



REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

ESTUDOS SOBRE ALTERNATIVAS DE PROJETO PARA A MINIMIZAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DE EDIFÍCIOS EM CONCRETO ARMADO

*Andréia Fátima Tormen¹
Betina Knebel Muliterno¹
Moacir Kripka¹
Suéllen Tonatto Ferrazzo¹
Eduardo Pavan Korf²

STUDIES OF DESIGN ALTERNATIVES FOR MINIMIZING THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF REINFORCED-CONCRETE BUILDINGS

Recibido el 11 de octubre de 2018; Aceptado el 31 de marzo de 2019

Abstract

In a built environment, practice of sustainability is a responsibility of all involved in the design and execution. Most of the measures should be used in the design stage, in which there are the greatest implications regarding the dimensions, specifications and details incorporated into the structure. Therefore, prior identification and study of the impacts generated in the environment allow professional, company or public agencies to develop action plans and innovative solutions focused on reducing of negative impacts. This paper shows a literature review on the alternatives applicable in the project phase, in order to minimize the environmental impact of reinforced-concrete buildings. Initially, a brief history and a contextualization about sustainability has been presented. After, this work relates studies in civil engineering, with an emphasis on structural design. The proposed alternatives include the role of each professional in the project development, such as studies and applications on sustainable concrete, including the relationship between structural optimization and environmental impacts of reinforced-concrete buildings. Thus, it was possible to conclude that with these available options, designer must verify which one will result better results with lower expenses and consumption of labor, financial and structural resources.

Keywords: *sustainability, structural design, structural optimization, sustainable concrete, reinforced concrete structures.*

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil e Ambiental- ppgENG, Passo Fundo, Brasil

² Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental - ppgCTA, Erechim, Brasil

*Autor correspondente: Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil e Ambiental- ppgENG, Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo. Campus I, Bairro São José, Passo Fundo, RS, Brasil. 610. Brasil.

Email: andreatormen@gmail.com

Resumo

Em um ambiente edificado, a prática da sustentabilidade compete a todos os envolvidos no projeto e execução. A maior parte das medidas deve ser empregada na fase de projeto, uma vez que é nesta etapa que se tem as maiores implicações referente às dimensões, especificações e detalhes a serem incorporados à estrutura. Sendo assim, a identificação prévia e o estudo dos impactos gerados no ambiente possibilitam ao profissional, empresa ou órgãos públicos o desenvolvimento de planos de ações e soluções inovadoras, de forma que os impactos negativos sejam reduzidos. O presente artigo apresenta uma revisão da literatura técnica sobre as alternativas aplicáveis na fase de projeto que visam a minimização do impacto ambiental de estruturas de edifícios em concreto armado. Inicialmente é apresentado um breve histórico no que diz respeito à sustentabilidade, bem como uma contextualização do assunto, e posteriormente expõem-se os trabalhos relacionados à referida temática, no âmbito da engenharia civil, com ênfase no projeto estrutural. As alternativas propostas contemplam desde a função exercida por cada profissional na elaboração do projeto, estudos e aplicações sobre o concreto sustentável, abrangendo até a relação entre a otimização estrutural e os impactos ambientais em estruturas de concreto armado. A partir disso, conclui-se que compete ao projetista, diante destas opções disponíveis, verificar qual apresentará os melhores resultados, os menores gastos e os menores consumos de recursos, sejam de mão de obra, financeiros ou estruturais.

Palavras chave: sustentabilidade, projeto estrutural, otimização estrutural, concreto sustentável, estruturas de concreto armado.

Introdução

Em um ambiente construído, a busca pela sustentabilidade compete a todos os envolvidos no projeto e execução. A adoção de mecanismos que propiciem um aumento da economia, menor consumo, uso de materiais recicláveis, redução da geração de resíduos e poluentes, aplicação e conformidade com regulamentos ambientais e melhor desempenho e eficiência dos edifícios, é resultado de um trabalho coletivo entre construtores, projetistas, gerenciadores, consultores, fornecedores, executores, poder público e todos os usuários ao seu entorno, de forma que as escolhas permitam condicionar ações a serem efetivadas por todos (Matar *et al.*, 2008; Tan *et al.*, 2011; Yilmaz e Bakis, 2015; Chang *et al.*, 2016; Kibwami e Tutesigensi, 2016).

Para Yilmaz e Bakis (2015), a construção sustentável consiste na integração dos princípios de desenvolvimento sustentável no ciclo de vida de um edifício, abrangendo desde as etapas do projeto da construção, execução, extração de matérias primas e processos de fabricação dos materiais, até o gerenciamento adequado dos resíduos. Em síntese, é um processo que, por meio da criação de construções adequadas ao homem e socialmente igualitárias, objetiva conciliar harmoniosamente o ambiente construído com a natureza.

Segundo Shen *et al.* (2010), entende-se por construção sustentável, o delineamento da criação e gerenciamento de um ambiente construído a partir de princípios e recursos ecológicos e eficientes, visando obter um *trade-off* entre as dimensões econômica, social e ambiental do desenvolvimento sustentável. DTI (2006) definem como as principais práticas da construção sustentável: implementar programas efetivos de construção; incentivar clientes da esfera pública

focados e capacitados; realizar a concepção e a tomada de decisões fundamentadas no “valor da vida total”, adotando estratégias adequadas de aquisição e contratação; trabalhar de forma cooperativa por meio de equipes integradas; analisar o desempenho e incorporar o aprendizado do projeto. Sendo assim, os princípios de construção sustentável devem ser integralizados nas atividades do ciclo de vida do projeto e com todas as partes envolvidas sendo responsáveis pela execução das práticas de sustentabilidade (Matar *et al.*, 2008).

Quanto aos impactos gerados, estes vão além do âmbito ambiental, uma vez que as grandes mudanças que ocorrem na sociedade são em virtude da implantação de novas construções. A construção civil é uma das atividades que mais atinge a sociedade, considerando as proporções das novas intervenções, por estas poderem alterar a vida das pessoas de uma rua, bairro ou até mesmo de uma grande cidade. A indústria da construção demanda de uma grande quantidade de recursos naturais e é responsável por diversos efeitos negativos ao meio ambiente através da geração de resíduos, poluição de água e ar, esgotamento de água e energia, grande contribuinte ao uso de aterros, dentre outros. Tais impactos têm despertado o interesse de especialistas e impulsionado pesquisas que visam a criação e o aperfeiçoamento de mecanismos para o desenvolvimento de projetos de construção de forma sustentável (Aigbavboa *et al.*, 2017; Oguntona e Aigbavboa, 2017).

Moriconi (2007) comenta que uma das ações para uma construção sustentável é o uso racional dos recursos naturais, que pode ser alcançado por meio da utilização de subprodutos e materiais reutilizáveis. Tal prática traz uma consequente redução da extração de recursos naturais e possibilita um menor impacto ambiental por meio da redução de emissão de dióxido de carbono.

