura.

Continuando no campo dos projetos estruturais, o real entendimento dos esforços, sejam eles estáticos, mas sobretudo dinâmicos, constituem uma etapa de fundamental importância no comportamento da estrutura ao longo de sua vida útil, melhorando seu desempenho e reduzindo de forma substancial as tarefas e custos relativos à manutenção. A percepção pelo projetista da existência, em maior ou menor escala, de cargas dinâmica e a sua forma de as representar nos modelos estáticos podem fazer uma grande diferença no comportamento das estruturas ao longo de sua vida, permitindo que através da redução de danos, a durabilidade da estrutura seja ampliada. Uma estrutura com adequado funcionamento permite uma elevação em seu nível de sustentabilidade, aumentando em muito, sua vida útil.

Finalmente, a correta configurações dos projetos, definindo de forma adequada os parâmetros do modelo de dimensionamento constitui a principal forma de economia de um projeto, inicialmente pela efetiva redução de custo ao mínimo adequado, seguido pela redução de custos de manutenção e sobretudo, pelo forte aumento da vida útil da estrutura projetada.

Além dos projetos, a forma de construção tem representado um ponto de grande vulnerabilidade quanto à sustentabilidade das estruturas de concreto armado. O desperdício de materiais, o retrabalho, o consumo desnecessário de materiais (em especial aqueles de revestimento) são alguns fatores que não colaboram para a sustentabilidade da estrutura de concreto. Somado a estes, ainda está muito presente a má execução, como por exemplo, o mau posicionamento das armaduras no interior do concreto, o inadequado lançamento do concreto nas formas e à falta de cura, que fazem com que o concreto se deteriore de forma muito ace-

lerada, permitindo incremento de potencial de lixiviação, carbonatação e elevação da porosidade, o que leva a facilitar a penetração de agentes agressivos ao interior do concreto.

A combinação dos fatores de projeto com aqueles relativos à construção, resultam em um verdadeiro potencial de danos para as estruturas de concreto armado, comprometendo inicialmente sua vida útil e como consequência a sua sustentabilidade. Estes fatores, hoje na maioria dos casos relegados a planos menores, devem constituir foco a ser perseguido pelos engenheiros civis, em especial aqueles mais novos, utilizando estas questões como diferenciais para ocuparem seus lugares no universo da construção civil, executando obras como prédios, pontes, instalações industriais e tantas outras com uma durabilidade adequada, permitindo que o sistema possa ser tratado como a técnica sustentável que realmente é, dependendo apenas que seus atores demonstrem a adequada responsabilidade técnica.

Considerações finais

As propostas apresentadas nas discussões desenvolvidas ao longo deste capítulo devem ser vistas como formas de uma evolução cada vez mais importante para a engenharia. Parece que uma falsa sensação de conhecimento tomou conta de muitos profissionais, que relegaram a planos menores a importância da elaboração de um projeto consistente e bem detalhado, assim como, os cuidados tradicionalmente considerados na execução das estruturas de concreto armado.

Os profissionais conscientes, que acompanham a construção civil atual no Brasil, habitualmente são decepcionados quando executam verificações de conformidade de projetos, ou quando são instados a verificar a execução de obras, muitas vezes ainda não utilizadas e já repletas de problemas, que claramente comprometem a integridade ou mesmo a segurança das estruturas, deixando claro que a durabilidade será um tema de difícil e muito custoso alcance.

Esta postura profissional, que hoje domina a maioria do mercado, certamente poderia resumir todas as discussões e considerações emitidas ao longo do presente texto. Embora muitos temas ligados às estruturas de concreto armado ainda estejam em fase de descobrimento, como é o caso da microestrutura dos concretos e mesmo das técnicas de dosagem, onde novas descobertas ocorrem com grande regularidade, da mesma forma que a cada dia lidamos com modelos computacionais mais requintados e precisos, a operacionalidade do manuseio destas técnicas associada à total displicência da execução resultam em construções de qualidade cada vez menor.

Efetivamente, o concreto armado constitui uma técnica excelente para a construção, nas mais diversas aplicações, como edifícios dos mais variados portes, pontes, estruturas industriais, estruturas de infraestrutura em geral, pavimentos e contenções, entre outras tantas aplicações, nas quais o material demonstra um elevado potencial de durabilidade e conseqüentemente, de sustentabilidade, desde que seja aplicado de forma responsável, incluindo todo o conhecimento acumulado através das técnicas e cuidados executivos.

Assim sendo, podemos concluir estas considerações, afirmando que o concreto armado é o material estrutural mais versátil, justificando de forma integral, ser o material estrutural mais utilizado no mundo e que, apesar dos danos ambientais causados na sua produção, quando o resultado desta operação se torna eficiente e adequadamente durável, estes danos são minimizados a níveis aceitáveis, tornando-se entre as diversas opções a melhor alternativa, seja pela facilidade executiva, plasticidade, resistência e compatibilidade com o meio ambiente em que esteja inserido. Desta forma, a busca contínua pela ampliação do conhecimento do comportamento deste material e de suas possíveis aplicações constitui uma área de conhecimento fundamental à humanidade, em função da grande aplicabilidade e do elevado potencial de utilização na solução dos mais variados problemas e/ou necessidades do ser humano.

Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. COMMITTEE 318: Building code requirements for structural concrete. Detroit: ACI, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto de cimento Portland: preparo, controle, recebimento e aceitação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15421: Projeto de estruturas resistentes a sismos: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

CAD/TQS. Projeto estrutural de edifícios de concreto armado, protendido, pré-moldados e alvenaria estrutural: Manual III e IV. Disponível em: http://www.tqs.com.br/recursos-do-site/downloads/cat_view/106-manuais-tqs. Acesso em: 20 jun. 2019.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **Eurocode 8**: Design of structures for earthquake resistance. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **Eurocode 2**: Design of concrete structures. Brussels: European Committee for Standardization, 2004

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE.
Model Code 90. CEB Laussane, 1993.

MANUAL EBERICK 2019. Eberick AutoQi. Disponível em: http://help.altoqi.com.br/eberick/#pageid=altoqi_eberick. Acesso em: 15 jun. 2019.

CAPÍTULO 3

SUSTENTABILIDADE E GESTÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Bruna Silva Almada; Gilberto Alves da Silva Neto; Henrique Silveira Neto; Juliana Martins; White José dos Santos³
Universidade Federal de Minas Gerais/ Brasil

Introdução

A indústria da construção é um dos setores com maior impacto direto sobre os três grandes pilares dos Estados-nação: sociedade, economia e meio ambiente. A construção civil, ao mesmo tempo em que movimenta a economia, associada ao crescimento populacional e inchaço urbano das grandes metrópoles globais, principalmente nos países em desenvolvimento, também é o principal setor que contribui para a geração de resíduos. Estima-se que, no Brasil, sejam gerados 70 milhões de toneladas por ano de resíduos de construção e demolição (RCD) e, em âmbito internacional, 3 bilhões de toneladas (AKHTAR; SARMAH, 2018; CONTRERAS *et al.*, 2016). Além disso, cerca de 9% do volume de concreto produzido nas centrais dosadoras do Brasil (6,5 milhões de metros cúbicos) são perdidos na forma de resíduos.

Como reflexos desta expansão, evidencia-se a redução progressiva, e quase extinção, da oferta por jazidas de insumos básicos próximos aos polos consumidores, como é o caso da areia de depósito aluvial (DOMINGOS, 2017). A situação tenderá a se alarmar caso as mesmas práticas sejam prosseguidas, haja vista o crescimento do consumo por matéria

³ bruna.almeida93@gmail.com; gilbertoalves.eng@gmail.com; netoh.2014@gmail.com; julianavmartins@outlook.com.br; white.santos@demc.ufmg.br

prima. Sabe-se que o concreto é um dos materiais mais consumidos no mundo e que a produção global de agregados aumentou de 21 bilhões de toneladas em 2007, para 40 bilhões de toneladas em 2014, sendo a China a maior consumidora, responsável por 38% desse total estimado (TAM *et al.*, 2018).

Além dos custos de tratamento e disposição final dos resíduos da construção, destaca-se a capacidade limitada dos aterros em recebê-los, o que dificulta ainda mais a situação. A extração de materiais implica a degradação de uma nova área para os devidos fins e os impactos associados ao transporte dos insumos e/ou resíduos. Em meio a esse cenário, diversos países, incluindo o Brasil, vêm buscando soluções para estas questões adotando as práticas dos 3 “Rs” da sustentabilidade (reduzir, reutilizar e reciclar) e priorizando a não geração de resíduos.

Devido ao seu porte e às características de seus resíduos, a indústria da construção civil tem ampla capacidade de recebê-los e (re) inseri-los em seu ciclo produtivo, assim como de outros setores, como a escória de alto-forno, resíduo originário da indústria metalúrgica utilizado como adição na fabricação do Cimento Portland. Entretanto, a insuficiência de normas regulamentadoras, a falta de conhecimento e, no caso do Brasil, os desafios em coletar e dispor os resíduos de maneira adequada tem dificultado a utilização desse material na construção civil, que poderia ser em maior escala (TAM *et al.*, 2018).

Dentre as soluções adotadas e passíveis de adoção, tem-se a utilização dos RCD e dos resíduos de concreto como agregados, que levam a um menor consumo de matérias primas naturais e redução de custos e impactos ambientais. A utilização de RCD é tecnicamente viável, tanto na substituição parcial quanto integral do agregado natural (AN) em compósitos cimentícios (GUO *et al.*, 2018). No entanto, a aplicação desses está condicionada às suas características, podendo ser utilizados em obras de rodovias, de drenagem, de concreto estrutural e na produção de demais tipos de concretos (TAM *et al.*, 2018). A utilização de resíduos de concreto como agregado reciclado (AR) reduz o consumo de calcário em 60% e a emissão de gás carbônico (CO₂) de 15 a 20%, além de reduzir o custo

final do produto com a reciclagem de 34 a 41% (NAYANA e KAVITHA, 2017; GUO *et al.*, 2018).

Portanto, frente à crescente geração de resíduos do setor e do consumo de recursos naturais, o aprofundamento dos estudos referentes à utilização e reinserção desses resíduos nos ciclos produtivos de materiais da construção civil se faz necessário. Dessa forma, podem ser produzidos, como alternativa aos produtos tradicionais, compósitos cimentícios que atendam às necessidades e exigências da construção civil de forma sustentável.

Gerenciamento de resíduos da indústria construção civil

A gestão dos RCD está inserida num contexto amplo, que engloba todos os demais resíduos sólidos e não pode ser considerada em separado. Se a maior parte dos RCD não causa preocupação, dado sua natureza relativamente inócua, seu principal problema consiste nas quantidades gigantescas em que são produzidos e como são dispostos. Nas cidades de médio e grande portes no Brasil, os RCD constituem mais de 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos coletados (JACOBI; BESEN, 2011). Estudos realizados em alguns municípios apontam que os resíduos da construção formal têm uma participação entre 15% e 30% na massa dos resíduos sólidos da construção civil (RCC), e até 75% provêm de iniciativas informais, como obras de construções pequenas, reformas e demolições, realizadas, em geral, pelos usuários dos imóveis (SINDUSCON-MG, 2014).

Passada mais de uma década da promulgação da Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307/2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos para o Brasil, verifica-se um cenário nacional ainda desolador, onde esses resíduos ainda representam um enorme e caro problema logístico e ambiental, especialmente nas áreas urbanas. Após o período motivado pelas políticas

públicas para os grandes eventos esportivos de 2013 a 2015 (Copa do Mundo de Futebol e Olimpíadas), juntamente com a crise do setor, foi observada certa estagnação na geração dos RCD, ficando em 123.421 t/d em 2017. Apesar da não continuidade do crescimento, a quantidade de RCD gerada é relevante, demandando, portanto, uma atenção especial dos municípios na gestão daqueles resíduos exigida pela Lei Federal nº 12.305/2010.

A reciclagem e o reaproveitamento de RCD se mostram eficientes e de amplo impacto para a redução do custo de produção de compósitos cimentícios e para o desenvolvimento sustentável, estimulando várias pesquisas sobre materiais alternativos para a construção civil. Este reaproveitamento é muitas vezes dificultado pela presença de agentes contaminantes como estopas, plásticos, poliestirenos expandidos e pelo o modo de armazenamento, manuseio e transporte do ponto de geração até as centrais de reciclagem. Esses fatores, além da própria heterogeneidade dos resíduos, podem reduzir o seu potencial de reaproveitamento, resultando, por exemplo, em altas taxas de absorção de água devido a porosidade e/ou a diminuição da resistência a compressão (XUAN, 2016; RICHARDSON *et al.*, 2011).

O acompanhamento de todo o processo de coleta, transporte e tratamento ou reciclagem dos resíduos é de suma importância para assegurar o potencial do resíduo, possibilitando que seu beneficiamento possa ser realizado de modo eficiente e que se enquadre junto às normas e legislações locais. Além disso, considerando as dimensões da problemática dos RCD, todo empreendimento deve zelar pelos resíduos gerados e por sua destinação, materializados na forma do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRRC) e Comprovante de Transporte de Resíduos (CTR).

O elevado percentual de desperdício dos materiais utilizados nas obras é um fator importante a ser observado pela indústria construtiva, pois influencia diretamente a extração de matéria prima e, posteriormente, a disposição final de uma grande quantidade de resíduos. Gusmão (2008) salienta que, na etapa de construção, na grande maioria das vezes, os resíduos são gerados por desperdício de materiais devido à aplicação de

técnicas rudimentares, consagradas no setor. Ademais, a pouca importância dada à fase de planejamento, principalmente no Brasil, leva a problemas de compatibilização de projetos e de dimensionamento que são identificados somente na fase de execução, potencializando o desperdício. Nesse sentido, sistemas construtivos mais racionalizados, utilização de materiais e técnicas menos nocivas e aplicação de medidas sustentáveis dentro do canteiro de obras contribuem para minimizar os impactos causados pelo setor da construção civil.

Além dos benefícios econômicos e logísticos, as práticas da sustentabilidade dão possibilidade de gerar reconhecimento e renome para quem empreende, através de certificações. Na medida em que essas iniciativas crescem, algumas medidas, muitas vezes discretas e artesanais, vêm sendo postas em prática nos canteiros de obras, tendo como finalidade reutilizar ou reciclar algum material que em outrora seria descartado, como ocorre para resíduos de madeira, pregos e até o próprio entulho.

Entretanto, ainda que bem vindas, essas práticas, quando aplicadas de forma isolada, sem dar a devida importância aos resíduos gerados devido às perdas, erros de dimensionamento, e problemas de planejamento, são insuficientes. Nesse caso, a medida funciona apenas pelo caráter econômico, crítica associada ao denominado “marketing verde”. Portanto, são necessárias ações imperativas ainda na fonte, através do aprimoramento do uso de materiais, buscando reduzir o refugo oriundo da negligência na etapa de organização e planejamento, minimizando o desperdício e as perdas através da gestão dos materiais (SOUSA *et al.*, 2004).

A identificação e quantificação dos resíduos, locais de produção e periculosidades, juntamente com suas propriedades físico-químicas são necessárias à sua compreensão sendo fundamental para seleção de suas possíveis aplicações. Logo, a segregação dos resíduos em conformidade com sua tipologia nos canteiros de obra é uma prática importante para auxiliar e facilitar sua utilização, que pode levar à geração de um novo produto. Os custos associados (licenças ambientais, deposição, transportes e multas), devem ser considerados na avaliação da viabilidade econômica da reciclagem e condicionam-se à possibilidade de uma vantagem

competitiva do novo produto no mercado. E para a avaliação do material alternativo deve-se relacionar tanto o desempenho e durabilidade quanto a adequação ao uso, sendo necessários testes e análises de critérios da engenharia, da saúde pública e do meio ambiente.

Os benefícios da adequada gestão dos RCD no canteiro de obras são diversos, destacando-se: a diminuição de custos, devido à ênfase da gestão na redução, reutilização e reciclagem do RCC; a minimização da demanda por aterros sanitários, já que uma menor quantidade de resíduos será destinada para estas áreas; o melhoramento da imagem da empresa, que passará a ser vista como uma companhia que preza pelo processo produtivo ambientalmente correto; e a melhoria da produtividade e qualidade do produto final.

Classificação e composição gravimétrica de resíduos da indústria da construção

Os RCCs foram classificados pela primeira vez pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), através da Resolução nº 307, de 17 de julho de 2002, em quatro categorias. No entanto, ao longo dos anos tal Resolução passou por alterações, sendo que a última (nº 469/2015) classificou os RCCs como:

Classe A – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis, como agregados, tais como: de construção, demolição, reformas e reparos de edificações e pavimentação, terraplanagem, componentes cerâmicos.

Classe B – são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso.

Classe C – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam sua reciclagem ou recuperação.

Classe D – são os resíduos perigosos provenientes do processo de construção, tais como tintas, solventes e óleos, por exemplo, ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde, provenientes de reparos, demolições de clínicas radiológicas, industriais e outros, bem como telhas e demais materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Outra forma de classificação foi proposta pela norma NBR 10.004: 2004. Nela, os resíduos sólidos e semissólidos são subdivididos quanto seu grau de periculosidade e das diversas formas de procedência, seja: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, serviços e varrição, sendo subdivididos em: Classe I – perigosos, Classe IIA – não perigosos e não inertes e Classe IIB – não perigosos e inertes.

Na análise da tipologia dos RCD gerados em diferentes locais deve considerar os diferentes métodos construtivos adotados em cada região. Como exemplo, cita-se o caso dos Estados Unidos da América (EUA), onde construções feitas de madeira são muito comuns, ocasionando em quantidades relativamente grandes de madeira como RCD. Constata-se que obras de alvenaria convencional (blocos e cimento) geram em torno de 44 kg/m² de RCD, enquanto construções feitas predominantemente de madeira produzem cerca de 21 kg/m² (COCHRAN *et al.* 2007). Além da tipologia, ressalta-se a importância de se realizar o monitoramento das taxas de geração de RCD, já que esses valores podem influenciar no gerenciamento dos resíduos, tanto no canteiro de obras quanto em âmbito municipal. Contata-se que o concreto, a madeira e o material de *Drywall* (composto principalmente de gesso) são os principais componentes dos RCD gerados em reformas.

Em relação ao material de *Drywall*, Cochran *et al.* (2007) fazem uma colocação importante, de que nos processos de reforma e demolição, principalmente, esse material, devido à grande quantidade de gesso, se quebra em pedaços pequenos, o que dificulta sua segregação dos outros materiais. Nesse caso, a presença de gesso misturado a outros tipos de RCD justifica as quantidades consideráveis de resíduos misturados, computados como “outros”.

Em países onde as práticas construtivas se aproximam com as encontradas no Brasil, como no caso da Espanha, observa-se, também, certa similaridade entre a composição dos RCD. Em um estudo analisando os resíduos recebidos nas Estações de Reciclagem de Entulho (ERE) de Belo Horizonte, Carmo *et al.* (2012) mostraram que a maior parte dos RCD gerados na capital mineira naquele ano era de base cerâmica, oriundos principalmente de obras de reformas residenciais de casas, classificadas em padrão normal de acabamento. Tal diagnóstico pode ser considerado como positivo pois são classificados como classe A pela resolução 307 do CONAMA, ou seja, resíduos com maior potencial para serem reaproveitados pela indústria da construção civil. No entanto, ressalta-se que a variabilidade na geração de RCD não acontece apenas entre diferentes métodos construtivos. Observa-se, também, grande variabilidade da tipologia de resíduos gerados em uma mesma obra, com a mesma prática construtiva, em diferentes fases da construção. Cada qual requer uma abordagem de gestão diferente, mas sempre com o intuito de dar ao resíduo sólido de construção e demolição uma destinação mais nobre do que o aterramento.

Resíduos de construção e demolição

As características físicas, químicas e morfológicas dos agregados reciclados (AR) influenciam diretamente as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade dos compósitos cimentícios que os utilizam. A granulometria dos AR é influenciada, dentre outros fatores, pelo tipo de britador utilizado no processo de beneficiamento dos resíduos (OLIVEIRA *et al.*, 2015). Busca-se sempre uma curva granulométrica semelhante à do agregado natural (AN) e de distribuição contínua, sendo bastante favorável para o empacotamento da mistura. Atualmente, o AR apresenta dimensão máxima dos grãos maior que a do AN, sendo que a substituição parcial AN pelo AR pode resultar em uma granulometria final da combinação adequada ao uso em concretos.

No geral, os AR tendem a apresentar uma grande quantidade de material mais fino que 75 μm , esse material pulverulento está relacionada à maior fragilidade dos materiais que compõem os RCD, de acordo com sua composição/tipologia e ao processo de britagem. Comumente, os finos dos AR são mais angulosos, prejudicando, assim, a trabalhabilidade de compósitos e fazendo com que a mistura requeira mais água livre para ser lubrificada (OLIVEIRA *et al.*, 2015). Esse comportamento também está atrelado à maior superfície específica dos finos, que os torna mais adsorventes.

Os AR, geralmente, têm uma massa específica menor que a dos NA, devido à maior porosidade das partículas, resultando, assim, numa maior absorção de água (OLIVEIRA *et al.*, 2015). Segundo Evangelista e Brito (2010), a absorção de água desse agregado chega a ser 16 vezes maior que a do AN. Pereira *et al.* (2012) complementam ainda que os menores valores para massa específica e massa unitária dos AR podem ser atribuídos ao maior teor de argamassa aderida às partículas dos mesmos. O AR originado de resíduo de concreto é composto basicamente de dois materiais diferentes, AN e argamassa aderida.

Correlacionando a capacidade de absorção de água do AR com a origem desses materiais, observou-se em alguns estudos que no caso dos AR originados de tijolos cerâmicos, a faixa de valores para esta propriedade está entre 12,2% e 14,7% (ETXEBERRIA; VEGAS, 2015; ALVES *et al.*, 2014). Valores esses similares ao encontrado por Evangelista e De Brito (2010) para o AR concreto (13,1%). De modo geral, constata-se que o AR cerâmico tem uma maior capacidade de absorção de água, se comparada aos de origem de concreto e argamassa, individualmente.

Segundo Oliveira *et al.* (2015), a maior absorção de água dos ARs possivelmente implicará na consistência dos concretos produzidos, caso não se adote um procedimento de pré-molhagem dos agregados. Além de dificultar o controle tecnológico dos compósitos cimentícios produzidos e prejudicar a qualidade dos mesmos, a absorção de parte da água da pasta tende a influenciar negativamente as reações de hidratação do cimento.

Nesse contexto, as propriedades de compósitos cimentícios, no estado fresco e endurecido, vão sendo discutidas em diversas pesquisas ao redor do mundo, nas quais se avaliam a influência da substituição parcial ou integral do AN pelo AR, de diversas origens. Tem-se observado que à medida que se aumenta o teor de AR, maior é a exigência de água para atingir a mesma consistência. Isto está, possivelmente, atrelado a presença de partículas finas (menores que 75 μm), que aumenta a superfície específica a ser molhada, juntamente com a maior porosidade desse tipo de agregado. Além disso, a alta capacidade de absorção de água dos ARs aumenta a aspereza da mistura e a fricção entre as partículas do agregado, o que também é resultado da forma irregular e da superfície rugosa dessas partículas (SILVA NETO; LEITE, 2018).

Os concretos com AR tendem a apresentar uma trabalhabilidade reduzida, quando não se utilizam aditivos redutores de água, indicando, assim, que a relação água/cimento (a/c) ótima deveria ser um pouco maior nesses casos (PEREIRA *et al.*, 2012). Essa redução da trabalhabilidade com o aumento do teor de ARs deve-se à maior capacidade de absorção desses agregados, e pode ser compensada pela incorporação de uma água adicional à mistura através de um procedimento de pré-molhagem (GARCÍA-GONZÁLEZ *et al.*, 2014). Com essa pré-umidificação do AR, os autores conseguiram melhorar a consistência da mistura à medida que o intervalo de saturação do agregado aumentava. Contudo, nem sempre esses acréscimos de água compensam a perda de trabalhabilidade devido à maior aspereza das partículas dos ARs, além de poder comprometer o desempenho mecânico do concreto, dado o alto teor de água na mistura. Sendo assim, a utilização de aditivos plastificantes ou superplastificantes se torna uma solução satisfatória.

Em relação ao comportamento mecânico de compósitos cimentícios produzidos com agregados originados de resíduos de construção civil, normalmente, a substituição do AN pelo AR causa a perda de resistência à compressão dos concretos na medida em que aumenta o teor de substituição (BARBUDO *et al.*, 2013). Esse comportamento pode estar atrelado à argamassa aderida à superfície do AN, nos ARs, que é responsável,

ainda, pelo aumento da absorção de água desses agregados e da perda de densidade das partículas. Além disso, devido à maior porosidade dos ARs, estes tendem a apresentar uma resistência menor se comparada aos ANs, contribuindo para a perda de resistência mecânica do produto final (ALVES *et al.*, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2015). O desempenho mecânico reduzido dos concretos reciclados se deve, ainda, ao aumento da relação *a/c* adotado para se corrigir a perda da trabalhabilidade.

É notório nas pesquisas com resíduo cerâmico a evolução da resistência à compressão ao longo das idades do concreto, apresentando taxas de desenvolvimento de resistência maiores até mesmo que as dos concretos convencionais. Este comportamento está relacionado ao efeito pozolânico desse resíduo cerâmico e à alta capacidade de absorção de água dos agregados de origem cerâmica, que contribui para a redução do excesso de água da mistura (ALVES *et al.*, 2014; ETXEBERRIA; VEGAS, 2015).

Considerando-se a resistência à tração por compressão diametral, esta não depende somente da resistência do agregado, mas também da quantidade e qualidade da conexão entre eles, e das microfissuras e imperfeições na matriz cimentícia. Barbudo *et al.* (2013) atribuíram a perda de resistência à tração dos concretos, observada em seus estudos, principalmente, à ligação mais fraca entre a pasta de cimento e os AR, enquanto Alves *et al.* (2014) justificam pelo aumento da porosidade da pasta devido ao aumento do teor do AR.

A qualidade do resíduo que originará o AR, também influencia na resistência dos novos compósitos cimentícios produzidos. Segundo Juan e Gutiérrez (2009), concretos de resistência acima de 25 MPa produzem AR de boa qualidade que podem ser utilizados na produção de concretos estruturais. O maior o teor de impurezas no AR, também influencia negativamente na resistência à compressão dos concretos. Por isso, pode se obter resultados completamente diferentes no desempenho de concretos reciclados, ainda que o teor de AR seja o mesmo nas misturas comparadas.

Considerando-se o módulo de elasticidade dos compósitos cimentícios com AR, a substituição do AN por AR cerâmico reduz o módulo de elasticidade dinâmico de concretos, que é intensificada com o aumento

do teor de substituição. Ademais, para um mesmo teor de substituição, os concretos com AR cerâmico apresentam maior módulo de elasticidade que os concretos com AR de concreto (KHATIB, 2005). Alves *et al.* (2014) complementam que quanto maior a relação a/c da mistura menor é o módulo de elasticidade do concreto.

A presença de argamassa aderida ao AR é o que mais afeta a durabilidade de concretos reciclados, pois quanto mais argamassa aderida ao agregado, maior será sua porosidade e absorção de água, prejudicando a durabilidade desses concretos (GUO *et al.*, 2018).

Os maiores teores de AR e de água na mistura podem prejudicar a durabilidade dos concretos, sendo que os efeitos negativos são mais expressivos quando se utiliza agregados miúdos reciclados (AR), do que quando se utiliza os agregados graúdos reciclados (AGRs). Problemas com a durabilidade podem ser resolvidos utilizando-se adições minerais ou ARs provenientes de concretos de alta resistência (GUO *et al.*, 2018). Por outro lado, Silva *et al.* (2015), afirmam que as adições minerais, utilizadas como substitutas de parte do cimento, causam um aumento da profundidade de carbonatação, uma vez que há o consumo de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), reduzindo seu teor na mistura e o pH do concreto.

A carbonatação, que consiste em uma série de reações químicas na presença de CO_2 reduzindo o pH do material, juntamente com a penetração dos íons cloreto, são responsáveis pela corrosão das armaduras em concretos. De acordo com Guo *et al.* (2018), o aumento da relação água/cimento e do teor de argamassa aderida, somado ao aumento do teor de AR tem efeito fortemente negativo frente à resistência à carbonatação; a redução do tamanho dos grãos de AR, tem efeito suavemente negativo; e a presença de superplastificantes tem efeito positivo em relação à essa propriedade.

A impermeabilidade de concretos com ARs é determinada, principalmente, pelo teor de AR, relação a/c, resistência do concreto que originou o agregado, idade de cura e a presença de adições minerais. Quanto mais aberta for a estrutura porosa, maior a predisposição à degradação pela

entrada de substâncias deletérias. Comumente, essa propriedade é mais fraca em concretos reciclados do que nos convencionais (GUO *et al.*, 2018).

Quanto à absorção de água por imersão dos concretos reciclados, a mesma tende a ser aumentada com a incorporação de ARs, dada à alta absorção de água desses (GUO *et al.*, 2018). Nos estudos de Etxeberria e Vegas (2015), o concreto com AMR originado de tijolos cerâmicos apresentou uma maior capacidade de absorção de água por capilaridade quando comparado ao concreto com AMR misto e ao concreto convencional. Os autores justificam para esse comportamento, a granulometria desses agregados, já que no AMR originado de tijolos cerâmicos houve maior presença de partículas maiores que 4,0 mm, 25% contra 14% no AMR misto e 1% no AMN. Além disso, o resíduo de tijolo cerâmico é bastante poroso, influenciando, assim, também na absorção de água dos compósitos cimentícios produzidos.

Outro importante parâmetro de durabilidade é a resistividade elétrica, que disponibiliza uma boa estimativa da probabilidade de corrosão no concreto. Quanto maior a resistividade elétrica do concreto, menor será sua taxa de corrosão (SINGH; SINGH, 2016). A resistividade elétrica dos concretos com ARs está relacionada ao teor de substituição do AN pelo reciclado e à qualidade do AR, sendo que o aumento do risco de corrosão está atrelado ao aumento da porosidade proveniente da argamassa aderida aos AR.

Resíduos de concreto gerados em centrais dosadoras

Dentro de uma central dosadora, há duas fontes principais de geração de resíduo proveniente do processo produtivo. Uma delas é a perda por produção excedente ou por caminhões que excederam o limite máximo previsto em norma para o lançamento do concreto, que retornam das obras sem ser descarregado (SERIFOU *et al.* 2013). A outra fonte de geração é oriunda do traço que permanece aderido às paredes internas dos caminhões betoneira, após total descarregamento da mistura. A limpeza

é realizada periodicamente, em geral, após a última viagem do caminhão, para remoção desse lastro, evitando deterioração do equipamento (CORREIA *et al.*, 2009).

De acordo com a Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), os líquidos cujas suas particularidades os tornem inviáveis para emissão à rede pública de esgoto ou em cursos d'água são classificados como resíduos sólidos e devem estar incluídos na gestão e gerenciamento dos mesmos, devendo, portanto ser tratados e ter disposição final de maneira ambientalmente adequada. Sendo assim, para atender a legislação brasileira, as centrais dosadoras de concreto (CDC) dispõem de tanques de decantação, que reduzem o teor de sólidos da água de lavagem interna dos caminhões misturadores, melhorando sua qualidade para um possível aproveitamento.

A câmara de entrada é usualmente chamada nas concreteiras de bate lastro. Ela recebe a água de lavagem dos caminhões betoneira e, posteriormente a água percorre as demais câmaras de decantação. Ao chegar à câmara de saída, esta água é bombeada e armazenada de acordo com a sua destinação final. Em geral, são enviadas a caixas d'água destinadas apenas para recebimento dessa água e utilizada 100% para atividades da própria central. (DE PAULA *et al.*, 2017)

O material sólido, aqui chamado de Lama Residual de Concreto Dosado em Central (LRCDC), é retirado periodicamente do bate lastro e das demais câmaras de sedimentação e enviado às baias de resíduos onde perde parte da umidade à temperatura ambiente e, em seguida, é transportado à sua destinação final, que poderá ser aterro ou algum tipo de reaproveitamento (DE PAULA *et al.*, 2017).

Dependendo da fonte de geração e do tipo de tratamento dado após a geração, diferentes tipos de resíduos podem ser gerados em uma central dosadora. O tipo de resíduo associado às peculiaridades de cada concreteira na produção dos traços, bem como os tipos de materiais utilizados influenciarão em sua caracterização. O resíduo de concreto que retorna das obras e a pasta de cimento que sobra após a passagem por central de reciclagem, seguido por filtragem sob pressão, são materiais que se hidratam e endurecem, devendo ser triturado para utilização. Os resíduos

oriundos de tanques de decantação não necessitam ser triturados, pois ao secar se apresentam na forma de grãos.

De forma geral a LRCDC oriunda da lavagem dos caminhões betoneira possui de 20 a 40% de partículas fina, abaixo de 150 μm , massa específica entre 2,24 a 2,64 g/cm^3 , absorção de água próximo de 16%, área superficial específica de 2,7 m^2/g . Os principais compostos são aqueles originais do cimento e agregados: quartzo, portlandita, calcita, silicatos de cálcio e gesso. As características do resíduo endurecido irão depender principalmente da porosidade do material, que está diretamente relacionada com a quantidade de água presente nesse material no estado fresco. A literatura apresenta massa específica igual a 1,83 g/cm^3 e absorção de água variando de 4,3 a 37,2% (AUDO *et al.*, 2016).

As alternativas para redução do resíduo consistem em:

Centrais de reciclagem de concreto fresco que são alternativas que podem ser adotadas pelas concreteiras para reduzir o volume de resíduo gerado, recuperando os agregados de concretos residuais. Estima-se que com a adoção desses equipamentos, a quantidade de resíduo gerado seja cerca 0,8% em relação ao total de concreto produzido (XUAN *et al.*, 2016). Nesses equipamentos, os agregados são recuperados por lavagem e reutilizados em novos traços. Eles podem processar o concreto retornado à central, a água de lavagem dos caminhões betoneira e o concreto residual presente nas bombas de concreto.

Aditivo estabilizador de hidratação (AEH) que atuam na molécula de cimento, bloqueando sua reação com a água, podendo-se manter estável cuja duração será definida pela dosagem de aditivo. Ou seja, quanto maior a dosagem, maior o período de estabilização. A hidratação recomeça normalmente após a adição de um aditivo ativador ou após completo consumo do AEH. O aditivo citado pode ser utilizado para estabilizar águas de lavagem interna dos balões dos caminhões betoneira. Após a última viagem do caminhão é realizada a lavagem e adicionada uma quantidade determinada de AEH, que dependerá do período em que se pretende estabilizar a mistura. Esse período, em geral, é de 24 horas ou um fim de semana, prazo para produção do próximo concreto, que terá em

sua composição essa água de lavagem armazenada, efetuando as devidas correções no teor de água que deverá ser adicionado (SOUZA, 2007). Segundo Salvador (2016), o emprego do AEH em águas de lavagem de caminhão betoneira em uma central com 60 caminhões possibilita o reaproveitamento de aproximadamente 1 milhão de litros de água, evitando seu descarte no ambiente e possibilitando a economia de água potável.

Devido à maior área superficial específica desses resíduos em relação aos agregados naturais e ao cimento, as misturas que foram produzidas com esse material apresentaram redução significativa da trabalhabilidade, sendo necessário a incorporação de aditivos plastificantes ou superplastificantes e/ou a adição de água para obter a consistência desejada. A produção de concretos com substituição parcial dos agregados por LRCDC resultou na queda de 10 a 200% no *slump* e redução de 2,5 a 7% na densidade do concreto fresco (CORREIA *et al.*, 2009; RUGHOOPTH *et al.*, 2017; SILVA, 2016). No concreto endurecido foi identificado um aumento na absorção de água (14 a 37%), bem como na retração (38 a 200%) e redução da resistência à compressão (0 a 50%) e do módulo de elasticidade (4 a 52%). Em geral, as propriedades mecânicas foram afetadas negativamente com a incorporação do resíduo, principalmente se a correção da trabalhabilidade for feita por meio do aumento do teor de água, sem uso de aditivos (RUGHOOPTH *et al.*, 2017). Com a utilização de aditivo superplastificante, não houve variação significativa da resistência à compressão, considerando a mesma relação *a/c* (CORREIA *et al.*, 2009).

Quando utilizado em substituição simultânea do filer calcário e da areia natural. Audo *et al.* (2016) mantiveram a mesma relação *a/c* e a relação em massa resíduo/finos (cimento+resíduo) variando de 7 a 9%. O percentual de substituição de areia variou de 3 a 10% e a trabalhabilidade foi corrigida com incorporação de aditivo superplastificante, com isso a porosidade das argamassas produzidas não variou significativamente. Os valores de resistência à compressão aos 28 dias variaram de: 17% maior a 31% menor que a argamassa de referência sem adições minerais, sendo encontrada a maior resistência onde houve a menor taxa de substituição de areia e filer calcário.

Para o aproveitamento do LRCC em substituição aos agregados naturais em concreto, foi necessária trituração e peneiramento até atingir a granulometria desejada (0 a 10 mm). A absorção de água dos agregados reciclados comparado com os agregados naturais graúdo e miúdo foi 3 e 8 vezes maior, respectivamente, por esse motivo, foi necessário adicionar até 56% de água nos concretos produzidos para manter uma trabalhabilidade constante. Houve queda de até 32% na resistência à compressão, reduzindo gradativamente com o aumento dos percentuais de substituição (SÉRIFOU *et al.*, 2013). Um estudo realizado por Juan e Gutiérrez (2009) concluiu que, para que um agregado reciclado possa ser utilizado na produção de concreto estrutural, deve conter um teor de argamassa inferior a 44%. Ao atender esse critério, os agregados reciclados obtiveram massa específica maior que 2,16 e absorção de água abaixo de 8%.

Os concretos produzidos com água de lavagem com adição de AEH apresentaram perda de resistência à compressão nas primeiras idades e o aumento da mesma na idade de 28 dias. O módulo de elasticidade não foi afetado e, no estado fresco, houve acréscimo nos tempos de início e fim de pega (SALVADOR, 2016). Os concretos produzidos com maior teor de AEH apresentaram aumento de 7% no *slump* em relação ao concreto sem aditivo, enquanto os produzidos com menores teores obtiveram redução de até 47%. A grande variação encontrada no teor de ar incorporado não pode ser justificada pela incorporação do aditivo no traço. O tempo de início de pega apresentou redução de 51 minutos a um aumento de 43 minutos na mistura produzida com maior teor de AEH. As temperaturas de início e fim de pega foram aumentadas em aproximadamente 2 a 11% (SOUZA, 2007).

Considerações finais

A construção civil pode ser mais sustentável à medida em que se busquem processos menos agressivos ao meio ambiente. A reciclagem dos resíduos é uma boa alternativa para redução do impacto causado pelo

elevado consumo de materiais e pela redução das áreas de disposição. O tipo de tratamento realizado e a segregação dos resíduos sólidos na fonte influenciam suas propriedades finais, permitindo obter materiais reaproveitáveis e mais adequados ao mercado. O reaproveitamento dos resíduos em grande escala permitiria redução significativa dos custos de produção ao diminuir os impactos derivados da extração, transporte e beneficiamento das matérias primas. Além disso, contribui sobremaneira para minimizar os impactos ambientais derivados da sua disposição em aterros.

Referências

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, v. 186, p. 262–281, 2018.

ALVES, A. V. *et al.* Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 64, p. 103–113, 2014.

ANGULO, S. *et al.* Determination of construction and demolition recycled aggregates composition, in considering their heterogeneity. *Materials and Structures*, v. 42, n. 6, p. 739–748, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil. 114 p. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/>. Acesso em: 18 mar. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

AUDO, M. *et al.* Utilization of sludge from ready-mixed concrete plants as a substitute for limestone fillers. *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 790–799, 2016.

BARBUDO, A. *et al.* Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 59, p. 93–98, 2013.

BARRETO, A.; HEINECK, L. Aplicação da análise de envoltória de dados (DEA) na avaliação da eficácia de ações gerenciais em relação aos desperdícios em obras. In: Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção, 6, João Pessoa, *Anais[...]*, 2009.

BRASIL. Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a política nacional de resíduos sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: DOU, 02 ago. 2010, 22 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da Construção Civil. Brasília, DF. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/conama>. Acesso em: 10 set. 2012.

CARMO, D. S. *et al.* Avaliação da tipologia dos resíduos de construção civil entregues nas usinas de beneficiamento de Belo Horizonte. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v.17, n.2, p. 187 – 192, 2012.

COCHRAN, K. M. *et al.* Estimation of regional building-related C&D debris generation and composition: case study for Florida, US. *Waste Management*, v. 27, n.7, p. 921–931, 2007.

CONTRERAS, M. *et al.* Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material. *Construction and Building Materials*, v. 123, p. 594 – 600, 2016.

CORREIA, S. L. *et al.* Assessment of the recycling potential of fresh concrete waste using a factorial design of experiments. *Waste management*, v. 29, n. 11, p. 2886 - 2891, 2009.

DE PAULA, *et al.* Lama residual de usinas de concreto: características e aplicação na confecção de blocos. *REEC*, v.13, n.2, p. 32 – 43, 2017.

DOMINGOS, J. L. O mundo enfrenta falta de areia. Quais os efeitos dessa escassez. *Nexo Jornal*, 2017. Disponível em: <http://www.nexojornal.com.br/expresso/2017/09/10/O-mundo-enfrenta-falta-de-areia.-Quais-os-efeitos-dessa-escassez>. Acesso em: 10 jul. 2019.

ETXEBERRIA, M.; VEGAS, I. Effect of fine ceramic recycled aggregate (RA) and mixed fine RA on hardened properties of concrete. *Magazine of Concrete Research*, v. 67, n. 12, p. 645 – 655, 2015.

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, n. 1, p. 9 – 14, 2010.

GARCÍA-GONZÁLEZ, J. *et al.* Pre-saturation technique of the recycled aggregates: solution to the water absorption drawback in the recycled concrete manufacture. *Materials*, v. 7, n. 9, p. 6224 – 6236, 2014.

GALARZA, L. H. *et al.* Modelo dinâmico de sistemas para o gerenciamento de resíduos da construção civil na cidade de Porto Alegre: estudo de caso. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 20, n. 3, p. 463 – 474, 2015.

GUO, H. *et al.* Durability of recycled aggregate concrete – A review. *Cement and Concrete Composites*, v. 89, p. 251 – 259, 2018.

GUSMÃO, S. L. L. A influência da customização sobre a cadeia produtiva: uma interpretação analítica. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP1997_T5202.PDF. Acesso em 2008. Porto Alegre, UFRS.

HWANG, B.; YEO, Z. B. Perception on benefits of construction waste management in the Singapore construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*, v. 18, n. 4, p. 394 – 406, 2011.

JACOBI, P.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. *Estudos Avançados*, v. 25, n. 71, p. 135 – 158, 2011.

JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 2, p. 872 – 877, 2009.

KHATIB, J. M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 4, p. 763 – 769, 2005.

KOFOWOROLA, O. F.; GHEEWALA, S. H. Estimation of construction waste generation and management in Thailand. *Waste Management*, v.29, p. 731 – 738, 2009.