De acordo com Naik (2008), projetar visando a sustentabilidade está diretamente relacionado à avaliação das consequências ambientais do projeto, tanto em curto quanto a longo prazo. Não existe uma fórmula que determine o que deve ou não ser decidido para que um projeto enfatize a busca de uma maior sustentabilidade. Sendo assim, a ideia e a proposta de cada projeto são frutos de escolhas específicas e únicas, uma vez que diferentes aspectos considerados resultam em variáveis independentes e diferentes situações apresentadas para este tipo de objetivo.

Neste contexto, o que tem se buscado para o projeto de qualquer edificação, em todos os aspectos, particularmente na concepção e detalhamento da estrutura, tem hoje como objetivo fundamental a sustentabilidade. Isto implica na projeção de estruturas mais econômicas, duráveis e flexíveis. Gagnon *et al.* (2012) sintetizam os diferenciais de um projeto pensado na sustentabilidade e consequente minimização ou mitigação dos impactos ambientais na construção civil, relacionando-os com os seguintes aspectos: a estruturação do processo de projeto; as questões relacionadas à consideração da sustentabilidade; a relevância dos indicadores de projeto; a precisão da avaliação dos indicadores; as melhorias e benefícios

esperados pelas escolhas de soluções alternativas, se comparadas às soluções convencionais, e a tomada de decisão, propriamente dita.

Alwaer e Kirk (2012) trabalham a mesma ideia, contudo, retratando que o projeto de estruturas, a localização da edificação no sistema urbano, a utilização de materiais e recursos energéticos na construção, os resíduos e as emissões são resultados negativos da industrialização e civilização. Tais resultados impactam no desenvolvimento sustentável e causam um efeito danoso das construções e infraestrutura urbana nos recursos e ambientes naturais. Como uma alternativa, propõe-se o uso racional destes recursos e a criação e o aprimoramento de métodos de avaliação dos impactos gerados pelas edificações por intermédio das etapas de projeto, execução e gestão.

O processo de racionalização constitui um princípio o qual pode ser aplicado a qualquer tipologia construtiva ou método de construção empregado. Neste, a maior parte das medidas deve ser empregada na fase de projeto, uma vez que é nesta etapa que se tem as maiores implicações referente às dimensões, especificações e detalhes a serem incorporados à estrutura (Fabricio e Melhado, 2004).

Weisenberger (2011) complementa esta ideia ao comentar que a obtenção de uma estrutura sustentável não é alcançada somente fazendo o uso de pensamentos racionais para dadas finalidades, como também, adotando práticas de soluções alternativas as quais permitam reduzir a degradação ambiental. Tais práticas podem contemplar a seleção de materiais e tecnologias limpas, a utilização de insumos renováveis, redução do consumo de água, energia e recursos naturais, por meio da reutilização, reciclagem, design inovador e minimização de resíduos e poluição, bem como por processos de otimização na etapa de projeto, de forma a proporcionar o desenvolvimento sustentável (Weisenberger, 2011; Aigbavboa *et al.*, 2017).

Nesse sentido, o objetivo deste estudo é apresentar uma revisão bibliográfica acerca das alternativas, aplicáveis na fase de projeto, que visam a minimização dos impactos ambientais gerados pelas estruturas de edifícios em concreto armado.

Metodologia

Este estudo constitui uma revisão da literatura técnica referente as alternativas de projeto de estruturas em concreto armado voltadas à sustentabilidade. O interesse pelo estudo se deu devido a pouca bibliografia e estudos relacionados. O levantamento bibliográfico foi realizado mediante pesquisas nas bases de dados Web of Science, Scielo. Org, ScienceDirect (Elsevier) e Scopus (Elsevier). Para tanto, não foi limitado nenhum idioma na tentativa de obtenção de uma quantidade relevante de referencial teórico. As palavras-chave utilizadas foram: minimização de impactos ambientais nas estruturas; sustentabilidade em estruturas de concreto armado; desempenho ambiental de estruturas de concreto armado; otimização de estruturas de concreto;

concreto reciclado; diretrizes do projeto de estruturas para garantia do desempenho ambiental; avaliação ambiental de estruturas de sustentabilidade. Foi definido como critério de inclusão, artigos publicados e estudos realizados a partir do ano 2000, uma vez que, acredita-se que deste período em diante, em específico, o enfoque quanto aos aspectos de edificações sustentáveis passou a ser mais enfatizado. Após a seleção dos artigos, conforme os critérios de inclusão previamente definidos, realizou-se as seguintes etapas: leitura exploratória e seletiva, bem como escolha dos materiais que se adequaram aos objetivos propostos no estudo; leitura analítica, análise e interpretação dos textos, finalizando com a redação.

Desenvolvimento sustentável e a construção civil

Motta e Aguilar (2009) comentam que o nascimento do conceito de desenvolvimento sustentável decorre da percepção do problema da evolução da civilização, em escala global. As táticas de busca do desenvolvimento sustentável devem atuar em três aspectos, visando um equilíbrio entre si, sendo eles: ambiental, sócio-cultural e econômico. Desde 1983, a ONU adota o conceito de desenvolvimento sustentável como sendo “aquele que atende as necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem as suas próprias necessidades”.

Motta e Aguilar (2008) também apresentam, resumidamente os principais conceitos relacionados com a sustentabilidade, ressaltando que a mesma deve estar presente em todas as fases do ambiente construído, desde a idealização, concepção, projeto, construção, uso, manutenção e final de vida útil.

Breve Histórico

Em 1990 foi lançado, na Inglaterra, o primeiro sistema de avaliação ambiental de construções do mundo, o BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), sistema este que certifica a construção com um selo “verde” (Motta e Aguilar, 2009).

Em 1999, o CIB (International Council for Research and Innovation Building and Construction) finalizou a Agenda 21 para a construção sustentável. Ainda no mesmo ano, o USBCG (United States Green Building Council) criou o selo de certificação LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), o qual origina incentivos financeiros e econômicos para o mercado de construções verdes do EUA.

No ano 2000, o CIB criou a Agenda Setorial para a construção sustentável para países em desenvolvimento, cuja função era promover a cooperação e trocas de pesquisas em construção sustentável. O principal objetivo da Agenda é diminuir a diferença entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, visando a melhoria do desempenho do ambiente construído. Já em 2002, o CIB finalizou a Agenda 21 para construção sustentável para países em desenvolvimento (Motta e Aguilar, 2009).

Ainda de acordo com os autores, em 2007 foi criado no Brasil o GBC Brasil (Green Building Council Brasil), tendo como alvo ser referência na avaliação e na certificação de construções sustentáveis no país, através da regionalização da ferramenta de avaliação LEED. No mesmo ano também foi criado o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), com a função de aplicar conceitos e práticas sustentáveis na construção civil, e em 2008, foi lançado o selo brasileiro de certificação ambiental AQUA (Alta Qualidade Ambiental), baseado na certificação francesa HQE.

Alternativas sustentáveis na fase de projeto

Motta e Aguilar (2009) comentam que devido a importância das fases de concepção e projeto, a implementação de estratégias de sustentabilidade na edificação, nessas etapas, deve ser prioritária, uma vez que é na fase de idealização da obra que os conceitos e as práticas da sustentabilidade permitem ser inseridos no contexto da edificação.

Inúmeras ferramentas de produção enxuta, cujo principal objetivo é produzir mais com uma menor utilização de recursos, podem ser utilizadas na fase de projeto. Uma maneira de realizar sua inserção é por meio da seleção prévia dos materiais, através de ferramentas de avaliação do ciclo de vida e custos inerentes, a partir do qual se pode ter uma abrangência direta e indireta dos impactos ambientais dos produtos e processos. Neste contexto, Jamil e Fathi (2016) relatam que a construção enxuta pode fornecer excelentes resultados no gerenciamento da construção e no alcance dos objetivos do projeto, com a eliminação de desperdícios. Os autores também afirmam que, a construção enxuta e a construção sustentável, geralmente eram consideradas como estratégias independentes e separadas, em que o processo “Lean” era aplicado visando melhorar os aspectos econômicos e o processo sustentável, as questões ambientais. Entretanto, recentes estudos e práticas têm demonstrado que estes dois sistemas são interdependentes e compartilham princípios voltados a eliminação de resíduos (Khalfan et al, 2001; Jamil e Fathi, 2016).

As principais funções que devem ser desempenhadas pelas pessoas envolvidas, ainda na fase de projeto, são (Batlouni, 2007):

- Proprietário: aplicar limitações quanto ao custo da construção e padrão de acabamento;
- Coordenador: garantir os aspectos de custo, técnico e de execução;
- Arquiteto: projetar buscando uma maior economia, criando estruturas com simetrias e pavimentos, a fim de evitar pilares com vigas de transição, o que aumenta o consumo de materiais;
 - Projetista estrutural: objetivar melhor desempenho e durabilidade, bem como redução de custos, através da escolha adequada da concepção estrutural.

Nas fases de projeto, a adoção de conceitos de engenharia simultânea contribui para um melhor resultado final, pois a otimização do design do projeto e seu processo de elaboração possibilita a

redução de custos e cronograma, e maior qualidade à construção. Nesta abordagem, considera-se a integração entre projeto, fabricação, atividades de construção e execução, o que facilita a execução coordenada e paralela das práticas de trabalho (Evbuomwan e Anumba, 1998; Khalfan *et al.*, 2001). Relativo a isso, ambientes colaborativos e sistemas BIM (Building Information Modeling) são alternativas viáveis e adequadas neste aspecto.

Os ambientes colaborativos permitem que diversas pessoas participem e colaborem com o processo de projeto, a fim de buscar um resultado que represente o objetivo comum. O ambiente integrado além de propiciar maior suporte à equipe de projeto, também contribui para garantir que as especificações adequadas sejam estabelecidas e que os projetos resultantes sejam avaliados mediante diversas perspectivas profissionais, precedendo o compromisso com o processo de construção (Evbuomwan e Anumba, 1998). Nestas situações, é possível o compartilhamento das habilidades de cada administrador do processo, o que facilita a obtenção do melhor resultado para atendimento dos requisitos do desempenho da edificação, incluindo os requisitos da certificação verde.

Já o sistema BIM é baseado em ferramentas que permitem a modelagem do edifício em três dimensões físicas, e a incorporação e domínio de informações relativas ao edifício, como custo e prazos, gerenciamento de projetos, segurança e parâmetros de sustentabilidade (Habibi, 2017; Lu *et al.*, 2017; Olawumi; Chan, 2018; Olawumi *et al.*, 2018). Tal sistema pode contribuir para a obtenção de uma certificação verde, uma vez que é possível inserir no modelo, o desempenho energético da edificação. Também, permite estender a análise do ciclo de vida dos edifícios. O BIM é considerado uma das ferramentas mais importantes para digitalizar e visualizar dados de ambientes naturais e construídos, oportunizando aplicar estratégias de adaptação essenciais às práticas sustentáveis (Habibi, 2017).

Segundo Olawumi e Chan (2018), a integralização do BIM com as práticas de sustentabilidade, em projetos de construção, traz inúmeros benefícios, tais como: melhoria da qualidade e eficiência global do projeto; possibilidade de simulação de desempenho do edifício e uso de energia, e facilitar melhores produtos de design e alternativas de design múltiplo. Um exemplo do uso desta ferramenta é contemplado no estudo desenvolvido por Shen *et al.* (2017), em que o BIM possibilitou desenvolver uma estratégia de design para aplicação de uma fachada solar térmica não-vítrea de um edifício, garantindo que fatores ambientais e econômicos e estratégias de eficiência energética sejam incorporados no projeto e na análise do edifício, em estágio inicial. Entretanto, Olawumi *et al.* (2018) relatam que as principais barreiras para integração do BIM consistem na resistência das indústrias em modificar as práticas tradicionais de trabalho, um período longo para ocorrer a adaptação à tecnologias inovadoras, e pouco entendimento acerca dos processos e fluxos de trabalho fundamentais ao BIM e à sustentabilidade.

Considerando as recentes tecnologias de materiais e ferramentas, na sequência deste estudo são apresentadas algumas alternativas fundamentadas sob a perspectiva de sustentabilidade, e que podem ser empregadas na fase de projeto para edifícios constituídos em concreto armado.

Práticas para a sustentabilidade na construção

Uma edificação sustentável demanda uma série de fatores, contemplando desde parâmetros de avaliação até a mão de obra de qualidade. Portanto, a construção civil, como um todo, deve buscar novas alternativas para racionalizar as edificações, como por exemplo, a elaboração de projetos inovadores e o manejo e uso sustentável dos bens materiais e humanos disponíveis às atividades (Nagalli, 2012).

Segundo Naik (2008), projetar buscando a sustentabilidade relaciona o projeto de estruturas, a localização da edificação, a utilização de materiais e recursos energéticos na construção, os resíduos e as emissões resultantes que impactam na sustentabilidade, gerando um efeito danoso da construção civil aos recursos ambientais (Alwaer e Kirk, 2012).

Motta e Aguilar (2008) relatam como as principais práticas adotadas visando um processo sustentável na construção civil, o planejamento apropriado, o conforto ambiental e eficiência energética, o consumo de água, construtiva em termos de materiais e no final da vida útil da construção, seguindo processos de reciclagem e aproveitamento dos resíduos de demolição.

Com a crescente industrialização e evolução do uso consistente de concretos de resistência mais elevada, ressalta-se a valiosa contribuição sustentável da indústria de pré-moldados de concreto. Os elementos estruturais construídos com esta tipologia permitem fazer mais com menos, ou seja, menos custo na fabricação, menos desperdício, com praticamente nenhum resíduo, ganhando destaque como uma alternativa sustentável dos últimos tempos e que hoje é uma das áreas produtivas de maior crescimento no país. (Lima *et al.*, 2014).