KOU, S. *et al.* Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 28, n. 1, p. 549 – 556, 2012.

LLATAS, C. A model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list. *Waste Management*, v. 31, n. 6, p. 1261 – 1276, 2011.

NAYANA, A. Y., KAVITHA, S. Evaluation of CO₂ emission for green concrete with high volume slag, recycled aggregate, recycled water to build eco environment. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, v. 8, n. 5, p. 703 – 708, 2017.

OLIVEIRA, T. T. A. *et al.* Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de laboratórios de ensaio de materiais visando aplicações não estruturais. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 57., Bonito. *Anais[...]*, p. 1–13, 2015.

PEREIRA, P. *et al.* The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 28, n. 1, p. 722 – 729, 2012.

RICHARDSON, A. *et al.* Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, v.19, n.2, p. 272 – 277, 2011.

RUGHOOPUTH, R. *et al.* Possibility of using fresh concrete waste in concrete for nonstructural civil engineering works as a waste management strategy. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 21, n. 1, p. 94 – 99, 2017.

SALVADOR, R. P. Accelerated cementitious matrices: hydration, microstructure and mechanical strength. 2016. *Tese de doutorado* – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha, 2016.

SÉRIFOU, M. *et al.* A study of concrete made with fine and coarse aggregates recycled from fresh concrete waste. *Journal of Construction Engineering*, v. 2013, 2013.

SINDUSCON-MG. Alternativas para a destinação de resíduos da construção civil. 3 ed., Belo Horizonte, 2014, 115 p.

SILVA, R. V. *et al.* Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 62, p. 22 – 32, 2015.

SILVA, D. O. F. *Reaproveitamento de lamas residuais do processo de fabricação do concreto*. 2016. *Dissertação de Mestrado em Ciências - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, São Paulo, 2016.

SILVA NETO, G. A.; LEITE, M. B. Study of the influence of the mortar fine recycled aggregate ratio and the mixing sequence on the behavior of new mortars. *Ambiente Construído*, v. 18, n. 2, p. 53 – 69, 2018.

SOUZA, A. F. *Otimização do uso de aditivo estabilizador de hidratação do cimento em água de lavagem dos caminhões-betoneira para produção de concreto*. 2007. *Trabalho de Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina*, 2007.

SOUZA, U. E. L. *et al.* Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de edifícios: Uma abordagem progressiva. *Ambiente Construído*, v. 4, n. 4, p. 33 – 46, 2004.

SINGH, N.; SINGH, S. P. Carbonation and electrical resistance of self-compacting concrete made with recycled concrete aggregates and metakaolin. *Construction and Building Materials*, v. 121, p. 400 – 409, 2016.

TAM, V. W. Y. *et al.* A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*, v. 172, p. 272 – 292, 2018.

XUAN, D. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, v. 65, p. 67 – 74, 2016.

XUAN, D. *et al.* Innovative reuse of concrete slurry waste from ready-mixed concrete plants in construction products. *Journal of Hazardous Materials*, v. 312, p.65 – 72, 2016.

CAPÍTULO 4

ESCÓRIA DE ACIARIA PARA CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

*Ana Carolina de Paula Matias; Humberto Dias Andrade;
Láís Cristina Barbosa Costa; Marcela Aguiar Nogueira;
Tainá Varela de Melo; Ricardo André Fiorotti Peixoto⁴*
Universidade Federal de Ouro Preto

Introdução

Em 2017, a indústria siderúrgica mundial produziu 1,67 bilhões de toneladas de aço bruto, sendo o Brasil responsável pela fabricação de 34,4 milhões de toneladas. São gerados 607 kg de rejeitos para cada tonelada de aço produzido, sendo que desses, 270 kg são de escórias de aciaria (IABR, 2018), o que significa dizer que 20,9 milhões de toneladas de rejeitos foram gerados e depositados em aterros e depósitos. Se pensarmos em volume, teríamos o suficiente para preencher aproximadamente 3,7 mil edifícios residenciais de 4 pavimentos com 300 m² área por pavimento.

As características das escórias dependem diretamente do processo produtivo do aço, que pode se dar por duas rotas de refino básicas: por conversor de arco elétrico (AE) ou por conversor a oxigênio, esta última conhecida como processo de Linz-Donawitz (LD). A Figura 1 apresenta a escória de aciaria sem processamento.

⁴ ana.carolina.p.matias@gmail.com; andrade.hdias@gmail.com; lais.cristina.costa@gmail.com; marcelaanogueira@outlook.com; tainavarela@hotmail.com; fiorotti.ricardo@gmail.com

Figura 1 - Escória de aciaria bruta

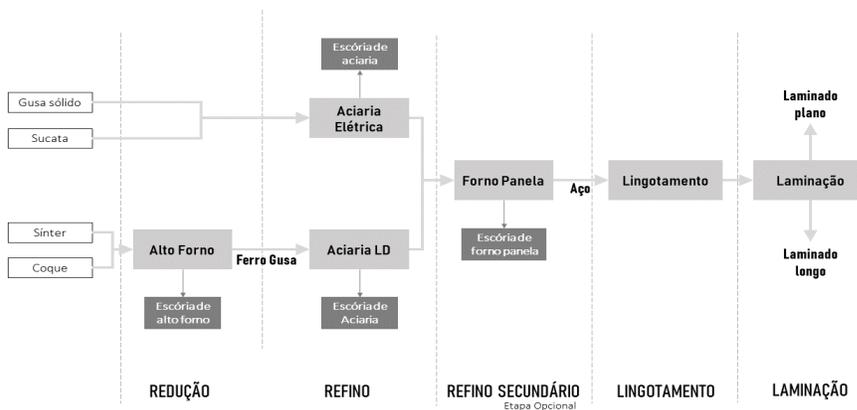


Fonte: Os autores

No processo de redução para fabricação do aço, que acontece nos altos-fornos, é gerada um tipo de escória denominada de escória de alto forno, usualmente incorporada na cadeia produtiva do cimento, substituindo até 75% do clínquer presente nos cimentos Portland, NBR 16697 (ABNT, 2018).

Na etapa de refino (onde há distinção entre os fornos das rotas AE e LD) é gerada a escória de aciaria, quando necessário ocorre um refino secundário em forno panela (onde é ajustado temperatura e composição do aço), nesses casos gera-se também a escória de forno panela. O refino em forno panela melhora a produtividade do processamento do aço, além de permitir um maior equilíbrio térmico entre o refratário e o aço permitindo reduzir a temperatura do forno de refino primário, aumentando a vida útil do mesmo. A Figura 2 apresenta as etapas do processo produtivo do aço.

Figura 2 - Processo de produção do aço



Fonte: Os autores.

As demandas da sociedade impulsionam o crescimento constante da indústria siderúrgica. Entre 2010 e 2017 a produção de aço bruto mundial aumentou em média 16,9%, existindo assim uma busca permanente por soluções sustentáveis e viáveis para os diversos resíduos/coprodutos siderúrgicos (IABR, 2018; IABR, 2013). Destaca-se nesse ponto que a escória de aciaria representa 27% de todo resíduo gerado pela atividade siderúrgica, e que sua destinação principal é a disposição em depósitos (IABR, 2018). Por outro lado, o setor da construção civil é responsável por um crescente consumo de recursos naturais, proporcional aos avanços econômicos. Se levarmos em consideração um dueto em que se concentram grandes geradores de rejeitos de um lado e grandes consumidores de recursos naturais de outro, talvez tenhamos conseguido agrupar os melhores ingredientes para construção de uma solução sustentável para destinação dos rejeitos da siderurgia. Muitas pesquisas científicas e de desenvolvimento tecnológico sugerem a incorporação desses resíduos em matrizes cimentícias bem como em outras tantas diversas aplicações na construção civil e construção pesada.

Citam-se os estudos a seguir, que avaliaram a viabilidade ou a relevância da incorporação de escórias de aciaria como agregados (em diversas frações) em matrizes cimentícias, como: concretos (San-José, *et*

al., 2014; Souza, 2015; Monosi, *et al.*, 2016; Biskri, *et al.*, 2017); blocos de pavimentação (Silva, *et al.*, 2016); e blocos de alvenaria estrutural (Januzzi, *et al.*, 2019; Carvalho, *et al.*, 2017). A escória de aciaria também foi avaliada como estabilizador do solo (Diniz, *et al.*, 2017) e como material cimentante suplementar (Carvalho, *et al.*, 2019A; Wang, *et al.*, 2013; Shi, *et al.*, 2017). Considerando a grande geração de escória de aciaria e a demanda crescente da construção civil é imperativo que atividades de pesquisas sejam desenvolvidas, a fim de aumentar o conhecimento sobre o material e suas aplicações.

Caracterização da escória

Considerando as alternativas em que as escórias de aciaria possam ser inseridas na cadeia produtiva da construção civil, é fundamental que se conheçam as características e o comportamento destes materiais, independentemente da rota de refino do aço (por arco elétrico ou Linz-Donawitz) os óxidos de ferro, silício e cálcio representam os componentes em maior proporção nas escórias de aciaria. Na Tabela 1 encontra-se os teores de óxidos de diferentes escórias de aciaria obtidos por fluorescência de raios-X.

Tabela 1 - Composição Química da Escória de Aciaria

Óxidos (%)	(Franco, <i>et al.</i> , 2019)	(Franco, <i>et al.</i> , 2019)	(Silva, <i>et al.</i> , 2016)	(Silva, <i>et al.</i> , 2016)	(Carvalho, <i>et al.</i> , 2019B)	(Santamaria, <i>et al.</i> , 2018)
Escória	LD	AE	LD	AE	LD	AE
CaO	40.3	34.1	38.7	32.3	37.1	32.9
Fe2O3	28.3	33	27	30	32.1	22.3
SiO2	10.6	16.5	10.3	17.5	14.4	20.3
MgO	8.5	7.3	8.2	7.5	5.6	3.0
MnO	5.0	6.1	5.4	4.64	3.7	5.1
Al2O3	3.1	3.2	3.9	4.2	3.7	12.2
Outros	1.9	1.1	1.7	1.38	3.4	3.72

Fonte: Os autores.

As escórias de aciaria podem apresentar teores significativos de óxidos expansivos, como CaO (30-40%), MgO (3-5%) e óxidos de ferro (22-33%). Os óxidos livres sob a influência da água se hidratam e observam uma expansão volumétrica que geram tensões internas que induzem a formação de fissuras que prejudicam a durabilidade dos elementos construtivos que contenham esse material (Motz & Geiseler, 2001; Silva, *et al.*, 2016).

Apesar dos óxidos CaO e MgO exibirem comportamento expansivo na presença de água, a hidratação dos óxidos de ferro pode ser ainda mais prejudicial para matrizes cimentícias, podendo gerar um aumento de volume em até 300% (Silva, *et al.*, 2016).

Pensando nas construções de concreto de cimento Portland, a estabilidade volumétrica dos materiais de construção é uma característica fundamental para sua utilização. Por essa razão, é de grande importância que haja operações prévias de processamento das escórias para neutralização dos efeitos expansivos. O beneficiamento da escória de aciaria pode se dar através de operações unitárias de separação magnética seguidas por uma intemperização que pode ser acelerada pela exposição das escórias a ciclos de molhagem e secagem. Essas operações têm se mostrado eficientes para mitigação dos efeitos deletérios observados nos óxidos livres (Diniz, *et al.*, 2017; Silva, *et al.*, 2016). As operações de separação magnética devem garantir teores de óxidos de ferro livre em concentrações em massa inferiores a 5%, para que a estabilidade e durabilidade das matrizes seja possível.

Pang *et al.* (2015) analisaram a estabilidade da uma escória de aciaria LD utilizando dois testes de expansão: em autoclave com um ensaio catalítico acelerado; e, por imersão em 1 mol/L de hidróxido de sódio (NaOH) que acelera as reações de cálcio e magnésio. Em ambos os ensaios, o autor encontrou boa estabilidade volumétrica para as argamassas com agregado de escória de aciaria intemperizados, obtendo uma retração menor do que as argamassas com agregado natural.

Toffolo (2015) avaliou a expansibilidade de agregados de escória de aciaria através de ciclos de molhagem e secagem realizados em concretos para pavimentação com baixo consumo de cimento (CCR –

concreto compactado rolado) produzidos integralmente com agregados de escórias (LD e AE) e convencionais (gnaisse e areia de rio). O programa experimental mostrou haver uma variação de linear de 0,70% e 0,22% e -0,01%, respectivamente para agregados LD, AE e convencionais. Os resultados mostraram viabilidade para utilização de escórias de aciaria tipo AE na construção de concretos para pavimentação.

As principais fases encontradas na escória são calcita (CaCO_3); brownmillerita ($\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$) e larnita (Ca_2SiO_4), em menores proporções há wuestita (FeO); portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e periclásio (MgO) (Carvalho, *et al.*, 2019A; Costa, 2019; Carvalho, *et al.*, 2019B; Silva, *et al.*, 2016). Os processos de beneficiamento para recuperação de óxidos metálicos e a seguinte intemperização são capazes de produzir agregados estáveis em que o cálcio, magnésio e ferro, que poderiam ter efeito nocivo à durabilidade, se encontram em sua maioria combinados com outros elementos, em formas estáveis.

Com relação a viabilidade ambiental para utilização da escória de aciaria, Diniz *et al* (2017) analisaram seu desempenho sob lixiviação e dissolução de acordo com NBR 10004. O concreto com agregado de escória de aciaria foi classificado ambientalmente como Classe IIA (material não inerte e não perigoso), mesma classificação de concreto com agregado convencional e solo estabilizado com cimento Portland (Silva, *et al.*, 2016). O único valor acima do permitido por norma foi o teor de ferro e alumínio, assim como o cimento Portland.

Com relação às propriedades físicas da escória de aciaria, a Tabela 2 apresenta as características físicas médias obtidas por alguns autores para escórias de aciaria (LD e AE), quando aplicadas às matrizes cimentícias.

Tabela 2 - Características físicas da escória de aciaria

	(Silva, <i>et al.</i> , 2016)	(Maslehuddin, <i>et al.</i> , 2003)	(Carvalho, <i>et al.</i> , 2019A)	(Franco, <i>et al.</i> , 2019)	(Franco, <i>et al.</i> , 2019)
Tipo	LD	AE	LD	AE	LD
Massa específica (g/cm ³)	3.50	3.51	3.77	3.59	3.32
Massa unitária (g/cm ³)	-	-	1.94	1.86	1.74
Aplicação	Agregado graúdo (DMC 12,5mm)	Agregado graúdo (DMC 19mm)	Agregado graúdo (DMC 12,5mm)	Agregado graúdo (DMC 19mm)	Agregado graúdo (DMC 19mm)

Fonte: Os autores.

Observa-se que a massa específica dos agregados de escória de aciaria (LD e AE) variou entre 3.32 g/m³ e 3.77 g/m³. Agregados convencionais de gnaiss possuem massa específica entorno de 2.6 g/cm³ e basalto aproximadamente 2.9 g/cm³ (Saxena & Tembhurkar, 2018). Diversos autores justificam a elevada massa específica da escória de aciaria pela presença de óxidos metálicos (Diniz, *et al.*, 2017; Toffolo, 2015).

Com relação a outras propriedades físicas como absorção de água e material pulverulento, há uma grande variabilidade, função da origem e do tipo de beneficiamento destas escórias, mas nada que não possa ser tratado de forma adequada. Por isso, encontrar um consenso acerca das propriedades na escória de aciaria, não é uma tarefa tão simples.

A propriedade mecânica das escórias de aciaria pode ser avaliada a partir do teste de esmagamento, em que se determina a resistência à compressão do agregado graúdo. Costa (2019) observou uma resistência ao esmagamento de 89,41% para escória de aciaria LD, resultado 38% maior do que a resistência do agregado convencional de gnaiss. Esses resultados confirmam a alta dureza desse material.

Estabilização de solos

O Brasil possui a quarta maior malha rodoviária do mundo, por isso avaliar técnicas mais sustentáveis e eficientes de estabilização dos solos é essencial para melhorar a infraestrutura rodoviária do país (Diniz, *et al.*, 2017). Materiais a base de cálcio, como cimento e cal, tem sido os principais estabilizadores químicos utilizados na atualidade, mas sabe-se que a produção desses insumos tem um alto custo econômico e geram grande impacto ambiental. Há uma busca constante pela estabilização dos solos com baixos teores de cimento, buscando produzir um conjunto com alta resistência, baixa plasticidade e baixa permeabilidade. Por isso, muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas na busca de alternativas para estabilização dos solos utilizando novos materiais, como a escória de aciaria.

Diniz *et al.* (2017) observaram que a utilização de 10% de escória de aciaria LD para estabilização do solo, melhora a resistência à compressão do solo em mais de 80%. Apesar desse bom desempenho, foi observado que amostras de solo estabilizados apenas com escória de aciaria poderiam ser utilizadas apenas como sub-leito, de acordo com o Índice de Suporte Califórnia (ISC). A NBR 7207 (1982) classifica a utilização de solos de acordo com seu ISC, sendo estabelecido que as seguintes faixas: sub-leito entre 2-20%; sub-base entre 20-80%; e base acima de 80%.

No entanto, composições mistas com finos de escória combinado a aglomerantes convencionais, como cal e cimento Portland, apresentaram resultados positivos. Foi observado que misturas com 15% de finos de escória de aciaria e 5% de cal tem ISC compatível com a utilização em sub-bases, substituindo o mesmo teor de dosagem de cal por cimento Portland há um aumento do ISC que permite a aplicação dessa mistura em bases (Diniz, *et al.*, 2017). Destaca-se que solos estabilizados apenas com cal ou cimento Portland, na proporção de 5% poderiam ser utilizados respectivamente apenas como sub-leito e sub-base e ainda assim não contribuíram para melhor destinação dos rejeitos de siderurgia.

Poh *et al.* (2006) também conseguiram alcançar bons resultados utilizando finos de escória de aciaria LD como estabilizador de solos. No

entanto, os autores utilizaram um ativador alcalino de silicato de sódio para melhorar o desempenho da escória de aciaria, com a finalidade de acelerar sua hidratação. Mas apesar da viabilidade técnica do uso da escória como estabilizador de solos, os autores enfatizaram o fato de que as amostras com escória de aciaria levaram um tempo maior para alcançar uma boa resistência a compressão, 1,4 MPa aos 28 dias, enquanto as amostras com estabilizador de Cimento Portland, obtiveram uma resistência de 2,5 MPa no mesmo tempo. Esse resultado é similar ao encontrado por Diniz *et al.* (2017), no entanto a combinação da escória de aciaria com cimento Portland e cal em menores proporções mitiga esse efeito e torna a resistência mecânica do solo similar ao estabilizado com aglomerantes convencionais.

Assim, é possível observar que a escória de aciaria possui um grande potencial para aplicação ambientalmente adequada e sustentável para a estabilização de solos, diminuindo significativamente o uso de aglomerantes convencionais com grande impacto ambiental, como a cal e o cimento Portland, que tem elevada emissão de CO₂ durante sua produção. Aliás, a inclusão de escórias de aciaria como aglomerante para estabilização de solos reduz o lançamento de aproximadamente 55 kg de CO₂ na atmosfera para cada metro cúbico de solo estabilizado, o que significam cerca de 231 toneladas de CO₂ por quilometro de rodovia.

Concreto com escória de aciaria

A necessidade da elaboração de matrizes cimentícias mais sustentáveis tem sido abordada por diversos pesquisadores em todo o mundo, uma vez que o concreto é o segundo material mais consumido pela humanidade. Dessa forma, a utilização da escória de aciaria como materiais granulares e finos pode significar vantagem produtiva, econômica e ambiental ao desenvolvimento de concretos de cimento Portland ao substituir os materiais convencionais.

A utilização das escórias de aciaria como agregados em concretos é uma opção viável, uma vez que possuem desempenho semelhante a um concreto com agregado convencional. Andrade (2018) produziu concretos com substituição total dos agregados por escória de aciaria AE e LD. Nesse estudo os concretos com agregado de aciaria AE e LD alcançaram uma resistência à compressão 30% e 27% respectivamente maior que as matrizes convencionais. Essa melhora nas propriedades mecânicas promovida pela incorporação de escória de aciaria como agregado é um consenso na literatura, encontrada também por San-José *et al.* (2014), Tofollo (2015), Costa (2019), Souza (2015), entre outros. Com relação, a resistência a tração e módulos de elasticidade os concretos com escória de aciaria tiveram desempenho similar ao convencional.

Concretos fabricados com escória aciaria AE como agregado apresentam boas características de resistência em condições ambientais comuns, uma vez que suas propriedades mecânicas são completamente comparáveis (ou até melhores) aos concretos convencionais (Pellegrino & Gaddo, 2009). Esse comportamento é condizente com os resultados obtidos por Costa (2019) que avaliou concretos produzidos totalmente com agregado de escória de aciaria LD, e concluiu que a escória de aciaria LD não influencia negativamente a resistência ao ataque por cloretos e ainda incrementa a resistência mecânica. De forma geral, a incorporação de escória de aciaria em concretos melhora sua resistência tanto a cloretos quanto à carbonatação (Pang, *et al.*, 2015; Andrade, 2018).

No trabalho de Monosi *et al.* (2016) foram realizadas substituições parciais por agregado miúdo e substituição total do agregado graúdo por escória de aciaria AE em concretos com relação água/cimento (a/c) de 0,45 e 0,54. A resistência à compressão dos concretos de escória com a/c de 0,54 foi 30% superior ao concreto com agregados naturais, já para o menor a/c a resistência foi de 40% superior. O melhor desempenho mecânico foi atribuído a uma aderência mais eficiente entre a pasta e o agregado. No que compete as avaliações de fissuração e lixiviação, observou-se nesse trabalho que o emprego da escória não influenciou resultados ambientais de potencial contaminante do concreto.

Em seu trabalho, Biskri *et al.* (2017) produziu concretos de alto desempenho combinando agregados de escória de aciaria LD com adições minerais (como sílica ativa e escória granulada de alto forno). Essas misturas apresentaram resistência à compressão 20% superior aos concretos produzidos com agregado calcário. Tal fato deve-se principalmente à maior resistência e à textura da superfície dos agregados de escória de aciaria. Essas características podem gerar um melhor intertravamento mecânico com a pasta de cimento, implicando a diminuição da zona de transição e aumento da resistência à compressão do concreto de alto desempenho.

Apesar do bom desempenho mecânico dos concretos produzidos com agregados de escória de aciaria, existe a limitação da quantidade de óxidos livres. No entanto, diversos estudos avaliando a expansibilidade de concretos produzidos com agregado de escória de aciaria comprovaram que é possível estabilizar esses óxidos livres através de intemperização, como Souza (2015) e Tofollo (2015), ou por meio de um beneficiamento com agente quelantes e tratamento de abrasão como realizado por Ding *et al.* (2017).

Utilização da escória de aciaria na substituição do cimento

A utilização da escória de aciaria como adição mineral tem sido bastante considerada, devido à presença majoritária na sua constituição de estruturas inorgânicas ricas em Ca, Si e Fe, na forma de silicatos e óxidos. Além disso, os processos de cominuição podem alcançar granulometrias idênticas às do cimento. A adição de escória de aciaria finamente moída em matrizes cimentícias criam ambiente favorável ao desenvolvimento do efeito filler, que melhora as características físicas, mecânicas e os parâmetros de durabilidade das matrizes.

Microconcretos são matrizes cimentícias compostas apenas por agregado miúdo e com propriedades equivalentes ao concreto. Abordando o

conceito de empacotamento e dosagem ótima, Carvalho *et al.* (2019A) produziu traços para microconcretos compostos por cimento, finos de escória de aciaria LD e areia convencional que produziram elevada resistência à compressão. As matrizes produzidas foram fabricadas com taxas de substituição de cimento por finos de escória variando entre 10% e 60%. Aquelas com substituições de cimento por escória de aciaria em até 40% tiveram resistências à compressão no mínimo 9% superiores ao microconcreto de referência (entre 90-100 Mpa), a melhor combinação obtida para as dosagens foi com 10% de substituição de cimento por escória de aciaria., obtendo uma resistência 16,3% maior que a referência. Destaca-se que os microconcretos com 50% e 60% de substituição de cimento por escória de aciaria tiveram resistência à compressão maior que 87 MPa, apenas 4% inferior ao de referência, sendo fabricados com respectivamente 388 kg/m³ e 317 kg/m³ de cimento frente aos 771 kg/m³ do microconcreto de referência.

Os resultados desse estudo corroboraram com as conclusões de Qiang *et al.* (2013) de que para baixas relações água/finos e idades mais longas o desempenho físico e mecânico das matrizes com finos de escória desempenham papéis tão competentes quanto as matrizes com materiais convencionais. Xiaolu *et al.* (2014) avaliou pastas de cimento produzidas com escória de aciaria combinado a escória granulada de alto-forno moída, substituindo o cimento em respectivamente 15% e 35%. Observou-se que as resistências à compressão de pasta de cimento com escória de aciaria combinada à escória de alto forno foram similares aqueles produzidos apenas com 50% de escória de alto forno.

Os resultados de caracterização física, química e mecânica das matrizes com a incorporação de escória de aciaria como material cimentante suplementar em substituições ao cimento em diferentes proporções enfatizam a viabilidade técnica da utilização desse material (Qiang, *et al.*, 2013; Carvalho, *et al.*, 2019A). O desempenho notável das misturas com escória de aciaria se deve também em parte à ação cimentante dos finos de escória (Diniz, *et al.*, 2017; Wang, *et al.*, 2013).

Destaca-se que a ação cimentante esperada da escória é mais lenta e resultados melhores a longo prazo são esperados. Roslan *et al.* (2016) observou que concretos produzidos com 15% de substituição de cimento por escória de aciaria possuíam resistência à compressão equivalente aos de referência na idade de 28 dias, porém aos 90 dias superava o mesmo em aproximadamente 10%. Os resultados dos estudos de Jianga *et al.* (2018) indicam que a cominuição é uma maneira efetiva de incrementar a reatividade da escória de aciaria.

Elementos pré-moldados produzidos com escória de aciaria

Nas últimas décadas, pesquisadores vêm demonstrando a viabilidade da aplicação de escória de aciaria como agregado, adição em compósitos à base de cimento ou ainda como substituição ao cimento Portland.

Com relação a elementos pré-moldados, estudos sobre a produção de *pavers* (blocos de pavimentação) de concreto produzidos inteiramente com agregados (miúdo e graúdo) de escória de aciaria LD e AE de diferentes usinas siderúrgicas apresentaram propriedades mecânicas superior aqueles produzidos com agregados convencionais (Peixoto, *et al.*, 2012). Ao analisar os resultados do estudo de Silva *et al.* (2016) percebe-se que os ensaios de resistência à compressão e à flexão indicaram a viabilidade técnica dos *pavers* produzidos com escória de aciaria AE para pavimentação de estradas sujeitas à tráfegos leves (mínimo de 35 MPa de resistência à compressão – NBR 9781 (2013)), já para aqueles fabricados com escória de aciaria LD as resistências foram compatíveis com pavimentação de tráfego intensos ou com alta abrasão (mínimo de 50 MPa de resistência à compressão - NBR 9781 (2013)).

De forma geral, os *pavers* com agregado de escória de aciaria apresentam homogeneidade dimensional mesmo sob efeito de ciclos sucessivos de temperatura, molhagem e secagem (Peixoto, *et al.*, 2012). Isso demonstra

que o processo de separação magnética posterior aos processos unitários internos da siderurgia, a fim de obter uma fração metálica inferior a 6%, é eficiente na estabilização da escória de aciaria. Além disso, indica que os óxidos expansivos presentes na escória de aciaria não foram capazes de produzir perturbação estrutural significativa na matriz de cimento; o que viabiliza sua aplicação.

Carvalho *et al.* (2017) avaliaram o comportamento mecânico de blocos de alvenaria estrutural produzidos com escória de aciaria em substituição à agregados naturais. Com isso, foi observado que a resistência à compressão uniaxial média dos blocos produzidos a partir de escória de aciaria foi maior que a obtida para blocos produzidos com agregados naturais. Esses resultados estão em concordância com o que já foi avaliado por Gomes *et al.* (2011), Santos (2011) e Peixoto *et al.* (2014). Essa melhora no desempenho mecânico dos blocos está relacionada a maior resistência ao esmagamento dos agregados de escória de aciaria, visto que componentes mais resistentes tendem a melhorar o desempenho das matrizes. Além disso, a escória de aciaria é um material higroscópico, assim a água presente nos vazios dos grãos de escória pode ser transferida para a pasta, em um segundo momento, possibilitando uma espécie de cura endógena. Nas matrizes produzidas com agregado natural, parte da água de hidratação é perdida, a relação água/cimento diminui e gera uma matriz mais porosa que resulta em perda de resistência nos blocos.

Com relação ao ensaio de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson dos blocos realizados através da NBR 8522 (2008), não houve uma convergência para os resultados, tanto para os blocos de escória de aciaria como para os de agregado natural. Essa variação pode ser atribuída ao processo de produção industrial dos lotes de blocos, na fábrica de pré-moldados, uma vez que as variações podem ser observadas tanto para blocos produzidos com escórias quanto com agregados naturais. Os dados obtidos para caracterização mecânica dos blocos encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas de blocos de alvenaria produzidos a partir de agregados de EA (BE) e agregados naturais (BN)

Blocos produzidos com agregados de EA (BE)					
Amostra	Área bruta (mm ²)	Resistência (KN)	Tensão (N/mm ²)	Módulo de elasticidade (N/mm ²)	Coefficiente de Poisson
BE01	401	895	22,32	23,27	0,30
BE02	398	582,34	14,63	25,45	0,45
BE03	399	736,5	18,46	19,85	0,37
BE04	399	595,7	14,93	24,81	0,43
Média	399	702,3	17,6	-	-
Blocos produzidos com agregados naturais (BN)					
Amostra	Área bruta (mm ²)	Resistência (KN)	Tensão (N/mm ²)	Módulo de elasticidade (N/mm ²)	Coefficiente de Poisson
BN01	400	474,80	11,96	8,73	0,15
BN02	400	658,40	16,46	18,6	0,16
BN03	400	362,40	9,06	4,72	0,17
BN04	400	587,60	14,69	(*)	(*)
Média	400	520,80	13,04	-	-

Fonte: adaptada de Carvalho *et al.* (2017)

(*) Falha na obtenção de dados

Mahoutian & Shao (2016) também avaliaram a produção de blocos de construção, onde o cimento Portland e o agregado natural foram substituídos por material fino de escória de aciaria e agregado de escória de alto forno leve expandido, respectivamente. Os resultados demonstram que o bloco de concreto com utilização de escória exibiu melhores propriedades mecânicas e de durabilidade do que o bloco comercial de cimento. Quanto a análise de custo, os blocos de concreto com escória podem ser feitos a um custo menor comparado ao bloco convencional, se forem produzidos em massa.

A fim de avaliar a performance dos elementos pré-fabricados como elementos construtivos, e em particular, considerando o desempenho térmico das edificações, estão sendo construídas unidades habitacionais

construídas com concretos e argamassas produzidos integralmente com agregados de escória de aciaria. Esse conjunto de habitações de interesse social será denominado “Vila Sustentável”. Vale ressaltar que esta estratégia não requer alterações nos projetos arquitetônicos e/ou técnicas de construção (Figura 3).

Figura 3: Complexo Vila Sustentável (a) Maquete Virtual 3D (b) Construção



Fonte: Os autores.

O desempenho térmico dos protótipos das habitações foi avaliado por Franco *et al.* (2019) com a ajuda de um software para simulação (EnergyPlus 8.6). Uma simulação da construção das habitações com elementos construtivos fabricados com agregados de escória de aciaria (LD e AE) e com agregados naturais foi implementada. Observou-se que os concretos e argamassas produzidos com escória de aciaria apresentaram condutividade térmica consideravelmente menor que os convencionais. Provavelmente, por consequência da composição química e da forma das partículas do agregado. A forma angular e elevada porosidade da escória de aciaria promovem uma maior entrada de ar na matriz, induzindo, juntamente com seu alto teor de amorfização, a redução da condutividade térmica de matrizes cimentícias produzidas. Além disso, esse resíduo siderúrgico apresenta em geral um alto grau de materiais amorfos, o que diminui sua condutividade por transferência de calor. Consequentemente, há maior conforto térmico e habitabilidade nesse tipo de edificação.

Viabilidade técnica e econômica do beneficiamento da escória de aciaria

Os principais objetivos da gestão sustentável consistem em resguardar a saúde humana e preservar os recursos naturais por meio de estratégias que visam evitar problemas futuros (Allesch & Brunner, 2014). Nesse cenário, a viabilidade técnica em aplicar a escória de aciaria como agregado reciclado em diversos elementos construtivos, contribui diretamente com a preservação dos recursos naturais e disposição inadequada de rejeitos. Os ganhos da reutilização da escória de aciaria na construção civil não devem ser medidos apenas pela sua contribuição financeira para as empresas geradoras, visto que o manejo desse resíduo pela indústria siderúrgica gera prejuízos econômicos e ambientais. Além disso, a incorporação da escória de aciaria na construção civil reduz o consumo de recursos naturais desse setor (Allesch & Brunner, 2014).

Todos esses fatores se aplicam à logística reversa, que é o processo de planejar, implementar e controlar o fluxo de matérias-primas e de produtos acabados, do ponto de consumo até o de origem. É um modelo de negócio sistemático que alinha as metodologias mais conhecidas de engenharia e gestão para fechar, com rentabilidade, o ciclo em uma Cadeia de Suprimentos (Meade, *et al.*, 2007). Seu objetivo é reconquistar valor ou promover o descarte adequado de acordo com as recomendações da ISO 14001 e Sistemas de Gestão Ambiental (ABNT, 2015). Atualmente, são despendidos cerca de US\$ 13,7 milhões por ano com a destinação adequada da escória de aciaria (IABR, 2018). Uma solução para minimizar os custos seria dispor para aplicações ambientalmente adequadas e reutilizar a grande quantidade de escória disponível, descartando a necessidade de grandes áreas para depósito e reduzindo seu impacto ambiental (IBS, 2009).

A reutilização da escória de aciaria como agregados cria oportunidades de negócio quando se recuperam materiais metálicos contidos na massa da escória bruta (Januzzi, *et al.*, 2019; Haltiery, *et al.*, 2014) após o

processamento primário nas siderurgias. O processamento na siderurgia consiste da separação magnética em frações metálicas com diâmetros maiores que 25 mm e frações não metálicas. A fração metálica recuperada com dimensões superiores a 25 mm retorna ao ciclo de produção de aço, reduzindo a extração de matérias-primas e o consumo de energia. Por sua vez, a fração não metálica é submetida a esmagamento e classificação de acordo com a distribuição de tamanho e disposta nos pátios de rejeitos.

Essa fração não metálica ainda conserva em sua massa, cerca de 30% de materiais metálicos com dimensões inferiores a 25 mm passíveis de recuperação em etapas de pós-processamento. O material metálico recuperado no pós-processamento garante o financiamento das operações de destinação da escória de aciaria e sua reutilização como agregado na camada de base para estradas, fabricação de elementos de concreto pré-moldado, como blocos de alvenaria e pavers, como mostrado pelos trabalhos de Behiry (2013) e Diniz, *et al.* (2017).

Tendo em vista o modelo de negócios para o pós-processamento das escórias de aciaria, Gonçalves *et al.* (2016) estudaram a viabilidade econômica para instalação de uma planta industrial para o pós-processamento de escórias de aciaria (AE e LD), com uma nova segregação magnética (recuperando material metálico inferior a 25 mm) e considerando a possibilidade econômica de reutilizar as frações não-metálicas como matéria-prima em substituição integral aos agregados naturais para a produção de pré-fabricados de concreto. De acordo com o modelo proposto por uma simulação de Monte Carlo e as condições de contorno aplicadas, os resultados obtidos para o cenário realista foram: viabilidade econômica de 98%, taxa interna de retorno de 61,4%, com lucro de 42% e retorno sobre o investimento em 2,5 anos.

Conclusões gerais

A escória de aciaria possui composição química e mineralógica que permite múltiplas aplicações na construção civil, desde que adequada-

mente tratada e pós-processada. Sua utilização em matrizes cimentícias como agregado e/ou material fino (em substituição ao cimento) produz concretos duráveis e com melhor desempenho mecânico, possibilitando reduções significativas no consumo de cimento. Permite ainda, contribuir com a redução das emissões de CO₂ da indústria cimenteira. Além disso, a incorporação da escória de aciaria em elementos pré-moldados como blocos de alvenaria estrutural tem relevância social considerando o grande déficit habitacional Brasileiro (6 milhões de moradias), onde os principais afetados são famílias de baixa renda (Fundação João Pinheiro, 2016).

Além disso, a escória de aciaria apresenta resultados relevantes permitindo sua utilização na infraestrutura rodoviária, seja na estabilização de solos (na composição de base e sub-base) ou na pavimentação de vias de tráfego com *pavers*. Estudos ainda revelam a viabilidade econômica da instalação de plantas de beneficiamento desse resíduo, que permite agregar valor a um material que atualmente é destinado a depósitos.

Considerando a significativa participação brasileira na produção de aço mundial e as demandas crescentes da construção civil por matéria-prima, o Brasil pode contribuir diretamente na implementação de um novo conceito de indústria e processos industriais que utilizem rejeitos em sua linha de produção (Juras, 2015; Tripathi & Chaudhary, 2016; IABR, 2018). O processo de inserção de resíduos na cadeia produtiva reduz custos de produção, agrega valor ao produto final e gera economia de energia (Rombach, 2013).

Referências

ABNT, 1982. *NBR 7207: Terminologia e classificação de pavimentação*. Rio de Janeiro: s.n.

ABNT, 2004. *NBR 10004 - Resíduos sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro: s.n.

ABNT, 2008. *NBR 8522 Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*. Rio de Janeiro: s.n.

ABNT, 2013. *NBR 9781 - Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio*. Rio de Janeiro: s.n.

ABNT, 2015. *NBR ISO 14001*. In: *ISO 14001*. Rio de Janeiro : ABNT.

ABNT, 2018. *NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro: s.n.

Allesch, A. & Brunner, P. H., 2014. Assessment methods for solid waste management: A literature review. *Waste Management & Research*, Volume 32, pp. 461-473.

Andrade, H. D., 2018. *Carbonatação em Concretos de Escória de Aciaria*. Ouro Preto: Diss. Mestrado.

Behiry, A. E., 2013. Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures. *Ain Shams Engineering Journal*, pp. 351-363.

Biskri, Y., Achoura, D., Chelghoum, N. & Mouret, M., 2017. Mechanical and durability characteristics of High Performance Concrete containing steel slag and crystalized slag as aggregates. *Construction and Building Materials*, Volume 150, pp. 167-178.

Carvalho, J. *et al.*, 2017. Study of the Mechanical Behavior of Blocks for Structural Masonry Produced with Steel Slag in Substitution of Natural Aggregates. *Masonry International*, 30(2), pp. 31-38.

Carvalho, J. *et al.*, 2019B. Low environmental impact cement produced entirely from industrial and mining waste. *Journal of Materials in Civil Engineering*.

Carvalho, J. *et al.*, 2019A. More eco-efficient concrete: an approach on optimization and use of waste-based supplementary cementing materials. *Construction and Building Materials*, Volume 206, pp. 397-409.

Carvalho, J. M. F. d., 2019C. *Obtention of eco-efficient cement based composites using industrial waste*, Ouro Preto: UFOP.

Costa, L. C. B., 2019. *Desempenho de concretos de escória de aciaria frente a ataque de cloretos*. Ouro Preto: Dissertação de Mestrado.

Ding, Y.-C., Cheng, T.-W., Liu, P.-C. & Lee, W.-H., 2017. Study on the treatment of BOF slag to replace fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, pp. 644-651.

Diniz, D. H., Carvalho, J. M. F., Mendes, J. C. & Peixoto, R. A. F., 2017. Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical Soil Stabilizer for Use in Roads. *Journal of Materials in Civil Engineering*.

Franco, L. C. *et al.*, 2019. Design and thermal evaluation of a social housing model conceived with bioclimatic principles and recycled aggregates. *Sustainable Cities and Society*.

Fundação João Pinheiro, 2016. *Déficit habitacional no Brasil 2013-2014*, Belo Horizonte: Centro de Estatística e Informação.

Gomes, V. e. a., 2011. *Utilização de resíduos de granito como substituição ao cimento Portland em matriz cimentícia*. Florianópolis: s.n.

Gonçalves, D. R. *et al.*, 2016. Evaluation of the economic feasibility of processing plant for steelmaking slag. *Wast & Management*, 34(2), pp. 107-120.

Haltier, D. *et al.*, 2014. Blocos de concreto produzidos com escória de aciaria para uso em alvenaria modular. In: *Anais do 56º Congresso Brasileiro de Concreto*. Natal: IBRACON, pp. 1 - 16.

IABR, 2013. *Relatório de Sustentabilidade 201*. Disponível em: <(acobrasil.org.br)> Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil.

IABR, 2018. *Relatório de Sustentabilidade 2016-2017*. Disponível em: <(acobrasil.org.br)> Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil.

IBS, 2009. *INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA*. [Online].

Januzzi, R., Costa, L., Peixoto, R. & Cury, A., 2019. Study of the mechanical behavior of prisms composed by two blocks produced with electrical steel slag for structural masonry. *Masonry International*, Volume 31, pp. 80-87.

Jianga, Y., Linga, T.-C., Shia, C. & Panb, S.-Y., 2018. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review. *Resources, Conservation & Recycling*, pp. 187-197.

Juras, I. d. A. G. M., 2015. *Os impactos da indústria no meio ambiente*, Brasília: s.n.

Mahoutian, M. & Shao, Y., 2016. Production of cement-free construction blocks from industry wastes. *Journal of Cleaner Production*, Volume 137, pp. 1339-1346.

Maslehuddin, M. *et al.*, 2003. Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, pp. 105-112.

Meade, L., Sparkis, J. & Presley, A., 2007. The theory and practice of Reverse Logistics. *International Journal of Logistics Systems and Management*.

- Monosi, S., Ruello, M. & Sani, D., 2016. Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production. *Cement and Concrete Composites*, Volume 66, pp. 66-72.
- Motz, H. & Geiseler, J., 2001. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste Management*, pp. 285-293.
- Pang, B., Zhou, Z. & Xu, H., 2015. Utilization of carbonated and granulated steel slag aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, pp. 454-467.
- Peixoto, R. e. a., 2014. *Aplicação da escória de aciaria como agregado em concreto para pavimentação*. Natal: s.n.
- Peixoto, R. et al., 2012. *Relatórios técnicos - Arcelor Mital: concreto, argamassa blocos de concreto para alvenaria e para pavimentação*, Ouro Preto: s.n.
- Pellegrino, C. & Gaddo, V., 2009. Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag. *Cement & Concrete Composites*, p. 663–671.
- Poh, H. Y., Ghataora, G. S. & Ghazireh, N., 2006. Soil Stabilization Using Basic Oxygen Steel Slag Fines. *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 229-240.
- Qiang, W., Peiyu, Y., Jianwei, Y. & Bo, Z., 2013. Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete. *Construction and Building materials*, pp. 1414-1420.
- Rombach, G., 2013. Raw material supply by aluminium recycling – Efficiency evaluation and long-term availability. *Acta Materialia*, pp. 1012-1020.

Roslan, N. *et al.*, 2016. Performance of steel slag and steel sludge in concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 104, pp. 16-24.

San-José, J., Vegas, I., Arribas, I. & Marcos, I., 2014. The performance of steel-making slag concretes in the hardened state. *Materials and Design*, Volume 60, pp. 612-619.

Santamaria, A., Orbe, A., San José, J. & González, J., 2018. A study on the durability of structural concrete incorporating electric steelmaking slags. *Construction and Building Materials*, Volume 161, pp. 94-111.

Santos, C., 2011. *Análise de blocos estruturais de concreto utilizando o a técnica de ultrassom*. Belo Horizonte: s.n.

Saxena, S. & Tembhurkar, A., 2018. Impact of use of steel slag as coarse aggregate and wastewater on fresh and hardness properties of concrete. *Construction and Building Materials*, pp. 126-137.

Shi, Y., Chen, H., Wang, J. & Feng, Q., 2017. Preliminary investigation on the pozzolanic activity of superfine steel slag. *Construction and Building Materials*, Volume 82, pp. 227-234.

Silva, M. *et al.*, 2016. Feasibility Study of Steel Slag Aggregates in Precast Concrete Pavers. *ACI MATERIALS JOURNAL*, Volume 113, pp. 439-446.

Souza, ., B. d., 2015. *ADERÊNCIA DE BARRAS DE AÇO TIPO CA EM CONCRETO SUSTENTÁVEL*. Ouro Preto: Dissertação de Mestrado.

Toffolo, R. V. M., 2015. *Pavimentos Sustentáveis*. Ouro Preto: Dissertação de Mestrado.

Tripathi, B. & Chaudhary, S., 2016. Performance based on evaluation of ISF slag as substitute of natural sand in concrete. *Journal of Cleaner Production*, Volume 112, pp. 672-683.

Wang, Q., Yang, J. & Yan, P., 2013. Cementitious properties of super-fine steel slag. *Powder Technology*, Volume 245, pp. 35-39.

Xiaolu, G., Huisheng, S. & Kai, W., 2014. Effects of Steel Slag Powder on Workability and Durability of Concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater.*

CAPÍTULO 5

REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE BARRAGEM DE MINÉRIO DE FERRO EM CONSTRUÇÃO CIVIL E INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA

Júlia Castro Mendes, Júnio Oliveira dos Santos Batista, Aline Santana Figueiredo, Luana Drago Kuster, Vanessa Pereira Santana, Juliana Fadini Natalli, Guilherme Jorge Brigolini Silva e Ricardo André Fiorotti Peixoto⁵

Universidade Federal de Ouro Preto/ Brasil

Introdução

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2018), somente em 2017 o Brasil extraiu 585 milhões de toneladas de minério de ferro, sendo o terceiro maior exportador mundial. De acordo com o relatório, esse minério tinha um teor médio de ferro de 54,4%.

O minério de ferro comercializado internamente ou exportado passa por um processo de beneficiamento para concentração dos óxidos de ferro. Embora os métodos modernos não incluam água no beneficiamento, a mineração brasileira depende fortemente de processos à base de água (ÁVILA, 2012). Como resultado, o minério concentrado é vendido para indústrias siderúrgicas em todo o mundo, enquanto as empresas de mineração brasileira são deixadas com uma lama composta de minérios de ferro pobres (baixo teor), areia, argila e água: o rejeito de minério de ferro. A figura 1 mostra esse rejeito após secagem.

⁵ julia.mendes@ufop.edu.br; junio.batista@aluno.ufop.edu.br; aline.figueiredo1@aluno.ufop.edu.br; luana.kuster@aluno.ufop.edu.br; vanessa.santana@aluno.ufop.edu.br; juliana.natalli@aluno.ufop.edu.br; guilhermebrigolini@ufop.edu.br ricardofiorotti@ufop.edu.br

O rejeito convencional normalmente possui entre 30 a 50% de sólidos (FRANKS *et al.*, 2011). Devido à sua reologia fluida, as barragens de rejeitos são o destino típico desse resíduo no Brasil (ÁVILA, 2012). Essas barragens são normalmente construídas usando a fração grossa dos próprios rejeitos, com inclinações íngremes e alteamentos sucessivos (GOMES; TOMI; ASSIS, 2016).

Com o avanço das atividades de mineração e o aumento da escala de operação, muitas dessas barragens passaram a apresentar riscos estruturais (ÁVILA, 2012). Como resultado da má gestão dos resíduos e das barragens, grandes colapsos ocorreram no Brasil, como mostra a figura 2. Esses desastres levaram à liberação de milhões de toneladas de rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF), várias vítimas e um expressivo impacto em propriedades e nos ecossistemas.

Figura 1 – Rejeito de Barragem de minério de ferro (RBMF) seco.



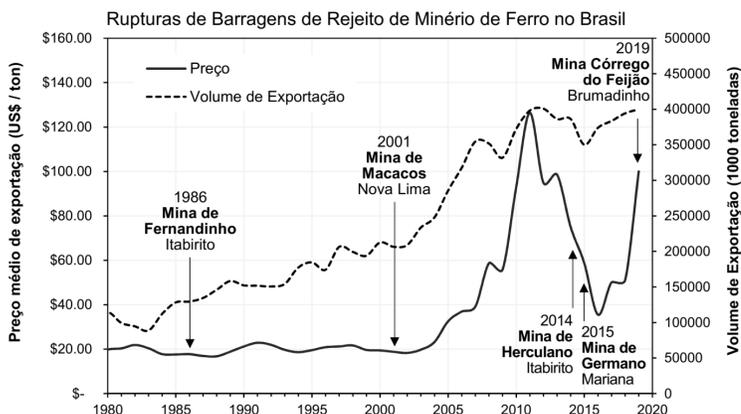
(a) Tamanho natural



(b) Microscópio óptico com aumento 20x

Fonte: Autores

Figura 2 – Gráfico de variação de preço e volume de exportação do minério de ferro, segundo o Ministério de Minas e Energia, juntamente com os casos de rupturas de barragens de RBMF no Brasil nas últimas décadas.



Fonte: Os autores.

Apesar dos impactos socioambientais decorrentes da implantação de uma mineradora, a indústria de mineração responde por uma parcela significativa da economia brasileira. Portanto, é imperativo que as empresas desenvolvam tecnologias de produção mais limpas e menos arriscadas e forneçam apoio social às comunidades afetadas (JENKINS; YAKOVLEVA, 2006). Alguns exemplos de tecnologias aprimoradas de gerenciamento de resíduos são o espessamento dos rejeitos, deixando o material em uma forma mais estável (GOMES, TOMI; ASSIS, 2016); depósito em águas profundas; armazenamento em minas vazias e o reuso do rejeito.

Atualmente, políticas estão sendo estabelecidas no Brasil para melhorar o monitoramento de barragens, reduzir a produção de rejeitos e incentivar seu reaproveitamento. Em 2016, o Ministério Público Federal emitiu uma recomendação de que as empresas de mineração devem incorporar pelo menos 70% de seus resíduos em outros setores econômicos até 2025 (BRASIL, 2016). Dessa forma, esse cenário é propício para ações e pesquisas visando o reuso do RBMF nos setores de construção civil e de estradas.

A composição química do RBMF varia de acordo com a origem do minério de ferro e o método de processamento. A maioria dos pesquisadores encontra óxidos de ferro (8-68%), alumínio (0,2-17%) e silício (20-68%) em proporções variadas (CARVALHO *et al.*, 2019; DEFÁVERI *et al.*, 2019; FONTES *et al.*, 2018; MENDES *et al.*, 2019b; DUAN *et al.*, 2016; FONTES *et al.*, 2016; CHENG *et al.*, 2016; YELLISHETTY *et al.*, 2008). Em teores menores (< 3,0 %), também podem aparecer óxidos de potássio, manganês, zinco e fósforo. As principais fases cristalinas usualmente encontradas são quartzo, gibsita, hematita, goetita, dolomita e caulinita (CARVALHO *et al.*, 2019; DEFÁVERI *et al.*, 2019; FONTES *et al.*, 2018; MENDES *et al.*, 2019b; DUAN *et al.*, 2016; FONTES *et al.*, 2016; CHENG *et al.*, 2016; YELLISHETTY *et al.*, 2008). Essa composição é responsável pela alta massa específica do RBMF, como todos os autores notam.

Ainda, as análises de lixiviação e dissolução realizadas por Fontes *et al.* (2016) e Bastos *et al.* (2016) para o RBMF confirmam sua viabilidade ambiental. Para o teste de lixiviação, o RBMF apresentou todos os resultados dentro das prescrições da norma ambiental NBR 10004 (ABNT, 2004). Os testes de dissolução apresentaram apenas teor de alumínio, ferro e fenóis ligeiramente acima do limite padrão. As amostras foram então classificadas como Classe II A, não perigosas e não inertes. Portanto, o RBMF não apresenta características perigosas como corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade ou inflamabilidade (ABNT, 2004).

RBMF como agregado para matrizes cimentícias

Entre as pesquisas desenvolvidas com a finalidade de investigar a viabilidade do rejeito de minério de ferro (RBMF), destaca-se Fontes *et al.* (2016) e Mendes *et al.* (2019a) como agregado miúdo na produção de argamassas; Sant'Ana Filho *et al.* (2016) na fabricação de blocos intertravados para pavimentação e Shettima *et al.* (2016) e Santos *et al.* (2014) no desenvolvimento de concretos.

O estudo de Fontes *et al.* (2016) investigou a aplicabilidade do uso de rejeito de barragem de minério de ferro como agregado miúdo na composição de argamassas de revestimento. Ensaios de caracterização física realizados no material seco indicaram que o rejeito se encontrava fora da zona utilizável NBR 7211 (ABNT, 2009). O RBMF é um material muito fino, com 50% de suas partículas passantes na peneira de 75 µm e com módulo de finura igual a 0,61. Embora o material não atenda aos limites granulométricos normatizados, a norma permite que agregados com diferentes distribuições granulométricas sejam usados, dado que sua aplicabilidade seja comprovada pela análise morfológica e química, o que foi verificado (FONTES *et al.*, 2016).

Nesse estudo foram produzidas argamassas convencionais com relação 1:3 (aglomerante: agregado), compostas por cimento, cal e areia quartzosa de rio, denominadas TN. Argamassas constituídas por RBMF em substituição total aos agregados também foram produzidas, denominadas de TR. A tabela 1 mostra as dosagens das matrizes produzidas.

Tabela 1 - Dosagem das argamassas em volume.

Materiais	TN1	TN2	TN3	TR1	TR2	TR3
Cimento	1	0,5	–	1	0,5	–
Cal	–	0,5	1	–	0,5	1
RBMF	–	–	–	3	3	3
Areia	3	3	3	–	–	–

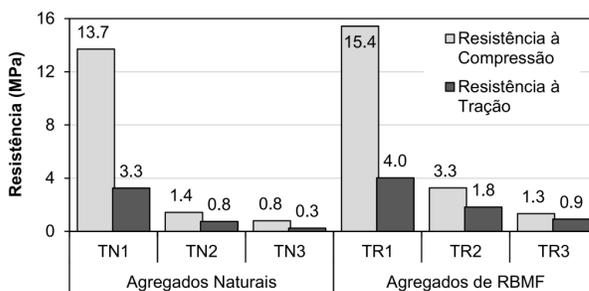
Fonte: (FONTES, *et al.*, 2016).

Durante a produção das matrizes, os autores verificaram que o aumento da proporção de RBMF resulta em uma maior quantidade de água para que o índice de consistência padrão pudesse ser atingido (ABNT, 2005). Em consequência desse fato houve um aumento da capacidade de incorporação de ar e redução da retenção de água nas argamassas fabricadas com rejeito.

Além disso, foi observado na dosagem construída apenas com agregados de rejeito (TR2 - 0,5 cimento, 0,5 cal e 3 RBMF) que a formação de trincas relacionadas ao fenômeno de retração da argamassa após a cura foi mais pronunciada. Isso se deveu ao aumento da porcentagem de finos na matriz com RBMF, tornando o seu uso inviável para substituição total do agregado natural nesse traço sem o uso de aditivos (FONTES *et al.*, 2016).

Em relação à resistência mecânica (figura 3), após o período de cura de 28 dias em câmara úmida o traço com RBMF TR1 obteve a resistência à compressão de 15,4 MPa, 13% superior aos 13,7 MPa do TN1. Da mesma forma, as argamassas de resíduo TR2 e TR3 se mostraram 128% e 67% mais resistentes que as naturais TN2 e TN3, respectivamente. A resistência a flexão das argamassas com cimento e RBMF (TR1 - 4,0 MPa) se mostrou 24% superior às argamassas convencionais (TN1 - 3,6 MPa). Similarmente, as argamassas TR2 e TR3 são 144% e 269% mais resistentes à flexão que TN2 e TN3, respectivamente. De acordo com esses resultados, pode-se verificar que a utilização do rejeito melhorou o desempenho mecânico das matrizes (FONTES *et al.*, 2016).

Figura 3 – Resistência mecânica das argamassas convencionais (TN) e com substituição total da areia por RBMF (TR).



Fonte: FONTES *et al.*, 2016.

Mendes, *et al.* (2019b) desenvolveram um trabalho avaliando a condutividade térmica de argamassas com incorporação de resíduos em substituição total aos agregados finos naturais, traços 1:3, 1:1:6 e 1:2:9

(cimento: cal: agregado miúdo). As argamassas de RBMF possuem uma condutividade térmica em média 47% menor do que as argamassas convencionais. Esse resultado se deveu à retenção de água e ao efeito filer promovidos pelas finas partículas de RBMF, que culminaram numa matriz com um grande número de poros muito pequenos. Essa reduzida condutividade térmica contribui para uma menor troca de calor entre os ambientes internos e externos das edificações, o que, por sua vez, auxilia a reduzir o gasto energético do condicionamento artificial.

Sant'Ana Filho *et al.* (2016) desenvolveu dosagens para blocos intertravados para pavimentação, *pavers*, substituindo o agregado miúdo natural pelo RBMF nos teores de 10%, 20% e 80%. Os blocos foram fabricados com cimento Portland tipo CPV - ARI, areia quartzosa de rio, RBMF, cascalho, aditivo plastificante e água (figura 4). O rejeito foi utilizado em seu estado bruto, submetido apenas a um processo de secagem ao ar e separação granulométrica na peneira de 150 µm. Os agregados miúdo e graúdo utilizados apresentaram D90 equivalentes a 1,2 mm e 8,7 mm, respectivamente.

Figura 4 - Paver intertravado produzido com RBMF em substituição à 80% da areia.



Fonte: Autores.

Os blocos foram moldados no modelo de 16 faces com 8 cm de altura, utilizando uma vib-prensa com um sistema automático de desmoldagem e subsequentemente armazenados em paletes. Os elementos foram curados por 70 dias. As dosagens foram projetadas visando uma resistência

à compressão de 50 MPa, necessária para estradas destinadas ao tráfego de veículos especiais ou aquelas que exigem controle significativo de abrasão (ABNT, 2013b). Devido à finura do RBMF e à sua alta superfície específica, as misturas com 20 e 80% de substituição exigiram mais água.

Os blocos para pavimentação foram analisados quanto à absorção de água após 42 dias de imersão, resistência à compressão (ABNT, 2013b) e resistência à abrasão (ASTM, 2001), em um dispositivo de roda de borracha usando alumina como partículas abrasivas.

Sant'Ana Filho *et al.* (2016) observou que os pavers produzidos com o resíduo da mineração apresentaram reduzida absorção de água e porosidade em comparação àqueles produzidos apenas com agregado natural. Isso ocorre devido à distribuição granulométrica do RBMF incluir uma grande proporção de partículas inferiores a 40 µm. Como o filler, o RBMF preenche os poros dos blocos e contribui para uma matriz mais homogênea, diminuindo a porosidade do concreto e conseqüentemente a sua absorção de água.

A tabela 2 compara os resultados de resistência à compressão de blocos para pavimentação produzidos com a maior substituição do resíduo de barragem. Também são apresentados valores obtidos por Shettima, *et al.* (2016), que produziu concreto com substituição total de RBMF.

Tabela 2 – Resistência à compressão de matrizes cimentícias produzidas com RBMF.

Traço	Pavers SANT'ANA FILHO et al., 2016		Concreto SHETIMA et al., 2016	
	Referência	Substituição	Referência	Substituição
	0%	80%	0%	100%
Cimento	1	1	1	1
Areia	1,8	0,36	2,16	0
Brita	1,03	1,03	2,66	2,66
RBMF	0	1,44	0	2,16
Água	0,16	0,29	0,5	0,5
Aditivo superplastificante (%)	0,02	0,02	0,5	0,5
Resistência à compressão (MPa)	62,6	48,9	38,0	38,5

Fonte: Os autores.

O ensaio de resistência à compressão realizado aos 70 dias apresentou para os *pavers* fabricados com agregados naturais a resistência de 62,6 MPa, superior aos *pavers* com 80% de RBMF, com 48,9 MPa. Os blocos produzidos com 10% e 20% de rejeito apresentaram resistência de 62,2 e 51,1 MPa, respectivamente.

Os testes de abrasão avaliaram a perda de massa total para cada traço e a perda de massa relativa à sua massa inicial. Para valores intermediários de substituição (10 e 20%), devido ao efeito filler, há uma menor perda de massa total, o que sugere uma maior durabilidade dessas misturas. O traço com 80% de RBMF, que apresentou a maior perda total de massa, exibiu uma perda de massa relativa de 0,15%, semelhante aos blocos de referência (SANT'ANA FILHO *et al.*, 2016).

A norma brasileira NBR 9781 (ABNT, 2013b) define que os blocos intertravados para pavimentação devem ter uma resistência à compressão mínima de 35 MPa para o tráfego comercial e 50 MPa para veículos especiais ou exposição a forte abrasão. Portanto, todas as dosagens são

aplicáveis a estradas com tráfego leve a intenso, que correspondem a quase 90% das estradas do país (DNIT, 2015).

Os concretos produzidos com 100% de substituição do agregado natural por RBMF no trabalho de Shettima, *et al.*(2016) apresentaram a resistência a compressão de 38,5 MPa. A resistência do concreto com RBMF foi próxima à do concreto produzido com agregado natural (38 MPa), embora o concreto com RBMF tenha apresentado um slump cerca de 39% menor. O autor também verificou absorção de água e profundidade de carbonatação menores para os concretos com RBMF.

Em uma investigação com 0,5% a 50% de substituição da areia natural por RBMF em concretos C20, C30 e C40, Santos *et al.* (2014) observaram que porcentagens até 10% demonstraram resultados equivalentes ou superiores aos de referência. A ação de fíler do rejeito provocou redução dos poros das matrizes, gerando uma composição mais homogênea e conferindo maior isotropia ao concreto (SANTOS *et al.*, 2014).

Em resumo, o RBMF tem um efeito de preenchimento dos poros, melhorando a integridade da matriz e como consequência, suas propriedades mecânicas e de durabilidade. Sua presença também reduz a trabalhabilidade da matriz. Se mantidos fixos os parâmetros de trabalhabilidade, como slump e índice de consistência, o RBMF leva a uma maior relação água/cimento. Esse fator faz com que as propriedades mecânicas diminuam com o acréscimo de rejeito, mas possivelmente pode ser mitigado com o uso de aditivos.

Portanto, os presentes resultados encorajam o uso do RBMF como material de construção na produção de argamassas para revestimento e assentamento de tijolos, blocos intertravados para pavimentação e concretos. Nesse sentido, o uso do RBMF surge como uma alternativa técnica e ambientalmente viável à exploração de recursos naturais na produção de matrizes cimentícias.

RBMF na produção de cerâmica vermelha

A argila é a matéria-prima mais utilizada na produção de cerâmica vermelha. Dentre os elementos que compõem as argilas, temos os argilo-minerais (principalmente caulinita, montmorilonita e ilita), compostos de ferro (principalmente magnetita e hematita) e a sílica. Estes elementos garantem as suas características principais como: plasticidade, resistência mecânica, retração linear na secagem, compactação, cor característica e permeabilidade (GRUN, 2007).

Visando empregar o rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF) na produção de cerâmicas, têm-se trabalhos recentes que estudam adição e substituição parcial (BARBOSA, 2017; MENDES, *et al.*, 2019a) e até mesmo a substituição total da argila convencional por rejeito (FONTES *et al.*, 2019). Esta última alternativa, porém, exige processos mais aperfeiçoados de beneficiamento deste rejeito.

Ao se beneficiar o RBMF, tem-se como objetivo aproximar ao máximo suas características às das argilas convencionalmente utilizadas na produção de cerâmica. O processo de segregação a seco utilizado por Fontes *et al.* (2019) consiste em secagem, moagem, separação por diferença de densidade e separação magnética. Ele resulta na separação das três frações dos materiais que compõem o rejeito, “areia” (fração mais grossa), “argila” (fração mais fina) e minério de ferro concentrado. A autora observou que as argilas obtidas pelo processo de beneficiamento do RBMF possuem características físicas, mineralógicas e químicas muito próximas às das argilas naturais.

A caracterização física e as composições mineralógica e química da fração argila obtida de RBMF coletado na barragem de Forquilha III do complexo de Itabirito – MG estão apresentadas nas tabelas 3 a 5.

Tabela 3 - Caracterização física da argila proveniente do beneficiamento de RBMF.

Massa específica	Massa unitária	D10	D50	D90
3,34 g/cm ³	0,53 g/cm ³	2 µm	10 µm	30 µm

Fonte: (FONTES *et al.*, 2019).

Tabela 4 - Composição química da argila proveniente do beneficiamento de RBMF.

Óxidos	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	MnO	Outros
%	18,81	20,04	0,6	0,3	57,32	2,62	0,03

Fonte: (FONTES *et al.*, 2019).

Tabela 5 - Composição mineralógica da argila proveniente do beneficiamento de RBMF.

Fases minerais	Hematita	Goethita	Caulinita
%	51,8	35,4	12,8

Fonte: (FONTES *et al.*, 2019).

Utilizando esta fração argila, Fontes *et al.* (2019) moldaram placas com 10% de teor de umidade, que posteriormente foram secas, queimadas e resfriadas. Diversos testes foram realizados com as placas, como: retração linear (variação dimensional), resistência mecânica à flexão e absorção de água (porosidade aberta).

Como resultado, foram obtidos revestimentos cerâmicos com plasticidade e resistência adequadas ao corpo verde, bem como boa resistência a tração na flexão das peças (53,4 MPa), baixa absorção de água após a queima (0,34%) e retração linear de 26,5% (FONTES *et al.*, 2019). Esta última característica tem correlação direta com a formação de fase líquida durante a queima (formação de mulita e vidro), que resultou em retração e fechamento de poros.

Os autores observaram que a presença de Fe₂O₃ e MnO teve grande influência na cor final da cerâmica. A caulinita, por outro lado, auxiliou no aumento da plasticidade do corpo verde. Os óxidos encontrados em

menor quantidade tiveram importante efeito de fluxo e, controladas as condições de queima, o óxido de ferro também atuou desta forma. Estas características bem como, o tamanho reduzido das partículas, justificam a sinterabilidade encontrada.

Como conclusão, os resultados encontrados por Fontes *et al.* (2019) garantem a viabilidade de produção de cerâmica vermelha a partir da fração argila do rejeito de barragem de minério de ferro.

RBMF como pigmento para materiais de construção

Outra possibilidade de aplicação do rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF) é como pigmento em materiais de construção, devido à sua coloração característica promovida pela alta concentração de óxido de ferro em sua composição. Existem publicações científicas a respeito da incorporação deste resíduo em função de seu potencial pigmentante, promovendo uma nova abordagem para a produção de materiais sustentáveis.

Nesse sentido, Fontes *et al.* (2018) avalia o desempenho de ladrilhos hidráulicos sustentáveis produzidos com RBMF como agregado e pigmento. Segundo Lee *et al.* (2003), os pigmentos utilizados em ladrilhos são compostos por partículas finas e insolúveis em água, com predominância de óxidos de ferro e de cromo em sua composição; sendo o RBMF, portanto, um candidato adequado.

Desta forma, a amostra de RBMF foi seca em estufa e submetida a um processo de segregação entre seus principais componentes: minério de ferro, areia e argila, o mesmo processo realizado para seu uso em cerâmicas. Para a produção dos ladrilhos, adotou-se a fração argilosa em função de sua alta concentração de ferro nas fases hematita e goetita, apresentando maior capacidade pigmentante. Para realçar a cor, a fração argilosa foi ainda calcinada a 950°C em um forno tipo mufla durante 120 minutos, a uma taxa de 3°C/min e posteriormente cominuído em um moinho planetário de bolas por 10 minutos sob rotação de 400 rpm. Esse material processado foi denominado “pigmento de RBMF”.

Foram moldadas peças de (5 × 5 × 2) cm na proporção de 2:1 (cimento Portland branco: agregado miúdo, em massa), empregando dois tipos de agregados: convencional (mármore branco triturado) e RBMF *in natura*. Nas peças que continham apenas agregados convencionais foram adicionados pigmento comercial, RBMF *in natura* e pigmento de RBMF; todos em teores de 5% e 10%. Alguns corpos de prova podem ser vistos na Figura 5. Em todos os traços foi fixado o teor água/cimento em 0,7. Sendo, então, procedida a avaliação RGB da faixa de tonalidades, qualidade da superfície e a proporção adequada de pigmento de RBMF, uma vez que a NBR 9457 (ABNT, 2013a) determina que as peças devam apresentar homogeneidade de cor, arestas bem definidas e ausência de fissuras, falhas ou protuberâncias. Todas as amostras apresentaram características satisfatórias em relação à normatização.

Figura 5 – Exemplos de ladrilhos produzidos com diferentes proporções de RBMF e pigmento de RBMF.



Fonte: Os autores

Nos ladrilhos com incorporação de RBMF apenas como agregado foi obtido um tom mais escuro à medida que se aumentaram os teores de rejeito. Nas peças com adição de RBMF *in natura* como pigmento foi observada propriedade pigmentante ligeiramente menor do que nas peças com a mesma quantidade de pigmento comercial. Por outro lado, as amostras produzidas com pigmento de RBMF apresentaram melhor *performance* do que as amostras com adição de RBMF *in natura*, ainda

que com cores mais suaves do que as amostras com pigmento comercial. Tais características foram observadas devido a um menor conteúdo de óxidos de ferro no RBMF em relação ao pigmento comercial, o que pode ser corrigido através do aumento do teor de pigmento de RBMF, que proporcionaria inclusive uma peça ainda mais sustentável.

Também foram produzidos ladrilhos com duas cores, que apresentaram bom contraste entre os tons e mantiveram o design sem mistura entre as duas partes, indicando, também, expressiva viabilidade técnica. De uma maneira geral, as amostras com RBMF em sua composição também apresentaram superfície regular, uniformidade das tonalidades, poros menores e em menor quantidade em comparação com as dosagens convencionais. Essas duas últimas atribuídas são atribuídas ao efeito filer do rejeito.

Os resultados obtidos por Fontes *et al.* (2018) estão de acordo com os apresentados por Sant'Ana Filho *et al.* (2016) em seu estudo a respeito do desenvolvimento de *pavers* com incorporação de RBMF e por Fontes *et al.* (2016) no desenvolvimento de argamassas de assentamento e revestimento com RBMF, submetidas a intempéries durante mais de 3 anos. Em todos estes trabalhos foi observada coloração homogênea e menor quantidade de poros do que nas matrizes elaboradas sem adição de RBMF. Além disso, a cor não desbotou com o tempo, clima ou desgaste da superfície, conforme observado após o teste de abrasão feito por Sant'Ana Filho *et al.* (2016).

Um estudo elaborado por Galvão *et al.* (2018) apresenta o desenvolvimento de tintas imobiliárias sustentáveis com a utilização de RBMF em substituição ao pigmento convencional. O rejeito foi submetido à secagem, destorroamento e peneiramento, tendo sido utilizada a fração passante na peneira #100 (150 µm). Como ligantes, foram testados cimento Portland de alta resistência inicial, cal hidratada para pintura; resina acrílica incolor à base de água para impermeabilização e polímero PVA proveniente de cola branca comum.

Para fins de comparação, foram utilizadas duas tintas imobiliárias comerciais que cumprem os requisitos da Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas (ABRAFATI, 2016). As tintas comerciais selecionadas

foram: uma tinta acrílica fosca e uma tinta látex PVA fosca, ambas de coloração avermelhada e à base de água, tendo sido então seguidos os processos de diluição e preparação recomendados pelo fabricante. Foram estabelecidas diversas proporções de tintas de RBMF com quantidades variadas dos aglutinantes investigados, além das duas amostras de tinta comercial.

Após a mistura, as amostras foram submetidas a uma análise visual de textura, trabalhabilidade e incorporação de ar. Em seguida, foram pintadas superfícies padronizadas com cada uma das misturas (figura 6), que passaram por avaliação de variabilidade de coloração através de um software de processamento de imagem, resistência à abrasão e custo dos materiais.

Figura 6 - Placas sendo pintadas com tintas sustentáveis com RBMF como pigmento.



Fonte: Os autores.

A partir dos resultados obtidos, observou-se que os ligantes de cimento Portland, cal e resina acrílica apresentaram um revestimento homogêneo e de baixo custo, mas devem ser utilizados preferencialmente em ambientes não sujeitos a intempéries e / ou abrasão. Por outro lado, as tintas sustentáveis de RBMF com polímero PVA e as elaboradas com cal e polímero PVA juntos demonstraram excelente cobertura, resistência à abrasão e às intempéries, além de baixo custo em comparação às tintas comerciais.

As tintas sustentáveis com esses aglutinantes apresentaram desempenho favorável para ser utilizadas em qualquer ambiente, com durabilidade e resistência equivalentes às tintas comerciais para o período estudado.

Desta maneira, o RBMF se apresenta tecnicamente viável para produzir pigmentos para a construção de tintas. Com seus tons avermelhados, a tinta sustentável também é uma expressão ambiental altamente visível. Nesse cenário, a reutilização do RBMF apresenta vantagens não apenas em relação aos aspectos econômicos e estéticos, mas também aos desejos dos usuários por sustentabilidade, ideologia e expressão social. De forma similar, os *pavers* produzidos com RBMF possuem valor estético sem a necessidade de pigmentos sintéticos, podendo também ser usados em conjunto com blocos convencionais para demarcar faixas de tráfego visto que não foi observado desgaste ou perda de contraste com o tempo; proporcionando segurança aos motoristas durante toda a vida útil do pavimento. O RBMF se apresenta, assim, como uma alternativa de pigmento para diversos materiais de construção, proporcionando um revestimento esteticamente agradável e potencialmente durável.

RBMF na produção de geopolímeros

Sintetizados a partir da combinação química de materiais ricos em silício e alumínio em meio alcalino, os geopolímeros vem ganhando destaque em diversas pesquisas e aplicações práticas nas últimas décadas. Esses aglomerantes são compostos inorgânicos de base polimérica altamente estável, com estrutura amorfa ou semicristalina (DAVIDOVITS, 2011).

Além das várias vantagens técnicas sobre os materiais de construção tradicionais, como alta resistência inicial à compressão, boa resistência química e excelente resistência ao fogo, sua aplicação apresenta benefícios ambientais associados às baixas emissões de dióxido carbono e à possibilidade de reutilizar resíduos como materiais precursores fontes de sílica e alumínio (MEHT; SIDDIQUE, 2016) (VAN DEVENTER, PROVIS; DUXSON, 2012). Assim, os geopolímeros surgem como candidato pro-

missor para substituir o cimento Portland comum no desenvolvimento de materiais de construção sustentáveis (SINGH *et al.*, 2015).

De acordo com Pacheco-Torgal e Jalali (2010), em teoria, materiais compostos por sílica e alumina podem ser ativados alcalinamente. Até o momento vários materiais foram amplamente investigados como fonte de aluminossilicatos, tais como cinzas volantes, escórias e argilas cauliníticas. Até o presente momento o rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF) foi avaliado como material precursor para síntese de geopolímeros por poucos pesquisadores, apesar de apresentar os compostos fundamentais para a síntese geopolimérica (sílica e alumina) e embora seja intensa a busca por novas formas de reutilização deste material.

Duan, *et al.* (2016) avaliaram a aplicação do RBMF como material suplementar para a reação geopolimérica, utilizando cinzas volantes como precursor principal. Foi observado que a substituição de parte da cinza volante pelo rejeito de barragem de minério de ferro conduziu à melhora das resistências térmica e mecânica, além da diminuição da porosidade aparente e de microfissuras. Com a adição do RBMF foi observada a diminuição dos conteúdos de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), indicando sua conversão para C-S-H nas matrizes produzidas, o que é utilizado como justificativa para os resultados de ganho de resistência mecânica (DUAN, YAN, *et al.*, 2016).

Defáveri, *et al.* (2019) estudaram a viabilidade da aplicação do RBMF como precursor principal para produção de geopolímeros, utilizando o resíduo de lã de vidro como material suplementar. A figura 7 mostra um corpo de prova desse material. Foram encontrados valores significativos de resistência mecânica para as matrizes avaliadas, principalmente para as matrizes formadas apenas pelo RBMF, que atingiram aos 7 dias resultados superiores a 100 MPa para compressão e superiores a 20 MPa para tração na flexão. Neste estudo a distribuição granulométrica dos materiais precursores e a concentração molar da solução alcalina ativadora exerceram grande influência no desempenho mecânico.

Figura 7 – Geopolímero produzido com RBMF e resíduo de lâ de vidro.



Fonte: Os autores.

Os ensaios mecânicos apresentados por Defáveri, *et al.* (2019) também evidenciam a hipótese de que os significativos valores de resistência mecânica podem estar relacionados ao efeito de empacotamento promovido pelo arranjo das partículas dos precursores e aos produtos geopoliméricos formados. Foi evidenciado que a geossíntese do RBMF promoveu a formação de uma matriz densa e menos porosa que pode ser um resultado atribuído a um elevado grau de geopolimerização.

Apesar de ter sido pouco investigada a utilização do RBMF com precursor geopolimérico, os resultados observados na literatura apontam para a potencial aplicabilidade do rejeito como precursor para a síntese de geopolímeros. As altas resistências mecânicas e as demais propriedades físicas obtidas nas pesquisas realizadas indicam uma nova e promissora aplicação desse resíduo.

RBMF na infraestrutura rodoviária

A estabilização dos solos é um método convencional adotado para aumentar a qualidade e a segurança dos projetos rodoviários. O processo permite tornar solos mais compactáveis, reduzindo sua plasticidade e aumentando a sua capacidade de suporte (KHEMISSA; MAHAMED, 2014); podendo ainda reduzir a tendência de expansão do material, melhorando parâmetros de durabilidade (T'ANEGONBADI; NOORZAD, 2017; BEHNOOD, 2018; POONI, *et al.*, 2019).

Entre os principais métodos de estabilização de solos destaca-se a compactação, a adição de estabilizantes químicos e a correção granulométrica (PATEL, 2019). Técnicas mecânicas densificam o material, eliminando o ar e os vazios (POURAKBAR *et al.*, 2016). Métodos químicos estão relacionados com alterações nas propriedades do solo pela adição de materiais quimicamente reativos (YI; GU; LIU, 2015; GHADIR; RANJBAR, 2018). Por sua vez, a correção granulométrica consiste na mistura de adequadas proporções de dois ou mais tipos de solos com a finalidade de se obter um material melhor graduado que ofereça, após a compactação, aumento da capacidade de carga e estabilidade volumétrica (PATEL, 2019; SENÇO, 2002).

Nos últimos anos, houve um aumento na tendência de utilizar os rejeitos de barragem de minério de ferro para aplicações geotécnicas, com as finalidades de correção granulométrica do solo e para a construção de infraestrutura rodoviária (RAMESH; KRISHNAIAH; SUPRIYA, 2012; OJURI; ADAVI; OLUWATUYI, 2017; ETIM; EBEREMU; OSINUBI, 2017; BASTOS *et al.*, 2016).

Dentre eles, Ojuri *et al.* (2017) avaliaram o efeito da mistura de rejeitos de barragem de minério de ferro nas propriedades de um solo laterítico. As misturas contendo 20%, 30%, 40% e 50% de substituição do solo laterítico pelo rejeito de barragem, associados com uma combinação dos ligantes cimento e cal, atingiram valores de CBR superiores a 80%, mínimo obrigatório para que o material possa ser utilizado como base de pavimentos. A inclusão do rejeito proporcionou redução da plasticidade, diminuição da fração fina e aumento da capacidade resistente (CBR) dos solos, melhorando a qualidade do material a ser destinado na construção de rodovias. Além de propriedades mecânicas, os autores também avaliaram, por meio de testes de lixiviação, o impacto ambiental da inclusão do rejeito ao solo laterítico. Os testes mostraram que os metais pesados presentes nos lixiviados foram reduzidos abaixo do nível regulatório nas misturas com a presença dos ligantes, com exceção do cromo e bário.

Etim *et al.* (2017) realizaram estudos sobre a estabilização do solo de algodão preto com uma mistura contendo cal e rejeito de minério de ferro

com a finalidade de correções químicas e granulométricas. O solo de algodão preto não é adequado para a construção de rodovias, por conter altos teores de argila plástica e minerais expansivos como a montmorilonita. De acordo com os resultados em termos de propriedades mecânicas, os autores recomendam um teor de 8% de cal e 8% de rejeito de barragem para estabilização do material. A mistura alcançou o CBR mínimo de 40% para o uso como base na construção de estradas levemente trafegadas.

Bastos *et al.* (2016) também verificaram a aplicabilidade do rejeito de barragem de minério de ferro para a construção de obras de infraestrutura de pavimentação quando estabilizado quimicamente. Para tanto foram utilizados como ligantes: cimento, cal e escória. Os ligantes foram dosados em misturas de rejeito-cimento, rejeito-cal e rejeito-escória nos teores de 1%, 2%, 5% e 10% em relação a massa de rejeito. Os resultados dos testes de CBR apresentaram valores crescentes com o aumento do teor de ligantes. A mistura contendo 5% de adição de cimento esteve em conformidade com o parâmetro normativo para uso do material como base de estrada para qualquer carga de tráfego. Testes na amostra com teor de 10% de cal mostraram que a mistura pode ser usada como base para tráfego médio de carga. No entanto, o uso de misturas estabilizadas com escória foi restrito ao uso para camada de sub-base. O aumento dos estabilizadores químicos contribuiu, também, para a redução da expansão das misturas.

Em conclusão, observam-se resultados promissores na adoção do RBMF como matéria-prima para pavimentação de estradas (RAMESH; KRISHNAIAH; SUPRIYA, 2012; OJURI; ADAVI; OLUWATUYI, 2017; ETIM; EBEREMU; OSINUBI, 2017; BASTOS *et al.*, 2016).

Considerações finais

Depositado em diversas barragens brasileiras e motivo de preocupações sociais, ambientais e econômicas relacionadas ao risco de colapso dessas estruturas de contenção, o RBMF vem sendo foco de estudo na

comunidade científica, envolvendo sua reutilização na construção civil e infraestrutura rodoviária.

Por ser um material fino, cristalino, composto principalmente por óxidos de ferro, silício e alumínio e ser caracterizado como não perigoso e não inerte de acordo com as prescrições da NBR 10004 (ABNT, 2004), o RBMF apresenta consideráveis possibilidades de aplicação na construção civil. Sua utilização como agregado miúdo na composição de argamassas de revestimento proporciona aumento do desempenho mecânico e redução da condutividade térmica, o que auxilia na redução do gasto energético com condicionamento artificial. Devido ao efeito *filer* do rejeito, a sua utilização na produção de concretos em substituição ao agregado miúdo convencional origina matrizes resistentes muito semelhantes às convencionais.

A argila de RBMF, resultante de procedimentos de segregação do material, pode ser utilizada na produção de revestimentos cerâmicos que atendem aos requisitos de aplicabilidade. Outra possibilidade de emprego do rejeito é no desenvolvimento de pigmentos e tintas imobiliárias, que produzidas com alguns tipos de aglutinantes, tais como polímero PVA e cal, compõem um produto de baixo custo com durabilidade e resistência equivalentes às tintas comerciais. O RBMF também vem sendo utilizado na composição de geopolímeros, candidatos promissores à substituição do cimento Portland no desenvolvimento de materiais de construção sustentável.

Na pavimentação e na infraestrutura rodoviária, destaca-se a utilização do RBMF na produção de *pavers* e na correção granulométrica de solos para a construção de rodovias. Publicações recentes apresentam resultados promissores relacionados à utilização deste resíduo como matéria-prima para pavimentação de estradas.

Por ser um dos maiores exportadores de minério de ferro, é necessário que o Brasil, responsável por sua geração de resíduos sólidos, contribua e investigue a reutilização sustentável do rejeito de minério de ferro em produtos finais significativos.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos:- Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto: Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9457: Ladriões hidráulicos para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013b.

ABRAFATI. Programa Setorial de Qualidade. [S.l.]. 2016.

AMERICAN SOCIETY TEST MATERIALS. ASTM G65-00e1: Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus. Detroit: ASTM, 2001.

ÁVILA, J. P. Barragens de Rejeitos no Brasil. Rio de Janeiro: CGDB – Comitê Brasileiro de Barragens, 2012.

BARBOSA, P. D. C. *Aproveitamento de Rejeito da Concentração de Minério de Ferro na Produção de Cerâmica Vermelha*. 2017. *Trabalho de Conclusão*

de Curso de Graduação em Engenharia de Minas - Universidade Federal Ouro Preto, 2017.

BASTOS, L. A. C. *et al.* Using iron ore tailings from tailing dams as road material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, n. 10, 2016.

BEHNOOD, A. Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. *Transportation Geotechnics*, v. 17, p. 14-32, 2018.

BRASIL. Recomendação No. 014/2016-MPF-GAB / FT. Brasília. 2016.

CHENG, Y. *et al.* Test research on the effects of mechanochemically activated iron tailings on the compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 118, p. 164 - 170, 2016.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer chemistry and applications. Saint-Quentin France: [s.n.], 2011. 25-48 p.

CARVALHO, J. M. F. *et al.* More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. *Construction and Building Materials*, v. 206, p. 397-409, 2019.

DEFÁVERI, K. D. C. E. S. *et al.* Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: A study of mechanical and microstructural properties. *Construction and Building Materials*, v. 220, p. 375 - 385, 2019.

DNIT. Rede rodoviária sob jurisdição do Ministério dos Transportes. [S.l.]. 2015.

DUAN, P. *et al.* Fresh properties, compressive strength and microstructure of fly ash geopolymer paste blended with iron ore tailing under thermal cycle. *Construction and Building Materials*, p. 78 - 90, 2016.

ETIM, P. K.; EBEREMU, A. O.; OSINUBI, K. J. Stabilization of black cotton soil with lime and iron ore tailings admixture. *Transportation Geotechnics*, v. 10, p. 85-95, 2017.

FONTES, W. C. *et al.* Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 988 - 995, 2016.

FONTES, W. C. *et al.* Iron ore tailings in the production of cement tiles: a value analysis on building sustainability. *Ambiente Construído*, v. 18, n.4, p. 395 -4 12, 2018.