Concreto Sustentável

O concreto convencional é um material de alta resistência e grande durabilidade, o que justifica a sua grande empregabilidade na construção civil. Entretanto, a indústria do concreto é a maior consumidora individual de recursos naturais, que são necessários à produção do cimento portland, extração de agregados e água para fabricação do concreto. Um dos seus principais componentes é o cimento, que na sua fabricação produz grandes quantidades de CO₂, atuando como um potencializador do aquecimento global (Kumar e Naik, 2010; Marinković *et al.*, 2017; Santoro e Kripka, 2017). Além disso, o concreto propicia as ilhas de calor devido ao seu alto poder de absorção, uma vez que é inserido no meio em substituição à camada vegetativa, que seria responsável por refletir naturalmente os raios solares, também sendo um produto impermeável, fator que favorece as enchentes.

Em função dos materiais provenientes da extração de recursos naturais serem em grande maioria esgotáveis, pesquisas e estudos referentes ao desenvolvimento e a criação de novas tecnologias e materiais, que auxiliem na preservação desses recursos, têm sido cada vez mais vislumbradas.

Neste cenário, os materiais substituintes do cimento no concreto, tais como cinzas volantes ou escória de alto forno são boas alternativas para o alcance da sustentabilidade, pois promovem a produção mais limpa por meio da redução de emissões de poluentes atmosféricos e de resíduos oriundos dos procesos de extração e fabricação de materiais (Marinković *et al.*, 2017; Xu e Shi, 2018).

Grande parte dos resíduos industriais requerem a disposição final em aterros específicos, demandando de um valor elevado. Desta forma, a produção do concreto fazendo uso de tais resíduos é uma prática extremamente válida para os padrões da sustentabilidade, uma vez que evita o descarte inadequado e elimina o custo de destinação final e as perdas com as sobras para as indústrias (Bhardwaj e Kumar, 2017; Manoharan *et al.*, 2018; Siddique *et al.*, 2018). Exemplo disso é o concreto sustentável que substitui 70% da areia natural por areia de fundição (utilizada em moldes nos processos de peças metálicas) e 100% da pedra por escória de aciaria (resíduo que sobra da produção do aço) (Lima *et al.*, 2014). De acordo com Mousa (2015), a utilização do concreto sustentável é vista como uma transformação fundamental na construção civil, a qual marca o aprimoramento técnico do setor e impulsiona o desenvolvimento local e a competitividade a nível global.

Uma outra prática da sustentabilidade é a redução do consumo de energia. A incorporação de resíduos na produção dos materiais permite que as distâncias de transporte de matérias primas sejam reduzidas. No caso das escórias e pozolanas utilizadas em substituição parcial ao cimento, esse nível de energia permite produção de cimentos sem a calcinação da matéria prima, o que promove uma redução de consumo energético de até 80% (Fernandes *et al.*, 2014).

A substituição dos agregados convencionais por agregados reciclados também tem sido uma alternativa extremamente viável e atrativa. Esta apresenta vantagens, como economia na aquisição de matéria prima, redução da poluição gerada pela produção dos agregados, preservação de recursos naturais, evita o descarte inadequado de resíduos sólidos industriais e conseqüentemente, a contaminação de solos e águas subterrâneas (Marinković *et al.*, 2017; Xu e Shi, 2018).

Segundo Gouveia (2012), a reciclagem dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e resíduos de construção e demolição (RCD) e sua posterior reutilização como insumo nos processos produtivos, resultam na atenuação de impactos dos gases de efeito estufa gerados no processamento e fabricação dos materiais, em especial do cimento. Tal prática contribui para um desenvolvimento sustentável de forma direta, pela redução da poluição ambiental causada pelos

aterros e depósitos e de forma indireta, pela conservação de energia. Tendo em ambas as situações, potencial diminuição nas emissões de gases responsáveis pelo aquecimento global.

Estudos relacionados

De acordo com Kumar e Naik (2010), o concreto oferece uma ampla gama de possibilidades para a aplicação criteriosa de subprodutos industriais e materiais reciclados na sua produção. A tecnologia do concreto reciclado consiste em utilizar o RCD ou o RSU como agregados, podendo este substituir parcial ou totalmente os materiais de fontes naturais. Para o uso no concreto, é necessário avaliar as características e o comportamento do resíduo a ser reciclado, uma vez que o concreto reciclado pode ser muito variável em função dos diferentes materiais que compõe os resíduos (Torres *et al.*, 2017). Se os resíduos provenientes de vários locais não passarem por uma separação prévia, pode-se inviabilizar sua utilização. Tem-se também, uma grande influência relacionada ao processo de demolição, britagem, peneiramento e armazenamento destes materiais.

As aplicações de resíduos recicláveis para fabricação de materiais mais sustentáveis têm despertado interesse de pesquisadores da área, que propõem estudos acerca do desempenho e durabilidade destes concretos com diferentes composições. Na sequência deste trabalho são apresentados exemplos de estudos relacionados ao assunto.

Leite (2001) verificaram que o módulo de deformação longitudinal dos concretos constituídos de agregados reciclados é menor se comparado com concretos com agregados naturais (diferença ressaltada para resistências à compressão mais elevadas). Tais reduções podem ser equivalentes a 40% quanto maior for o teor de substituição do agregado gráudo natural pelo reciclado. Ainda, quanto menor forem as resistências dos concretos, maiores são as reduções observadas, quanto ao módulo do concreto reciclado em relação ao concreto de referência.

No estudo de Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002) comparou-se concretos com agregados reciclados substituindo apenas o agregado gráudo reciclado e alterando a relação a/c, adotada como 0,4 e 0,55. Os resultados demonstraram que o efeito do agregado gráudo reciclado é prejudicial para os concretos de relação a/c mais baixas, como o valor de 0,4, os quais apresentaram valores de resistência à compressão em torno de 70% dos valores para os concretos convencionais de referência. Para os concretos de relação a/c superior, igual a 0,55, onde tem-se que a resistência do agregado não é muito solicitada, os concretos com substituição dos agregados gráudos ficaram em torno de 85% em relação aos de referência. Além disso, para os autores, a baixa resistência à compressão dos concretos reciclados deve-se à correção na relação a/c, pela alta taxa de absorção dos agregados reciclados.

Latterza e Machado Jr. (2003) verificaram que o módulo de elasticidade não apresentou variação entre o concreto de referência e os demais que continham 100% e 50% de gráudos reciclados,

sendo que para o caso do concreto com 50% de substituição, estes apresentaram um comportamento superior. Os autores acreditam que tal comportamento deve-se à boa aderência entre a pasta que penetra nos poros superficiais dos agregados reciclados, o que garante uma maior interação entre a pasta e o agregado. Ainda, a “cura úmida interna” também potencializou a aderência entre a matriz de cimento e o agregado.

No trabalho de Dal Molin *et al.* (2004) fez-se a substituição dos agregados reciclados na sua fração miúda e graúda, em percentuais fixados em 0, 50 e 100% e adoção de relações água/cimento utilizadas de 0,40, 0,60 e 0,80. Os resultados demonstraram que o crescimento da resistência aumentou à proporção que aumentou a relação água/cimento, uma vez que para as três relações a/c utilizadas, quanto maior o percentual de substituição do agregado miúdo reciclado, maior a resistência à compressão. Com relações água/cimento menores, também obteve-se ganhos, no entanto de menores proporções, mas também apresentando diferenças significativas em relação ao concreto de referência. Também, verificou-se que a textura e granulometria dos agregados miúdos influenciaram positivamente no aumento da resistência. Entretanto, quanto menor a relação a/c adotada, bem como um maior percentual de substituição do agregado graúdo reciclado, menores foram as resistências, o que pode ser atribuído a fatores como baixa resistência e densidade do grão do agregado. Já Xiao *et al.* (2005) constataram que, a resistência à compressão do concreto diminuiu conforme o aumento do teor de agregado reciclado na mistura. Em comparativo com os valores da mistura sem agregado reciclado e a com 100% destes, o decréscimo atingiu cerca de 19%.

Aragão (2007) analisou o comportamento mecânico de lajes produzidas a partir de concretos reciclados, os quais tiveram 50 e 100% de substituição e $f_{ck} < 25$ Mpa. Verificou-se que o comportamento das lajes foi muito semelhante ao comportamento da laje produzida com agregados naturais, em relação a análise dos valores de deslocamentos que resultaram em flecha limite abaixo dos valores estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2004). Segundo os critérios de aceitabilidade sensorial para vibrações sentidas no piso, as lajes constituídas com agregados reciclados também apresentaram comportamentos semelhantes às lajes de referência.

Tenório *et al.* (2012) analisou as propriedades mecânicas e de durabilidade do concretos produzidos com agregados miúdos e graúdos de RCD reciclado, a fim de avaliar a sua possibilidade de uso nas estruturas. Os resultados permitiram concluir que a combinação de agregado graúdo reciclado com agregado miúdo reciclado não apresentou vantagens, sendo as propriedades dos concretos foram melhores para a menor a porosidade (ou, maior a massa específica) dos agregados graúdos reciclados.

Já o estudo de Turk *et al.* (2015) realizou a avaliação do ciclo de vida, de forma comparativa, entre misturas de concreto com agregados de resíduos industriais (areia de fundição, escória de aço e cinzas volantes), com agregado reciclado oriundos de resíduos de concreto armado, e mistura

convencional. Em substituições parciais ao agregado natural ou ao cimento portland, todos estes materiais geram impactos ambientais positivos mediante a redução no consumo de recursos naturais para fabricação do concreto e também, evitando a disposição final dos resíduos. No entanto, os autores ressaltam que o uso de materiais alternativos ou reciclados, que estão disponíveis em locais à longas distâncias, pode representar uma desvantagem. Sendo assim, a representatividade dos impactos inerentes a esta aplicação deve ser avaliada de forma criteriosa.

No estudo de Torres *et al.* (2017), o uso de resíduos do processo de fundição de aço (areia usada, escórias, cinzas, poeira e detritos) foi avaliado na substituição parcial dos agregados naturais do concreto de cimento Portland. A constituição dos agregados foi realizada mediante processamento e peneiramento dos resíduos, sendo feitas combinações em misturas de concreto controle, agregados miúdos e grãos e com substituições em 10%, 20% e 30% da massa. Foram realizadas análises do concreto quanto à resistência a compressão, tração e flexão, e o módulo de elasticidade após 7, 14 e 28 dias. Os autores verificaram que o uso dos resíduos de fundição, como miúdo, grão ou combinado, na substituição dos agregados convencionais do concreto, não afetam o comportamento mecânico do material, quando a substituição individual (miúdos ou grãos) for de até 30% e 20% para combinada (miúdos ou grãos). Sendo assim, entende-se que, alguns concretos reciclados apresentam resistências mecânicas maiores que as de seus respectivos concretos convencionais de referência, no entanto, os resultados permitiram inferir que concretos reciclados podem ser usados em estruturas, mas com restrições.

Marinković *et al.* (2017) realizaram uma importante avaliação ambiental com fins comparativos entre diferentes misturas de concreto para aplicação em estruturas. A comparação ocorreu entre quatro misturas de betão reciclado e uma convencional: betão com agregado natural e cimento como ligante; betão com agregado natural e com 35% de cinzas volantes em substituição ao cimento; betão com agregado natural e cinzas volantes com ativação alcalina (solução de hidróxido de sódio e de silicato de sódio); betão com agregados reciclados e cimento como aglutinante, e betão com agregado reciclado e 35% do cimento substituído por cinzas volantes. Todas misturas foram projetadas e testadas quanto a resistência à compressão e trabalhabilidade. Foi feita uma avaliação do ciclo de vida, conforme a ISO 14040/06, considerando práticas de construção, distâncias de transporte e materiais disponíveis. Os autores também avaliaram impactos das cinzas quanto a três formas de alocação deste resíduo: sem alocação; econômica, e alocação em massa. A normalização destes fatores, a agregação de indicadores e o impacto de cada mistura foi expressa em termos de um indicador global de sustentabilidade. Verificou-se que o melhor desempenho ambiental global resulta da mistura de concreto de cinzas volantes com ativação alcalina e agregados naturais, e a mistura de concreto com agregado reciclado e elevado volume de cinzas volantes. O betão de agregado reciclado com aglutinante de cimento apresentou o pior desempenho. Visando maior eficiência ambiental e econômica, e para estender as possibilidades de aplicação, os autores recomendam a substituição parcial das cinzas volantes

por escórias de alto forno (fundição de metais), obtendo-se assim, um concreto geopolimérico de cinzas volantes e escórias.

Em termos de importantes avanços em estudos que visam aliar a sustentabilidade à fabricação do concreto, pode-se destacar o trabalho de Siddique *et al.* (2018), em que avaliou-se os impactos econômicos e ambientais da substituição parcial da areia natural por resíduo de areia de fundição, na produção do concreto. As substituições foram de 0, 5, 10, 15 e 20% em massa e foi utilizado cimento portland pozolânico com 30% de cinzas volantes. Posterior ao tempo de cura do concreto (28 dias), verificou-se que as misturas de concreto que continham areia de fundição apresentaram 26% e 12,87% de aumento nas resistências à compressão e à tração de ruptura, em relação ao concreto controle. Conforme os autores, a maior presença de partículas finas no resíduo de areia de fundição contribui para o aumento da resistência à compressão do concreto, pois atuou como um material que envolveu a matriz do material, tornando-a mais densa. Também, foram identificadas melhorias acerca da penetração de íons de cloreto e da resistência ao sal de degelo, que oscilaram, respectivamente entre 7,2-17,7% e 6,6-26,42%, sugerindo uma maior proteção contra a corrosão do aço de reforço em ambientes salinos. Os resultados demonstraram que a incorporação de até 20% de areia de fundição como substituto da areia natural proporciona melhorias na resistência e durabilidade do concreto. Além disso, esta aplicação gerou uma economia no custo do concreto em US\$ 1,06 por metro cúbico, e apresenta potencial de reduções no custo de disposição do resíduo de fundição e nas emissões de CO₂.