FONTES, W. C. *et al.* Assessment of the use potential of iron ore tailings in the manufacture of ceramic tiles: From tailings-dams to “brown porcelain”. *Construction and Building Materials*, v. 206, p. 111 - 121, 2019.

FRANKS, D. M. *et al.* Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resources Policy*, v. 36, p. 114 - 122, 2011.

GALVÃO, J. L. B. *et al.* Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. *Journal of Cleaner Production*, v. 200, p. 412 - 422, 2018.

GHADIR, P.; RANJBAR, N. Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement, *Journal of Cleaner Production* . v. 188, p. 361-371, 2018.

GOMES, R. B.; DE TOMI, G.; ASSIS, P. S. Iron ore tailings dry stacking in Pau Branco mine, Brazil. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 5, n. 4, p. 339 - 344, 2016.

GRUN, E. *Caracterização de Argilas provenientes de Canelinha/SC e Estudo de Formulação de Massas Cerâmicas*. 2007. *Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais* - - UDESC, 2007.

JENKINS, H.; YAKOVLEVA, N. Corporate social responsibility in the mining industry: Exploring trends in social and environmental disclosure. *Journal of Cleaner Production*, v. 14, n. 3-4, p. 271 - 284, 2006.

KHEMISSA, M.; MAHAMED, A. Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay. *Applied Clay Science*, v. 95, p. 104 - 110, 2014.

LEE, H.-S.; LEE, J.-Y.; YU, M.-Y. Influence of iron oxide pigments on the properties of concrete interlocking blocks. *Cement and Concrete Research*, v. 33, p. 1889 – 1896, 2003.

MEHTA, A.; SIDDIQUE, R. An overview of geopolymers derived from industrial by products. *Construction and Building Materials*, v. 127, p. 183 - 198, 2016.

MENDES, B. C. *et al.* Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks. *Construction and Building Materials*, v. 227, p. 116669, 2019a.

MENDES, J. C. *et al.* On the relationship between morphology and thermal conductivity of cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, v. 104, p. 103365, 2019b.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Anuário Mineral Brasileiro 2017. Brasília. 2018.

OJURI, O. O.; ADAVI, A. A.; OLUWATUYI, O. E. Geotechnical and environmental evaluation of lime–cement stabilized soil–mine tailing mixtures for highway construction. *Transportation Geotechnics*, v. 10, p. 1 - 12, 2017.

PACHECO-TORGAL, F. P.; JALALI, S. A sustentabilidade dos materiais de construção. [S.l.]: TecMinho, 2010.

PATEL, A. Geotechnical investigations and improvement of ground conditions. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019.

POONI, J. *et al.* Durability of enzyme stabilized expansive soil in road pavements subjected to moisture degradation. *Transportation Geotechnics*, v. 21, 2019.

POURAKBAR, S. *et al.* Model study of alkali-activated waste binder for soil stabilization. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, v. 35, n. 4, 2016.

RAMESH, H. N.; KRISHNAIAH, A. J.; SUPRIYA, M. D. Effect of lime on the compaction and strength behaviour of red earth treated with mine tailings. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, v. 2, n. 4, p. 1 - 6, 2012.

SANT'ANA FILHO, J. N. *et al.* Technical and Environmental Feasibility of Interlocking Concrete Pavers with Iron Ore Tailings from Tailings Dams. *Journal of Materials in Civil*, v. 29, n.9, 2016.

SANTOS, D. H. *et al.* Utilização de Rejeito de Mineração de Ferro para a Produção de Argamassas para a Construção Civil. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 55. 2014.

SENÇO, W. Pavimentação. 2. ed. São Paulo: Escola Politécnica de São Paulo, 2002.

SHETTIMA, A. U. *et al.* Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 120, p. 72 - 79, 2016.

SINGH, B. *et al.* Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, p. 78 - 90, 2015.

TA'NEGONBADI, B.; NOORZAD, R. Stabilization of clayey soil using lignosulfonate. *Transportation Geotechnics*, v. 12, p. 45 - 55, 2017.

VAN DEVENTER, J. S. J.; PROVIS, J. L.; DUXSON, P. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*, p. 89 - 104, 2012.

YELLISHETTY, M. *et al.* Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52, n. -, p. 1283–1289, 2008.

YI, Y.; GU, L.; LIU, S. Microstructural and mechanical properties of marine soft clay stabilized by lime-activated ground granulated blastfurnace slag. *Applied Clay Science*, v. 103, p. 71-76, 2015.

CAPÍTULO 6

RESILIÊNCIA URBANA E A QUALIDADE DAS ÁGUAS DE ABASTECIMENTO: O DESASTRE DE BRUMADINHO-MG

Samuel Castro; Pedro Fagundes; Fernanda Gomes; Celso Ribeiro⁶

Universidade Federal de Juiz de Fora/ Brasil

Introdução

As cidades configuram-se como sistemas complexos constituídos de fatores sociais, econômicos e ecológicos. No entanto, devido ao rápido crescimento populacional e à urbanização, estão vulneráveis a distúrbios em seus subsistemas, ou não conseguem se adaptar a novos desafios. Fatores incertos, como desastres, tragédias, mudanças climáticas, instabilidade política, crise financeira, entre outros, configuram-se como ameaças ao desenvolvimento urbano. Além disso, o impacto de um desastre pode estender as fronteiras da cidade afetando diferentes regiões e nações (FREITAS *et al.*, 2019; HERNANTES *et al.*, 2019).

O sistema urbano pode ser entendido como, além de complexo, adaptativo, composto por redes sócio-ecológicas e técnicas, se estendendo por múltiplas escalas espaciais. Assim, a resiliência é enquadrada como um estado desejável, surgindo como perspectiva atraente às cidades (MEEROW *et al.*, 2016). Portanto, a resiliência pode ser entendida como a capacidade de resistir, absorver, acomodar e recuperar, através da preservação e restauração das estruturas básicas essenciais, quando sistemas são expostos (JABAREEN, 2013).

⁶ samuel.castro@ufjf.br; pedro.fagundes@engenharia.ufjf.br; fernanda.bento@engenharia.ufjf.br; celso.bandeira@ufjf.br

Segundo Spaans e Waterhout (2017), os sistemas de governança devem construir capacidades sistêmicas para lidar com distintas complexidades, possuindo desenvolvimento direcionado à melhoria econômica, social e ambiental, criando resiliência no sistema urbano. Logo, os sistemas resilientes urbanos devem: absorver choques e sobreviver sem perda significativa de sua funcionalidade ou capacidade de funcionamento; atender à necessidade de uma demanda inesperada; permitir ajustes no comportamento ou ação de resposta efetiva; restaurar a funcionalidade de seus serviços e sistemas essenciais; incluir e capacitar, atores e comunidades, no processo político (BORSEKOVA *et al.*, 2018).

A partir da década de 1990, principalmente após Primeira Conferência Mundial para Redução de Desastres, políticas de redução de desastres começaram a incluir fatores sociais e suas vulnerabilidades. A inclusão da prevenção como prioridade na gestão de riscos de desastres, foi ratificada com o Marco de Sendai, em 2015 (SARRAFF; SILVA, 2016). O Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres 2015-2030 define quatro ações prioritárias na redução dos desastres: (i) compreensão do risco de desastres; (ii) fortalecimento da governança de risco de desastres; (iii) investimento em resiliência; e (iv) aprimoramento na prevenção de possíveis desastres.

Os gestores locais possuem grandes responsabilidades, contudo possuem capacidade reduzida diante das problemáticas. Assim, para que a cidade seja resiliente, é necessário que as autoridades locais e a população compreendam os riscos que enfrentam, tornando eficaz o planejamento de mitigação dos desastres. Além disso, políticas públicas devem ser adotadas buscando a reconstrução e reorganização de sistemas afetados (UNISDR, 2012).

Minas Gerais e a mineração

A mineração compreende um conjunto de atividades destinadas a pesquisar, encontrar, mensurar, extrair, beneficiar, e transformar recursos

minerais, tornando-os benéficos a economia e sociedade. Como indústria, difere-se de outros setores produtivos por ser a provedora de insumos que são a base da cadeia produtiva, além disso, possuem resíduos sólidos diferenciados, variando com a tipologia mineral (IBRAM, 2016). Portanto, a extração de recursos naturais não renováveis da crosta terrestre, configura a mineração como uma atividade altamente impactante e não sustentável. Contudo, fornece matéria-prima para demais setores da economia, portanto, essencial ao desenvolvimento (MMA, 2001).

O Brasil detém enorme patrimônio mineral, um dos maiores produtores mundiais, possuindo 72 substâncias minerais, onde destacam-se o ferro, o ouro, o nióbio, o cobre, a bauxita e o manganês, sendo que o setor mineral representou 3,9% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro em 2016 (BRASIL, 2017; ARAUJO *et al.*, 2014; CARVALHO *et al.*, 2018).

Segundo o IBRAM (2016), o Brasil é o terceiro maior produtor de minério de ferro do mundo, onde os estados de Minas Gerais (MG) e Pará contribuem com a maior parcela dessa produção, 71% e 26%, respectivamente. Além disso, o estado de Minas Gerais destaca-se como principal estado minerador, pois é responsável por aproximadamente 53% da produção nacional de minerais metálicos e 29% de outros tipos de minério. A atividade mineradora ocorre em mais de 400 municípios mineiros, e 40 das 100 maiores minas brasileiras se encontram no estado. Portanto, a indústria extrativa de Minas Gerais tem importância estratégica para o Brasil e para o próprio estado. As exportações de bens minerais possuem representação significativa para Minas Gerais, contribuindo para superávits comerciais alcançados no país nos últimos anos.

Segundo reportado por Silva e Santos (2010), a mineração foi a atividade motora por trás da configuração espacial mineira desde o século XVII. Produtos de momentos distintos da realidade social cotidiana, as cidades mineradoras mineiras abarcam a herança de um momento em que eram centros em uma colônia eminentemente agrária, sendo lócus de exploração; assim, evidencia-se a escassez de investimentos que garantam resiliência. Apesar da geração de riqueza e crescimento econômico, a indústria extrativa mineral está entre as atividades antrópicas que mais

causam impactos socioeconômicos e ambientais negativos, sendo que os efeitos ambientais e socioeconômicos do aproveitamento dos depósitos minerais dependem, principalmente, do planejamento e execução de tal atividade (MMA, 2001; ARAUJO *et al.*, 2014).

Os impactos da extração mineral estão associados a diversas fases de exploração dos bens, indo desde a lavra, podendo se estender até após o fechamento da mina ou encerramento das atividades, sendo registrados na dimensão social, econômica e ambiental (ARAUJO *et al.*, 2014; CARVALHO *et al.*, 2018; GONELLA *et al.*, 2015).

Os efeitos ambientais negativos estão relacionados com alteração do meio físico, provocando desmatamento, erosão, contaminação dos corpos hídricos, alteração da paisagem, e comprometimento da fauna e da flora (ARAUJO *et al.*, 2014; MECCHI; SANCHES, 2010). Ressalta-se também, que muitas vezes o solo superficial, que possui maior fertilidade, é removido, expondo os solos remanescentes a processos erosivos que podem causar assoreamento dos corpos d'água do entorno. Além desses impactos, destacam-se ainda a poluição do ar e sonora. (LEITE *et al.*, 2018; MECCHI; SANCHES, 2010; MILANEZ, 2017; REZENDE, 2016).

No que se refere à dimensão social, o vínculo entre o empreendimento e a sociedade pode ser permeado por diversas divergências, como conflitos no uso do solo, depreciação de imóveis circunvizinhos, e aumento no tráfego urbano. O aumento populacional dos municípios próximos ao empreendimento impacta os aparelhos públicos nos diversos setores, além de provocar aumento nos preços de bens e serviços locais, e apresentar ameaças à independência econômica da comunidade se não houver diversificação produtiva (ARAUJO *et al.*, 2014; CARVALHO *et al.*, 2018; REZENDE, 2016).

O Brasil, assim como outros países mineradores, enfrenta problema relacionado à disposição de rejeitos, demandando mecanismos de gestão e soluções tecnológicas pertinentes, visando disposição de baixo risco e recuperação (CARVALHO *et al.*, 2018). Em 2017, o total de resíduos inventariados no Estado de Minas Gerais (FEAM, 2018b) foi de 562.402.296,758 toneladas. Deste total, 51,55% são de rejeitos, 48,41%

de estéril e 0,04% de resíduos de atividades não relacionadas diretamente a mineração (papel, plástico, bombonas, restos de pneus, entre outros).

Segundo Duarte (2008), até o séc. XV, a geração de rejeitos pelas empresas de mineração e seus respectivos impactos eram considerados insignificantes. Já no séc. XIX, com o desenvolvimento tecnológico, houve um aumento significativo da capacidade de processamento dos minerais de interesse econômico, tornando-se possível minerar corpos com baixo teor mineral, resultando em uma maior geração de rejeitos, com cada vez menor granulometria, e aumentando o potencial poluidor da atividade de mineração. No entanto, as práticas de disposição desses rejeitos não acompanharam o mesmo ritmo, utilizando-se de barragens de acumulação para esse fim.

A Deliberação Normativa nº 62 de 17 de setembro de 2002 determina critérios de classificação de barragem e reservatório em três categorias: (i) classe I: Baixo potencial; (ii) classe II: Médio potencial; e (iii) classe III: Alto potencial de dano ambiental. Segundo Inventário de Barragem do estado de Minas Gerais Ano 2017 (FEAM, 2018a), das 698 estruturas cadastradas, 190 são de Classe I, 303 Classe II, e 205 Classe III. Nesse sentido, verifica-se a eminência de risco de rompimento de diversas barragens no estado de Minas Gerais, fato que coloca em risco a sociedade, meio ambiente e economia de diferentes regiões.

O histórico de desastres ambientais ocorridos no Estado de Minas Gerais evidencia certa negligência com relação à gestão de tais equipamentos de destinação de resíduos. Com base em um breve registro cronológico de desastres, cita-se: (i) rompimento da barragem de rejeitos da mineradora Rio Verde, em 2001, no Município de São Sebastião das Águas Claras; (ii) rompimento da barragem de rejeitos da produção de celulose, em 2003, no Município de Cataguases com contaminação do Rio Paraíba do Sul e trechos da bacia hidrográfica localizados no interior do Estado do Rio de Janeiro; (iii) rompimento da pilha de rejeitos da mineradora Herculano, em 2014, no Município de Itabirito; e (iv) rompimento da barragem da mineração Samarco, em 2015, no Município de Mariana, considerada a

maior catástrofe ambiental ocorrida no país com conseqüente contaminação do Rio Doce.

Segundo reportado por Lopes (2016), no caso do rompimento da barragem de Mariana/MG, a utilização de técnicas mais modernas de filtragem dos resíduos e manutenção das barragens, utilizando-se de instrumentos de monitoramento eletrônico, sistemas de alerta, implementação de planos emergenciais, além de uma fiscalização eficiente por órgãos competentes, poderiam ter evitado o impacto e/ou minimizado seus impactos socioambientais. Além disso, o autor ratifica que a adoção de Planos de Recuperação de Áreas Degradadas, além de um constante e rígido monitoramento ambiental são medidas que, a médio e longo prazos, poderão contribuir na recuperação do rio Doce e do ecossistema atingido.

O desastre de Brumadinho-MG: a Vale é uma das maiores mineradoras de ferro do mundo, com sede no Brasil, atuando em cerca de 30 países. No Brasil, a empresa possui um total de 133 barragens de minério de ferro, sendo que 80% delas localizam-se no estado de Minas Gerais (VALE, 2017 a, b). O Córrego do Feijão, complexo operado pela mineradora, em 2018, produzia o equivalente a 2% de sua produção total de ferro. Localizado em Brumadinho, Minas Gerais, o complexo encontra-se nas encostas do Quadrilátero Ferrífero, área relacionada à extração de minério de ferro, e parte do Vale do Rio Paraopeba (PORSANI *et al.*, 2019).

Dentre as barragens do Córrego do Feijão, destaca-se a Barragem 1 (B1), que até 2015 recebia rejeitos provenientes da produção da referida mina, onde, a partir de então, tornou-se inativa. Essa barragem foi construída em 1976 pela Ferteco Mineração, adquirida pela Vale em abril de 2001, utilizando método de alteamento a montante, possuindo 86 m de altura e 720 m de comprimento da crista. Os rejeitos ocupavam área de 249.500 m² com volume disposto de 11,7 milhões de m³ (VALE, 2019).

Segundo dados do Cadastro de Barragens para elaboração do Relatório de Segurança de Barragens de 2017, B1 foi classificada com alto potencial poluidor e baixo risco de rompimento (ANA, 2017). Contudo, em 25 de janeiro de 2019 ocorreu o colapso da estrutura, onde cerca de 11,7 milhões de m³ de rejeito percorreu 8,5 km até atingir o rio Paraope-

ba, estendendo-se por mais de 300 km ao longo desse, em direção ao rio São Francisco, causando impacto considerável ao ecossistema atingido (PORSANI *et al.*, 2019).

O rio Paraopeba, ao longo de seu curso, abastece diversos municípios do estado, dentre eles Caetanópolis, Paraopeba e Pará de Minas. Destaca-se, ainda, o uso de tal recurso pelas comunidades ribeirinhas para pesca, irrigação e lazer (FIOCRUZ, 2019). Segundo Milanez *et al.* (2010) é necessário que a riqueza gerada pela indústria mineral já instalada proporcione um efetivo desenvolvimento das comunidades e uma permanente integração com o meio ambiente, através de mecanismos que tornem a sociedade civil protagonista de sua relação com o território.

O presente estudo se pautou no tratamento de dados secundários, e tem como objetivo geral caracterizar a qualidade das águas do rio Paraopeba em função do rompimento da Barragem B1, no complexo minerário do Córrego do Feijão em Brumadinho-MG em janeiro de 2019, gerando informações para avaliar o conseqüente impacto no abastecimento de água de municípios localizados à jusante do desastre. Como objetivos específicos, tem-se: (i) com base em série histórica (2008 – 2018), estabelecer valores de referência (VR) para parâmetros físico-químicos do rio Paraopeba (ferro dissolvido, manganês total e turbidez) que possam servir de base para evidenciar influências e alterações antrópicas, além de impactos da mineração; e (ii) comparar os VR calculados com a estatística descritiva obtida após rompimento da Barragem B1, 25/01/2019, considerando os mesmos parâmetros físico-químicos.

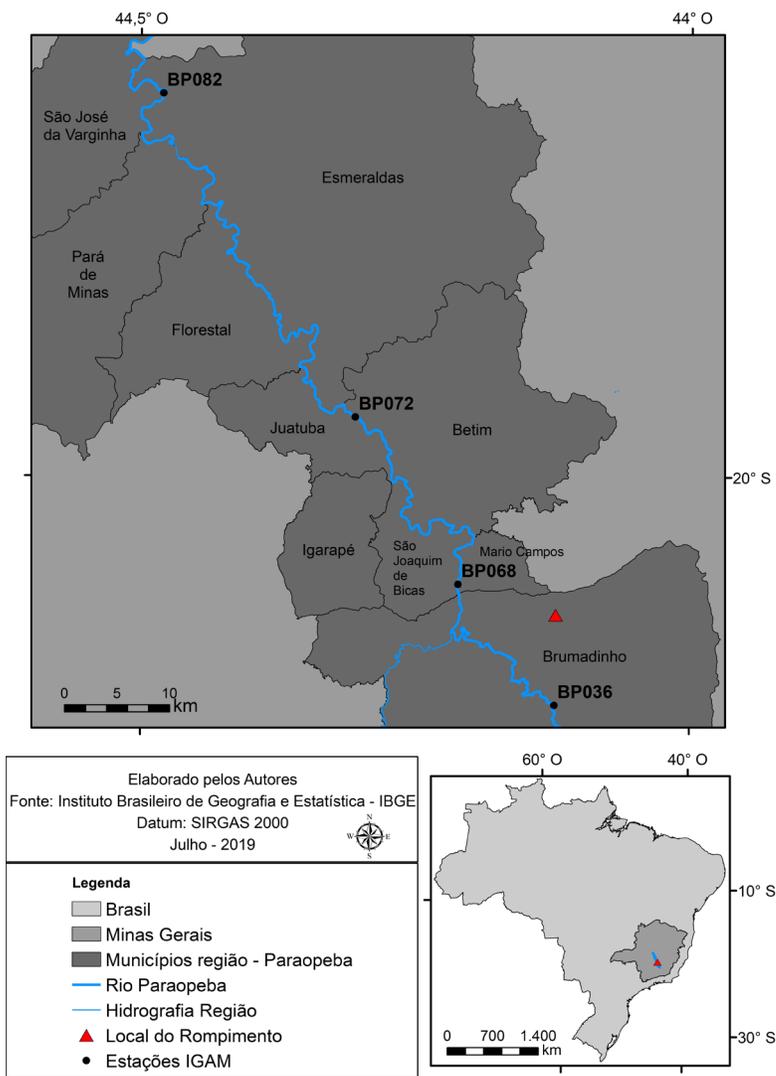
Para Freitas *et al.* (2016), dentre as ações de mitigação e recuperação ambientais pós-desastre destacam-se: (i) elaboração de um plano emergencial de recuperação da bacia do rio contendo estratégias de soluções de abastecimento de água; (ii) zoneamento ecológico ambiental dos rios e suas margens e recomposição da mata ciliar; (iii) concepção de sistema de prevenção de eventos críticos, mitigação dos efeitos da cheia e enfrentamento de desastres; (iv) monitoramento e recuperação do solo; e (v) levantamento de fauna e flora para avaliação dos impactos e subsidiar medidas para proteção e recuperação da biodiversidade.

Materiais e métodos

O Projeto Águas de Minas, desenvolvido pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), é responsável pelo monitoramento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas de Minas Gerais. Para o estudo, foram considerados dados obtidos pela análise de amostras coletadas nas estações de monitoramento do IGAM ao longo do curso do rio Paraopeba, com a localização conforme apresentado na figura 1, tendo como referência local aproximado do rompimento da Barragem B1: (i) BP036 – 10,0 km a montante; (ii) BP068 – 24,8 km a jusante; (iii) BP072 – 59,0 km a jusante; e (iv) BP082 – 123,1 km a jusante.

Verifica-se uma tendência ao estabelecimento de listas orientadoras com valores de referência (VR), de alerta e de intervenção, como etapa preliminar nas ações de monitoramento da qualidade, da prevenção à poluição, do diagnóstico de áreas suspeitas de contaminação e do controle de áreas contaminadas (CETESB, 2001; ROCHA *et al.*, 2013).

Figura 1 – Área de estudo: rompimento de B1 e estações de monitoramento da qualidade da água do Rio Paraopeba.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para os procedimentos estatísticos adotados, considerou-se uma série histórica de dez anos (2008 – 2018), reportada pelo IGAM (2019a). Foram considerados parâmetros físico-químicos que podem estar diretamente

associados ao aporte de rejeitos da mineração na calha do rio Paraopeba, oriundos do rompimento da barragem, a saber: ferro dissolvido, manganês total e turbidez; resultado de análises de amostras coletadas nas estações de monitoramento do IGAM denominadas BP036, BP068, BP072 e BP082, considerando-se nas análises estatística a independência dos dados (IDAHO DEQ, 2014). De modo geral, o tratamento de dados se deu por testes disponíveis no pacote ProUCL 5.1, a 95% de confiança, por meio das seguintes etapas: (i) Análise de consistência e preparação dos dados; e (ii) Estimativa dos valores de referência (USEPA, 2019).

Como resultado de análises ambientais, verifica-se a recorrência de valores censurados, perdidos ou discrepantes (*outliers*) ou anômalos que têm impacto expressivo e negativo nas análises estatísticas, podendo comprometer as interpretações. Outro fato comum a essa tipologia de dados é que dificilmente seguem uma distribuição Normal ou Log-normal. Devido a tais características, métodos estatísticos mais robustos são os mais indicados (REIMANN *et al.*, 2008; SABINO *et al.*, 2014). Na avaliação de consistência dos dados foram realizados testes de:

- Estabilidade temporal e identificação de multimodalidade;
- *Outliers* e análise crítica para expurgo dos mesmos.

Para a estimativa de magnitude de tendência realizou-se o teste não-paramétrico de Theil-Sen, em que a estimativa da inclinação da linha de tendência (β) é obtida para o período avaliado, o qual representa a mediana da inclinação obtida de todas as possíveis combinações de dois pontos da série temporal (HELSEL; HIRSCH, 2002). A identificação de *outliers* se deu pelo teste de Rosner, teste indicado a um conjunto de dados com *n amostral* superior a 25.

O ProUCL 5.1 apresenta, ainda, métodos estatísticos de tratamento dos dados censurado ou não-detectados com fins de cálculo dos limites superiores de interesse, aplicáveis à estimação de valores de referência, tais como o emprego de estimadores de Kaplan-Meier (KM), baseado

em estatística paramétrica. Os parâmetros físico-químicos avaliados no presente estudo não apresentaram dados censurados ou não detectados.

Várias medidas podem representar o conjunto dos valores de *background* e, portanto, possibilitar a proposição de valores de referência. A escolha de uma medida depende da possibilidade de calculá-la, da facilidade com que é calculada e de sua adequação ao processo em que for utilizada, ou seja, de sua capacidade de distinguir resultados falsos positivos com uma confiança estatística definida.

O Limite Superior de Confiança (LSC95) é um número que, com 95% de confiança, é superior à concentração média real da população (IDEM, 2010). A escolha do LSC95 como VR tem grande utilidade quando se comparam valores de *background* de diferentes áreas, visto que esta é uma medida de tendência central e, portanto, para dados que seguem uma distribuição estatística definida, expressa o limite superior da faixa em que se encontra a média, que é quantidade mais provável do parâmetro de interesse em um aquífero (VIRGINIA DEQ, 2003). À título de análise, os VR calculados foram comparados ao percentil 75%, definido pela CETESB como valor guia no estabelecimento de Valores de Referência de Qualidade (VRQ) de solos e águas subterrâneas (CETESB, 2001), e limites estabelecidos para corpos hídricos Classe 2 na DN COPAM/CERH n° 01/2008 e da Resolução CONAMA n° 357/2005, que dispõem sobre a classificação dos corpos de água e dão as diretrizes ambientais para enquadramento.

Análise após rompimento da Barragem B1 – Brumadinho-MG

O Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM em conjunto com a Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais - COPASA, Agência Nacional de Águas - ANA e a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM instituíram uma rede integrada de monitoramento de qualidade das águas e sedimentos com fins de garantir abrangência na avaliação e

transparência dos impactos gerados pelo rompimento da Barragem B1 no Rio Paraopeba. Nesse sentido, os resultados do monitoramento emergencial foram reportados em *Informativos dos parâmetros de qualidade da água - Rio Paraopeba - após desastre na barragem B1- Brumadinho/MG* (IGAM, 2019b). Para o presente estudo foram considerados dados de 26/01/2019 a 27/05/2019, para os mesmos parâmetros físico-químicos analisados em amostras coletadas nas estações de monitoramento adotadas na etapa de estimativa de valores de referência. Os resultados da estatística descritiva para os dados referentes ao período supracitado foram adotados em análise comparativa aos VR estimados em etapa prévia.

Testes de normalidade embasaram a escolha do ensaio estatístico não paramétricos Kruskal-Wallis para avaliação da hipótese de que as medianas dos pontos amostrais são iguais, em comparações múltiplas, a 95% de confiança (LEMONS *et al.*, 2000). Utilizou-se o software estatístico STATISTICA 8.0 (STATSOFT, 2007) tanto na execução de testes de hipóteses quanto na representação descritiva e gráfica dos resultados.

Resultados e discussão

No presente tópico são apresentados resultados obtidos em etapas de estimativa e proposição de VR para o rio Paraopeba, considerando os parâmetros ferro dissolvido, manganês total e turbidez, bem como os resultados da caracterização do impacto no corpo hídrico resultante do rompimento da Barragem B1.

De posse dos dados de monitoramento das estações BP036, BP068, BP072 e BP082 referentes aos anos de 2008 a 2018, procedeu-se com a análise descritiva dos parâmetros ferro dissolvido, manganês total e turbidez (Tabela 1). Observou-se que a faixa de ocorrência de ferro variou de 0,05 a 0,68 mg.L⁻¹, com concentração média de 0,24 mg.L⁻¹ e maior percentual de dados (36%) entre 0,10 e 0,20 mg.L⁻¹. No caso do Mn, 57% das amostras estiveram entre 0,05 mg/L e 0,15 mg.L⁻¹, a faixa de detecção variou de 0,03 a 0,44 mg.L⁻¹, com valor médio de 0,20 mg.L⁻¹. Em 41%

das amostras obtidas nas estações referidas, a turbidez foi inferior a 20 UNT, sendo que a faixa de ocorrência desse parâmetro foi de 3,7 UNT a 146,0 UNT e a concentração média se manteve em 35,42 UNT.

Tabela 1 – Estatística descritiva dos parâmetros de monitoramento nas estações BP036, BP068, BP072 e BP082.

Parâmetro	N ₁	Outliers %	N ₂	Mín.	Máx.	Média	DP	Distribuição monomodal	Estabilidade temporal
Fe dissolvido (mg.L ⁻¹)	171	1,2	169	0,05	0,68	0,24	0,13	Sim	Sim*
Mn total (mg.L ⁻¹)	171	15,2	145	0,03	0,44	0,15	0,09	Sim	Sim**
Turbidez (UNT)	171	15,2	145	3,7	146,0	35,4	30,3	Sim	Sim*

Fonte: os autores.

Nota: N₁: número total de dados; N₂: número de dados após a exclusão de *outliers*; Mín.: mínimo; Máx.: máximo; DP: desvio padrão. Teste de Theil-Sen * 95% de confiança; ** 99% de confiança.

No Quadrilátero Ferrífero, por se tratar de uma região rica em recursos minerais com extensivas reservas de ferro e manganês (MELFI *et al.*, 2016), espera-se que espécies químicas (ferro e manganês) ocorram naturalmente nos cursos d'água, por processos erosivos e lixiviação. Porém, a atividade mineradora pode contribuir consideravelmente para o aporte desses metais nos mananciais (USEPA, 2018).

Para uma estimativa robusta do LSC95, é necessário que a aproximação do valor máximo atribuído pela média populacional seja feita através de um grupo de dados amostrais com características constantes e sem a interferência de perturbações pontuais (SINGH; MAICHLE; LEE, 2006). Para tanto, a verificação e expurgo de dados extremos (*outliers*) e as análises de estabilidade temporal e monomodalidade das distribuições de cada parâmetro são procedimentos indispensáveis e considerados no estudo. Com base no estimador de Theil-Sen, que busca identificar tendências temporais por meio da avaliação da declividade da mediana (ELY e DUBREUIL, 2017), constatou-se a inexistência de evidências estatísticas

de tendências temporais na ocorrência dos parâmetros, indicando a estabilidade para os parâmetros: ferro dissolvido, manganês total e turbidez no corpo hídrico para o período de 2008 a 2018. Além disso, todas as distribuições apresentaram caráter monomodal (Tabela 1) e aderência à distribuição gama (Tabela 2).

Tabela 2 – Estimativa dos valores de referência dos parâmetros.

Parâmetro	Distribuição	VR	Perc. 75%	VM
Fe dissolvido (mg.L ⁻¹)	95% <i>Approximate gamma</i>	0,26	0,30	0,30
Mn total (mg.L ⁻¹)	95% <i>Approximate gamma</i>	0,17	0,20	0,10
Turbidez (UNT)	95% <i>Approximate gamma</i>	39,7	46,5	100,0

Fonte: Os autores.

Nota: VR: valor de referência adotado a partir do Limite Superior de Confiança (LSC); 95% *Approximate gamma*: método de estimativa do LSC 95% com base na aderência da distribuição dos dados à distribuição gama, evidenciada por testes de aderência, com 95% de confiança. Perc.: percentil. VM: valor máximo reportado pela Resolução CONAMA n° 357/2005 e DN COPAM/CERH n° 01/2008 para mananciais superficiais de classe 2.

A tabela 2 contém os valores de referência dos parâmetros monitorados ao longo do trecho do Rio Paraopeba, a montante e a jusante da barragem B1. Os VR estimados pelo LSC95 e propostos foram: 0,26 mg.L⁻¹ para ferro dissolvido; 0,17 mg.L⁻¹ para manganês total e 39,7 UNT para turbidez. Em todos os casos, o VR estimado se manteve próximo ao percentil 75%, indicativo de coerência do valor calculado.

Diante do percentual de quantificação dos dados (Tabela 1) e da proximidade dos VR com os valores máximos estabelecidos na Resolução CONAMA n° 357/2005 e na DN COPAM/CERH n° 01/2008 para os parâmetros ferro e manganês, evidencia-se a ocorrência natural e abundante de tais elementos no curso d'água, sendo que, no caso do manganês, a concentração estimada como VR chega a superar os limites estabelecidos nas legislações.

Costa *et al.*, (2003) reportaram valores de *background* para ferro e manganês que superaram valores estipulados pelas legislações em estudos

de caracterização de sedimentos da sub-bacia do Rio Gualaxo do Norte, no município de Mariana-MG. Andrade *et al.* (2012) destacaram elevados teores de ferro e manganês no Quadrilátero Ferrífero como reflexo da geologia local, assim como Costa *et al.*, (2014) e Carvalho Filho *et al.*, (2011), que também revelaram ocorrência de manganês em concentrações consideráveis nos solos da região.

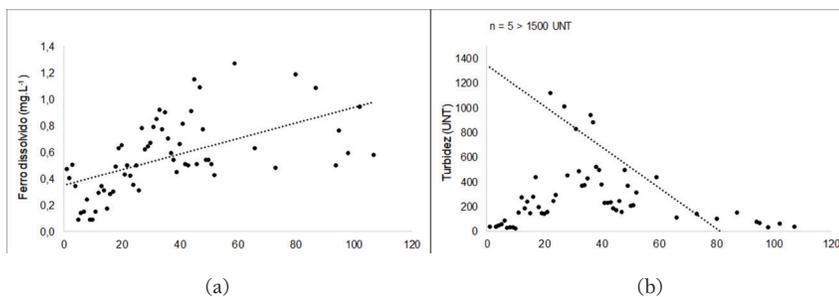
Análise após rompimento da Barragem B1 – Brumadinho-MG:

Em análise dos dados obtidos como resultados de análises em amostras coletadas após o rompimento verificou-se que, para o parâmetro ferro, analisado em fração dissolvida, não foram evidenciadas diferenças significativas entre os resultados medianos reportados para as diferentes estações de monitoramento pós-desastre, a 95% de confiança. Tal fato foi também observado quando comparadas as estações à jusante e montante (Kruskal Wallis – *p-value* > 0,05). Porém, em análise conjunta, com mediana reportada para dados de estações à jusante do rompimento, BP068, BP072 e BP082; considerando o período de 120 dias após o rompimento de B1, verificou-se tendência crescente, conforme resultado ratificado pelo teste de Theil-Sen a 95% de confiança, apresentado na figura 2(a). Tal fato deve-se, possivelmente, ao incremento gradativo da fração solúvel de ferro com o aporte de rejeitos. Para o parâmetro manganês total o referido teste apresentou evidências insuficientes de tendência.

Segundo o Informativo nº 1 do IGAM (2019b), dados históricos de monitoramento no rio Paraopeba (1997 – 2018) apontam para valores médios de turbidez de 84,25 UNT, a 20 km a jusante do desastre. A medição realizada pela COPASA no dia seguinte ao rompimento de B1, 26/01/19, a 19 km a jusante do acidente, resultou em uma turbidez igual a 63.700 UNT. Uma avaliação no dia 28/01/19 verificou-se um decréscimo considerável no valor, com turbidez igual a 7.200 UNT.

Na estação de monitoramento do IGAM BP068, no dia 26/01/19, o valor de turbidez foi igual a 34.500 UNT, valor máximo reportado para tal parâmetro no banco de dados considerado no presente estudo. A medição de 28/01/19 para a mesma estação, o valor apurado foi de 3.826 UNT. A tendência de decréscimo significativo da turbidez com o tempo, para estações à jusante do rompimento (BP068, BP072 e BP082), foi evidenciada pelo teste de estabilidade temporal de Theil-Sen, conforme apresentado na figura 2(b), resultado relacionado à possível deposição e/ou sedimentação dos sólidos suspensos, oriundo dos rejeitos, no fundo calha do rio Paraopeba. Ferro, manganês e metais pesados porventura oriundos de atividades de extração apresentam riscos consideráveis de contaminação porque não se degradam e permanecem solubilizados nas águas ou precipitados como sedimentos de fundo (MINAS GERAIS, 2016)

Figura 2 – Análise de estabilidade temporal: (a) ferro dissolvido; e (b) turbidez.



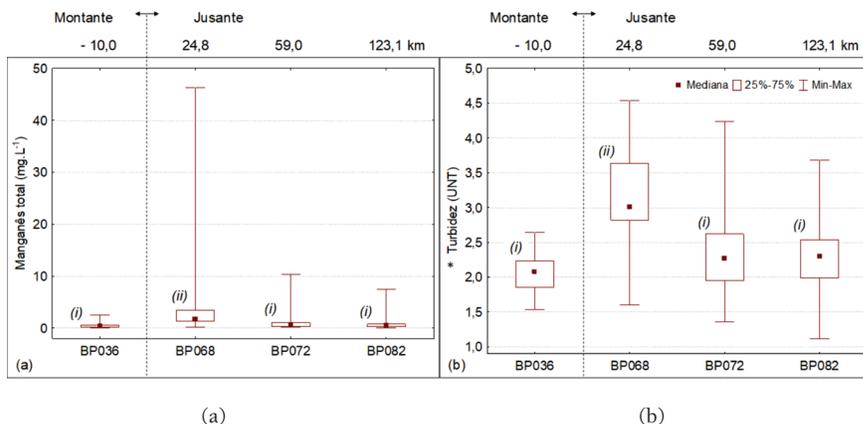
Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: Para turbidez, cinco resultados com valores superiores a 1500 UNT foram omitidos para favorecer a visualização gráfica.

Diferenças significativas foram evidenciadas em análises reportadas nas diferentes estações para os parâmetros manganês total e turbidez (Kruskal Wallis – $p\text{-value} < 0,05$), parâmetros que têm resultados diretamente relacionados com o teor da fração de sólidos em suspensão. Nesse sentido, verificou-se, para ambos os parâmetros, que a estação de monitoramento imediatamente à jusante do rompimento (BP068), localizada a 24,8 km do mesmo, reportou valores de tendência central significativamente superiores às demais estações. Fato também observado para valores máximos

reportados, obtidos em análises de amostras coletadas no dia seguinte ao rompimento, 26/01/2019. Tal resultado encontra-se na figura 3, em que o parâmetro turbidez é apresentado em escala logarítmica para favorecer a visualização do comportamento.

Figura 3 – Dados reportados nas diferentes estações de monitoramento: (a) manganês total; e (b) turbidez.



Fonte: Elaborado pelos autores.

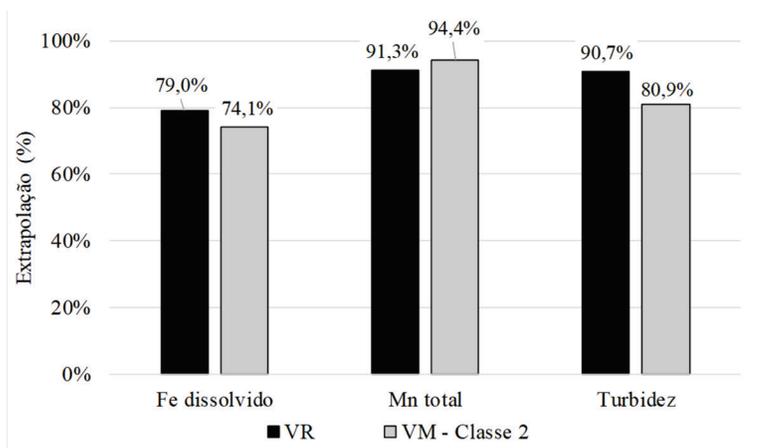
Nota: Teste de Kruskal-Wallis – (i) e (ii) diferença significativa a 95% de confiança. (*) \log_{10} .

As análises evidenciam a rápida sedimentação do rejeito, corroborando em queda considerável nos teores de manganês total e turbidez reportados para amostras coletadas nas estações BP072 e BP082, localizadas a distâncias superiores a 50 km do rompimento da Barragem B1. Os valores reportados para tais estações de monitoramento, localizadas à jusante do rompimento, apresentam-se próximos aos reportados para amostras coletadas à montante (BP036), sem evidências significativas de diferenças entre os valores de tendência central obtidos, a 95% de confiança. Ainda assim, segundo laudo técnico da ANA (2015) reportado para estudo referente ao desastre de Mariana-MG, em 2015, a qualidade da água do rio menciona:

[...] ainda estará sujeita a variações turbulentas decorrentes da sedimentação da massa de rejeitos quando da ocorrência de chuvas e consequente aumento da vazão, intervenções físicas abruptas no rio e outras ações antrópicas que possam aumentar o poder de degradação e transporte de sedimentos acumulados na sua calha, sendo esperados novos picos de turbidez, queda de oxigênio dissolvido, aumento temporário da concentração de metais e prejuízos para os diversos usuários de água da bacia nessas ocasiões, por períodos indeterminados e imprevisíveis ANA (2015).

Tomando os VR calculados e VM estabelecidos nas normativas que estabelecem padrões para corpos hídricos classe 2 para os diferentes parâmetros, verificou-se o percentual de dados que extrapolaram os limites para amostras coletadas em estações localizadas à jusante do rompimento da Barragem B1 (figura 4). De modo geral, verificou-se elevado percentual de extrapolação, mesmo para amostras coletadas em estações com localização mais distante do rompimento, fato que pode evidenciar, para ferro e manganês, a ocorrência natural de tais elementos na geoquímica da região e uma contribuição considerável do aporte de rejeitos oriundos do desastre. Para o parâmetro manganês total, mais de 91% das amostras coletadas nas estações à jusante do rompimento de B1 extrapolaram o VR proposto, igual a $0,17 \text{ mg.L}^{-1}$.

Figura 4 – Percentual de extrapolação do VR e VM para amostras coletadas em estações de monitoramento à jusante do rompimento: ferro dissolvido, manganês total e turbidez.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para os parâmetros ferro dissolvido e turbidez, os VR calculados apresentaram-se mais sensíveis à detecção de impactos ao corpo hídrico, quando comparados aos padrões estabelecidos pelas legislações vigentes. Nesse sentido, para o parâmetro ferro, verificou-se cerca de 5% a mais de amostras fora do limite estabelecido pelo VR ($0,26 \text{ mg.L}^{-1}$) quando comparado ao enquadramento ao VM ($0,30 \text{ mg.L}^{-1}$). Para turbidez a diferença foi ainda maior, cerca de 10% a mais de amostras não se enquadraram ao limite estabelecido pelo VR ($39,7 \text{ UNT}$) quando comparadas ao enquadramento ao padrão de VM ($100,0 \text{ UNT}$).