De forma geral, os resultados dos estudos recentes têm-se demonstrado satisfatórios em relação a qualidade do concreto produzido a base de agregados reciclados, a partir do reaproveitamento de RSU, principalmente os oriundos dos procesos de fundição de metais e de RCD. Tão importante quanto as características e o comportamento do concreto constituído por estes subprodutos, os resultados das pesquisas apresentadas também apontam para a mimização da extração e consumo de recursos naturais, redução da geração de resíduos e poluentes, e ganhos econômicos, resultantes da referida aplicação.

Contudo, a substituição dos agregados reciclados apresenta algumas diferenças nas condições de aplicação e nas características dos concretos. Desta forma, fornecem propriedades específicas diferentes das propriedades obtidas por meio do uso de agregados convencionais, uma vez que se têm alterações nas propriedades do material, as quais são decorrentes da composição do resíduo, das operações unitárias de processamento, dos equipamentos usados, do seu teor de impurezas, da sua granulometria, dentre outros fatores preponderantes.

As principais diferenças dos agregados reciclados em relação aos agregados convencionais são em função da maior absorção de água dos grãos, heterogeneidade na composição e alterações das propriedades mecânicas. Por possuir uma maior absorção, o agregado reciclado proporciona

maior aderência entre a pasta e o agregado, aspectos estes que são significativos para o aumento da resistência.

O efeito negativo da substituição dos agregados graúdos reciclados no concreto, quanto às baixas resistências alcançadas, pode ser minimizado com o uso de relações a/c maiores, uma vez que alta taxa de absorção destes agregados com maior granulometria promove uma grande absorção da água do traço, dificultando a trabalhabilidade do concreto e conseqüentemente, reduzindo a sua resistência (Hansen, 1992).

Ainda, Liew *et al.* (2017) ressaltam que para que o concreto reciclado ou “verde” seja aplicado em projetos de infraestrutura, a nível global, são necessários implementação de padrões, mais projetos de demonstração, capacitação adequada, sensibilização pública, envolvimento de profissionais multidisciplinares, bem como o desenvolvimento de mais pesquisas.

Otimização estrutural

Na construção civil existem diversas alternativas de projeto acerca da concepção estrutural, principalmente para edifícios de múltiplos pavimentos. Todavia, é função do profissional habilitado a escolha de um modelo estrutural adequado para cada situação, considerando o meio no qual a referida construção estará inserida.

Neste sentido, a otimização pode funcionar como uma ferramenta de projeto, a qual possibilita a obtenção de soluções que maximizem ou minimizem um objetivo, como por exemplo, a redução de custos de fabricação, de operação ou transporte, a diminuição dos impactos ambientais, o melhoramento do desempenho dos componentes e sistemas, ou até mesmo um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

Suji *et al.* (2008) relatam que na engenharia de estruturas, a otimização estrutural é um processo numérico/matemático que visa encontrar a melhor configuração para o sistema em estudo, isto é, busca encontrar um dimensionamento ótimo para a estrutura, no que diz respeito ao desempenho, posicionamento dos elementos, geometria e/ou dimensões. Neste cenários, há diversos estudos acerca da sustentabilidade em projetos de estruturas, sendo alguns exemplos apresentados a seguir.

Na estudo de Carvalho *et al.* (2005), a partir da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para vigas, constatou-se que à medida que a porcentagem de aço aumenta, os impactos ambientais, bem como os custos, acabam diminuindo. Pinheiro (2008) afirma que, apesar das normas permitirem seções de vigas com 12 cm de largura, as seções maiores com 14 cm resultam em uma maior economia quando realiza-se a avaliação global dos custos da construção.

No trabalho de Brondani *et al.* (2014), após a análise estrutural, foram comparados os quantitativos de concreto, aço e formas, a fim de observar qual tipologia de laje em estudo (maciças de concreto armado, nervuradas e pré-moldadas) apresentou maior racionalização na execução da estrutura. As lajes pré-moldadas apresentaram os menores consumos de materiais, caracterizando-se como a solução mais apropriada para ser aplicada ainda na etapa de projeto, seguida pelas lajes nervuradas, e finalmente, pelas lajes maciças de concreto armado. Evidenciando a importância da concepção estrutural na sustentabilidade, os resultados apontam que, quando comparados os extremos, ou seja, a tipologia de laje pré-moldada com a laje maciça, observa-se uma diferença de 20% para o concreto, 8% para o aço e 24% para as formas, no que refere-se ao consumo de materiais.

Referente aos resultados mais específicos dos estudos sobre os projetos estruturais, destaca-se por exemplo, que as lajes nervuradas e pré-moldadas demandam blocos de enchimento, uma diferença em relação às lajes maciças de concreto armado. Quando o objetivo é realizar uma avaliação mais ampla, sabe-se que os blocos de enchimento também podem ser decisivos no que diz respeito ao impacto ambiental. Dessa forma, os autores afirmam que, para os critérios estabelecidos na pesquisa, a laje pré-moldada revelou-se como a opção mais sustentável. Porém, na decisão final em uma situação real de projeto, os parâmetros de interesse para a avaliação da sustentabilidade podem ser alterados, e o resultado pode ser outro.

A pesquisa de Brondani *et al.* (2015) evidenciou a necessidade do aprofundamento nos conhecimentos englobando a sustentabilidade e a otimização estrutural, a fim de mudar o senso comum quanto a insistência na aplicação de metodologias e técnicas convencionais para análises de estruturas. Uma vez que, por meio de ferramentas recentes e modernas, é possível gerar um aproveitamento dos recursos físicos, materiais, temporais e econômicos disponíveis, essenciais para a minimização do impacto ambiental no caminho da construção sustentável.

No trabalho de Bento e Rossignolo (2013) buscou-se obter a melhoria do desempenho ambiental das estruturas de concreto armado por meio da avaliação de seis classes de resistências características à compressão do concreto (C25, C30, C35, C40, C45 e C50), realizando as alterações possíveis nas dimensões dos elementos estruturais, assim como do consumo dos materiais utilizados na edificação. Verificou-se que as classes de resistência à compressão do concreto C40, C45 e C50 apresentaram os melhores resultados na maioria dos quesitos avaliados. Este estudo é um exemplo prático dos benefícios de aliar a otimização estrutural ao desenvolvimento sustentável. Ao variar a resistência do concreto foi possível melhorar a concepção estrutural, quanto às dimensões menores e, portanto, mais econômicas. Em suma, o concreto da classe C40 demonstrou o melhor desempenho quanto à redução do impacto ambiental, já que, como citado pelo autor, quanto maior a resistência à compressão do concreto, menores poderão ser as dimensões das peças. Portanto, diminuindo a seção do elemento, reduz-se o consumo de

materiais, o que contribui para a minimização do impacto ambiental mediante redução do consumo de recursos naturais e energia.

Dentre os estudos sobre alternativas de projeto para minimização de impactos ambientais em estruturas de concreto armado, ainda pode-se destacar o trabalho de Yoon *et al.* (2018). Segundo os autores, o projeto destas estruturas convencionalmente busca a redução de custos inerentes a construção. Entretanto, quando objetiva-se integrar a sustentabilidade ao projeto estrutural faz-se necessário realizar a ACV da estrutura. Sendo assim, este trabalho desenvolveu um projeto sustentável para colunas de concreto armado que otimiza custos, energia incorporada (materiais de construção) e emissões de CO₂. Em síntese, os resultados da análise de otimização demonstraram que, assume-se um aumento de 10% do custo (com redução do uso de concreto e aumento da armadura de aço), a energia incorporada e as emissões de CO₂ apresentam uma redução de 20% e 60%, respectivamente. Este estudo também demonstra a importância de que a busca por benefícios ambientais deve ser conciliada com as especificações do projeto estrutural, e que neste caso, pode-se minimizar os impactos das emissões atmosféricas e do consumo de energia com um sacrifício aceitável no custo.

Por fim, a apresentação dos estudos supracitados, acerca da aplicação de resíduos industriais e RCD e otimização estrutural no concreto armado, demonstram inúmeras possibilidades de estratégias, ferramentas e materiais reciclados que contribuem para a integração de princípios de sustentabilidade em ambientes construídos. Trabalhos da literatura como de Leite (2001), Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002), Latterza e Machado Jr. (2003), Dal Molin *et al.* (2004), Aragão (2007), Tenório *et al.* (2012), Turk *et al.* (2015), Torres *et al.* (2017), Marinković *et al.* (2017), demonstraram que o uso de agregados reciclados na fabricação do concreto armado resulta em um material com bom comportamento mecânico, que contribui para redução no consumo de recursos naturais e energéticos e para a minimização da geração de resíduos e de emissões de CO₂. Ainda, conforme Siddique *et al.* (2018), a aplicação de resíduos industriais como agregados do concreto também possibilita obter uma economia no custo do material de construção. Outros estudos (Suji *et al.*, 2008; Carvalho *et al.*, 2005; Pinheiro, 2008; Brondani *et al.*, 2015; Bento e Rossignolo, 2013; Yoon *et al.*, 2018) demonstraram que o uso de otimização estrutural de elementos em concreto armado e avaliação do ciclo de vida possibilitam otimizar custos e energia incorporada, bem como reduzir emissões de CO₂ e consumo de recursos naturais. Todavia, a implementação destas alternativas deve partir de atitudes dos projetistas, em buscar mais informações e realizar demonstrações do uso de estratégias e técnicas inovadoras para o projeto e execução de obras da construção civil.

Conclusões

Este estudo apresentou e discutiu sobre alternativas de projeto que visam incorporar os princípios de sustentabilidade em estruturas de concreto armado, associando benefícios e

limitações. Nesse contexto, as ferramentas de gestão como ambientes colaborativos e sistemas BIM apresentam potencial de contribuição para obter-se resultados mais precisos, rápidos e satisfatórios.

Também, é possível compreender que o uso de resíduos industriais, principalmente da fundição de metais, e RCD como agregados reciclados na fabricação de concreto armado, podem fornecer uma série de benefícios ambientais, além de custo econômico e comportamento mecânico satisfatórios, desde que aplicados de forma criteriosa. Além disso, a otimização de estruturas de concreto armado e a avaliação do ciclo de vida são ferramentas que permitem otimizar custos, reduzir consumo de recursos naturais e energia incorporada, além de contribuir para a redução de emissões de CO₂ e desperdícios de materiais. Contudo, compete ao projetista analisar diante destas opções disponíveis e verificar qual apresentará os melhores resultados, os menores gastos e os menores consumos de recursos, sejam de mão de obra, financeiros ou estruturais.

Referências bibliográficas

- Aigbavboa, C., Ohiomah, I., Zwane, T. (2017) Sustainable Construction Practices: “A Lazy View” of Construction Professionals in the South Africa Construction Industry. *Energy Procedia*, **105**, 3003-3010.
- Ajdukiewicz, A., Kliszczewicz, A. (2002) The Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC, *Cemento & Concrete Composites*, **24**(2), 269-279.
- Alwaer, H., Kirk, D. (2012) Building sustainability assessment methods, *Proceedings of the Institute of Civil Engineers – Engineering Sustainability*, **165**(4), 241-253.
- Aragão, H. G. (2007) *Análise estrutural de lajes pré-moldadas produzidas com concreto reciclado de construção e demolição*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió.
- Batlouni Neto, J. (2007) Critérios de projeto para seleção de materiais. Geraldo Cechella Isaia (Eds.) *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*, v.1, IBRACON, São Paulo.
- Bhardwaj, B., Kumar, P. (2017) Waste foundry sand in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, **156**, 661-674.
- Bento, R.C., Rossignolo, J. A. (2013) Aplicação da Avaliação do ciclo de vida (ACV) na análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado. *Concreto & Construções*, **71**, 74-81.
- Brondani, R. P., Mohamad, G., Isaia, G. C. (2015) Sustentabilidade em projeto de estrutura em concreto armado. *Concreto & Construções*, **77**, 92-96.
- Carvalho, C., Javali, S., Peyroteo, A. (2005) Avaliação ambiental comparativa de estruturas metálicas e de betão armado. V *Simpósio Ibero-Americano “O Betão nas Estruturas”*. Coimbra, Portugal.
- Chan, R., Soebarto, V., Zhao, Z., Zillante, G. (2016) Facilitating the transition to sustainable construction: China's policies. *Journal of Cleaner Production*, **131**, 534-544.
- Dal Molin, D. C. C., Vieira, G. L., Lima, F. B. (2004) *Resistência e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição*. Engenharia Civil UM (Braga), Minho, Portugal, n.19, p. 5-18.
- DTI (2006) Sustainable construction strategy report 2006. Acesso em: 06 out. 2018. Disponível em: <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20060715192514/http://www.dti.gov.uk/files/file21332.pdf>
- Evbuomwan, N. F. O., Anumba, C. J. (1998) An integrated framework for concurrent life-cycle design and construction. *Advances in Engineering Software*, **29**(7-9), 587-597.
- Fabricio, M. M., Melhado, S.B. (2004) Qualidade no Processo de Projeto, *Gestão da Qualidade: Tópicos avançados*. 1ª ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 107-122.