O rio Paraopeba é a principal fonte de captação de água do município de Pará de Minas, localizado próximo à estação de monitoramento BP082, a cerca 123,1 km do rompimento da Barragem B1. O município teve seu abastecimento de água comprometido e situação de emergência decretada 10 dias após o desastre. Segundo reportado por Garrôcho e Kadavid (2019), por meio de assinatura de Termo de Ajustamento de Conduta, a empresa Vale afirmou assumir as responsabilidades pela realização de obras que garantam o abastecimento, incluindo a perfuração de novos

poços artesianos, manutenção dos poços já existentes e estabelecimento de novas redes de captação, considerando mananciais alternativos.

Considerações finais

Como resultado de planos de monitoramento, o estabelecimento de valores de referência e padrões de qualidade torna-se estratégico na identificação de impactos e perturbações ao estado de equilíbrio e estabilidade ambiental. Assim, a proposição de VR para o rio Paraopeba, utilizando-se de metodologia com credibilidade estatística e série temporal robusta de dez anos, possibilitou o cálculo de limites muito próximos aos percentis 75%, medida adotada em metodologia referência para estimativa de valores de qualidade. Para o presente estudo, foram considerados parâmetros físico-químicos que apresentassem relação direta com a atividade minerária e que servissem de traçadores do impacto causado pela mesma, sendo eles: ferro dissolvido, manganês total e turbidez, com VR estimados em $0,26 \text{ mg.L}^{-1}$, $0,17 \text{ mg.L}^{-1}$ e $39,7 \text{ UNT}$, respectivamente. Para ferro e manganês, a proximidade dos valores propostos com padrões estabelecidos pelas legislações vigentes para corpos hídricos classe 2, pode ser indicativo da ocorrência natural dos referidos metais no corpo hídrico em função da geoquímica local. Como etapa de caracterização do impacto do rompimento da Barragem B1, análises de amostras coletadas em estações de monitoramento à jusante evidenciaram tendência significativa de incremento de ferro dissolvido com o tempo e decréscimo nos resultados das análises de turbidez, a 95% de confiança. Análises para os parâmetros manganês total e turbidez apresentaram resultados medianos significativamente superior em estação de monitoramento mais próxima ao rompimento, BP068, localizada a 24,8 km, a 5% de confiança. De modo geral, em comparação com os VR, verificou-se elevado percentual de amostras fora do enquadramento aos limites propostos, indicativo de que a metodologia adotada demonstrou-se sensível ao impacto avaliado. Por fim, acredita-se que o presente estudo abre perspectivas para novas

análises, considerando: (i) um número maior de dados, coletados em outras estações de monitoramento, também localizadas no curso do rio Paraopeba; (ii) maior número de parâmetros físico-químicos indicadores de qualidade; (iii) outros estimadores e limites para estabelecimento de valores de referência, bem como (iv) a adoção de métodos de tratamento de dados censurados. Nesse sentido, tal abordagem pode nortear uma avaliação crítica dos VR propostos no presente estudo e incrementar sistemas de monitoramento para municípios localizados à jusante de atividades minerárias, bem como caracterizar impactos e desastres decorrentes de tais atividades.

Referências

ANDRADE, L. N. *et al.* Composição mineralógica e geoquímica dos solos do parque estadual do Itacolomi - Ouro Preto/MG. *Quaternary and Environmental Geosciences*, v. 3, n. 1-2, p. 1-8, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Cadastro Relatório de Segurança de Barragens 2017. 2018. Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2017>. Acesso em: 5 jul. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Relatório Técnico. Análise Preliminar sobre a qualidade da água e seus reflexos sobre os usos da água. 2015.

ARAÚJO, E. R. *et al.* Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente. In: Recursos minerais e sociedade: impactos humanos - socioambientais - econômicos. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.

BORSEKOVA, K. *et al.* Urban resilience patterns after an external shock: an exploratory study. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 31, p. 381-392. 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Boletim informativo do setor mineral, 2017. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/2674215/Boletim+Informativo+do+Setor+Mineral+2017+%28PDF%29/416c7c4c-6046-4ab6-bfbb-92251f87b656?version=1.2>. Acesso em: 17 jul. 2019.

CARVALHO, P. S. L. *et al.* Sustentabilidade Socioambiental da Mineração. BNDES Setorial, v. 47, p. 333–390, 2018.

CARVALHO FILHO *et al.* Óxidos de manganês em solos do quadrilátero ferrífero (MG). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 3, p. 793-804, 2011.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo. São Paulo: CETESB, 2001. 247p.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. Deliberação Normativa nº 62, de 17 de dezembro de 2002. Dispõe sobre critérios de classificação de contenção de rejeitos, de resíduos e reservatórios de água em empreendimentos industriais e de mineração no Estado de Minas Gerais.

COSTA, A. T. *et al.* Surface water quality and sediment geochemistry in the Gualaxo do Norte basin, eastern Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Environmental Geology*, v. 45, n. 2, p. 226–235, 2003.

COSTA, S. A. D. *et al.* Pedogênese e classificação de latossolos desenvolvidos de itabiritos no Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 2, p. 359-371, 2014.

DUARTE, A. P. *Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco*. 2008. *Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio*

Ambiente e Recursos Hídricos - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ELY, D. F.; DUBREUIL, V. Análise das tendências espaço-temporais das precipitações anuais para o estado do Paraná – Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 21, p. 553-569, 2017.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Inventário de barragens do Estado de Minas Gerais: ano 2017. Belo Horizonte, fev. 2018a.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Inventário de resíduos sólidos da mineração: ano base 2017. Belo Horizonte, dez. 2018b.

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ. Nota técnica: Avaliação dos impactos sobre a saúde do desastre da mineração da Vale (Brumadinho, MG). Minas Gerais, fev. 2019.

FREITAS, C. M *et al.* O desastre na barragem de mineração da Samarco - fratura exposta dos limites do Brasil na redução de risco de desastres. *Ciência e Cultura*, v. 68, n. 3, p. 25-30. 2016.

FREITAS, C. M. *et al.* Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 35, n. 5, 2019.

GARRÔCHO, M.; KADAVID, K. G1 - Após tragédia em Brumadinho que atingiu Pará de Minas, Vale assina TAC com Prefeitura. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/centro-oeste/noticia/2019/03/18/apos-tragedia-em-brumadinho-que-atingiu-para-de-minas-vale-assina-tac-com-prefeitura.ghtml>. Acesso em 26 jul. 2019

GONELLA, J. S. L. *et al.* Diagnóstico dos Impactos Ambientais no Setor de Mineração. In: Congresso Internacional de Administração, 2015. *Anais [...]*. p. 1–12, 2015.

HELSEL, D.R.; HIRSCH, R.M. Statistical methods in water resources. In: *Techniques of Water-resources Investigations of the United States Geological Survey*. Washington: U.S. Government Printing Office, 2002.

HERNANTES, J. *et al.* Towards resilient cities: A maturity model for operationalizing resilience. *Cities*, v. 84, n. July 2018, p. 96–103, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. *Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração*. 1.ed., Brasília, 2016.

IDAHO DEQ - Department of Environmental Quality. *Statistical Guidance for Determining Background Ground Water Quality and Degradation*. Water Quality Division. p. 103, 2014.

IDEM - Indiana Department of Environment Management. *The southwest Indianapolis air toxics study 95% upper confidence limits*. Fact Sheet, mar, 2010.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. *Séries históricas de monitoramento da qualidade das águas superficiais no estado de Minas Gerais*. 2019a. Disponível em: <http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/noticias/349-eries-historicas-de-monitoramento-da-qualidade-das-aguas-superficiais-no-estado-de-minas-gerais>. Acesso em 26 jul. 2019.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. *Informativo dos parâmetros de qualidade da água - Rio Paraopeba - após desastre na barragem B1- Brumadinho/MG*. 2019b. Disponível em: <http://200.198.57.118:8080/handle/123456789/2934>. Acesso em 26 jul. 2019.

JABAREEN, Y. Planning the resilient city: Concepts and strategies for coping with climate change and environmental risk. *Cities*, v. 31, p. 220–229, 2013.

LEITE, A. L. *et al.* Atividade mineradora e impactos ambientais em uma empresa cearense. Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento, n. c, p. 7282–7286, 2018.

LEMOS, M. M. G. *et al.* Metodologia adotada para o estabelecimento dos valores de referência de qualidade para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo. In: 1st Joint World Congress on Groundwater, Brasil - Fortaleza, 2000.

LOPES, L. M. N. O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais. *Sinapse Múltipla*, v. 5, n. 1, p. 1 – 14, 2016.

MECHI, A.; SANCHES, D. L. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. *Estudos Avançados*, v. 24, n. 68, p. 209–220, 2010.

MEEROW *et al.* Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning*, v. 147, p. 38–49, 2016.

MELFI, A. J. *et al.* Recursos minerais no Brasil: problemas e desafios. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. 417 p.

MILANEZ, B *et al.* Impactos da Mineração. *Le Monde Diplomatique Brasil*, p. 34. 2010.

MILANEZ, B. Dialogues between social and natural sciences: contribution to the debate on socio-environmental conflicts. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, v. 87, n. 4, p. 2335 – 2348. 2015.

MILANEZ, B. Mineração, ambiente e sociedade: impactos complexos e simplificação da legislação. *Boletim regional, urbano e ambiental*, 2017.

MINAS GERAIS. Secretaria de estado do desenvolvimento regional, política urbana e gestão metropolitana. Relatório: Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem do Fundão em Mariana-MG. Grupo da força-tarefa - Belo Horizonte, 2016.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Manual de Normas e Procedimentos para Licenciamento Ambiental no Setor de Extração Mineral. Brasília, agosto de 2011.

PORSANI, J. L. *et al.* GPR Survey on an Iron Mining Area after the Collapse of the Tailings Dam I at the Córrego do Feijão Mine in Brumadinho-MG, Brazil. *Remote Sensing*, v. 11, n. 7, p. 860, 2019.

REIMANN, C. *et al.* Statistical data analysis explained. Applied environmental statistics with R. 1 ed. Chichester. Ed. John Wiley & Sons, 362 p. 2008.

REZENDE, V. L. A mineração em Minas Gerais: uma análise de sua expansão e os impactos ambientais e sociais causados por décadas de exploração. *Revista Sociedade & Natureza*, v. 28, n. 3, p. 375–384, 2016.

ROCHA, O. G. F. *et al.* Banco de solos do estado de Minas Gerais – Manual de Procedimentos Analíticos para a determinação de VRQ de elementos-traço em solos do Estado de Minas Gerais. Fundação Estadual do Meio Ambiente – Minas Gerais, 2013.

SABINO, C. V. S. *et al.* Uso de métodos estatísticos robustos na análise ambiental. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, ed. especial, p. 87-94, 2014.

SARRAFF, T. E. S.; SILVA, A. Promoção da cultura de prevenção de riscos por meio dos núcleos comunitários de proteção e defesa civil. *Revista Ordem Pública*, v. 9, n. 1, p. 67–78, 2016.

SILVA, H.; SANTOS, I. R. T. Mineração e cidade, cidade da mineração: notas sobre a produção do espaço urbano das cidades mineiras sob a égide da indústria mineradora. Diamantina: Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional, 2010.

SINGH, A. *et al.* On the Computation of a 95% Upper Confidence Limit of the Unknown Population Mean Based Upon Data Sets with Below Detection Limit Observations. Washington, DC: USEPA, 2006 (EPA/600/R-06/022)

SPAANS, M.; WATERHOUT, B. Building up resilience in cities worldwide – Rotterdam as participant in the 100 Resilient Cities Programme. *Cities*, v. 61, p. 109–116, 2017.

STATASOFT. Statistica (data analysis software system), versão 8.0. 2007.

UNISDR – ESCRITÓRIO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA REDUÇÃO DE RISCOS E DESASTRES. Como Construir Cidades Mais Resilientes Um Guia para Gestores Públicos Locais. Genebra, nov. 2012.

UNISDR – ESCRITÓRIO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA REDUÇÃO DE RISCOS E DESASTRES. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 – 2030. Genebra, 2015.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. ProUCL Software. 2019. Disponível em: <https://www.epa.gov/land-research/proucl-software>. Acesso em 26 jul. 2019.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. 2018 edition of the drinking water standards and health advisories. Washington, DC: USEPA, 2018 (EPA 822-F-18-00).

VALE. Quem somos. 2017a. Disponível em: < <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/Paginas/default.aspx> >. Acesso em: 10 jul. 2019;

VALE. Entenda as barragens da VALE. 2017b. Disponível em: < http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/Paginas/Entenda-as-barragens-da-Vale.aspx >. Acesso em: 10 jul. 2019.

VALE. Vale atualiza informações sobre o rompimento da barragem de Brumadinho. 2019. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/Vale-atualiza-informacoes-sobre-o-rompimento-da-barragem-de-Brumadinho.aspx>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

VIRGINIA DEQ - Department of Environmental Quality. Data Analysis Guidelines for Solid Waste Facilities. Richmond, VA: Virginia DEQ. 2003.

CAPÍTULO 7

SEGURANÇA NO TRÂNSITO: A ZONA DE TRANSIÇÃO ENTRE OS TRECHOS RURAL E URBANO EM RODOVIAS QUE CRUZAM CENTROS URBANOS

Ana Cristina Junqueira Ribeiro; José Alberto Barroso Castañon⁷
Universidade Federal de Juiz de Fora/ Brasil

Introdução

A sustentabilidade das cidades passa, inequivocamente, pela segurança de seus acessos e dos trechos rodoviários que cruzam sua área urbana.

A caracterização do ambiente rodoviário auxilia a verificação das necessidades dos usuários da rodovia, entre pedestres e motoristas, no que tange às condições de segurança e à utilização dos diversos dispositivos para alcançá-la.

O ambiente rodoviário é dividido em rural e urbano (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), 2008). Esta divisão é utilizada pelos órgãos responsáveis pela manutenção, fiscalização e operação das rodovias, que tem preocupações diferentes quanto à segurança nesses dois ambientes. É fácil para um usuário mais atento verificar as diferenças, definidas por placas de sinalização, fiscalização mais intensa e presença maior de usuários não motorizados na rodovia. Inclui-se nos elementos de diferenciação a placa de sinalização de início e fim do perímetro urbano.

⁷ jose.castanon@ufjf.br

Devido à interpenetração entre estes ambientes, notada na observação do espaço, acredita-se na existência uma zona intermediária, denominada Zona de Transição.

Para tanto, deve-se salientar que em torno das rodovias, o uso e ocupação do solo apresenta uma configuração de espaços onde, segundo o DNIT (2006), a sobreposição de uso impacta na condição de operacionalidade da via. Portanto, a delimitação da zona de transição busca implementar parâmetros que elaborem um diagnóstico de ocupação e uso para que seja possível manter a segurança e qualidade de vida para os usuários desses trechos.

Para auxiliar na busca de uma rodovia mais segura, principalmente nos seus trechos urbanos, buscamos propor uma metodologia para definição da chamada “Zona de Transição” entre os trechos rural e urbano, de forma a possibilitar ações mais adequadas a cada um desses trechos.

Para atingir tal objetivo, foram realizadas uma pesquisa bibliográfica e uma pesquisa experimental, esta com base nos estudos de casos de trechos selecionados culminando na geração de parâmetros para a caracterização da Zona de Transição.

A pesquisa teve como local de estudo a BR-116, que é uma rodovia de jurisdição federal, fiscalizada pela Polícia Rodoviária Federal (PRF) e operada pelo DNIT. O trecho delimitado para a pesquisa compreende 12 cidades: Caratinga, Santa Rita de Minas, Santa Bárbara de Minas, Manhuaçu, São João do Manhuaçu, Orizânia, Fervedouro, São Francisco do Glória, Miradouro, Muriaé, Laranjal e Leopoldina.

Dessas cidades, foram selecionadas cinco, com trechos cortados pela rodovia, atendendo ao foco do estudo – cidades cortadas por rodovias de pista simples e mão dupla. Considerando que apenas o plano diretor tem a função de delimitar o espaço urbano e rural, mesmo que não aplicado efetivamente pelas cidades, a seleção de cidades se limitou às que possuem o plano diretor.

Dessa forma, apenas quatro das doze iniciais, foram selecionadas, todas com mais de 20.000 habitantes e com Plano Diretor, mesmo que

não efetivamente implementado. Essas informações foram compiladas e são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Dados sobre perímetro urbano e plano diretor.

S e n t i d o n o r t e - s u l	Cidades	Nº de Habitantes IBGE (2010)	Perímetro Urbano	Plano Diretor
	Caratinga	85.239	Sim	Sim
	Santa Rita de Minas	6.5547	Não	Não
	Santa Bárbara do Leste	7.682	Não	Não
	Manhuaçu- Distritos	79.574	Sim	Sim
	São João do Manhuaçu	10.245	Não	Não
	Orizânia	7.284	Não	Não
	Fervedouro	10.349	Sim	Não
	São Francisco do Glória	5.114	Não	Não
	Miradouro	10.251	Não	Não
	Muriaé	100.765	Sim	Sim
	Laranjal	6.826	Sim	Não
	Leopoldina	51.130	Sim	Sim

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

Fonte: autores.

Foram verificados os marcos quilométricos da rodovia na delimitação de início e fim dos perímetros urbanos, marcos esses que são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Marcos quilométricos dos perímetros urbanos.

S e n t i d o N o r t e - S u l	Cidades	Distrito	Início (Km)	Fim (Km)	Extensão (Km)
	Caratinga		524,90	530,84	5,94
	Manhuaçu	Realeza	589	591	2,00
		Vila Nova	586	588	2,00
	Muriaé		703,60	709,20	5,60
Leopoldina		761,10	770,10	9,00	

Fonte: autores.

Estudo dos espaços

A conceituação dos espaços urbano e rural tem sofrido constantes alterações, se afastando cada vez mais do antigo conceito em que o urbano representa as cidades e rural o campo, agricultura. As transformações sociais, econômicas e culturais ocorridas tanto no espaço rural, quanto no espaço urbano, vêm mudando a análise dos mesmos pela incorporação de novos elementos que mudam suas concepções (CAMPOS e SANTOS, 2008).

Devido a essa característica híbrida do espaço, nenhum estudo dos ambientes urbano e rural pode ser realizado separadamente, pois existe uma relação cidade-campo que as interligam, e que faz com que sejam percebidas algumas características do espaço urbano dentro do espaço rural e vice-versa. Desta forma é necessário buscar as características que diferenciam estes dois ambientes, observando as peculiaridades desta interligação entre estes espaços, pois é nela que se encontram as características para a delimitação deste espaço de transição.

Existem duas abordagens que podem ajudar nesta busca pela definição mais clara dos espaços rural e urbano. A abordagem “dicotômica” se baseia na oposição entre rural e urbano, onde as diferenças estabelecem cada um destes espaços. Já a abordagem “continuum” apresenta a ideia de que a mudança ocorrida na sociedade, em geral pelo processo de urbanização, vem atingindo o espaço rural, aproximando-o do espaço urbano (CAMPOS e SANTOS, 2008).

Sorokin, Zimmermann e Galpin (1986) analisaram estudos dos espaços rural e urbano e construíram uma caracterização através de diferenças das características e combinações compostas nas classificações dos espaços. Dessa forma, são elencadas oito diferenciações básicas que são apresentadas a seguir:

1. Ocupacional, que é definida pela função econômica exercida nos espaços, sendo a função econômica do espaço rural uma função agrícola e a urbana uma função diversificada dependendo da atividade de cada cidade;

2. Ambiental, que é relacionada com o ambiente de trabalho da população. Na urbana sua população trabalha em meio a imensas estruturas que os cercam, já a população rural trabalha, em sua maioria, ao ar livre em contato com a natureza;
3. Tamanho das aglomerações, sendo a comunidade rural de ocupação mais esparsa e a comunidade urbana mais adensada de grande variação;
4. Densidade demográfica, sendo que os espaços urbanos possuem uma acentuada densidade demográfica quando comparada com os espaços rurais;
5. A homogeneidade e heterogeneidade das populações. As populações rurais apresentam crenças religiosas, opiniões e comportamentos mais semelhantes entre si e sempre buscam preservar as tradições, neste contexto existe uma homogeneidade dentro dos espaços rurais. Contudo, nos espaços urbanos, a população é formada por diversas pessoas produzindo um ambiente heterogêneo onde a cultura, a religião, os costumes e a conduta diferenciam de comunidade para comunidade dentro das próprias cidades;
6. A estratificação social dos espaços, pois a sociedade urbana possui uma complexidade social maior, ligada a divisão do trabalho, o que gera uma diferença nos padrões de vida, com isso no espaço urbano a estratificação é maior que nos espaços rurais;
7. A mobilidade social, que é entendida através da dinâmica migratória, onde a população se descola acentuando os movimentos em que essa mobilidade tem características territoriais, ocupacionais e econômicas;
8. A integração social, que produz um sistema muito mais complexo no ambiente urbano do que no ambiente rural, pois a diversificação das relações urbanas quanto à mobilidade e a dinâmica apresenta um caráter diverso das relações sociais tornando o espaço fragmentado e hierarquizado. Já no ambiente rural como a mobilidade é pequena, as interações sociais são emocionais e profundas onde as pessoas são ligadas por vínculos.

A identificação dos espaços urbano e rural é muito complexa, pois as transformações sociais destes espaços e a aproximação existente entre eles dificulta a delimitação de fronteiras. A classificação sustentada pela

mudança espacial ocorrida nos fatores como densidade demográfica, tamanho, interligações socioeconômicas, acabam sendo variáveis, pois estes fatores dependem dos avanços técnicos e econômicos, da urbanização das sociedades em questão, para construir os limites entre a cidade e o campo (CAMPOS e SANTOS, 2008).

Para o estado brasileiro, área urbana é a sede do município ou distrito que é definida pelo IBGE como as áreas internas ao perímetro urbano de uma cidade ou vila, caracterizada por construções, densidade populacional e arruamentos, áreas na qual ocorre a transformação do ambiente pelo processo de desenvolvimento urbano nas áreas de expansão (MARQUES, 2002). Enquanto que área rural é aquela que não é urbana, segundo IBGE (2010) são áreas externas aos perímetros urbanos onde essas delimitações são definidas pelos órgãos municipais.

O espaço rural compreende a área externa ao perímetro urbano, existindo diferenças quanto às características dessa área, criando subdivisões dentro do espaço rural, que podem ser visualizadas na tabela 3.

Tabela 3 – Classificação das áreas rurais segundo o IBGE.

Denominação	Tipo	Definição
Aglomerado	Rural	Localidade situada em área não definida legalmente como urbana e caracterizada por um conjunto de edificações permanentes e adjacentes, formando área continuamente construída, com arruamentos reconhecíveis e dispostos ao longo de uma via de comunicação.
	Rural de extensão urbana	Localidade que tem as características definidoras de Aglomerado Rural e está localizada a menos de 1 Km de distância da área urbana de uma Cidade ou Vila. Constitui simples extensão da área urbana legalmente definida.
	Rural isolado	Localidade que tem as características definidoras de Aglomerado Rural e está localizada a uma distância igual ou superior a 1 Km da área urbana de uma Cidade, Vila ou de um Aglomerado Rural já definido como de extensão urbana.

Denominação	Tipo	Definição
Aglomerado Rural Isolado	Povoado	Localidade que tem a característica definidora de Aglomerado Rural Isolado e possui pelo menos 1 (um) estabelecimento comercial de bens de consumo frequente e 2 (dois) dos seguintes serviços ou equipamentos: 1 (um) estabelecimento de ensino de 1º grau em funcionamento regular, 1 (um) posto de saúde com atendimento regular e 1 (um) templo religioso de qualquer credo. Corresponde a um aglomerado sem caráter privado ou empresarial ou que não está vinculado a um único proprietário do solo, cujos moradores exercem atividades econômicas quer primárias, terciárias ou, mesmo secundárias, na própria localidade ou fora dela.
	Núcleo	Localidade que tem a característica definidora de Aglomerado Rural Isolado e possui caráter privado ou empresarial, estando vinculado a um único proprietário do solo (empresas agrícolas, indústrias, usinas, etc.).
	Lugarejo	Localidade sem caráter privado ou empresarial que possui característica definidora de Aglomerado Rural Isolado e não dispõe, no todo ou em parte, dos serviços ou equipamentos enunciados para povoado.

Fonte: (IBGE, 2016).

Perímetro urbano

Segundo o Ministério das Cidades (2004), a construção dos planos diretores deve ser uma responsabilidade de todos os municípios, pois planejar as cidades estabelecendo uma relação de todos os setores é fundamental para o desenvolvimento das políticas públicas.

Segundo o Estatuto das Cidades, Lei 10.257 de 10/7/2001, o plano diretor é um instrumento de que é obrigatório para municípios que possuam as seguintes características:

- Mais de 20 mil habitantes;
- Integram regiões metropolitanas e aglomerações urbana;
- Tenham áreas de especial interesse turístico;

- Estejam situados em áreas de influência de empreendimentos ou atividades com significativo impacto ambiental na região ou no país.

Assim, nem todos os municípios tem obrigatoriedade de elaborar o plano diretor, mas apesar disto, o Ministério das Cidades recomenda que todos os municípios brasileiros o façam. A gestão da política urbana através desse instrumento possibilita a construção e reconstrução dos espaços urbanos, integrando os ecossistemas, e respeitando a identidade e a diversidade social e cultural do homem que vive nas cidades.

Serratto e Michellon (2009) tratam da delimitação do perímetro urbano por uma perspectiva mais ligada aos elementos físicos, e neste contexto apresentam o decreto-lei 311 de 1938, estabelecendo que a partir de sua efetivação as sedes municipais existentes se tornaram cidades, e para a formação de futuras cidades seria exigida a existência de pelo menos 200 casas, e ainda para a formação de futuras vilas (sedes de distrito), um mínimo de 30 moradias.

Segundo Veiga (2001), existe uma dificuldade em se adotar parâmetros, no Brasil, como os indicados na Tabela 4, pois a urbanização é concentrada em determinadas regiões específicas, o que configura uma diferença entre os municípios brasileiros e os municípios dos países que fazem parte da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). Segundo Veiga (2001), é razoável adotar como parâmetro para a caracterização de áreas urbanizadas a densidade demográfica em torno de 80 hab./km², apesar da *Organization de Coopération et de Développement Economiques* – OCDE (1996) sugerir os parâmetros na tabela 4.

Tabela 4 – Características de subdivisão do espaço.

Categoria	Porcentagem Populacional para ocupação de localidades	Densidade Demográfica
Essencialmente Rural	Mais de 50%	<150 hab./km ²
Relativamente Rural	Entre 15% à 50%	Com mesma densidade
Essencialmente Urbana	Acima de 85%	> 150 hab./km ²

Fonte: Adaptado de Serratto e Michellon (2009).

Zona De Transição

A conceituação da Zona de Transição se baseia na delimitação e caracterização do espaço através de cinco parâmetros, que são descritos abaixo:

1) Ocupação e uso do solo das faixas lindeiras (demografia): para a rodovia BR 116 adotou-se como parâmetro a densidade demográfica, a fim de determinar e quantificar a aglomeração urbana na faixa que determina a transição.

Os procedimentos realizados para identificação dos trechos foram:

- Escolha trechos que possuem aglomeração urbana nas cidades, mas se encontram na zona de expansão urbana e no rural de extensão;
- Delimitação da região onde se encontra a aglomeração;
- Quantificação da área delimitada;
- Contabilização do número de edificações que se encontram dentro da delimitação;
- Para o cálculo da população é utilizada a média de moradores em domicílios particulares ocupados para cada cidade escolhida, fornecida pelo IBGE;
- A taxa demográfica é calculada pela divisão do número de habitantes pela área calculada de cada trecho.

Para essa caracterização é proposta a quantificação a partir dos dados relacionados, levando em consideração o parâmetro estabelecido pela OCDE de uma densidade demográfica de 150 habitantes por quilometro quadrado, ou seja, quando a densidade for inferior a esse valor o ambiente é considerado rural.

Sendo as taxas maiores ou iguais à do trecho urbanizado podemos considerá-lo urbano, caso contrário podemos considerá-lo uma Zona de Transição.

2) Identificação de equipamentos urbanos públicos: todos os bens públicos ou privados, de utilização pública, destinados à prestação de serviços necessários funcionamento da cidade, no qual determina as categorias como saúde, educação, sistema de energia e abastecimento, circulação e transporte entre outros.

Os procedimentos realizados para identificação dos trechos são:

- Delimitação do trecho no qual existe aglomeração urbana;
- Verificação da presença de equipamentos urbanos próximos à via;
- Quantificação da distância em linha reta até o eixo da rodovia;

3) Verificação da segurança viária nos trechos de aplicação: Para a questão de segurança viária são relacionados dispositivos de sinalização, fiscalização e feita a quantificação de acidentes nos trechos demarcados. Os procedimentos utilizados para verificação dos trechos são:

- Contabilização das quantidades de placas existentes nos trechos demarcados;
- Quantificação de redutores de velocidade (quebra-molas) ao longo da rodovia no trecho;
- Quantificação de radares ao longo da rodovia no trecho limitado;
- Quantificação de faixas de pedestre ao longo da rodovia no trecho limitado;
- Contabilização do número de acidentes em que cada trecho.

4) Verificação quanto à mobilidade e acessibilidade: A mobilidade e a acessibilidade da via no trecho de transição serão avaliadas principalmente quanto à questão de acesso por parte dos veículos. Os procedimentos utilizados para verificação dos trechos são:

- Contabilização de acessos pavimentados nos dois sentidos da via;

- Contabilização de acessos não pavimentados nos dois sentidos da via.

5) Questões operacionais da via no ambiente de transição: Seguindo parâmetros do DNIT e da PRF quanto ao sistema operacional, foram avaliadas as questões de sinalização e velocidade máxima permitida no trecho de Transição. Os procedimentos para verificação das questões operacionais da via no ambiente de transição são:

- Quantificação das placas que apresentam a velocidade permitida em cada trecho para verificação da velocidade praticada em cada trecho com a velocidade operacional.

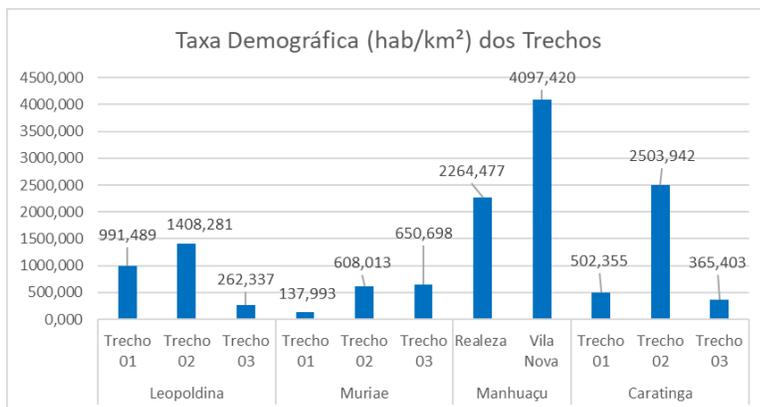
Para aplicação dos parâmetros foram escolhidos trechos dentro dos municípios, que se encontram na zona de expansão urbana e rural de extensão. Para o município de Manhuaçu foram selecionados dois trechos, pois a BR-116 não passa na sede do município e sim em distritos.

Para criação do conceito – Zona de Transição, aplicou-se a elaboração de parâmetros que identificam e caracterizam o ambiente rodoviário de forma a proporcionar uma condição de delimitação do tipo de espaço. Os parâmetros como uso e ocupação do solo através da taxa demográfica e o equipamento urbano apresentam relação com o tipo de população usuária da rodovia. O parâmetro de segurança viária demonstra que, com uso por parte destes habitantes, existe a necessidade de sinalização e fiscalização para se minimizar os acidentes nos espaços compreendidos pela rodovia. A questão de mobilidade e acessibilidade também tem o papel relacionado com o deslocamento, a sobreposição do número de acessos pavimentados e não pavimentados ligados ao urbano e ao rural configuram a Zona de Transição. A velocidade operacional da via apresenta uma significativa alteração dependendo do ambiente rodoviário acarretando uma diminuição de seu padrão.

Para o processo de identificação do ambiente de transição, avaliou-se parâmetros relacionados às faixas lindeiras. Todos esses parâmetros são compilados e analisados para a verificação da existência de Zona de Transição entre o perímetro urbano e o rural ao longo de uma rodovia.A

Figura 1 apresenta um comparativo entre os municípios e seus respectivos trechos escolhidos nesta pesquisa.

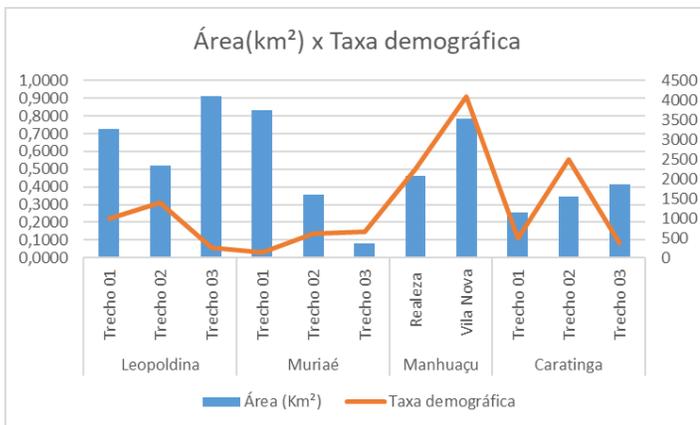
Figura 1 - Comparativo das taxas demográficas dos trechos selecionados.



Fonte: Os autores.

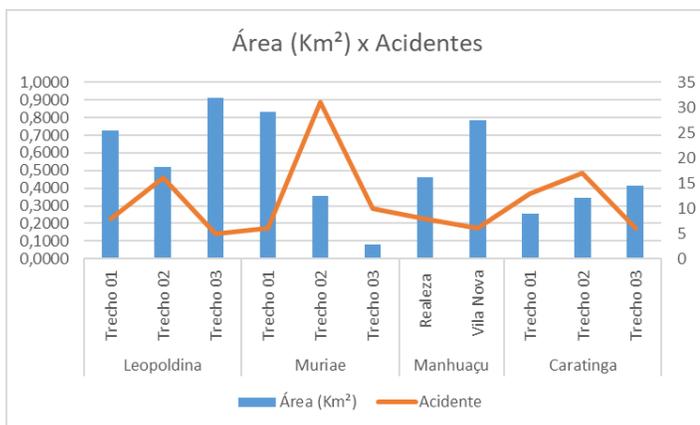
Pode ser visto na figura 2 que, quando os trechos estão na expansão urbana, a demografia tem uma taxa significativa, pois são locais onde existem o crescimento de loteamentos residenciais. Enquanto a figura 3 relaciona área do trecho com o número de acidentes e a figura 4 o número de casas por área.

Figura 2 - Comparação entre áreas (km²) e taxa demográfica nos trechos.



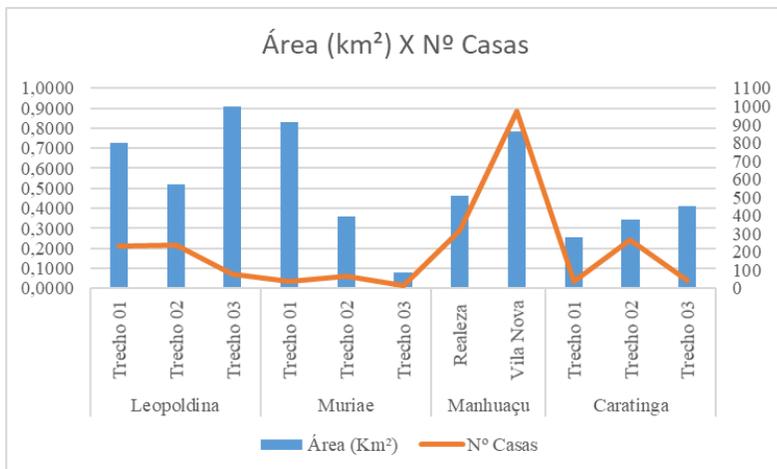
Fonte: Os autores.

Figura 3 - Comparação entre áreas (km²) e acidentes nos trechos.



Fonte: Os autores.

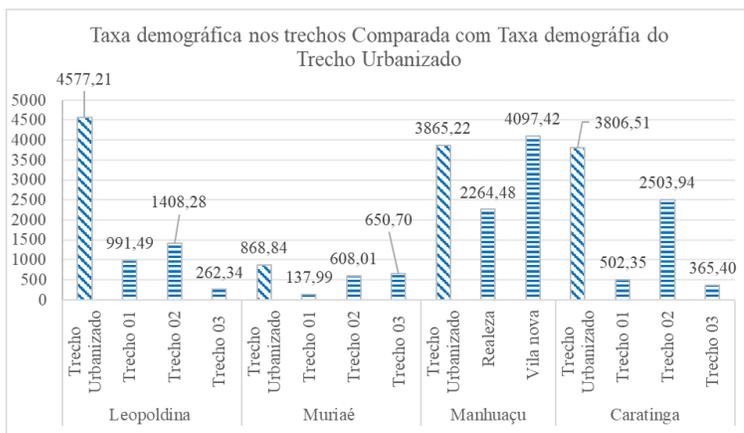
Figura 4 - Comparação entre áreas (km²) e número de casas nos trechos.



Fonte: Os autores.

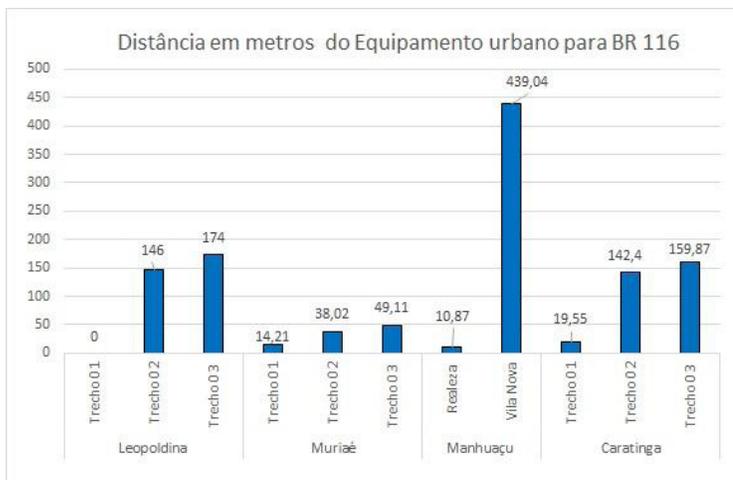
A figura 5 apresenta a comparação entre os trechos urbanizados com os trechos de estudo. O parâmetro de identificação do equipamento urbano pode ser conferido na figura 6, que apresenta para cada trecho, as distâncias dos mesmos para a BR 116. Deve-se ressaltar que cada trecho possui iluminação pública em vias paralelas na sua faixa lindeira, exceto os trechos 03 de Caratinga e Muriaé, nos quais não possuem ruas paralelas, além de estarem inseridos no rural de extensão.

Figura 5 - Comparação entre a taxa demográfica nos trechos e a taxa demográfica do trecho urbanizado.



Fonte: Os autores.

Figura 6 - Identificação das distâncias dos equipamentos urbanos para a via.



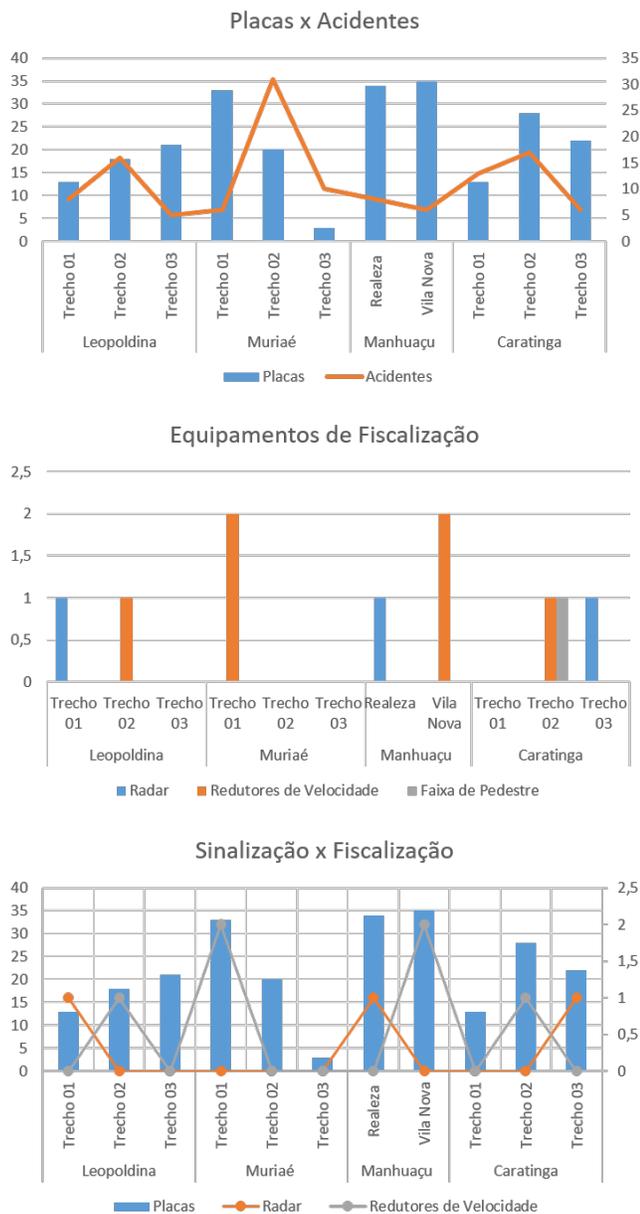
Fonte: Os autores.

A verificação da segurança viária foi avaliada pelos dispositivos de sinalização, fiscalização e a relação de acidentes nos trechos. Os dados representados na Figura 7 consistem nos elementos quantificados para

cada trecho de estudo. Analisando o Gráfico percebe-se que a sinalização por placas é mais frequente, tendo uma variação de 13 a 35 elementos por trecho selecionado.

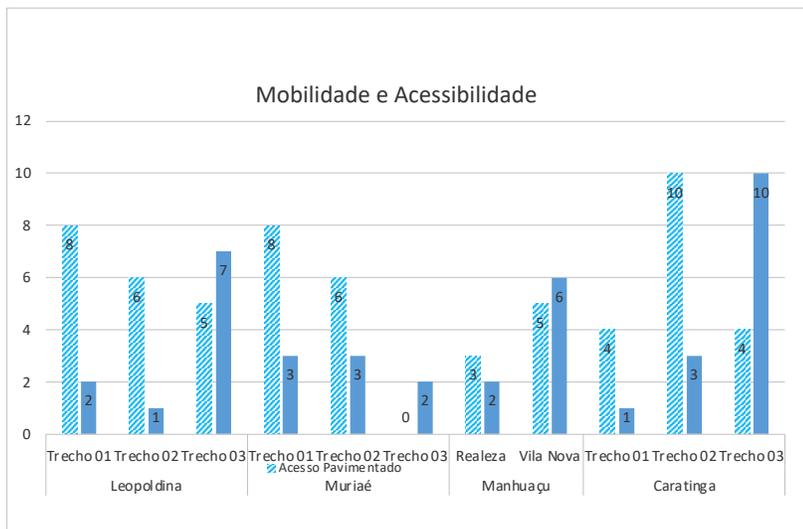
Para a mobilidade e acessibilidade pode-se verificar que o Trecho 03 de Leopoldina, o Trecho 03 de Caratinga e o distrito de Vila Nova possuem mais acessos não pavimentados do que acessos pavimentados. Os Trechos 01 de Leopoldina e Muriaé possuem 8 acessos pavimentados e 2 e 3 acessos não pavimentados, respectivamente. Existem trechos, como o distrito de Realeza e o Trecho 03 de Muriaé, que possuem poucos acessos, chegando a nenhum acesso pavimentado como é o caso do Trecho 03 de Muriaé. Os Trechos 02 de Leopoldina e Muriaé apresentam o mesmo número de acessos pavimentados, seis. Já o Trecho 02 de Caratinga possui o maior número acessos pavimentados e apenas 3 acessos não pavimentados, sendo a maior diferença entre todos os trechos selecionados para a pesquisa, como pode ser visto na Figura 8.

Figura 7 – Identificação de elementos de sinalização e fiscalização e índice de acidentes.



Fonte: Os autores.

Figura 8 - Identificação de acessos à rodovia.



Fonte: Os autores.

Os valores do Coeficiente de Correlação de *Spearman*, calculados para os parâmetros analisados, são apresentados na tabela 5. Verificou-se apenas uma única correlação significativa ($p < 0,05$) entre o número de acidentes e a área de cada trecho estudado ($r = -0,70$). Entretanto, os valores das demais variáveis resumem bem a dinâmica deste estudo.

Tabela 5 - Correlação de Spearman entre os dados coletados.

	Área	Taxa demográfica	Acidentes	Placas	Radar	Redutores	Faixa de Pedestre	Áreas não pavimentadas	Áreas pavimentadas
Área	1	-0,18	-0,70	0,47	0,15	0,39	-0,30	0,39	0,35
Taxa demográfica		1	0,37	0,25	0,30	0,29	0,40	-0,24	0,07
Acidentes			1	-0,39	-0,08	-0,08	0,40	-0,57	0,22
Placas				1	0,04	0,55	0,20	0,54	0,15
Radar					1	-0,35	-0,15	-0,30	-0,04
Redutores						1	0,29	0,11	0,52
Faixa de Pedestre							1	0,10	0,50
Áreas não pavimentadas								1	0,09
Áreas pavimentadas									1

Fonte: Os autores.

Observação: correlação significativa ($p < 0,05$) está sublinhado e em negrito.

A proposta estatística vem corroborar na pesquisa, já que a correlação área e acidentes é significativa. O estudo da delimitação das áreas que compreendem o entorno da rodovia tem uma importância para segurança viária, pois através do entendimento dos espaços que compõem essas áreas pode-se identificar os acidentes e suas causas.

Considerando a densidade demográfica dos trechos, apesar de trechos selecionados que seriam ambientes rurais ou de expansão urbana, perceberemos que quase todos se enquadram na categoria, preferencialmente, urbano com mais de 150 hab./km². Esta é a primeira questão que chama atenção quanto à existência de outro ambiente que não a zona rural ou urbana.

Analisando o panorama dos equipamentos urbanos, percebe-se a proximidade em relação à via. Essas distâncias, relativamente pequenas, sugerem a necessidade de maior atenção com o pedestre e entrada e saída de veículos da rodovia. Fica evidente a importância de equipamentos de segurança viária nestes trechos.

Por falar em segurança viária, nota-se que elementos como placas de sinalização, radares e redutores de velocidade contribuem para a diminuição do índice de acidentes. Quando o trecho em questão é tido como uma zona de expansão urbana, com maior aglomerado de pessoas, percebe-se maior sinalização.

Outra questão notável no que diz respeito às áreas de expansão urbana são os acessos à rodovia. O trecho já configurado como área de expansão urbana possui mais acessos pavimentados do que não pavimentados. Entretanto, um acesso não pavimentado à rodovia necessita de atenção devido à diferença de velocidade praticada nestes dois ambientes, podendo causar acidentes graves nas proximidades de equipamentos urbanos essenciais.

A fim de caracterizar os trechos selecionados, é feita uma análise qualitativa dos espaços. A tabela 6 a 9 mostram a análise dos trechos selecionados.

De acordo com a análise qualitativa é possível estabelecer proximidades para a Zona de Transição, tem-se que são qualificados os seguintes trechos: Trecho 01 de Leopoldina, Trecho 03 de Leopoldina, Trecho 02 de Muriaé, Trecho 03 de Muriaé, Trecho 01 de Caratinga e Trecho 03 de Caratinga.

Todos os trechos delimitados como Zona de Transição acima estão próximos ou contidos em ambientes rurais de extensão, onde a produção do ambiente acontece de forma não ordenada. Sendo assim, os trechos apresentam taxas relativamente altas de densidade demográfica, índice de acidentes, equipamentos urbanos influenciando a via, além da presença considerável de acessos.

Tabela 6 - Caracterização dos trechos de Leopoldina.

Leopoldina	Trecho 01	Pode ser considerada uma zona de transição apesar de não se encontrar totalmente em zona de urbana/expansão urbana possui alta taxa demográfica (991,49 hab. /km ²), equipamento urbano na via e mais acessos pavim entados do que não pavimentados.
	Trecho 02	Não é considerada uma zona de transição por estar totalmente na zona de expansão urbana possuindo uma taxa demográfica próxima do trecho urbanizado (1408,28 hab. /km ²).
	Trecho 03	Pode ser considerada uma zona de transição, está totalmente inserido no ambiente rural de extensão, com uma aglomeração mais espaçada. Possuindo vários acessos, eles são, em sua maioria, não pavimentados e revelam um pequeno número de acidentes.

Fonte: Os autores.

Tabela 7 - Caracterização dos trechos de Muriaé. Fonte: Os autores.

Muriaé	Trecho 01	Não é considerada uma zona de transição por possuir uma taxa demográfica baixa (137,99 hab./km ²).
	Trecho 02	Pode ser considerada uma zona de transição, pois possui uma taxa demográfica considerável (608,01 hab./km ²) e elevado índice de acidentes com baixa sinalização, o que revele a necessidade de ações de segurança viária.
	Trecho 03	Pode ser considerada uma zona de transição, pois possui uma taxa demográfica elevada (650,70 hab./km ²) e elevado índice de acidentes, além de possuir equipamentos urbanos próximos.

Fonte: Os autores.

Tabela 8 - Caracterização dos trechos de Manhuaçu. Fonte: Os autores.

Manhuaçu	Trecho 01 Realeza	Não é considerada uma zona de transição por possuir uma taxa demográfica alta (2264,48 hab./km ²), além de estar localizado no perímetro urbano do distrito.
	Trecho 02 Vila Nova	Não é considerado zona de transição por possuir uma taxa demográfica alta (4097,42 hab./km ²), além de estar localizado no perímetro urbano do distrito.

Fonte: Os autores.

Tabela 9 - Caracterização dos trechos de Caratinga.

Caratinga	Trecho 01	Pode ser considerada uma zona de transição, está localizado no ambiente rural de extensão, além de possuir uma taxa demográfica alta (502,35hab./km ²) com um índice de acidentes alto em relação à sinalização.
	Trecho 02	Não é considerada uma zona de transição, possui uma grande aglomeração urbana, alto número de acessos pavimentados além de possuir todos os elementos que configuram um bairro, como faixa de pedestres e redutores de velocidade.
	Trecho 03	Pode ser considerada uma zona de transição, pois está localizado no ambiente rural de extensão, possuindo uma taxa demográfica considerável (365,40 hab./km ²) e equipamento urbano na proximidade.

Fonte: Os autores.

Considerações finais

A partir dos dados obtidos pela correlação de *Spearman* é possível aferir que a delimitação através de áreas é um fator essencial para a análise do comportamento do espaço, visto que a correlação significativa de área por acidentes se mostra inversamente proporcional. Sendo assim, a pesquisa buscou a delimitação do espaço através de uma proposta metodológica, na qual foram aplicados parâmetros específicos. Tais parâmetros contribuem para a caracterização do ambiente rodoviário na BR-116 no trecho entre Leopoldina e Caratinga, a partir de fatores físicos do espaço.

Considerando os equipamentos urbanos, como geradores de fluxo, os mesmos provocam a necessidade de atenção urgente. Devido ao fato de ser um espaço não necessariamente com aglomeração urbana constante, o entorno destes equipamentos demanda iniciativas únicas. A presença de polos industriais como equipamentos urbanos gera um fator econômico para a área, que demanda ainda mais atenção quanto à circulação de usuários em uma rodovia com jurisdição superior.

Com a crescente produção de fluxo devido aos equipamentos urbanos e moradias nas faixas lindeiras, surgem diversas configurações de acessos. Acessos regulamentados, ou seja, aqueles autorizados por órgãos competentes produzem um espaço mais seguro, pois garantem uma visibilidade maior para os usuários além da maior sinalização nas proximidades. Já os acessos não regulamentados, na maioria não pavimentados, são uma causa relevante de acidentes. Tal afirmação pode ter como prova os dados obtidos pela correlação de *Spearman* entre número de acessos e acidentes. Quanto maior o número de acessos não pavimentados, podendo ser interpretados como não regulamentados, maior o número de acidentes. O inverso ocorre com o número de acessos pavimentados.

A questão de sinalização e fiscalização das áreas delimitadas é um contorno importante devido à ambiguidade do espaço, assim estes elementos se tornam uma estratégia de combate à insegurança viária. A proposta metodológica feita na pesquisa contabiliza os elementos nos trechos, a fim de relacionar sua quantidade com os índices de acidentes para melhor identificação destas áreas.

Sobre a questão dos acidentes, os mesmo se mostraram um importante fator de estudo sobre a existência das Zonas de Transição. A necessidade da caracterização desse espaço é necessária para combater o número acentuado de acidentes, levando a um ambiente seguro tanto para motoristas quanto para pedestres, produzindo ações mitigadoras de acidentes. Ao vislumbrar o tipo de acidente, sua localização e frequência, é possível produzir uma gestão eficiente de segurança viária.

Conclui-se que os parâmetros para definição da Zona de Transição giram em torno da localização desse ambiente, sua taxa demográfica, equipamentos urbanos presentes, assim como o índice de acidentes, sinalização e acessos à rodovia. A Zona de Transição caracteriza-se por apresentar elementos que indicam alta circulação de usuários, porém encontra-se fora ou nas proximidades do perímetro urbano.

Referências

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988. 292 p.

CAMPOS, A.; SANTOS, C. Rural e Urbano: Da dicotomia teórica às práticas espaciais. Geonordeste, *Revista de Pós-Graduação em Geografia*, n. 4, p. 51-69, 2008.

Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT). Elaboração de ações preventivas e corretivas de segurança rodoviária, por meio de identificação e mapeamento dos segmentos críticos da malha viária do DNIT. Destaque orçamentário, Portaria nº 1.282/ 2008. Ministério dos transportes, 2008.

Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT). Manual de Estudos de Tráfego, Publicação IPR - 723. Ministério dos Transportes, 2006.

Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT). Elaboração de ações preventivas e corretivas de segurança rodoviária, por meio de identificação e mapeamento dos segmentos críticos da malha viária do DNIT. Destaque orçamentário, Portaria nº 1.282/ 2008. Ministério dos transportes, 2008.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Censo Demográfico 2010. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso em: 12 nov. 2016.

MARIA, A. C. *A produção do espaço urbano da zona sul de Viçosa-MG: Empreendimentos horizontais na bacia do Ribeirão São Bartolomeu*. 2016. *Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.*

MARQUES, M. I. M. O conceito de espaço rural em questão. *Revista Terra Livre*. São Paulo: AGB, n.19, p.95-112. 2002.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Plano diretor participativo: Guia para a elaboração pelos municípios e cidadãos. Coord. Raquel Rolnik e Otilie Macedo Pinheiro. Brasília, DF, 2004, 160p.

Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). Zero Road Deaths and Serious Injuries: Leading a Paradigm Shift to a Safe System. Research Report. International Transport Forum, Leipzig, Alemanha, 2016. 172 p. Disponível em: http://www.oecd-ilibrary.org/transport/zero-road-deaths-and-serious-injuries_9789282108055-en. Acesso em: 5 mar. 2017.

SERATTO, C.; MICHELLON, E.. A dicotomia rural versus urbano e suas consequências: teoria e estudo de caso. 2009. Disponível em: <http://www.sober.org.br/palestra/12/13O555.pdf>. Acesso em 22 abr. 2016.

SOROKIN, P. A.; ZIMMERMAN, C.C. e GALPIN, C. J. Diferenças Fundamentais entre o mundo rural e urbano. In: MARTINS, J. S. *Introdução Crítica à Sociologia Rural*. São Paulo: Hucitec, 1986

VEIGA, J.. O Brasil Rural precisa de uma estratégia de desenvolvimento; Serie de Textos para discussão nº1, convenio FIPE-IICA/MDA-CNDRS/NEAD, Brasília. 2001.

CAPÍTULO 8

A BICICLETA COMO TRANSPORTE SUSTENTÁVEL E OS DESAFIOS PARA AS SMART CITIES

Ugo Nogueira Castañon; Rui António Rodrigues Ramos; Paulo Jorge Gomes Ribeiro⁸
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha
e Mucuri/ Universidade do Minho

Introdução

A cidade é um sistema complexo, composto por diversos componentes e é possível perceber em seu cotidiano a necessidade dos gestores em lidar com situações difíceis para garantir o funcionamento deste sistema e o bem-estar da população, como por exemplo: a gestão dos resíduos e efluentes, problemas de mobilidade, demandas econômicas e sociais e a deterioração das infraestruturas, entre outros. Por serem os territórios de maior concentração de pessoas os centros urbanos são responsáveis pelo consumo de importantes quantidades de recursos, seja para o seu próprio funcionamento, seja para o transporte e produção de bens. Face aos problemas de sustentabilidade, especialmente no que se refere as emissões carbônicas dos transportes, as cidades enfrentam importantes desafios na luta contra às alterações climáticas (AHVENNIEMI *et al.*, 2017).

Na busca pela eficiência urbana, surgiu na última década o conceito de *smart cities* que inicialmente sugere que o funcionamento dos componentes da cidade (e.g., sistemas de transporte) pode ser aprimorado através da aplicação de tecnologia, como é o caso dos sistemas inteligentes de transporte (ITS – *intelligent transportation systems*), nos projetos

⁸ ugo.castanon@ufvjm.edu.br; rramos@civil.uminho.pt; pauloribeiro@civil.uminho.pt

que favoreçam a intermodalidade o uso misto do solo e a alta qualidade dos serviços urbanos (ALBINO; BERARDI; DANGELICO, 2015; RANA *et al.*, 2019).

Também no contexto das cidades, sabe-se que o uso da bicicleta como modo de transporte (i.e., viagens utilitárias) vem crescendo nos últimos anos. Soma-se a este fato a popularização das bicicletas elétricas (*e-bikes*) que, no contexto dos cicláveis, favorece a integração deste modo ativo com os demais modos de transportes urbanos (BEHRENDT, 2016; STAMATIADIS; PAPPALARDO; CAFISO, 2017). Diante de tais circunstâncias, levantam-se duas indagações:

1) De que forma as *smart cities* podem ser mais sustentáveis por uma maior inclusão das bicicletas no transporte cotidiano?

2) Como a informação da utilização das bicicletas pode ser inserida no contexto de uma *smart city* e encontrar o seu espaço de atuação nos transportes urbanos?

No empenho de responder tais questões, desenvolveu-se este artigo que está estruturado em quatro seções. A primeira seção é a presente introdução. A segunda diz respeito às *smart cities* e são apresentadas perspectivas a respeito da definição deste conceito e suas principais dimensões, pontuando-se também questionamentos e entraves apresentados pela literatura. A terceira aborda os tópicos sobre o modo ciclável e a respectiva integração nos transportes urbanos e discute-se a relação deste modo com a mobilidade urbana e a evolução tecnológica através da aplicação de tecnologias de informação e comunicação ao transporte por bicicleta, seja de forma individual ou considerando a operação de um sistema de partilha (integrado aos demais sistemas de transporte). A quarta e última seção apresenta as principais conclusões sobre o relacionamento destes dois temas de relevância inquestionável para a sustentabilidade das cidades, particularmente na redução de emissões carbônicas dos transportes.

Smart cities

Para a compreensão do conceito *smart city* é essencial que se tenha em mente o papel das cidades em relação aos aspectos sociais, econômicos e principalmente aos ambientais, pois, atualmente as cidades consomem imensa quantidade de recursos. Isto se deve tanto pela importância econômica destes territórios quanto pela sua baixa performance ambiental (ALBINO; BERARDI; DANGELICO, 2015). Embora seja amplamente utilizado, não há uma única e universal definição para o conceito de *smart city*, embora haja aspectos comuns entre os exemplos da literatura (AHVENNIEMI *et al.*, 2017; ALBINO; BERARDI; DANGELICO, 2015; ANGELIDOU, 2015; BIBRI; KROGSTIE, 2017).

De uma perspectiva tecnológica, uma *smart city* pode ser apontada como uma cidade com grande presença das tecnologias de informação e comunicação (ICT – *information and communication technologies*) aplicadas em importantes componentes da infraestrutura e dos serviços. Nesta ótica, Harrison *et al.* (2010) definem as *smart cities* como cidades instrumentadas, interconectadas e inteligentes. O primeiro termo refere-se à capacidade de coletar dados do ambiente real através de sensores (e.g., dispositivos pessoais como os smartphones), o segundo sugere a possibilidade de utilização destes dados por plataformas de diferentes serviços, o terceiro termo refere-se à utilização de modelos e análises complexas para otimização das decisões.

O conceito de *smart city* não é limitado somente pela disseminação das ICT, ele também considera as necessidades das pessoas e das comunidades. Em termos de planejamento urbano o termo suscita a tomada estratégica de decisões, ou seja, a orientação de políticas e programas com metas de desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental de forma a garantir a qualidade de vida e alegria da população. A título de exemplo, ao considerar o contexto da União Europeia, um dos principais objetivos das *smart cities* é a redução das emissões dos gases do efeito estufa através do uso de tecnologias inovadoras (AHVENNIEMI *et al.*, 2017), isto aponta para uma perspectiva de sustentabilidade ambiental.

Entretanto, como destaca Vanolo (2014), a tecnologia deve ser aplicada nos territórios de forma que a mesma adapta-se às necessidades dos cidadãos e não o inverso. Somente assim a comunidade promoverá um crescimento *smart* e útil para o desenvolvimento da cidade (ALBINO; BERARDI; DANGELICO, 2015).

Pode-se fazer a síntese de duas grandes perspectivas a respeito das *smart cities*. A primeira destaca o uso de modernas tecnologias voltadas para a melhoria da qualidade de vida e redução dos impactos ambientais, enquanto a segunda é uma perspectiva mais holística e sugere que as *smart cities* congreguem a tecnologia, o governo e a sociedade a fim de possibilitar uma série de *smart components* (e.g., economia, mobilidade, governança). Essas duas perspectivas podem ser observadas em investigações recentes. Huovila *et al.* (2019) consideraram em seu trabalho que *smart city* é uma cidade inovadora que utiliza as ICT e outros meios para melhorar a qualidade de vida, a eficiência da operação e serviços urbanos e a competitividade, garantindo o atendimento das gerações atuais e futuras (numa perspectiva de incremento da sustentabilidade urbana). Por outro lado, Rana *et al.* (2019) fundamentam sua investigação na definição de *smart cities* como territórios modernos tecnologicamente avançados com a existência de determinada habilidade intelectual para lidar com diversos aspectos do desenvolvimento (e.g., técnico, social, econômico, etc.) sob o auxílio de técnicas computacionais e com o objetivo da oferta de infraestruturas e serviços superiores aos convencionais (focados principalmente nos usuários).

Albino *et al.* (2015) justificam a falta de consenso sobre o conceito *smart city* pelo fato de que este tenha sido aplicado a dois domínios distintos. De um lado os domínios *Hard* (i.e., matriz energética, recursos naturais, mobilidade), onde as ICT desempenham papel fundamental no funcionamento dos sistemas, e de outro, os domínios *Soft* (i.e., educação, cultura, inclusão social), onde a aplicação das ICT não é normalmente determinante. Estes autores destacam ainda quatro características (dimensões) correntes das *smart cities*:

1. Infraestrutura urbana interconectada, de forma a possibilitar a eficiência política e o desenvolvimento social e cultural;
2. Ênfase no desenvolvimento urbano orientado pelos negócios e atividades criativas para a promoção do crescimento urbano;
3. A atuação do ambiente natural como componente estratégico para o futuro;
4. Inclusão social dos cidadãos da cidade e a ênfase sobre o capital social no desenvolvimento urbano.

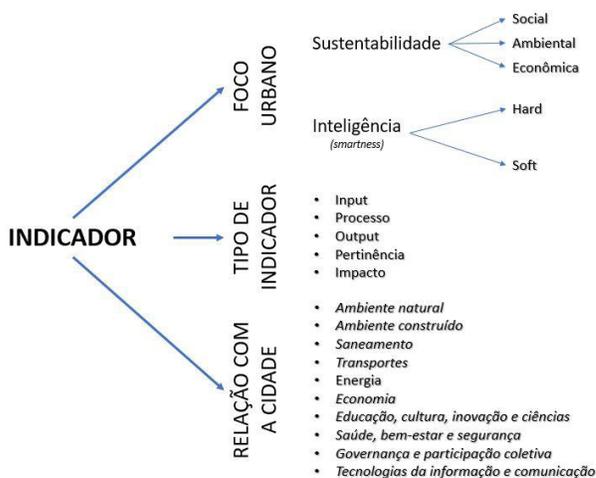
De acordo com Nam e Pardo (2011), os componentes principais das *smart cities* são: a tecnologia, as pessoas (i.e., criatividade, diversidade e educação) e as instituições (i.e., política e governança). Os dois primeiros já foram introduzidos no tópico anterior, cabendo neste momento o destaque para o conteúdo do terceiro componente. Assim, a *smart governance* é compreendida pelo envolvimento dos *stakeholders* nos processos decisórios e nos serviços públicos. A aplicação das ICT nos processos de governança resulta na chamada *e-governance*, ela é fundamental para a difusão das iniciativas entre os cidadãos e participação dos mesmos, assim como para garantir a transparência em todos os processos (ALBINO; BERARDI; DANGELICO, 2015). Cabe ressaltar que, o objetivo de se alcançar o status de *smart city* pode ser prejudicado caso os governantes não tenham uma visão clara do futuro (i.e., não consigam fazer planos de longo prazo). Este tipo de percalço geralmente advém de um cenário de instabilidade política (RANA *et al.*, 2019).

A aplicação isolada de um *smart component* não é suficiente para criar uma *smart city*, estes componentes necessariamente devem trabalhar em rede, apresentando um funcionamento orgânico. As cidades tornam-se de fato *smart cities* quando investem nos capitais humano e social tal como nas tecnologias de informação e comunicação, fazendo com que todas estas contribuam para o desenvolvimento sustentável e a qualidade de vida da população.

Para além dos investimentos em um *smart component* é necessário proceder com o seu acompanhamento. Pode-se verificar a relevância desta ação através do exposto por Huovila *et al.* (2019) que destacam a necessidade do desenvolvimento de indicadores para o monitoramento da décima primeira meta de desenvolvimento sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU), isto é, tornar as cidades e os assentamentos humanos mais seguros, resilientes e sustentáveis.

Em geral, os indicadores são empregados com diferentes propósitos. As cidades utilizam regularmente conjuntos de indicadores para definir objetivos e sistematizar o seu monitoramento. Um exemplo de taxonomia para análise de indicadores (figura 1) é o proposto pelos autores anteriormente citados. Esta sistemática considera o tipo de indicador, o componente em relação à cidade e também o foco em relação ao meio urbano.

Figura 1 - Taxonomia para análise de indicadores.



Fonte: adaptado de Huovila *et al.*, 2019.

Para uma apropriada seleção de indicadores deve-se considerar fatores que na respectiva avaliação tenham em conta o horizonte espacial (e.g., cidade, estado, país), o horizonte temporal (e.g., tempo real, anual) e o propósito da análise (e.g., definição de objetivos, monitoramento,

comparação de indicadores ou marketing) (HUOVILA; BOSCH; AIRAKSINEN, 2019).

Sharifi (2019) afirma que a avaliação das *smart cities* (SCA – *smart city assessment*) é um tema em ascensão na literatura. No entanto, pode-se perceber que as abordagens sobre o estudo das ferramentas de SCA podem ser alocadas em dois níveis de profundidade, o primeiro é orientado para uma visão geral das ferramentas. O segundo é centrado em análises mais detalhadas das ferramentas para a melhor compreensão de seu foco temático e tipologia dos indicadores.

A identificação do conjunto de indicadores é o primeiro passo no desenvolvimento de uma ferramenta de avaliação. O uso de *big data* e a *internet of things* (IoT) tenderá a aperfeiçoar o entendimento da dinâmica urbana e também poderá sugerir possibilidades de conexões entre os indicadores. (SHARIFI, 2019)

Em geral as cidades ainda se encontram em um estágio inicial de desenvolvimento e operacionalização das SCA, ou seja, as práticas de avaliação até então não estão integradas nos mecanismos e estratégias de planejamento. Isto se deve à falta de mecanismos estatutários para integrar a SCA nos processos de planejamento e tomada de decisão (CAIRD; HALLETT, 2019). Por fim, a avaliação de uma *smart city* deve levar em conta o fato de as cidades possuírem prioridades distintas para atingir determinados objetivos, no entanto, deve haver um desenvolvimento integrado dos diferentes aspectos (ALBINO; BERARDI; DANGELICO, 2015).

Entraves, questionamentos e o novo conceito de “Smart Sustainable City”

O aumento da dependência das cidades em relação às ICT com o objetivo de intensificar a eficiência da gestão e dos serviços, e alcançar um novo patamar na sustentabilidade é uma constatação generalizada na literatura. Contudo, como referem muitos autores, este processo não é

isento de entraves e por vezes suscita alguns questionamentos (AHVENNIEMI *et al.*, 2017; ANGELIDOU, 2015; HUOVILA; BOSCH; AIRAKSINEN, 2019; SHARIFI, 2019).

As *smart cities* se relacionam com a partilha de uma grande quantidade de dados pessoais, inclusive em tempo real (e.g., registros de localização e movimentação), por isso as liberdades civis tornam-se uma relevante fonte de preocupação. Nos países em desenvolvimento, que apresentam um cenário político instável, a principal barreira para o desenvolvimento das *smart cities* está relacionada com as questões de governança, uma vez que existe grande fragilidade na relação de confiança entre a população e a administração pública. (BEHRENDT, 2016; RANA *et al.*, 2019)

Dois grandes questionamentos recorrentes são: (i) as soluções que se encaixam no contexto das *smart cities* serem demasiado tecnocêntricas, e (ii) apesar da existência de várias definições, nem todas relacionam as *smart cities* com os propósitos e princípios da sustentabilidade (ALBINO; BERARDI; DANGELICO, 2015; HUOVILA; BOSCH; AIRAKSINEN, 2019).

Relativamente aos indicadores ambientais, Ahvenniemi *et al.* (2017) afirmam que existe uma carência de representação nas ferramentas de SCA e que situação semelhante ocorre com os indicadores de uso de energia que são representados de forma mais limitada no âmbito das *smart cities* do que no âmbito da sustentabilidade.

Para Ahvenniemi *et al.* (2017) a consideração dos aspectos sustentáveis deve ser parte do desenvolvimento de uma *smart city*, por este motivo recomendam a integração dos aspectos *smart* e *sustainable* e propõe o novo termo *smart sustainable city*. Este (novo) conceito complementa o conceito de *smart city* que tradicionalmente inclina-se para a esfera tecnológica, e eleva o mesmo para o conceito de desenvolvimento sustentável, pois considera as alterações das necessidades de uma sociedade altamente digitalizada (HUOVILA; BOSCH; AIRAKSINEN, 2019).

A nível dos transportes urbanos, uma das formas de promoção da sustentabilidade nas *smart cities* que se vem a destacar é o estímulo do uso da bicicleta como modo regular de transporte. Os cicláveis são modos de baixo custo que permitem aumentar os índices de atividade física

da população, reduzir as emissões de gás carbônico (CO₂) e a poluição sonora através da substituição das viagens baseadas em petróleo, e assim tornam as cidades mais humanas. A sua inclusão de uma forma mais evidente também resulta de em alguns contextos terem uma forte ligação aos transportes públicos, em contextos de intermodalidade nas viagens pendulares (BEHRENDT, 2018; HISELIUS; SVENSSON, 2017).

As novas tendências no uso da bicicleta

Se, no passado, o automóvel prevaleceu como principal referência norteadora para o planejamento urbano e de transportes, nota-se alguma mudança a partir deste século. Políticas e orientações mundiais ao nível da mobilidade, sobretudo em contexto urbano, estão alinhadas com a promoção da utilização de modos de transporte mais sustentáveis (FISHMAN; WASHINGTON; HAWORTH, 2013). Neste contexto, os modos ativos têm vindo a assumir um papel relevante nesta segunda década do século XXI, especificamente a bicicleta, uma vez que pode ser encarada como uma melhor alternativa para os deslocamentos de maior ocorrência no meio urbano (i.e., viagens de curta e média duração)(GROOT, 2007).

Nos últimos tempos a mobilidade elétrica é vista como uma potencial solução para os problemas de mobilidade e transportes (BEHRENDT, 2018), particularmente para a descarbonização deste setor. Porém, a associação entre a mobilidade elétrica e o carro elétrico, é um reflexo da reprodução de uma cultura centrada no automóvel, que deverá ser evitada, pois, em nada contribui para a mudança de paradigma de um sistema de transportes de uma cidade sustentável.

Segundo Behrendt (2018), a mobilidade elétrica vem crescendo rapidamente, particularmente fora do segmento automobilístico (e.g., patinetes, bicicletas, triciclos elétricos). A utilização da bicicleta se verifica principalmente em dois tipos de viagens, as utilitárias (i.e., de carácter pendular) e as recreativas (i.e., de carácter eventual). A existência de uma infraestrutura que atenda aos requisitos de segurança, coesão, objetivida-

de, conforto e atratividade é um dos principais fatores que estimulam o ciclismo utilitário (GROOT, 2007), de maior relevância para os sistemas de mobilidade urbana. Sobre isto, Stamatiadis *et al.* (2017) salientam que as políticas públicas são de vital importância para a implementação de intervenções que visem o encorajamento do uso da bicicleta especialmente ao nível das viagens utilitárias/ pendulares.

A bicicleta enquanto meio de transporte, indiferente do seu tipo (i.e., convencional/ mecânica ou elétrica) ou da forma de atuação (i.e., privada ou partilhada), inspira a produção de conceitos, em geral, relacionados à sustentabilidade e à mobilidade. Um exemplo disto é o conceito de *velomobility*, usado para especificar os interesses relacionados com os sistemas, tecnologias e as práticas do ciclismo. Sua estrutura centra-se no uso da bicicleta em meio urbano e no seu planejamento na área de transporte, considerando-se essencialmente os movimentos dos ciclistas e as relações de compartilhamento do espaço viário (BEHRENDT, 2016). Do conceito *velomobility* pode-se destacar quatro aspectos fundamentais para o embasamento de políticas e ações:

1. Movimentação física de um ponto ao outro através de uma infraestrutura que incentive a livre circulação dos ciclistas e que não seja um obstáculo aos fluxos;
2. Relações de compartilhamento do espaço de circulação que considere os diversos atores da mobilidade;
3. Evitar a representação negativa da bicicleta em termos de status econômico e social;
4. Reconhecimento das práticas quotidianas e experiência dos usuários que utilizam a bicicleta para se deslocarem.

A *velomobility* auxilia na compreensão das relações de poder envolvendo o modo ciclável e as *smart cities*, assim como o uso dos ITS no planejamento dos diferentes modos de transportes envolvidos (BEHRENDT, 2016). De forma complementar ao conceito *velomobility*, o autor sugere que

um conceito de *smart velomobility* envolve o relacionamento de sistemas, tecnologias e práticas integradas que giram em torno do ciclismo. Este conceito considera o quão interconectadas são as práticas e experiências ciclísticas, o nível de fusão entre os aspectos físico e digital, e as relações de poder entre os modos.

O trabalho de Behrendt (2016) demonstrou a relevância do ciclismo, tanto para a *smart mobility*, quanto para os ITS. No entanto, advertiu-se que, a exclusão física e política deste modo ativo, representadas respectivamente pela escassez de infraestrutura e pela exígua representação nas políticas e normas relacionadas às *smart cities* e *IoT*, pode agora ser agravada pela exclusão digital. Mais recentemente desenvolveu-se o conceito de *e-velomobility* (BEHRENDT, 2018), relacionado com as práticas, sistemas e tecnologias em torno de bicicletas, onde uma combinação entre o acionamento do pedal (necessário) e a assistência elétrica (opcional) impulsionam o veículo. O uso dos pedais é uma característica chave tanto da *velomobility* quanto da *e-velomobility*, portanto exclui-se do último os veículos elétricos de duas rodas em que o uso dos pedais seja opcional.

As mais recentes tendências na mobilidade urbana ciclável correspondem à implementação e exploração de sistemas de partilha de bicicletas (*Bicycle-Sharing Systems – BSS*) e do uso de bicicletas elétricas (*e-bikes*).

O conceito da partilha de bicicletas surgiu na Holanda na década de 1960 através das bicicletas brancas (*Witte Fietsen*) dispersas por Amsterdã. Desde aquela época até aos nossos dias, os sistemas de partilha foram evoluindo, nomeadamente através da integração de tecnologias. Entre 2004 e 2014 ocorreu um crescimento vertiginoso no número de BSS, com um salto de 13 para 855. Os países que lideraram esta expansão foram China, Itália e Espanha (FISHMAN, 2016). Diversos autores convergem para a classificação dos BSS em quatro gerações (FISHMAN, 2016; MANZI; SAIBENE, 2018; SHAHEEN; GUZMAN; ZHANG, 2010).

As duas primeiras gerações distinguem-se principalmente pela forma de acesso. Enquanto a pioneira oferecia livre acesso, a segunda geração obrigava à realização de um pequeno depósito para desbloquear as bicicletas. Manzi e Saibene (2018) relatam que as bicicletas da segunda geração

eram geralmente colocadas nas proximidades de polos geradores de viagens. A terceira geração dos BSS destacou-se pelo registro e identificação de usuários (i.e., uso da tecnologia da informação), mas, os BSS ainda não atuavam de forma integrada com os demais modos de transporte, fato que somente ocorreu a partir da quarta geração destes sistemas. Em comum, a terceira e a quarta geração ofereciam esquema de preços e planos de utilização conforme o tipo de usuário (e.g., frequente ou ocasional) e problemas relacionados com a ocupação das estações.

A favor de uma mobilidade sustentável, a introdução de BSS contribuiu para a redução do uso do automóvel (WANG; ZHOU, 2017). Indiretamente estes sistemas ajudam a lidar com os problemas das fases inicial e final das viagens (*last mile problem*), atuando em complementariedade com o transporte público (FISHMAN, 2016). Além disso, os sistemas de partilha relacionam-se diretamente com a redução dos índices de congestionamento (WANG; ZHOU, 2017).

Até a quarta geração a operação dos BSS baseava-se essencialmente em bicicletas convencionais/mecânicas e no emprego de interfaces (docas) fixas. Atualmente, algumas cidades europeias contam com sistemas que operam bicicletas elétricas (FISHMAN; CHERRY, 2016). Os Sistemas de partilha de bicicletas elétricas (*Electric-Bicycle-Sharing Systems – e-BSS*) de Madri (ROMANILLOS *et al.*, 2018) e Zurique (GUIDON *et al.*, 2019) são exemplos de sistemas que operam de forma distinta. O primeiro conta com estações para empréstimo e devolução enquanto o segundo oferece bicicletas espalhadas pela cidade (*free-floating*), tal qual a primeira geração. Em comum, ambos apresentam: integração com outros modos, rastreamento dos veículos por GPS e informação em tempo real sobre a disponibilidade das bicicletas.

Para Guidon *et al.* (2019), as inovações existentes em sistemas como o de Zurique são tamanhas que a consideração de uma quinta geração é justificada. Os aprimoramentos apontados pelos autores são: i) a integração dos smartphones nos sistemas e-BSS (i.e., serviços baseados na localização), que tornou possível a existência de sistemas *free-floating* eficientes; ii) o fato das estações tornarem-se opcionais, pois, as bicicletas

podem ser localizadas, desbloqueadas e bloqueadas através do uso de um smartphone, que, para além disso, também favorece a coleta de dados.

Já, a introdução das bicicletas elétricas (*e-bikes*) na dinâmica dos transportes urbanos, pode ser compreendida de duas formas: i) um novo modo de transporte ou um aperfeiçoamento da bicicleta e, portanto, deve-se considerar a perspectiva de adoção de uma nova tecnologia; e, ii) um novo padrão de mobilidade (i.e., mobilidade como um serviço - *MaaS*) onde, a bicicleta elétrica se torna um elemento chave nos sistemas urbanos de partilha e aparece como interessante elemento de transição para a mobilidade elétrica, nomeadamente com o advento e disseminação dos e-BSS (WOLF; SEEBAUER, 2014).

As investigações relacionadas às bicicletas elétricas ainda são muito recentes. Apesar disso, pode-se constatar a proeminência dos estudos relacionados com a modernização ou adaptação das cidades considerando este modo de transporte, especialmente em termos de segurança para os usuários mais vulneráveis, especialmente os pedestres e os ciclistas das bicicletas mecânicas (SALMERON-MANZANO; MANZANO-AGUGLIARO, 2018).

Entre os fatores ambientais importa o fato de que as bicicletas elétricas, com base na análise das emissões no ciclo de vida das *e-bikes*, emitirem substancialmente menos poluição por quilômetro do que os automóveis, para além de apresentarem baixíssimos níveis de ruído (BEHRENDT, 2018; HISELIUS; SVENSSON, 2017). Por isso, as regiões populosas (urbanas) estão especialmente interessadas nas *e-bikes* para desenvolver ações e implementar políticas de mobilidade sustentável.

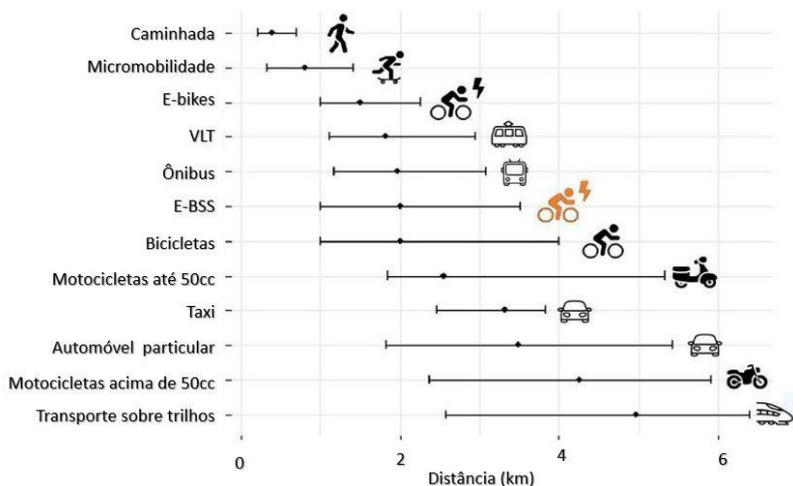
As principais limitações da bicicleta convencional são eliminadas através da assistência elétrica, que fornece ao usuário a possibilidade de transpor trechos íngremes, percorrer longas distâncias mantendo velocidades elevadas e carregar mais bagagem, tudo isso diminuindo o esforço de locomoção e evitando a sudorese (FYHRI *et al.*, 2017). Por todas as características expostas, a bicicleta elétrica pode ser uma opção interessante de transporte sustentável para grupos populacionais mais vulneráveis (e.g., idosos e pessoas com algumas limitações do seu estado

físico). As *e-bikes* poderão ainda potencializar os deslocamentos pendulares (i.e., *commuting*) e o transporte de carga (e.g., entregadores de mercadorias e transporte de crianças).

Embora termo *e-bike* por vezes pareça ambíguo, o entendimento corrente é que este refere-se às bicicletas que possuem motor elétrico com potência máxima de 250W – vulgarmente conhecidas por *pedelec*, verificando-se que a assistência é progressivamente reduzida consoante o aumento da velocidade e cessando quando o veículo atinge a velocidade de 25 km/h ou o usuário para de pedalar. A assistência elétrica pode atuar com diferentes propósitos, seja no sentido de reduzir o esforço no arranque após uma parada ou de proporcionar um deslocamento contínuo. Considerando este último, a introdução de um e-BSS é uma forma de atender demandas dispersas em áreas urbanas extensas (GUIDON *et al.*, 2019).

Segundo Campbell *et al.* (2016), diferentemente dos outros sistemas de mobilidade partilhada os e-BSS atraem parte da demanda dos modos de transporte público, o que não é necessariamente negativo. Em regiões onde a oferta não supre a demanda dos serviços tradicionais de transporte público, os sistemas de e-BSS complementam essa oferta de transporte, podendo inclusive servir como alternativa de transporte em territórios de baixa demanda que conduzam a investimentos avultados relativos à implementação de sistemas de transporte públicos convencionais (CAMPBELL *et al.*, 2016). Guidon *et al.* (2019) constatou que o alcance das viagens com sistemas de transporte que integrem e-BSS ultrapassa o alcance dos transportes públicos tradicionais e reconhece que as *e-bikes* partilhadas, podem atender às viagens realizadas pela maioria dos modos urbanos, inclusive ônibus e VLT (figura 2).

Figura 2- Comparação entre as distâncias de viagens dos modos de transporte urbano.



Fonte: adaptado de Guidon *et al.*, 2019.

A principal diferença entre os sistemas de partilha de bicicletas que utilizam estações (*docks*) reside no fato de que aqueles que operam com bicicletas elétricas (e-BSS) necessitam de estações com maior capacidade, porém, em menor número (i.e., maior distanciamento entre estações) do que os BSS. Portanto, a área de cobertura dos sistemas que utilizam e-bikes pode ser 400% superior aos sistemas que utilizam bicicletas convencionais (Campbell *et al.*, 2016).

Sob a perspectiva do planejamento e governança, a bicicleta elétrica pode ser utilizada para promover sistemas de mobilidade ainda mais sustentáveis e *smart* dado o potencial tecnológico inerente a este tipo de veículos. Porém, na ótica do planejamento urbano de transporte e mobilidade esta assume particular relevância na adoção de redes de e-BSS, que num contexto de promoção da sustentabilidade numa cidade que se deseja “*smart*”, as e-bikes juntamente com os e-BSS poderão ser utilizados como ferramentas para: i) incentivar padrões de mobilidade mais sustentáveis, ii) mitigar o uso irregular de veículos elétricos de duas rodas e controlar as rotas destes veículos (e.g., instalação planejada das estações) e, iii) promover a segurança rodoviária (CAMPBELL *et al.*,

2016). Em relação às questões de segurança importa destacar que com o aumento do ciclismo proporcionado pelas *e-bikes*, o risco individual de quem utiliza a bicicleta elétrica tende a aumentar, enquanto o risco para os demais utilizadores da via tende a diminuir, uma vez que ocorre a mudança de um modo motorizado mais pesado, para um modo leve, sustentável e menos veloz (SCHEPERS *et al.*, 2014). Por último, os principais fatores que influenciam a demanda dos e-BSS prendem-se com a atividade econômica e social, a disponibilidade de infraestrutura ciclável e a qualidade do transporte público (GUIDON *et al.*, 2019).