- Fernandes, A. V. B., Amorim, J. R. R. (2014) Concreto sustentável aplicado na construção civil. *Ciências Exatas e Tecnológicas Unit*, **2**(1), 79-104.
- Gagnon, B., Leduc, R., Savard, L. (2012) From a conventional to a sustainable engineering design process: different shades of sustainability. *Journal of Engineering Design*, **23**(1), 49-74.
- Gouveia, N. (2012) Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. *Ciência & Saúde Coletiva*, **17**(6), 1503-1510.
- Habibi, S. (2017) The promise of BIM for improving building performance. *Energy and Buildings*, **153**, 525-548.
- Hansen, T.C. (1992) Recycling of demolished concrete and masonry. *London: Chapman & Hall*, 316.
- Jamil, A. H. A., Fathi, M. S. (2016) The Integration of Lean Construction and Sustainable Construction: A Stakeholder Perspective in Analyzing Sustainable Lean Construction Strategies in Malaysia. *Procedia Computer Science*, **100**, 634-643.
- Khalfan, M. M. A., Anumba, C. J., Carrillo, P. M. (2001) Development of a readiness assessment model for concurrent engineering in construction. *Benchmarking: An International Journal*, **8**(3), 223-239.
- Kibwami, N., Tutesigensi, A. (2016) Enhancing sustainable construction in the building sector in Uganda. *Habitat International*, **57**, 64-73.
- Kumar, R., Naik, T. R. (2010) Sustainable Concrete with Industrial and Post-Consumer By-Products. *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy.
- Latterza, L. M., Machado Jr, E. F. (2003) Concreto com agregado graúdo reciclado: propriedades no estado fresco e endurecido e aplicação em pré-moldados leves. *Cadernos de Engenharia de Estruturas, Concretos Especiais*, **21**. Acesso em: 10 dez. 2017. Disponível em: http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/nova_versao/pdf/cee21.pdf
- Leite, M. B. (2001) *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Liew, K. M., Sojobi, A. O., Zhang, L. W. (2017) Green concrete: Prospects and challenges. *Construction and Building Materials*, **156**, 1063-1095.
- Lima, C. I. V., Coutinho, C. O. D., Azevedo, G. G. C., Barros, T. Y. G., Tauber, T. C., Lima, S. F. de. (2014) Sustentabilidade e processos de projetos de edificações. *Ciências exatas e tecnológicas*, **1**(1), 31-40.
- Lu, Y., Wu, Z., Chang, R., Li, Y. (2017) Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions. *Automation in Construction*, **83**, 134-148.
- Manoharan, T., Laksmanan, D., Mylsamy, K., Sivakumar, P., Sircar, A. (2018) Engineering properties of concrete with partial utilization of used foundry sand. *Waste Management*, **71**, 454-460.
- Marinković, S., Dragas, J., Ignjatović, I., Tosić, N. (2017) Environmental assessment of green concretes for structural use. *Journal of Cleaner Production*, **154**, 633-649.
- Matar, M. M., Georgy, M. E., Ibrahim, M. E. (2008) Sustainable construction management: introduction of the operational context space (OCS). *Construction Management and Economics*, **26**(3), 261-275.
- Mousa, A. (2015) A Business approach for transformation to sustainable construction: an implementation on a developing country. *Resources, Conservation and Recycling*, **101**, 9-19.
- Moriconi, G. (2007) Recyclable materials in concrete technology: sustainability and durability. Department of Materials and Environment Engineering and Physics, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy. Acesso em: 10 dez. 2017. Disponível em: http://www.claisse.info/special%20papers/moriconi_full_text.pdf
- Motta, S.R.F., Aguilar, M. T. P. (2008) The Dialectic Creative Process for a Sustainable in the Constructed Environment, *2008 World Sustainable Building Conference - SB08*, Melbourne, 2, 2640-2643.
- Motta, S.R. F., Aguilar, M. T. P. (2009) Sustentabilidade e processos de projetos de edificações. *Gestão & Tecnologia de Projetos*, **4**(1).
- Nagalli, A. (2012) Comparativo técnico e econômico entre obras comerciais com características sustentáveis e convencionais, *Techné, São Paulo*, **179**, 60-63.

- Naik, T. R. (2008) Sustainability of Concrete Construction. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, **13**(2), 98-103.
- Oguntona, O. A., Aigbavboa, C. O. (2017) Biomimicry principles as evaluation criteria of sustainability in the construction industry. *Energy Procedia*, **142**, 2491-2497.
- Olawumi, T. O., Chan, D. W. (2018) Identifying and prioritizing the benefits of integrating BIM and sustainability practices in construction projects: A Delphi survey of international experts. *Sustainable Cities and Society*, **40**, 16-27.
- Olawumi, T. O., Chan, D. W., Wong, J. K. W., Chan, A. P. C. (2018) Barriers to the integration of BIM and sustainability practices in construction projects: A Delphi survey of international experts. *Journal of Building Engineering*, **20**, 60-71.
- Pinheiro, M. A. (2008) *Análise estrutural de edificações de pequeno porte- estudo de caso*, Dissertação de mestrado em Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Santoro, J. F., Kripka, M. (2017) Studies on Environmental Impact Assessment of Reinforced Concrete in Different Life Cycle Phases. *International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research*, **1**(2), 32-40.
- Shen, L., Tam, V. W. Y., Tam, L., Ji, Y. (2010) Project feasibility study: the key to successful implementation of sustainable and socially responsible construction management practice. *Journal of Cleaner Production*, **18**, 254-259.
- Shen, J., Zhang, X., Yang, T., Tang, L., Wu, Y., Pan, C., Wu, J., Xu, P. (2017) Design Strategy of a Compact Unglazed Solar Thermal Facade (STF) for Building Integration Based on BIM Concept. *Energy Procedia*, **105**, 1-6.
- Siddique, R., Singh, G., Singh, M. (2018) Recycle option for metallurgical by-product (Spent Foundry Sand) in green concrete for sustainable construction. *Journal of Cleaner Production*, **172**, 1111-1120.
- Suji, D., Natesan, S.C., Murugesan, R., Prabhud, R.S. (2008) Optimal design of fibrous concrete beams through simulated annealing. *Asian Journal of Civil Engineering (Build Hous)*, **9** (2), 193-213.
- Tan, Y., Shen, L., Yao, H. (2011) Sustainable construction practice and contractors' competitiveness: A preliminary study. *Habitat International*, **35**(2), 225-230.
- Tenório, J. J. L., Gomes, P. C. C., Rodrigues, C. C., Alencar, T. F. F. (2012) Concrete produced with recycled aggregates. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, **5**(5), 692-701.
- Torres, A., Bartlett, L., Pilgrim, C. (2017) Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland Cement Concrete. *Construction and Buildings Materials*, **135**, 674-681.
- Turk, J., Cotic, Z., Mladenovic, A., Sajna, A. (2015) Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. *Waste Management*, **45**, 194-205.
- Weisenberger, G. (2011) Sustainability and the Structural Engineer. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, **16**, 146-150.
- Xi, G., Shi, X. (2018) Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A state-of-the-art review. *Resources, Conservation and Recycling*, **136**, 95-109.
- Xiao, J., Sun, Y., Falkner, H. (2005) Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete. *Engineering Structures*, **28**(1), 1-8.
- Yilmaz, M., Bakis, A. (2015) Sustainability in Construction Sector. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, **195**, 2253-2263.
- Yoon, Y.C., Kim, K. H., Lee, S. H., Yeo, D. (2018) Sustainable design for reinforced concrete columns through embodied energy and CO₂ emission optimization. *Energy and Buildings*, **174**, 44-53.