Desta forma, uma *smart city* terá sempre que integrar no planejamento do seu sistema de transportes e mobilidade as novas tendências associadas à mobilidade ciclável, seja como sistemas independentes, mas sobretudo como sistemas integrados e de partilha de informação, que permitam a sua coleta e respetivo tratamento para que se possam desenvolver e implementar políticas e ações para intensificar a perspectiva de uma mobilidade mais sustentável neste tipo de territórios.

Pelo exposto, verifica-se que a introdução da componente elétrica nas bicicletas traduz uma certa mudança de paradigma na mobilidade ciclável, tornando-se necessário dotar os territórios de infraestruturas apropriadas para possibilitar a continuidade do crescimento do modo ciclável e consequentemente da sustentabilidade de territórios que se querem *smart*. O desenvolvimento e aplicação de tecnologias para monitoramento desempenha papel fundamental no planejamento e desenvolvimento das infraestruturas cicláveis. Nesse sentido, o avanço da tecnologia de geocalização e a disseminação de aplicativos para smartphones são condições reconhecidamente importantes, pois poderão permitir compreender as preferências dos usuários (BEHRENDT, 2016).

De forma geral a informação sobre a utilização da bicicleta, sobretudo em meio urbano, é escassa e traduz-se em muitos casos apenas a contagens de volumes de ciclistas em certos trechos das cidades. Assim, torna-se necessário monitorar a evolução do uso da bicicleta no tempo e no espaço com a devida regularidade e precisão. As tecnologias existentes no âmbito do sensoriamento dos ciclistas podem ser organizadas

em quatro classes, de acordo com o tipo de informação a ser coletada: i) tráfego, ii) infraestrutura, iii) comportamento do usuário e, iv) ambiente (STAMATIADIS; PAPPALARDO; CAFISO, 2017).

Por outro lado, de acordo com Behrendt (2016) os dados individuais de cada viagem do usuário podem ser coletados através dos smartphones ou de dispositivos embarcados. Para o ciclismo a segunda opção pode não ser exequível, pois a bicicleta convencional não possui fonte de energia para suportar equipamentos eletrônicos (e.g., sensores e transmissores). Tal diferença pode potencializar a marginalização do ciclismo no contexto das *smart cities* e na integração de ITS. Porém, o uso de bicicleta elétrica poderá resolver esta situação já que estes veículos possuem fonte de energia embarcada que poderá servir de suporte para diversos equipamentos.

Para além disso, considerando que grande parte dos ciclistas possui um smartphone, a coleta de dados pode ser realizada em larga escala e de forma econômica, permitindo a formação de um banco de dados que poderá ser útil para fornecer informações relevantes sobre o uso da bicicleta. Porém, é necessário ter em conta que em regiões economicamente desfavorecidas a utilização do smartphone para coleta de dados pode ser mais difícil uma vez que o valor do dispositivo pode ser maior que o custo de uma bicicleta.

Para Stamatiadis *et al.* (2017), o uso de aplicativos de smartphones poderá servir o usuário e, ou a entidade gestora das infraestruturas e sistemas urbanos. Ao nível do usuário pode fornecer informações de planeamento e roteamento de percursos e recolha de informação sobre as condições da viagem e do seu estado físico/ motor. Segundo a perspectiva dos agentes públicos/ gestores da infraestrutura podem contribuir para a determinação do estado e qualidade da infraestrutura (e.g., avaliação dos riscos de acidentes), bem como da identificação de outras necessidades, como a monitorização das tendências de viagem e ainda a avaliação posterior de impactos decorrentes de ações/ modificações na infraestrutura.

Os dados de monitoramento, tanto na utilização dos sistemas de partilha como através dos usuários individuais de bicicletas, podem ser usados de forma integrada no contexto de *smart cities* para fomentar a

tomada de decisão dos gestores quanto às modificações urbanas e investimentos necessários que visem: tornar o modo ciclável mais atrativo, melhorar a disponibilidade de veículos e de informações para os usuários, analisar o comportamento dos usuários e das viagens, e ainda definir o importância da utilização deste modo nos indicadores de inteligência e sustentabilidade das cidades, a fim de garantir o aumento da qualidade de vida de seus habitantes.

Considerações finais

As tecnologias aplicadas aos sistemas cicláveis podem contribuir para que as *smart cities* viabilizem o desenvolvimento sustentável nas cidades, através de um de seus principais aspectos que é a mobilidade e os modos de transporte urbanos. A bicicleta como modo de transporte é um vetor de sustentabilidade para as cidades, pois não gera emissões poluentes e, também, contribui para o aumento dos índices de atividade física da população. Já os sistemas de partilha mostram-se imprescindíveis nas *smart sustainable cities* por ampliarem o acesso a este modo de transporte a um maior número de pessoas que utilizam diariamente a cidade e por proporcionar a sua integração efetiva nas redes dos transportes públicos.

É importante ter em mente que a maioria das estratégias para que um a cidade se torne *smart* está relacionada com um sistema de monitoramento eficiente e com a geração e partilha de dados relevantes e confiáveis. Desta forma, a utilização das ICT nos cicláveis, seja no uso privado (e.g., através dos aplicativos de smartphone) ou pelos sistemas de partilha (e.g., através do sistema de informação para monitorização), mostra-se como um valioso gerador de dados que auxilia na formulação de políticas e na tomada de decisão no contexto da mobilidade nas *smart cities*.

É fundamental que se alie a utilização dos cicláveis às tecnologias inteligentes, pois assim é possível promover o aumento da substituição modal para viabilizar a descarbonização dos transportes, e, por conseguinte contribuir para alcançar os objetivos globais de sustentabilidade. A este

nível a aquisição e compartilha de dados é fundamental para promover o sistema e o tornar mais apelativo para um maior número de usuários. Complementarmente, a disponibilização de indicadores e a sistematização dos mesmos irá contribuir de forma efetiva para que o sistema seja integrado de forma efetiva nos processos de governança relacionados à mobilidade, o que representará certamente um contributo para a sustentabilidade nas *smart cities*. Assim, fica claro que a integração efetiva da bicicleta como modo de transporte e a utilização de sistemas de partilha devem ser tidos em conta pelas autoridades que gerem a mobilidade urbana.

Referências

AHVENNIEMI, H. *et al.* What are the differences between sustainable and smart cities? *Cities*, v. 60, p. 234–245, 2017.

ALBINO, V.; BERARDI, U.; DANGELICO, R. M. Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives. *Journal of Urban Technology*, v. 22, n. 1, p. 1–19, 2015.

ANGELIDOU, M. Smart cities: A conjuncture of four forces. *Cities*, v. 47, p. 95–106, 2015.

BEHRENDT, F. Why cycling matters for Smart Cities. Internet of Bicycles for Intelligent Transport. *Journal of Transport Geography*, v. 56, p. 157–164, out. 2016.

BEHRENDT, F. Why cycling matters for electric mobility: towards diverse, active and sustainable e-mobilities. *Mobilities*, v. 13, n. 1, p. 64–80, 2018.

BIBRI, S. E.; KROGSTIE, J. Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. *Sustainable Cities and Society*, v. 31, p. 183–212, 2017.

CAIRD, S. P.; HALLETT, S. H. Towards evaluation design for smart city development. *Journal of Urban Design*, v. 24, n. 2, p. 188–209, 2019.

CAMPBELL, A. A. *et al.* Factors influencing the choice of shared bicycles and shared electric bikes in Beijing. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 67, p. 399–414, jun. 2016.

FISHMAN, E. Bikeshare: A Review of Recent Literature. *Transport Reviews*, v. 36, n. 1, p. 92–113, 2 jan. 2016.

FISHMAN, E.; CHERRY, C. E-bikes in the Mainstream: Reviewing a Decade of Research. *Transport Reviews*, v. 36, n. 1, p. 72–91, 2 jan. 2016.

FISHMAN, E.; WASHINGTON, S.; HAWORTH, N. Bike Share: A Synthesis of the Literature. *Transport Reviews*, v. 33, n. 2, p. 148–165, 2013.

FYHRI, A. *et al.* A push to cycling—exploring the e-bike's role in overcoming barriers to bicycle use with a survey and an intervention study. *International Journal of Sustainable Transportation*, v. 11, n. 9, p. 681–695, 2017.

GROOT, R. DE. Desing manual for bicycle traffic. CROW, 2007.

GUIDON, S. *et al.* Electric Bicycle-Sharing: A New Competitor in the Urban Transportation Market? An Empirical Analysis of Transaction Data. *Transportation Research Record*, 2019.

HARRISON, C. *et al.* Foundations for Smarter Cities. *IBM Journal of Research and Development*, v. 54, n. 4, p. 1–16, jul. 2010.

HISELIUS, L. W.; SVENSSON, A. E-bike use in Sweden – CO₂ effects due to modal change and municipal promotion strategies. *Journal of Cleaner Production*, v. 141, p. 818–824, 2017.

HUOVILA, A.; BOSCH, P.; AIRAKSINEN, M. Comparative analysis of standardized indicators for Smart sustainable cities: What indicators and standards to use and when? *Cities*, v. 89, n. January, p. 141–153, jun. 2019.

MANZI, G.; SAIBENE, G. Are they telling the truth? Revealing hidden traits of satisfaction with a public bike-sharing service. *International Journal of Sustainable Transportation*, v. 12, n. 4, p. 253–270, 21 abr. 2018.

NAM, T.; PARDO, T. A. Smart city as urban innovation. Proceedings of the 5th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance. In: ICEGOV '11, p. 185, 2011.

RANA, N. P. *et al.* Barriers to the Development of Smart Cities in Indian Context. *Information Systems Frontiers*, v. 21, n. 3, p. 503–525, 30 jun. 2019.

ROMANILLOS, G. *et al.* The pulse of the cycling city: visualising Madrid bike share system GPS routes and cycling flow. *Journal of Maps*, v. 14, n. 1, p. 34–43, 2018.

SALMERON-MANZANO, E.; MANZANO-AGUGLIARO, F. The electric bicycle: Worldwide research trends. *Energies*, v. 11, n. 7, p. 1–16, 2018.

SCHEPERS, J. P. *et al.* The safety of electrically assisted bicycles compared to classic bicycles. *Accident Analysis and Prevention*, v. 73, p. 174–180, 2014.

SHAHEEN, S.; GUZMAN, S.; ZHANG, H. Bikesharing in Europe, the Americas, and Asia. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2143, n. May, p. 159–167, 2010.

SHARIFI, A. A critical review of selected smart city assessment tools and indicator sets. *Journal of Cleaner Production*, v. 233, p. 1269–1283, out. 2019.

STAMATIADIS, N.; PAPPALARDO, G.; CAFISO, S. Use of technology to improve bicycle mobility in smart cities. In: IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), 7, 2017. Anais[...], jun. 2017. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8005636/>

VANOLO, A. Smartmentality: The Smart City as Disciplinary Strategy. *Urban Studies*, v. 51, n. 5, p. 883–898, 2014.

WANG, M.; ZHOU, X. Bike-sharing systems and congestion: Evidence from US cities. *Journal of Transport Geography*, v. 65, p. 147–154, dez. 2017.

WOLF, A.; SEEBAUER, S. Technology adoption of electric bicycles: A survey among early adopters. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 69, p. 196–211, nov. 2014.

CAPÍTULO 9

EFICIENCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

*Belayne Zanini Marchi; Cristiano Casagrande; Maria Teresa Barbosa*⁹
Universidade Federal de Juiz de Fora/ Brasil

Introdução

A indústria da construção civil, uma das maiores responsáveis pela geração de emprego e com uma significativa participação no PIB, influenciando a sociedade e a economia e, destaca-se como um setor estratégico para se alcançar o desenvolvimento sustentável de uma região, bem como de um país (SOUZA *et al.*, 2015).

Ao mesmo tempo que a construção civil impacta positivamente na sociedade, ela consome excessivamente os recursos naturais. O processo de utilização desses recursos, no entanto, está em constante reavaliação (ALVES *et al.*, 2016). As consequências causadas pela construção civil estão associadas em parte ao setor de energia elétrica, resultado do elevado consumo. Sendo assim, a utilização de novas fontes de energia, limpas e sustentáveis, é um meio de mitigar os efeitos negativos em prol do desenvolvimento sustentável.

A energia está presente no cotidiano das pessoas, desde a simples ação de acender uma lâmpada até a realização de atividades mais complexas sendo, portanto, um fator determinante na qualidade de vida do homem moderno, principalmente para o desenvolvimento econômico. Logo, a energia está diretamente associada aos três pilares principais que regem o desenvolvimento sustentável, a saber: meio ambiente, sociedade e economia.

⁹ belaynez@hotmail.com; cristiano.casagrande@ufjf.br; teresa.barbosa@ufjf.br

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2015) a utilização de energia no mundo deverá crescer um terço entre 2015 a 2040. Dados preocupantes ao se considerar que atualmente a principal fonte de energia do planeta é composta por 31% de petróleo, seguido pelo carvão mineral com 29% e pelo gás natural com 21% (EPE, 2017). Em resumo, isso significa que 81% da energia consumida no mundo deriva dessas três fontes não renováveis, o que demanda uma reestruturação do consumo de energia mundial e, simultaneamente, adaptações de máquinas e equipamentos.

Fornecer energia a baixo custo, reduzir o consumo e/ou evitar desperdício passou a ser prioridade nas estratégias governamentais de vários países que buscam fazer o seu melhor uso. Em resumo, conservar energia é preservar o meio ambiente.

Desenvolvimento sustentável na iluminação pública

Desde a Conferência das Nações Unidas em 1992, sobre o meio ambiente e desenvolvimento, ocorrida na cidade do Rio de Janeiro, o desenvolvimento sustentável tornou-se um tema na política local, nacional e mundial e, também, um tópico importante para os profissionais de engenharia.

Assim, inúmeras definições de desenvolvimento sustentável estão presentes na literatura, destacando-se a apresentada no Relatório de 1987 da Comissão Mundial das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (comumente conhecido como The Brundtland Report) que, em resumo, menciona a imprescindibilidade de prover as necessidades presentes sem comprometimento para que as gerações futuras satisfazerem suas próprias necessidades (BRUNDTLAND, 1987).

É crescente a discussão pública e política acerca dos hábitos e estilos de vida da sociedade moderna, principalmente, porque a capacidade do planeta de prover recursos está se excedendo. Essa problemática, reconhecer a necessidade e/ou definir limites e/ou assegurar justiça no acesso a recursos limitados, está no cerne dos conceitos de desenvolvimento sus-

tentável e afeta a maneira como a engenharia deve ser praticada no futuro. Trata-se de uma abordagem às questões ambientais e de desenvolvimento, que procuram conciliar as necessidades humanas com a capacidade do planeta de superar as suas consequências.

Assim, o propósito da política energética é garantir, no presente e no futuro, o suprimento de energia necessário ao desenvolvimento econômico e ao bem-estar de uma sociedade (GOLDEMBERG *et al.*, 2005). Nos últimos anos a produção e o consumo crescente de energia trazem uma preocupação constante em garantir esse suprimento de energia necessário, porém sem provocar problemas ambientais, valorizando os recursos energéticos e assim dando enfoque a eficiência energética. Ao se reduzir a demanda de energia, conseqüentemente seus custos, investe-se em eficiência energética melhorando o bem-estar e a riqueza, resultando numa melhor adequação do emprego e do acesso à energia e aos seus serviços. A Agência Internacional de Energia (IEA) refere-se a este conjunto como os “múltiplos benefícios” da eficiência energética (IEA, 2015).

Uma ampla gama de impactos econômicos e sociais são sentidos com a eficiência energética, que vai muito além de reduzir a demanda de energia. Em termos gerais, a eficiência energética pode estimular o desenvolvimento social, contribuindo para a sustentabilidade. Além disso, a escassez das fontes de energia na natureza requer o combate ao desperdício, isto é, a energia não desperdiçada por um consumidor pode ser utilizada por outro. (PINTO *et al.*, 2001).

Com a criação da Lei de eficiência energética, Lei nº 10.295 em 2001, a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia estabeleceu limites máximos de consumo de energia e limites mínimos de eficiência energética, para os equipamentos utilizados no Brasil. As práticas adotadas já possibilitaram uma economia de 21,2 bilhões de quilowatts-hora só em 2017, o que equivale a uma economia de 4,57% do consumo total de energia. Além disso, o uso mais eficiente na geração de energia evitou que 1,965 milhões de toneladas de CO₂ fossem emitidos e inseridos na atmosfera, correspondente às emissões de 675 mil veículos durante um ano. (ELETROBRAS, 2018).

O PROCEL Reluz (Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica eficientes) investe no desenvolvimento de sistemas mais eficientes em iluminação pública. Dentre vários objetivos do programa, destaca-se a inovação tecnológica na iluminação pública e melhoria dos sistemas de iluminação pública existentes. Portanto, as alternativas e reformas na reestruturação da energia, junto a projetos de incentivo na redução do consumo de energia elétrica em sistemas de iluminação, contribuem para uma melhor eficiência energética e desenvolvimento sustentável. Minimizando o desperdício de energia favorece-se a preservação do meio ambiente e também produz impactos positivos na economia.

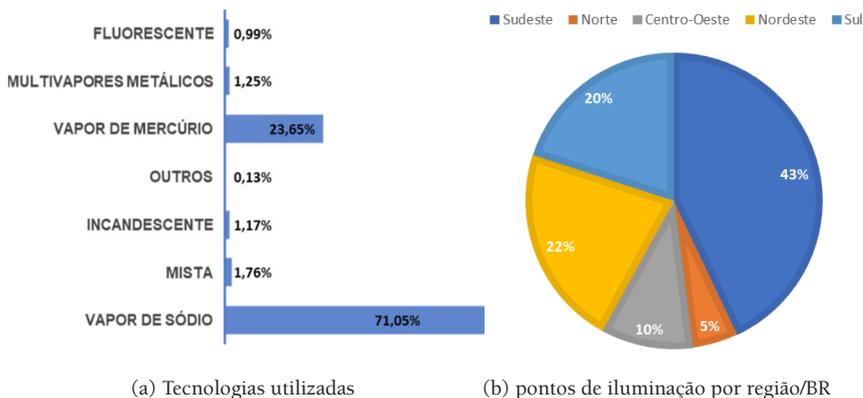
No que se refere à iluminação pública (nome dado ao serviço que fornece luz artificial aos logradouros públicos quando não há claridade suficiente, como no período noturno ou em eventuais dias escuros, incluindo locais que necessitem de iluminação constante no período diurno) é fundamental que a iluminação favoreça a redução de acidentes noturnos, destaque edifícios e obras públicas durante à noite, além de segurança ao tráfego de veículos e pedestres (ROSITO, 2009).

No Brasil, a norma que define os parâmetros mínimos a serem avaliados em um projeto de iluminação pública e na comprovação em campo após a instalação, os quais são destinados a propiciar segurança aos tráfegos de pedestres e veículos é a NBR 5101 (2012). Essa norma classifica as vias urbanas como sendo as vias de trânsito rápido, arterial, coletora e local, pertencente aos domínios do município e vias rurais que são as estradas e rodovias, geralmente de domínio federal.

Em 2012, a Eletrobrás divulgou o novo cenário no sistema de iluminação pública no país, apresentando uma predominância pelas lâmpadas vapor de sódio em alta pressão (HPS, do inglês *high pressure sodium*) devido a alta vida útil e eficácia luminosa existentes nesta tecnologia, que são propriedades almejadas e importantes em um sistema de iluminação pública. Além disso, houve um incentivo governamental pelo programa RELUZ, o qual implementou um projeto de substituição de lâmpadas a vapor de mercúrio por lâmpadas HPS, mais eficientes até naquele mo-

mento. A seguir, a relação de distribuição de pontos de iluminação por região do Brasil, conforme figura 1.

Figura 1 – Panorama da iluminação pública no Brasil.



Fonte: Adaptado de Eletrobrás, 2012.

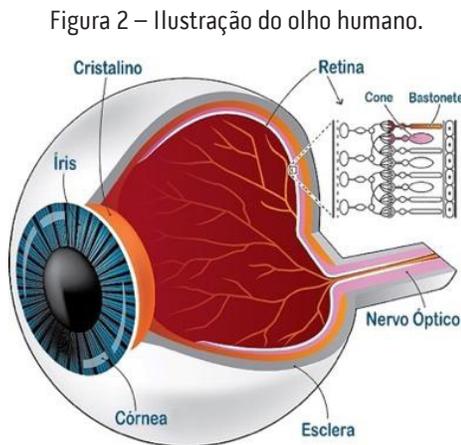
Até 2017 as lâmpadas de descarga em alta pressão, como as de vapor de sódio, ainda eram as mais utilizadas em iluminação pública (ELETROBRÁS, 2018). Os três tipos de lâmpada de descarga mais utilizadas atualmente em sistemas de iluminação pública são: vapor de sódio em alta pressão, vapor de mercúrio em alta pressão; e multivapores metálicos.

Apesar da elevada eficácia luminosa e longa vida útil, o uso de LED (*Light Emitting Diode*) também começou a ser difundido em iluminação pública devido ao seu fluxo luminoso com elevada eficácia e longa vida útil, sendo uma realidade mais eficiente (PINTO, 2012). Os LEDs, conseguem atingir economias de energia entre 50 a 70% quando comparados com as lâmpadas convencionais de mercúrio e de vapor de sódio. Adicionalmente, não requerem um tempo de espera para alcançar o nível de fluxo luminoso máximo (KALTHOUM, 2016).

Percepção e processamento visual humano

O principal objetivo dos projetos de iluminação é fornecer iluminação artificial satisfatória para os usuários. Uma iluminação eficiente se traduz numa iluminação que corresponda às necessidades visuais do ser humano. O olho humano faz parte de um sistema óptico muito complexo, que retém relações espaciais e temporais dos objetos no espaço visual. É um órgão aprimorado, apto a gravar e processar imagens por meio da incidência de luz e convertê-la em sinais elétricos enviados ao cérebro. É composto de células sensoriais, nervos, músculos, grupo de lentes e fluidos lacrimais (HELENE *et al.*, 2011).

Algumas das principais características do olho humano durante o processo de visão estão ligadas à sua adaptação, relacionadas com a abertura da pupila e à visão de cores. Cada uma delas influi em maior ou menor grau no projeto dos sistemas de iluminação e devem ser consideradas no momento da análise da tarefa visual. A figura 2 mostra uma ilustração do olho humano.

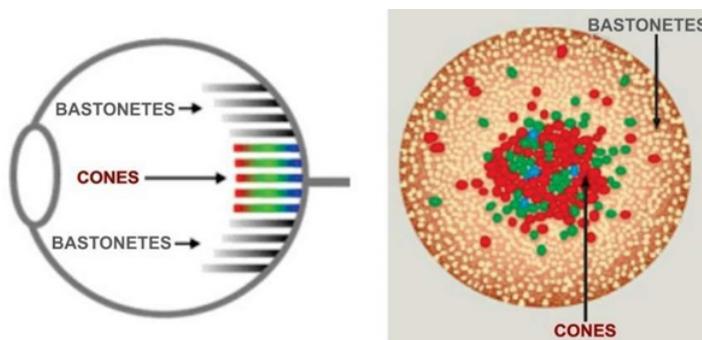


Fonte: Adaptado de MYERS *et al.*, 2017.

A íris é a parte mais visível do olho, e coordena a passagem de luz para seu interior. Conforme a incidência de luz, o tamanho da pupila

(área negra no meio da íris, isto é, a parte colorida do olho humano) pode dilatar ou reduzir, os raios luminosos ao atravessarem-na, atingem a retina onde a imagem é formada. A retina contém células fotorreceptoras que captam os estímulos luminosos, denominadas cones e bastonetes (vide Figura 3). Os cones, aglomerados na região central da retina, têm menor sensibilidade à luz, sendo os fotorreceptores responsáveis pela percepção das cores. Já os bastonetes, apesar de serem mais sensíveis à luz, não reconhecem as cores, mas dão a percepção de claro e escuro, em condições de baixa luminosidade.

Figura3– Ilustração da posição de cones e bastonetes.



Fonte: Adaptado de GOLDSTEIN *et al.*, 2016.

O olho humano comporta-se de maneiras diferentes de acordo com as condições de iluminação, as células fotorreceptoras respondem conforme o ambiente de iluminação, sempre uma célula sendo predominante à outra, ou seja, cones prevalecendo sobre bastonetes ou vice-versa. Assim, no caso de muita incidência de luz sobre a pupila, mais contraída ela se encontrará, e dessa forma, a luz ao invés de se expandir pelo globo ocular, irá atravessar a pupila como um feixe de luz focalizado na região central da retina. Como os cones estão concentrados na região central do olho, se sobressairão sobre os bastonetes, permitindo boa definição e diferenciação das cores.

Visão mesópica

Em ambientes bem iluminados, onde o olho humano tem sensibilidade na distinção das cores, é designado como visão fotópica. Ao contrário, em ambientes com condições de baixa luminosidade, a visão é designada como escotópica. Entre a visão fotópica e a escotópica, há um intervalo de transição chamado mesópica, considerada uma faixa intermediária, quando as condições de iluminação em ambientes externos são baixas.

Na visão mesópica, o sistema visual combina sinais entre cones e bastonetes e essas interações podem modificar a experiência perceptiva e alterar quase todos os aspectos do processamento visual, incluindo a detecção visual, observado na maioria dos ambientes noturnos de iluminação de tráfego e trânsito (SCHREUDER, 2008).

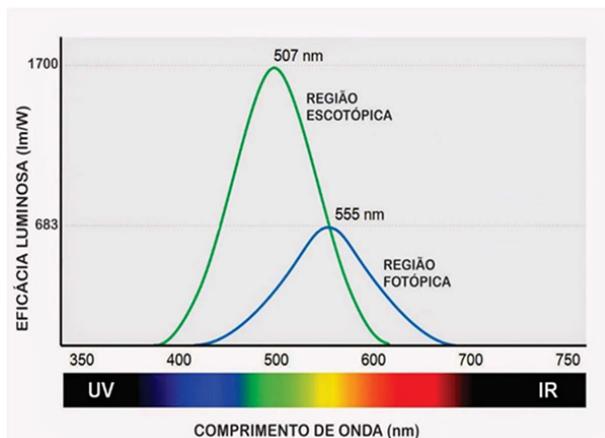
No Brasil, atualmente todas as aplicações em iluminação ainda são projetadas para grandezas fotométricas fotópicas, mesmo que a iluminação esteja na faixa mesópica. Essa situação omite as vantagens da eficácia luminosa das fontes de luz que são ricas em componentes de comprimento de onda curto, como LEDs, sobre fontes convencionais para iluminação externa, como o HPS. O sistema de fotometria mesópica poderia resolver essa deficiência do convencional sistema de fotometria.

No entanto, o sistema de fotometria mesópica é recomendado pela Comissão Internacional de Iluminação (Commission Internationale de l'Éclairage – CIE) e foi implementado em vários países. No Reino Unido, por exemplo, a recomendação de iluminação rodoviária permite reduzir a iluminância do projeto, baseado em alguns dados disponíveis pelos fabricantes de lâmpadas, como o índice de reprodução de cores (IRC) e da relação S/P (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2003).

Essa relação, denominada relação S/P (*Scotopic/ Photopic*) representa a distribuição de potência total espectral radiante da fonte de luz, em unidades radiométricas, entre os fluxos luminosos escotópico e fotópico. O valor dessa taxa é expresso pela efetividade relativa de diferentes fontes de luz em estimular os cones e bastonetes no sistema visual humano (MAGGI, 2012). A CIE reformulou as curvas de sensibilidade espectral

relativa ao olho humano para os regimes escotópico e fotópico. Essas curvas descrevem a sensibilidade da visão humana em função dos comprimentos de onda da luz (cor), visível de 380 nm (alta frequência) a 780 nm (baixa frequência), vide figura 4.

Figura 4 – Curvas de sensibilidade espectral.



Fonte: Adaptado de HARROLD, 2003.

Adaptação da fotometria para a condição mesópica

Como no Brasil, o fluxo luminoso é fundamentado na resposta visual humana correspondente ao regime fotópico, é possível que uma adaptação da fotometria convencional onde a condição mesópica fosse considerada resolveria o problema.

Um método existente, utilizado para fazer a conversão de unidades fotópicas para diferentes condições mesópicas, está proposto em tabela fornecida pela CIE 191:2010, que faz adaptações a partir de multiplicadores estabelecidos, conforme a tabela 1.

Tabela 1 – Fatores de correção percentuais para luminância efetiva.

S/P	Luminância fotópica (cd/m ²)									
	0,01	0,03	0,1	0,3	0,5	1	1,5	2	3	5
0,25	-75%	-52%	-29%	-18%	-14%	-9%	-6%	-5%	-2%	0%
0,45	-55%	-34%	-21%	-13%	-10%	-6%	-4%	-3%	-2%	0%
0,65	-31%	-20%	-13%	-8%	-6%	-4%	-3%	-2%	-1%	0%
0,85	-12%	-8%	-5%	-3%	-3%	-2%	-1%	-1%	0%	0%
1,05	4%	3%	2%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
1,25	18%	13%	8%	5%	4%	3%	2%	1%	1%	0%
1,45	32%	22%	15%	9%	7%	5%	3%	3%	1%	0%
1,65	45%	32%	21%	13%	10%	7%	5%	4%	2%	0%
1,85	57%	40%	27%	17%	13%	9%	6%	5%	3%	0%
2,05	69%	49%	32%	21%	16%	11%	8%	6%	3%	0%
2,25	80%	57%	38%	24%	19%	12%	9%	7%	4%	0%
2,45	91%	65%	43%	28%	22%	14%	10%	8%	4%	0%
2,65	101%	73%	49%	31%	24%	16%	12%	9%	5%	0%

Fonte: Adaptada de CIE:2010.

São selecionados valores, de acordo com a luminância do ambiente em cd/m² e a relação S/P. A relação S/P pode ser obtida através de uma equação fornecida por (CASAGRANDE, 2016), utilizando parâmetros disponibilizados pelos fabricantes de lâmpadas disponíveis em catálogos ou em suas embalagens, como a temperatura de cor correlatada (TCC) e do índice de reprodução de cor (IRC). A expressão é uma alternativa bastante interessante para obtenção da razão S/P, de forma simples e sem recorrer aos onerosos equipamentos fotométricos especializados, vide equação 1.

$$S/P = -1,886 \times 10^{-8} (TCC)^2 + 4,311 \times 10^{-7} (TCC)(IRC) + 6,430 \times 10^{-5} (IRC)^2 + 3,590 \times 10^{-4} (TCC) + 1,247 \times 10^{-3} (IRC) - 0,114 \quad (1)$$

Sendo que:

S/P: razão entre o fluxo luminoso escotópico e fotópico

TCC: temperatura de cor correlatada (K)

IRC: índice de reprodução de cor (%)

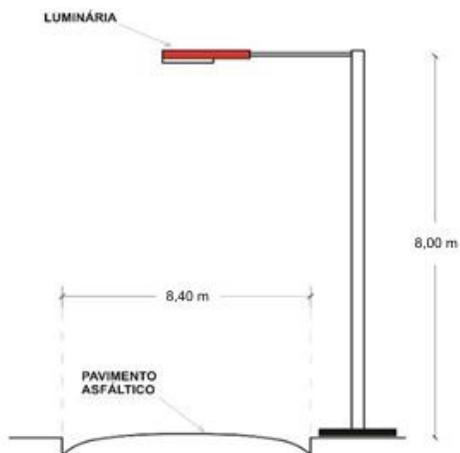
Simulações em software

Um estudo feito com projetos de iluminação em vias públicas pelo método convencional, e posteriormente, para efeito de comparação priorizando a fotometria mesópica será apresentado a seguir. Os projetos de iluminação foram simulados no software livre DIALUX. Foi idealizado um condomínio fictício, com uma rua principal de acesso, destinada apenas ao acesso local ou a áreas restritas, com baixo fluxo de veículos, de tráfego leve.

Todas as simulações obedeceram a norma brasileira ABNT NBR 5101, referente aos requisitos mínimos necessários para sistema de iluminação em vias públicas no Brasil. De acordo com a classificação do fluxo e do tipo de via, ela pertencerá a uma determinada classificação de iluminação.

A rua principal do condomínio de tráfego leve é considerada conforme a norma como via de classe local V5. Suas dimensões são: 8,40 m de largura, com duas pistas de rolamento. Os postes são distribuídos unilateralmente, com distância de 35,00 m entre eles, distantes 30 cm em relação à via e altura de 8,00 m (distância entre a luminária e o asfalto) (Figura 5).

Figura 5 - Desenho esquemático do perfil da rua.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Inicialmente, os projetos são adequados segundo a fotometria convencional (fotópica) e, posteriormente, pela fotometria mesópica, para cada tipo de luminária, resultando um total de quatro simulações.

Para a simulação dos projetos, utilizaram-se dois tipos de luminárias, ambas pertencentes ao catálogo da Philips: HPS - PHILIPS SGS 252 PC (70W de potência, TCC 2000K, IRC 25% e fluxo luminoso de 6.600 lm) e LED - PHILIPS BGP 382 (36W de potência, TCC 3000K, IRC 80 % e fluxo luminoso de 5.046 lm). Usando a fotometria clássica, os resultados das simulações para as luminárias LED e HPS encontram-se na tabela 2.

Tabela 2 – Fatores de correção percentuais para luminância efetiva.

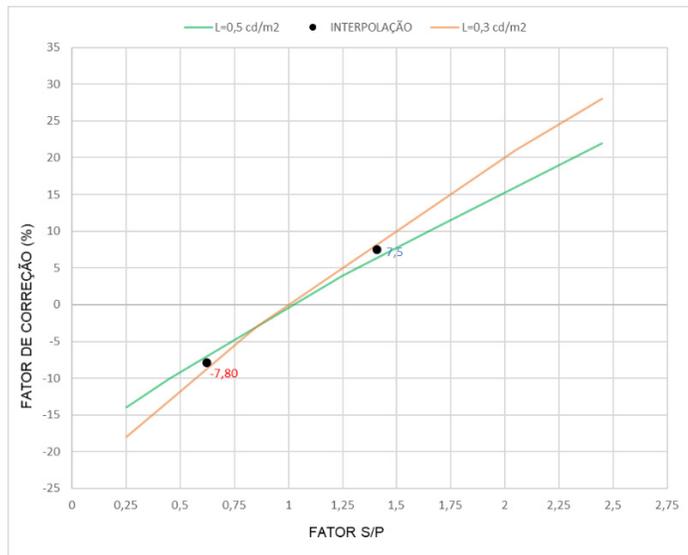
Lâmpada	Fotometria	Fluxo Luminoso (lm)	Iluminância Média (lux)	Eficácia Luminosa (lm/W)	Luminância Fotópica Média (cd/m ²)
HPS	Fotópica (clássica)	6.600	6,28	66,00	0,43
LED	Fotópica (clássica)	5.046	6,54	50,46	0,42

Fonte: Elaborada pelos autores.

Para a adaptação na fotometria utilizando o sistema mesópico, utilizou-se os parâmetros disponibilizados pelos fabricantes das lâmpadas e cálculo do valor S/P, sendo 0,621 para a luminária HPS e 1,408 para o LED.

Com o fator S/P e a luminância observada, é possível usar o fator de correção na Tabela da CIE. No entanto, tanto o fator o S/P (0,621 e 1,408) como a luminância calculada (0,43 e 0,42 cd/m²), não estão disponíveis diretamente na Tabela da CIE, sendo necessário obter os multiplicadores de correção por meio de interpolação. A linha verde do gráfico corresponde aos valores de luminância de 0,5 cd/m², a linha laranja representa os valores de luminância iguais 0,3 cd/m², vide figura 6:

Figura 6 - Interpolação de valores S/P.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Com os multiplicadores de correção encontrados (-7,8 e 7,5), foi realizada uma nova simulação, porém alterando os valores dos fluxos luminosos originais para os valores com a correção, obtendo novos valores dos fluxos luminosos. Na luminária HPS, o fluxo luminoso passou de 6.600 para 6.085 lm, o que resultou na simulado uma iluminância

média caindo de 6,28 para 5,79 lux, um percentual de 7,8% a menos. Ao mesmo tempo, na luminária LED, o fator de correção do fluxo luminoso passou de 5.046 para 5.424 lm, e ao simular usando esse fluxo luminoso corrigido resultou um acréscimo na iluminância média, que era de 6,54 lux, passando para 7,03 lux, um percentual de 7,5% a mais.

Com os multiplicadores de correção encontrados (-7,8 e 7,5), foi realizada uma nova simulação, porém alterando os valores dos fluxos luminosos originais para os valores com a correção, obtendo novos valores dos fluxos luminosos. Na luminária HPS, o fluxo luminoso passou de 6.600 para 6.085 lm, o que resultou na simulado uma iluminância média caindo de 6,28 para 5,79 lux, um percentual de 7,8% a menos. Ao mesmo tempo, na luminária LED, o fator de correção do fluxo luminoso passou de 5.046 para 5.424 lm, e ao simular usando esse fluxo luminoso corrigido resultou um acréscimo na iluminância média, que era de 6,54 lux, passando para 7,03 lux, um percentual de 7,5% a mais.

Portanto, ao se comparar o fluxo luminoso efetivo e o corrigido para condições mesópicas, é possível perceber que quando a tecnologia empregada são as luminárias de vapor de sódio, há uma redução dos níveis de iluminância, Por sua vez, ao se aplicar a correção mesópica no projeto com LED visualiza-se um aumento dos níveis de iluminância na via pública, vide a tabela 3.

Tabela 3 – Comparação entre projeto convencional e mesópico.

Lâmpada	Fotometria	Fluxo Luminoso (lm)	Iluminância Média (lux)	Eficiência Luminosa (lm/W)	Luminância Fotópica Média (cd/m ²)	Fator de Correção
HPS	Fotópica (clássica)	6.600	6,28	66	0,43	-7,8%
	Mesópica (efetiva)	6.085	5,79	60,9	-	
LED	Fotópica (clássica)	5.046	6,54	50,46	0,42	7,5%
	Mesópica (efetiva)	5.424	7,03	54,24	-	

Fonte: Elaborada pelos autores.

Ao se fazer uma avaliação geral do desempenho de ambas as tecnologias usadas, é importante observar que além do ganho de 7,5% no fluxo luminoso efetivo que o LED apresentou considerando a visão mesópica, a potência da lâmpada é de apenas 36 W, uma redução de 48% na potência quando se troca HPS de 70 W por LED de 36 W.

O estudo apontou que quando utilizado o sistema priorizando a fotometria mesópica, o fluxo efetivo que o olho humano visualiza é entorno de 7,5% a mais do fluxo luminoso da luminária a LED.

Na prática, pode-se dizer que o LED pode ser dimerizado (redução adicional) em cerca de 7,5% a menos do seu fluxo luminoso, de forma a manter o mesmo fluxo luminoso que era efetivamente percebido nas luminárias HPS, ou ainda optar por outro LED de menor potência ainda. Quando a luminária utilizada é a HPS, observa-se um fluxo luminoso de 6,28 lm, porém o olho humano enxerga o fluxo luminoso efetivo de 5,79 lm, ou seja, um déficit de 7,8%, desperdiçando 7,8% de energia.

Considerações finais

Com essas considerações, conclui-se que uma forma de melhorar a eficiência energética do sistema elétrico do país é fazendo uso da correção das grandezas fotométricas. Quando se opta por uma tecnologia mais satisfatória para a iluminação pública, isso reflete diretamente em um custo menor na conta de energia elétrica. Como no exemplo exposto, isso acontece porque consegue-se reduzir o fluxo luminoso da lâmpada mantendo a mesma iluminância da condição fotópica clássica, usada na condição mesópica.

A reabilitação energética se destaca no conceito de desenvolvimento sustentável nos centros urbanos, em contrapartida há dificuldades técnicas e/ou econômicas e/ou institucionais que por vezes dificultam uma abordagem mais eficiente sobre o tema. É perceptível que ações de conservação de energia podem ser implantadas, através das variáveis tecnológicas existentes. A substituição por luminárias LED, por exemplo,

pode ser inserida no planejamento energético nacional em diferentes níveis, através de políticas públicas. Como demonstrado nos resultados, onde se tem regiões de baixa luminosidade há ganhos reais da inserção do sistema mesópico em projetos de iluminação pública.

Por fim, é importante observar que existe uma tendência mundial na produção de energia elétrica que vem cada vez mais necessitando atender uma crescente demanda de consumo dos usuários. No Brasil, só a iluminação pública é responsável por aproximadamente 8,2% do consumo total de energia elétrica produzida (EPE, 2017).

A parcela que a iluminação pública ocupa no consumo total de energia elétrica num país é de suma importância, não só para a economia dos gastos públicos mas, também, para a redução do consumo de recursos ambientais em nível mundial. Portanto, uma adequação a essa nova tecnologia é um desafio que países dispostos a mudança podem enfrentar na busca de um ambiente construído mais sustentável.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR. 5101: Iluminação pública- Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ALVES, D. F.; SANTOS, A.S. A iluminação pública e sua função nos centros urbanos. *Blucher Design Proceedings*, v. 2, n. 4, p. 317-333, 2016.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Code of Practice for the Design of Road Lighting- Part 1: Lighting of Roads and Public Amenity Areas. British Standards Institution, 2003.

BRUNDTLAND, Gru *et al.* Our common future ('brundtland report'). 1987.

CASAGRANDE, C. G.. *Desafios da iluminação pública no Brasil e nova técnica de projetos luminotécnicos fundamentada na fotometria mesópica*. 2016. *Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica* - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2016.

CIE191, C. I. E. Recommended system for mesopic photometry based on visual performance. Vienna: CIE, 2010.

ELETROBRAS, PROCEL. Relatório de Resultados 2013: ano base 2012. Relatório Completo. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.elektrobras.com>. Acesso em: 10 julho de 2019

ELETROBRAS: Resultados PROCEL 2018: Ano base 2017. Disponível em: http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2018/docs/Procel_rel_2018_web.pdf. Acesso em: 10 de julho de 2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016. - Brasil. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2017

GOLDEMBERG, J., & MOREIRA, J. R.; Política energética no Brasil. *Estudos avançados*, v. 19, n. 55, p. 215-228, 2005.

GOLDSTEIN, E. B., & BROCKMOLE, J.; Sensation and perception. Cengage Learning, 2016.

HARROLD, R., MENNIE, D. "IESNA Lighting Ready Reference (RR-03): A compendium of materials from the IESNA lighting handbook". 4 ed., New York: IESNA, 2003

HELENE, O.; HELENE, A. F. Alguns aspectos da óptica do olho humano. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 33, n. 3, p. 3312, 2011.

IEA. World Energy Outlook 2015. Paris: OECD/IEA, 2015

IESNA - Illuminating Engineering Society of North America (IESNA). Lighting Handbook, 9 ed.. New York, 2000.

KALTHOUM, K. M. *Distorção harmônica causada pelos LEDs em iluminação pública-análise e proposta de soluções*. 2016. Tese de Doutorado em Engenharia - Instituto Superior de Engenharia do Porto. Portugal, 2016.

MAGGI, T., DALLA COSTA, M. A., FURLANETTO, C. A., DOS SANTOS, A. S., & Toss, Estudo do Fluxo Luminoso Necessário para Luminárias de Iluminação Pública de LEDs. In Congresso Brasileiro de Automática. 11, 2012. Campina Grande. *Anais[...]* Paraíba, 2012

MYERS, David G., DEWALL, C. Nathan, Psicologia, sensação e percepção. 11 ed., LTC, 2017.

PINTO, D. P., OLIVEIRA, E.; BRAGA, H. A. C. A disciplina de eficiência energética do curso de Engenharia Elétrica da UFJF. In: COBENGE- Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 29, 2001, Juiz de Fora. *Anais[...]*. Minas Gerais, 2001.

PINTO, R. A. *sistemas eletrônicos para iluminação de exteriores empregando diodos emissores de luz (LEDs) alimentados pela rede elétrica e por baterias*. 2012. Tese de Doutorado em Engenharia - Universidade Federal de Santa Maria. 2012.

PROCEL. Lei de Eficiência Energética. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2014/lei.pdf>. Acesso em: 10/07/2019.

RODRIGUES, C. R. B. S. *Contribuições ao uso de diodos emissores de luz em iluminação pública*. 2012. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2012.

ROSITO, L. H. As Origens da Iluminação Pública no Brasil. Portal O Setor Elétrico. 36 ed., Janeiro de 2009a.

SCHREUDER, D. Outdoor Lighting: Physics, Vision and Perception. 1. ed. Leidschendam: Springer, 2008.

SOUZA, B. A., OLIVEIRA, C. A. C., SANTANA, J. C. O. D., VIANA NETO, L. A. D. C., & SANTOS, D. D. G. Análise dos indicadores PIB nacional e PIB da indústria da construção civil. *Revista de Desenvolvimento Econômico*, v. 17, n. 31, 2015.

SCOPACASA, V. A. Introdução à Tecnologia de LED. *Revista LA_PRO*, v. 1, p. 5-10, 2008.

CAPÍTULO 10

DEFINIÇÃO DE TIPOLOGIAS REPRESENTATIVAS PARA A DETERMINAÇÃO DO EFEITO DE MEDIDAS DE REABILITAÇÃO ENERGÉTICA À ESCALA DE BAIRRO

*Ricardo Barbosa; Manuela Almeida; Charlotte Verhaeghe*¹⁰
Universidade do Minho/ Universidade de Antuérpia

Introdução

Os edifícios são responsáveis por uma parte muito significativa das emissões de gases com efeito estufa. Na Europa, cerca de 40% do consumo de energia e 36% das emissões de CO² estão diretamente relacionadas com o sector dos edifícios e o estoque de edifícios residenciais é responsável por 30% do consumo de energia total (GYNTHER, L., LAPILLONE, B; POLLIER, 2015). Para esta questão contribui o facto de a maior parte dos edifícios existentes terem sido construídos antes da entrada em vigor das muito exigentes regulamentações atuais relativas à eficiência energética neste setor, bem como a uma muito baixa taxa de renovação dos edifícios (ARTOLA *et al.*, 2016). Existe, assim, um potencial muito significativo de poupança de energia e de redução de gases com efeito de estufa associado à reabilitação energética dos edifícios existentes que, num contexto de cumprimento das metas delineadas pelos Estados Membros da União Europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2018), não pode, de todo, ser ignorada.

¹⁰ ricardobarbosa@civil.uminho.pt; malmeida@civil.uminho.pt; charlotte.verhaeghe@student.uantwerpen.be

Embora, inicialmente, a regulamentação europeia e nacional para a promoção da eficiência energética nos edifícios se tenha focado essencialmente na construção nova, a legislação mais recente põe já uma maior ênfase na questão da necessidade de intervenção no edificado existente. Este facto é também reforçado pela revisão de 2018 da diretiva EPBD (EU, 2018), que salienta o papel fundamental dos planos de reabilitação do edificado a longo prazo na descarbonização necessária, nomeadamente através do desafio significativo do objetivo de um estoque de edifícios existentes com necessidades quase nulas de energia (nZEB) (EU, 2010). Este tipo de edifícios pressupõem uma envolvente energeticamente eficiente, complementada por formas de captação local de energias renováveis, que cubram grande parte do remanescente das necessidades energéticas.

Assim, embora atualmente se assuma amplamente que a reabilitação energética é talvez o processo mais importante para a descarbonização do edificado, a maior parte da investigação é direcionada para o edifício como uma unidade individual (FERREIRA; ALMEIDA; RODRIGUES, 2016; THOMSEN *et al.*, 2016). No entanto, existem agora evidências de que uma intervenção que contemple um grupo de edifícios, embora associada a novos desafios, pode trazer grandes vantagens do ponto de vista de rentabilidade da intervenção e das sinergias que podem ser obtidas entre as medidas de eficiência energética aplicadas aos edifícios e o aproveitamento das fontes de energia renovável usadas no local (AGUACIL *et al.*, 2017; DODOO; GUSTAVSSON; TRUONG, 2018). De uma forma geral, e dependendo das características dos edifícios de uma determinada zona urbana, é possível que surjam oportunidades para a obtenção de economias de escala, bem como de sinergias em processos de planeamento e construção (AGUACIL *et al.*, 2017). No que toca à questão das economias de escala, vários edifícios intervencionados ao mesmo tempo podem permitir poupanças significativas a vários níveis, tanto na compra de material como na alocação de recursos necessários à execução dos trabalhos, seja na fase de projeto, seja em obra. Assim, soluções de reabilitação não rentáveis a nível do edifício individual, poderão sê-lo, se implementadas num grupo de edifícios.

Para a avaliação do desempenho energético de grupos de edifícios e do efeito das medidas de reabilitação energética, é comum o uso de arquétipos e tipologias representativas que reúnem um conjunto de similaridades e elementos comuns que permitem que estas constituam um modelo das habitações existentes no estoque a analisar (MONTEIRO *et al.*, 2017; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015). O uso do melhor modelo a ser utilizado para representar um determinado grupo de edifícios não é consensual e depende significativamente da forma como o assunto é abordado.

O estudo reportado neste capítulo pretende contribuir para esta discussão, seguindo uma abordagem distinta, mas potencialmente complementar, com o objetivo de definir as tipologias que têm uma maior influência no desempenho energético do conjunto de edifícios que se pretende analisar. Para além de uma utilização possivelmente mais abrangente, a abordagem seguida aqui enquadra-se na investigação produzida no âmbito do projeto de investigação internacional IEA EBC Annex 75, promovido pela Agência Internacional de Energia através do seu Programa EBC (Energy in Buildings and Communities). O projeto Annex 75 – Cost-Effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables, que é coordenado pela Universidade do Minho, teve início em janeiro de 2018 e tem uma duração planeada de 5 anos. Este projeto reúne competências várias de parceiros internacionais de treze países (Alemanha, Áustria, Bélgica, China, Dinamarca, Espanha, Holanda, Itália, Noruega, Portugal, República Checa, Suécia e Suíça), onde se contam não só instituições universitárias e de investigação, mas também empresas de consultoria privadas que atuam no setor energético, num total de 22 instituições. Este projeto tem como intenção investigar, para um grupo de edifícios existentes, o balanço entre as medidas de eficiência energética e as medidas relacionadas com a utilização de energia renovável produzida localmente, num contexto de uma intervenção de reabilitação energética com o objetivo nZEB (nearly zero energy buildings, de acordo com o definido na Diretiva Europeia EPBD-recast de 2010)(EU, 2010). O projeto aspira a investigar e identificar as estratégias de reabilitação

mais rentáveis que permitam reduzir as emissões de carbono e o uso de energia nos edifícios residenciais a uma escala urbana. Assim, o método a desenvolver durante o projeto, permitirá testar de forma eficaz e com um reduzido tempo de computação, um grande número de possíveis cenários de reabilitação energética num conjunto mais ou menos alargado de edifícios.

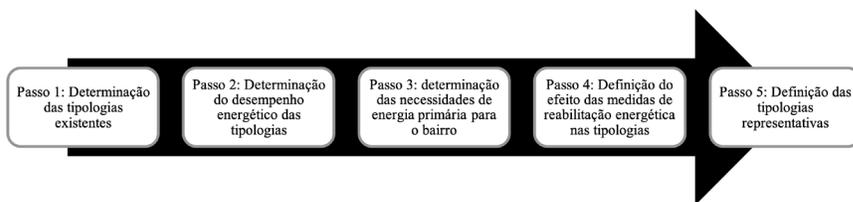
Com o objetivo de definir um método adequado à avaliação do efeito das medidas de reabilitação energética aplicadas a edifícios residenciais, este capítulo reporta a abordagem metodológica, que combina simulação numérica e análise estatística, e a sua aplicação a um bairro de habitação social localizado em Braga, Portugal.

Abordagem metodológica

De modo a atingir os objetivos do estudo, foi definida uma abordagem metodológica que estipula os principais passos a dar. Para além da determinação das tipologias mais representativas que permitam avaliar o impacto de vários cenários de reabilitação energética num grupo de edifícios, pretende-se ainda que a avaliação deste impacto seja feita com base em metodologias já existentes, de forma a otimizar técnicas anteriores e obter uma decisão relativa à eficiência das diferentes medidas de reabilitação sem necessidade de muito tempo de computação.

Para este efeito, foi efetuada uma investigação com base numa abordagem metodológica que considera 5 fases distintas, conforme mostrado na figura 1.

Figura 1 – Passos da abordagem metodológica utilizada neste estudo.



Fonte: Os autores.

O primeiro passo na definição do método foca-se na determinação das tipologias do edifício que permitam a avaliação do comportamento das habitações da forma mais exata possível. Para um grupo de edifícios ou bairro, o desempenho energético é normalmente calculado através de uma de duas abordagens distintas: *top down* e *bottom up* (ALLEGRIANI *et al.*, 2015; KAVGIC *et al.*, 2010). A abordagem *top down* parte da análise de dados macroscópicos que são reunidos a um nível nacional ou regional. Os dados utilizados são normalmente gerais e com uma granularidade muito baixa. A abordagem *bottom up*, utiliza dados com base microscópica relativamente às características das habitações e dos edifícios. Tendo uma granularidade elevada, providencia a oportunidade para gerar cálculos de desempenho energético tendo em consideração questões detalhadas como o impacto individual no uso de energia. As características principais dos edifícios são depois comparadas e combinadas de forma a suportar uma extrapolação que permita fazer uma estimativa do uso de energia para o conjunto que está a ser analisado.

Para o método reportado neste capítulo, foi escolhida a abordagem *bottom up*, sendo que as tipologias devem ser definidas com base na localização das habitações no interior do edifício, a orientação da habitação e tendo em consideração a geometria e os detalhes de construção que ocorrem com maior frequência. Fatores como a idade, a zona climática, a ocupação e os sistemas associados devem ser também levados em conta. Estes fatores podem ser considerados como sendo similares num edifício ou em um grupo de edifícios com desenho semelhante (FERNÁNDEZ

-AGÜERA *et al.*, 2016). A força desta abordagem está na sua capacidade de incorporar um nível de detalhe elevado e apresentar maior exatidão, embora necessite de um maior número de dados que a abordagem *top down*(KAVGIC *et al.*, 2010).

Num segundo passo, o desempenho térmico e energético das tipologias é calculado, nomeadamente através da utilização de métodos comprovados, como a simulação dinâmica ou o método quase-estático. Os parâmetros a serem analisados foram determinados por uma revisão de literatura e incluem a zona climática, a geometria do edifício, dados construtivos e identificação dos sistemas que operam no edifício, assim como das características dos utilizadores e os seus dados de ocupação. A geometria é considerada como sendo um fator primordial quando o objetivo é determinar um modelo para o estoque de edifícios (CAPUTO; COSTA; FERRARI, 2013; WONG *et al.*, 2019). No caso de dados em falta, pressupostos baseados em valores estandardizados ou resultantes de análise estatística podem ser assumidos para o cálculo.

Após os cálculos necessários para a determinação do desempenho energético, as necessidades de energia primária são calculadas de acordo com o definido na regulamentação portuguesa (Portaria 15793-K/2013), a qual tem em conta a eficiência dos equipamentos e os fatores de conversão de energia (MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DO EMPREGO, 2013).

No terceiro passo, o desempenho energético em termos de energia primária do estoque de edifícios é determinado com base nas necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento de cada tipologia.

O quarto passo diz respeito à determinação do impacto da implementação das várias medidas e cenários de reabilitação energética. Os cenários de reabilitação a serem testados derivam de uma revisão da literatura e dos tipos de intervenção mais comuns no contexto nacional. No entanto, a seleção destas medidas é alinhada com o foco do projeto Annex 75 no sentido em que se procuram soluções com rentabilidade económica. Assim sendo, as medidas devem melhorar o desempenho energético dos edifícios pelo menor custo possível ao longo de ciclo de vida desses edifícios. Aqui, utilizando o método de cálculo escolhido no

segundo passo, as tipologias definidas no primeiro passo são usadas para calcular o impacto das intervenções no desempenho dessas tipologias. Após este cálculo, o resultado de cada cenário deve ser extrapolado para o estoque de edifícios em termos de energia primária.

No passo 5, é feita a seleção das tipologias mais representativas, de modo a reduzir a necessidade e tempo de computação na investigação subsequente relativa ao estoque de edifícios. De modo a selecionar as tipologias mais representativas, uma análise estatística deve ser efetuada. No método que aqui se apresenta é usada a correlação de Pearson que demonstra de que modo o desempenho energético das tipologias dos edifícios está linearmente relacionado com a energia primária total calculada para o bairro ou grupo de edifícios. Por forma a verificar se a correlação calculada é confiável, a significância estatística do resultado é também examinada.

A correlação de Pearson (r) é também conhecida por “Product Moment Correlation Coefficient”. Esta correlação dá uma indicação do modo como as variáveis estão relacionadas (KIRCH W., 2008) e pode ser encontrada com recurso à equação (1).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

Em que:

r = coeficiente de correlação;

X_i = valor do vetor 1;

\bar{X} = média do vetor 1;

Y_i = valor do vetor 2;

\bar{Y} = média do vetor 2.

O vetor 1 é representado pelo conjunto de valores independentes. Neste caso, os valores independentes são as necessidades de energia primária para as habitações que se enquadram numa determinada tipologia “x”. O vetor 2 representa o conjunto de valores dependentes que é dado pelos

valores de energia primária de todas as habitações de todas as tipologias do conjunto de edifícios que se está a analisar. A maior parte das folhas de cálculo, como o Excel e o Open Office, podem ser usadas para calcular a correlação. A correlação é obtida por um valor entre -1 e 1 e é adimensional. Quando dois conjuntos de números se movem na mesma direção ao mesmo tempo, considera-se que estes têm uma correlação positiva e é dado um valor de correlação positivo. Quando os vetores se movem em direções opostas, é considerado que a correlação é negativa. No caso de não haver correlação entre os valores, o coeficiente de Pearson é zero. Se o vetor 1 se mover na mesma exata quantidade e na mesma direção que o vetor 2, o número dado pela equação será o valor absoluto 1. A correlação de Pearson não distingue a diferença entre variáveis dependentes e independentes e não dá informação sobre a inclinação da linha que descreve a correlação. Este coeficiente apenas determina a existência de uma correlação. No caso de o valor ser alto, a relação é considerada como sendo forte e quanto mais perto de zero, mais baixa é a correlação (KIRCH, 2008). Por outro lado, um valor baixo de coeficiente de Pearson não significa que a relação entre as variáveis não existe. Pode indicar que os vetores têm uma relação não linear, o que pode ser verificado com outro tipo de análise, como a regressão simples (KIRCH, 2008).

De modo a determinar as tipologias mais representativas, torna-se também necessário que um teste de significância estatística seja utilizado. O uso de um teste é determinante, uma vez que, mesmo que a correlação seja positiva e alta, não está provado com certeza que correlação é diferente de zero, mas sim que é extremamente improvável que a correlação seja zero. De modo a verificar esta questão, é usado um teste designado por “teste t”, que verifica o coeficiente de correlação (KIRCH, 2008):

$$t = r \sqrt{\frac{(n-2)}{(1-r^2)}} \quad t = r \sqrt{\frac{(n-2)}{(1-r^2)}} \quad (2)$$

Em que:

t = pontuação t;

r = coeficiente de correlação;
 n = tamanho da amostra;
 $n-2$ = graus de liberdade.

Enquanto que o resultado do teste t mede o tamanho da diferença relativa à variação nos dados da amostra, a probabilidade de obtenção deste valor é dada pelo valor P , que é aferido através da relação do resultado do teste t e dos graus de liberdade. Neste caso, o valor P dá a probabilidade de a tipologia “ x ” não estar correlacionada com a necessidade energética total. O resultado indica que há uma probabilidade $(1-P)$ de encontrar uma correlação Pearson entre $+r$ e $-r$. Um valor elevado de P significa uma alta probabilidade (P) de a correlação não ser significativa. Na maior parte dos estudos, um valor de P menor ou igual a 0.05 indica uma correlação significativa (KIRCH, 2008). A seleção final é baseada nas correlações que são estatisticamente mais significativas, de entre as tipologias existentes no conjunto de edifícios.

O último passo relativo à análise estatística consiste em determinar o impacto do conjunto de tipologias representativas escolhido relativamente ao desempenho energético do bairro. Este passo é importante para ter a certeza de que o desempenho energético aferido com o método é próximo do calculado para todas as tipologias. O desvio é calculado como o valor absoluto da diferença entre as necessidades energéticas de uma combinação de tipologias e as necessidades energéticas totais calculadas para o grupo de edifícios. A equação seguinte ilustra a aplicação do rácio de desvio utilizado para a combinação “ x ” e para a situação atual (R_i) que não considera nenhuma melhoria e onde todas as tipologias são consideradas:

$$\text{Rácio Desvio} = \frac{\sum_{i=1}^n |A_i - B_i|}{\sum_{i=1}^n B_i} [\%] \quad \text{Rácio Desvio} = \frac{\sum_{i=1}^n |A_i - B_i|}{\sum_{i=1}^n B_i} [\%] \tag{3}$$

Em que

A_i = Necessidades de energia primária total para aquecimento e arrefecimento em que a combinação “x” de tipologias é usada para o cenário de reabilitação R_i : $\forall i \in [1, n] \cup RI$

B_i = Necessidades de energia primária total para aquecimento e arrefecimento em que todas tipologias são usadas para o cenário de reabilitação R_i : $\forall i \in [1, n] \cup RI$.

A habitação social em Portugal e o caso de estudo do bairro de Santa Tecla

Em Portugal, a maior parte das habitações sociais surge a partir de meados dos anos 80 do séc. XX para dar resposta à necessidade de alojamento de famílias carenciadas e com baixo rendimento económico. Existem no país cerca de 120.000 habitações sociais distribuídas por 26.000 edifícios, constituindo cerca de 2% do parque edificado total (INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA, 2015). Tendo como prioridade dar resposta à necessidade premente de uma habitação condigna, este tipo de edifícios apresenta, de forma comum, um tipo de construção que não teve em consideração critérios conducentes a um elevado desempenho energético. Para além disso, e como consequência, estas construções apresentam recorrentemente anomalias associadas à falta de isolamento térmico, como o aparecimento de bolor e falta de conforto térmico no seu interior. Apesar destes problemas, a habitação social é um instrumento social fundamental no que respeita ao combate à pobreza e exclusão, sendo também absolutamente essencial na identificação e no combate de situações de pobreza energética.

A pobreza energética é um conceito que começa a ganhar relevância no desenvolvimento de políticas sociais, de saúde e também de eficiência energética dos edifícios. Embora não haja ainda uma definição generalizada para o conceito, o seu significado está ligado à incapacidade económica de os utilizadores dos edifícios climatizarem as suas habitações de forma

adequada (PYE *et al.*, 2015). Estudos recentes revelaram a significativa vulnerabilidade de Portugal em termos de pobreza energética, que é potenciada por uma combinação de fatores associados a baixos rendimentos disponíveis, ocupantes com idade avançada, preços elevados da energia e habitações com fraco desempenho térmico e energético (SIMOES; GREGÓRIO; SEIXAS, 2016).

Neste sentido, e no âmbito da investigação relativa à reabilitação energética, a habitação social revela-se um caso de estudo particularmente interessante, pelos desafios inerentes ao próprio contexto, mas também pelas oportunidades que apresenta, nomeadamente relativas ao aumento de conforto térmico, redução de riscos para a saúde dos ocupantes devido a questões de salubridade e condições interiores e diminuição de patologias no edificado, para além do significativo potencial de redução das necessidades energéticas que apresenta.

O bairro de habitação social de Santa Tecla, em Braga, no norte de Portugal, é um exemplo típico dos bairros existentes no país. Construído em 1979, o bairro é constituído por quatro edifícios, com orientações predominantes Nordeste-Sudoeste, embora haja um edifício com orientação Noroeste/Sudeste e outro mais pequeno com orientação Este/Oeste (Figura 2).

Os edifícios apresentam já alguns sinais de degradação física (Figura 3). O bairro é composto por 160 unidades habitacionais com tipologias com dois quartos (T2), três quartos (T3) e quatro quartos (T4).

Figura 2 – Localização dos edifícios que constituem o Bairro de Santa Tecla em Braga, Portugal.



Fonte: Os autores.

Definição de tipologias representativas no bairro de Santa Tecla

De modo a ser testada, a metodologia definida foi aplicada ao bairro de Santa Tecla. O bairro é composto por quatro edifícios. Cada edifício tem cinco pisos. Considerando a posição relativa da habitação no edifício, seis situações distintas podem ser diferenciadas (Tabela 1).

Figura 3 – Imagens dos edifícios do Bairro Social de Santa Tecla.



Fonte: Os autores.

Tabela 1 - Tipologias analisadas, com base na posição relativa da habitação no edifício.

Tipologia	Posição	Quantidade	Tipologia	Posição	Quantidade
Tipologia 1	Superior, extremo do edifício	8	Tipologia 4	Intermédio no meio do edifício	64
Tipologia 2	Superior, meio do edifício	32	Tipologia 5	Piso térreo no extremo do edifício	8
Tipologia 3	Intermédio no extremo do edifício	16	Tipologia 6	Piso térreo no meio do edifício	32

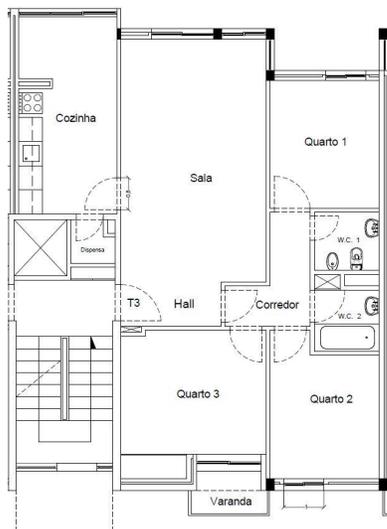
Fonte: Os autores.

Há um menor número de tipologias que estão situadas nos extremos dos edifícios. Os apartamentos que estão situados nas posições intermédias do edifício representam o maior número de habitações. Todos os apartamentos com o mesmo número de quartos têm a mesma geometria. Assim, a geometria mais comum no edifício pode ser baseada no número de quartos que possui. No bairro de Santa Tecla, a habitação mais comum tem três quartos (figura 4) e foi considerada como base para os cálculos das tipologias na tabela 1.

Conforme já foi referido, há muitas semelhanças entre os edifícios de habitação social em Portugal do ponto de vista construtivo. No caso de Santa Tecla, os edifícios apresentam uma estrutura porticada de betão armado com paredes exteriores duplas em tijolo cerâmico sem isolamento e paredes de compartimentação em tijolo cerâmico de menor espessura (11 cm).

A tabela 2 resume as principais características dos edifícios do ponto de vista construtivo, com respeito ao coeficiente de transmissão térmica (U) dos elementos construtivos.

Figura 4 - Geometria da habitação mais comum.



Fonte: Os autores.

Tabela 2 – Características dos elementos construtivos.

Elemento	U (W/m ² .0C)	Descrição
Parede exterior	1.16	Parede dupla rebocada com 28 cm de espessura, constituída por dois panos de alvenaria de tijolo de 11 cm, com 4 cm de caixa-de-ar, sem isolamento térmico
Parede de compartimentação	1.84	Parede simples rebocada em ambas as faces, constituída por tijolo cerâmico de 11 cm
Pavimento	1.72	Laje em betão armado com revestimento em madeira ou revestimento cerâmico nas zonas de cozinha e instalações sanitárias
Janela	4.39	Janelas com vidro simples e caixilharia de madeira, com estores em PVC, sem corte térmico
Cobertura	1.81	Cobertura inclinada, constituída por painéis sandwich, com isolamento de 4 cm e chapa de metal

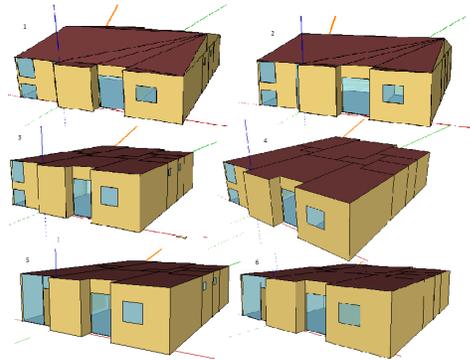
Fonte: Os autores.

As habitações não são servidas por sistemas centralizados de climatização e, na sua maioria, os habitantes aquecem ou arrefecem a habitação com equipamentos individuais e muitas vezes portáteis. No bairro de Santa Tecla, a ventilação nas instalações sanitárias e cozinhas é feita por efeito de chaminé e não existe ventilação mecânica centralizada.

Para a determinação do desempenho energético das tipologias no Bairro de Santa Tecla, foi construído um modelo de simulação dinâmica no *software* EnergyPlus, com recurso ao interface gráfico OpenStudio. Numa primeira fase foi gerado um exemplo que servisse como base para cada cenário de reabilitação a ser implementado. O exemplo é a representação da situação atual, sem qualquer medida implementada (Figura 5), para as seis tipologias. A totalidade do apartamento é considerado como sendo uma zona térmica. Os dados de entrada para o modelo foram na sua maioria baseados em normas *standard* ASHRAE com razoabilidade para o contexto nacional e constantes da base de dados do OpenStudio

para habitações. As simulações foram efetuadas tendo em consideração uma configuração de “Cargas Ideais”¹¹.

Figura 5 – Modelação das tipologias em OpenStudio.

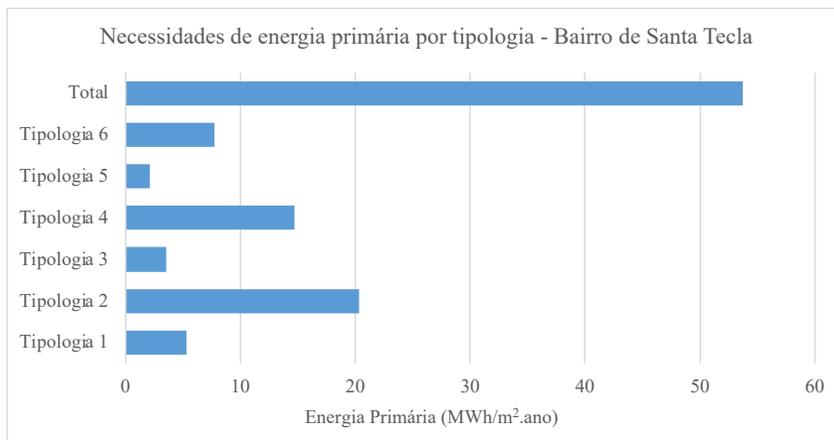


Fonte: Os autores.

Os resultados indicam que para o exemplo calculado, a tipologia 1 apresenta necessidades de energia primária superiores às outras tipologias (660 KWh/m².ano), maioritariamente devido a necessidades energéticas de aquecimento elevadas. Em oposição, a tipologia 3 apresenta as menores necessidades de energia primária (223 KWh/m².a), com necessidades energéticas de aquecimento de cerca de 70 KWh/m².a e de arrefecimento de 16 KWh/m².a. Quando a escala de análise é o bairro, a tipologia com mais significado em termos de necessidades é a tipologia 2 (20 Mwh/m².a), seguida da tipologia 4 (14 Mwh/m².a) (Figura 6). Estando estabelecida a base da análise, é necessário estabelecer os cenários de intervenção que foram definidos tendo em consideração o contexto nacional. Foram definidas 30 medidas a ser implementadas em termos de pavimentos, paredes, cobertura, janelas e equipamento de climatização (Tabela 3) por forma a reduzir as necessidades energéticas do estoque de edifícios.

¹¹ A configuração de “Cargas Ideais” providencia um modelo de AVAC ideal, fornecendo ar aquecido ou arrefecido em quantidade suficiente para que os requisitos de conforto definidos sejam cumpridos. <https://bigladdersoftware.com>

Figura 6 - Necessidades de energia primária para o bairro por tipologia.



Fonte: Os autores.

No que se refere a resultados, de uma forma geral, as medidas simuladas indicam melhorias relevantes no desempenho energético em todas as tipologias. Embora os efeitos, em termos de necessidades de aquecimento e arrefecimento, sejam significativamente distintos em cada tipologia, importa destacar a redução média de 85% nas necessidades de energia primária com a medida R22, que resulta da combinação de medidas passivas (isolamento da laje de esteira, ETICS nas paredes e uso de grelha de ventilação nas janelas) com um sistema Bomba de Calor Mini-Split. Em termos de medidas passivas, será importante realçar os resultados referentes às paredes (R09, R10, R11), demonstrados na Figura 7. Com a aplicação desta medida, é possível verificar que em comparação com a situação atual (R_i), há um decréscimo generalizado nas necessidades de aquecimento, com particular incidência na tipologia 2 (de 8,12 KWh/m².ano para 5,16 KWh/m².ano). No entanto, verifica-se igualmente um acréscimo marginal ($\approx 0,50$ KWh/m².ano) nas necessidades de arrefecimento (tipologia 4), consequência do aumento da resistência térmica dos materiais, que reduz as perdas pela envolvente. A medida mais eficaz na redução das necessidades de energia primária foi a medida R11 – aplicação de painéis prefabricados na fachada – que resultou numa redução

média de 77 KWh/m².ano em energia primária. Embora se considerem relevantes as reduções de energia primária nos cálculos efetuados, o principal objetivo dos dados é o de conferir robustez à correlação que se pretende determinar, de modo a definir as tipologias mais representativas do impacto das medidas de reabilitação energética.

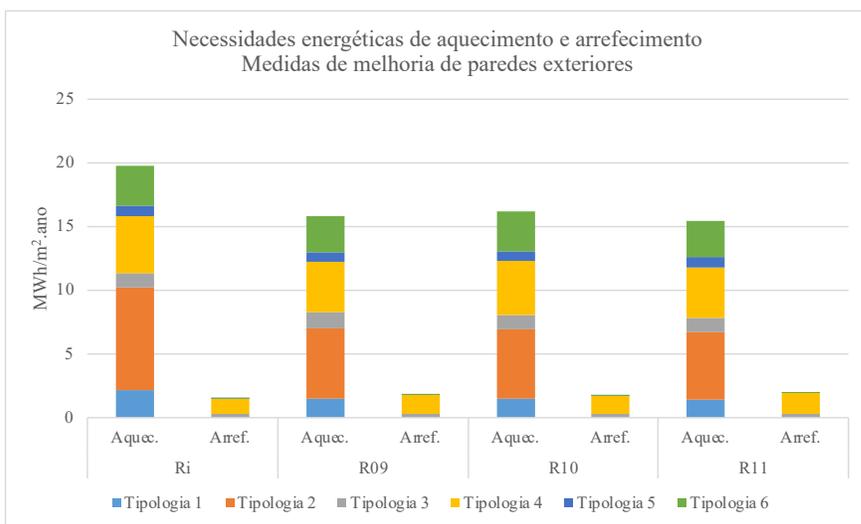
Tabela 3 – Medidas de reabilitação energética consideradas para a metodologia.

Me- dida	Aplicação	Descrição	Me- dida	Aplicação	Descrição	
R01	Pavimento	Isolamento na face superior da laje (U=0.20 W/m ² C)	R16	Combinações de Sistemas Bomba de Calor Mini-split (COP:4.4; EER11.02)	Situação atual (Ri)	
R02		Isolamento na face inferior da laje (U=0.20 W/m ² C)	R17		R01	
R03	Cobertura	Isolamento na laje de esteira (U=0.30 W/m ² C)	R18		R03	
R04		Isolamento cobertura - faces inclinadas (U=0.57 W/m ² C)	R19		R08	
R05	Janelas	Envidraçado duplo (U= 2.72 W/m ² C)	R20		R10	
R06		Envidraçado triplo (U= 1.77 W/m ² C)	R21		R07+R03	
R07		Envidraçado de baixa emissividade	R22		R13	
R08		Grelha de ventilação (aberta quando temperaturas exteriores estão dentro dos limites de conforto)	R23		Situação atual (Ri)	
R09	Paredes	ETICS (U=0.26 W/m ² C)	R24		Combinações de Sistemas Ar Condicionado Multisplit (COP:4.2, EER:3.5)	R02
R10		Isolamento preenchendo a caixa-de-ar (U=0.51 W/m ² C)	R25			R07
R11		Painel prefabricado (U=0.15 W/m ² C)	R26	R13+R03		
R12	Combinações	R08+R09	R27	R04		
R13		R08+R09+R03	R28	R06		
R14	Medidas passivas	R08+R03	R29	R10		
R15		R07+R04	R30	R11		

Fonte: Os autores.

Assim, tanto os resultados do desempenho energético na situação atual, como os resultados da aplicação das medidas de melhoria, foram utilizados na análise estatística para a determinação das tipologias mais representativas. Os resultados, mostrados na tabela 4, sugerem que a tipologia 1 tem 95% de probabilidade de ter uma correlação elevada (de 0.896) entre o desempenho energético dessa tipologia e o desempenho energético total do bairro. Por outro lado, a correlação do desempenho energético da tipologia 2 não é significativa (por a significância ser superior a 0.05), mas a análise para as tipologias 3 a 6 indica uma probabilidade de 96% de se obter uma correlação alta.

Figura 7 – Resultado do cálculo de implementação de medidas de melhoria de desempenho energético nas paredes exteriores para as diferentes tipologias.



Fonte: Os autores.

Tabela 4 – Resultados da análise estatística.

	Coefficiente Pearson	t-score	Significância
Tipologia 1	0.896	11.95	0.05
Tipologia 2	0.889	11.46	0.06
Tipologia 3	0.946	17.31	0.04
Tipologia 4	0.925	14.41	0.04
Tipologia 5	0.941	16.47	0.04
Tipologia 6	0.940	16.26	0.04

Fonte: Os autores.

Com base na análise efetuada, tipologias que se situam nos extremos dos edifícios são aquelas que apresentam uma maior probabilidade de ter uma correlação elevada. Em particular, as tipologias 3 e 5 apresentam os resultados mais relevantes, assim como a tipologia 1 em menor escala. Também a tipologia 4 apresenta uma correlação significativa com uma probabilidade alta (96%).

Finalmente, importa entender o que significa a utilização destas tipologias em termos de avaliação de desempenho energético e do impacto das medidas de melhoria energética consideradas. Conforme referido, foi decidido calcular o rácio de desvio para as tipologias com correlações mais significativas. Assim, quando são consideradas as tipologias dos extremos dos edifícios (1, 3 e 5), o rácio de desvio nos resultados, quando comparado com o cálculo efetuado para todas as tipologias existentes no conjunto de edifícios, é de 4,1%, podendo, por isso, considerar-se estas tipologias como representativas para o cálculo do desempenho energético dos edifícios do bairro. No entanto, no caso de se utilizar a tipologia mais comum nos edifícios do bairro de Santa Tecla (tipologia 4), o desvio em relação ao valor real é de 27%. Esta questão é muito relevante uma vez que o uso da tipologia que se encontra em maior número num conjunto de edifícios para a realização dos cálculos energéticos é uma estratégia comum em estudos desta natureza, o que, segundo estes resultados, poderá significar um desvio significativo em relação ao desempenho energético real.

Considerações finais

Neste capítulo foi apresentado um método para selecionar as tipologias mais representativas para a determinação do impacto das medidas de reabilitação energética no desempenho dos edifícios à escala de bairro. A metodologia combina métodos de simulação numérica e análise estatística, nomeadamente com a utilização da análise da correlação. De modo a testar a metodologia, esta foi aplicada a um bairro de habitação social em Braga, Portugal. Foram simuladas várias medidas de melhoria de desempenho energético, que permitem obter poupanças energéticas significativas, nomeadamente a nível de intervenções nas paredes, cobertura, envidraçados e com a introdução de sistemas de climatização eficientes, que indicam reduções de energia primária de até 85%, quando combinados com medidas passivas. A metodologia permitiu distinguir as tipologias 1, 3 e 5 como aquelas que apresentam uma probabilidade de 95% a 96% de serem as mais representativas para a determinação do impacto da implementação das medidas de reabilitação energética no estoque de edifícios existentes no bairro de Santa Tecla. De acordo com os resultados da análise, o cálculo do impacto com base nestas tipologias representativas conduz a um desvio de 4,1% em relação ao desempenho energético calculado com base em todas as tipologias existentes no conjunto de edifícios. Não obstante a necessidade de comprovação dos resultados obtidos neste estudo com análises subsequentes, estes resultados sugerem que as tipologias representativas determinadas com a aplicação da metodologia apresentada neste capítulo, podem ser uma alternativa, com menor incerteza associada, ao cálculo com recurso à utilização da tipologia que se encontra em maior número no bairro, como é comum fazer-se. Este método pode também ser útil como metodologia complementar para outras formas de avaliação de desempenho energético e de medidas de reabilitação energética à escala de bairro, como na definição de arquétipos ou em conjunto com outras técnicas estatísticas como a análise de *clusters*.

Referências

AGUACIL, S. *et al.* Application of the cost-optimal methodology to urban renewal projects at the territorial scale based on statistical data—A case study in Spain. *Energy and Buildings*, v. 144, 2017.

ALLEGRI, J. *et al.* A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 52, p. 1391–1404, 2015.

ARTOLA, I. *et al.* Boosting Building Renovation: What potential and value for Europe? Study for the ITRE Committee. European Parliament. 2016. v. PE 587.326

CAPUTO, P.; COSTA, G.; FERRARI, S. A supporting method for defining energy strategies in the building sector at urban scale. *Energy Policy*, v. 55, p. 261–270, 2013.

DODOO, A.; GUSTAVSSON, L.; TRUONG, N. LE. Primary energy benefits of cost-effective energy renovation of a district heated multi-family building under different energy supply systems. *Energy*, v. 143, p. 69–90, 2018.

EU. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) OJ L 153, 18.06.2010, p. 13, 2010. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu>. Acesso em: 12 dez. 2017

EU. Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. Official Journal of the European Union, v. 2018, n. May, p. 75–91, 2018. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu>. Acesso em: 10 dez. 2018

EUROPEAN COMMISSION. A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy.2018. Disponível em: <https://ec.europa.eu/>. Acesso em: 1 abr. 2019.

FERNÁNDEZ-AGÜERA, J. *et al.* An approach to modelling envelope airtightness in multi-family social housing in Mediterranean Europe based on the situation in Spain. *Energy and Buildings*, v. 128, p. 236–253, 2016.

FERREIRA, M.; ALMEIDA, M.; RODRIGUES, A. Cost-optimal energy efficiency levels are the first step in achieving cost effective renovation in residential buildings with a nearly-zero energy target. *Energy and Buildings*, v. 133, p. 724–737, 2016.

GYNTHNER, L., LAPILLONE, B; POLLIER, K. Energy Efficiency Trends and Policies in the Household and Tertiary Sectors :An Analysis Based on the ODYSSEE and MURE Databases. Disponível em: <http://www.odyssee-mure.eu/>. Acesso em: 18 jun. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTATISTICA. Inquérito à Caracterização da Habitação Social relativo a 2015. Disponível em: <https://www.ine.pt>. Acesso em: 12 dez. 2018.

KAVGIC, M. *et al.* A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Building and Environment*, v. 45, n. 7, p. 1683–1697, 2010.

KIRCH W. (ED.). Pearson's Correlation Coefficient. In: *Encyclopedia of Public Health*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008. p. 1090–1091.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DO EMPREGO. Despacho n.º 15793-D/2013. Diário da República, n. 13, p. 35088, 2013.

MONTEIRO, C. S. *et al.* The Use of Multi-detail Building Archetypes in Urban Energy Modelling. *Energy Procedia*, v. 111, p. 817–825, 2017.

PYE, S. *et al.* Energy poverty and vulnerable consumers in the energy sector across the EU. 2015. Disponível em: <https://ec.europa.eu>. Acesso em: 18 jun. 2018.

SIMÕES, S. G.; GREGÓRIO, V.; SEIXAS, J. Mapping Fuel Poverty in Portugal. *Energy Procedia*, v. 106, p. 155–165, 2016.

THOMSEN, K. E. *et al.* Energy consumption and indoor climate in a residential building before and after comprehensive energy retrofitting. *Energy and Buildings*, v. 123, p. 8–16, 2016.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. *Energy Policy*, v. 87, p. 524–541, 2015.

WONG, I. L. *et al.* Classification and energy analysis of bank building stock: A case study in Curitiba, Brazil. *Journal of Building Engineering*, v. 23, p. 259–269, 2019.

SOBRE OS ORGANIZADORES

Ricardo André Fiorotti Peixoto é Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Ouro Preto, Bolsista de Produtividade Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora do CNPq - Nível 2, coordenador do grupo de pesquisa RECICLOS. É membro do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFOP e de vários comitês, associações científicas e técnicas nacionais e internacionais nas áreas de materiais de construção civil buscando sempre sua integração com o ambiente construído e sua sustentabilidade. É autor e coautor de mais de mais de 100 publicações, incluindo livros, capítulo de livros, artigos em revistas internacionais e nacionais artigos em conferências internacionais e nacionais e tem quinze patentes.

Maria Teresa Gomes Barbosa é Graduada em Engenharia pela Universidade Federal de Juiz de Fora (1990), Mestre em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1993) e Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2002). Atualmente é Professora Titular da UFJF, Revisora de periódicos indexados (American Concrete Institute, Ambiente Construído, Engenharia Estudo e Pesquisa, dentre outros), consultor 'ad hoc' da FACEPE, Avaliadora de instituição de educação superior do Ministerio da Educacao e Cultura. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Materiais e Componentes de Construção, atuando principalmente nos seguintes temas: patologia, aderência aço-concreto, novos materiais, buscando sempre a integração com o ambiente construído e sua sustentabilidade.

Este livro foi desenvolvido com as fontes Berkeley
Oldstyle e Pill Gothic, conforme Projeto Gráfico
aprovado pela Diretoria da Editora UFOP.



ISBN 978-65-89785-20-0



9 786589 785200