Gestão de resíduos sólidos na construção civil com base nos conceitos da Indústria 4.0.

Vinicius Augusto Castelo Branco Mateus¹, Armando Araújo de Souza Júnior²

Resumo

Verifica-se a legislação mais rígida no que se refere ao meio ambiente – tendência mundial que visa minimizar ao máximo a sua degradação e a preservação de uma vida mais saudável. Porém não é suficiente para atender a necessidade de diminuição de geração de resíduos e aumento de reciclagem se não vier acompanhada por uma gestão de resíduos sólidos eficiente por parte dos geradores. O objetivo geral deste artigo é apresentar uma proposta de gestão de resíduos sólidos na construção civil com base nos conceitos da Indústria 4.0. Essa proposta foi pensada num método na qual a plataforma de Modelagem da Informação da Construção (*BIM*) é combinada com um modelo de estimativa capaz de quantificar os resíduos gerados no canteiro de obra na fase de projetos. Por ser um modelo teórico, sua limitação é quantificar assertivamente o Nível de Desperdício em cada etapa da obra. Essa precisão de estimativa de desperdício pode ser aprimorada aumentando os níveis da estrutura EAP, ou seja melhorando o detalhamento de cada atividade, ou incorporando o conhecimento das construtoras e buscando dados históricos.

Palavras-Chave: Meio Ambiente, Modelo de Estimativa e Modelagem da Informação da Construção

Abstract

The most stringent legislation regarding the environment - a global trend that aims to minimize its degradation and the preservation of a healthier life. However, it is not sufficient to meet the need to reduce waste generation and increase recycling if it is not accompanied by an efficient solid waste management by the generators. The general objective of this article is to present a proposal for solid waste management in construction based on the concepts of Industry 4.0. This proposal was based on a method in which the Building Information Modeling (*BIM*) platform is combined with an estimation model capable of quantifying the waste generated at the construction site in the project phase.. Because it is a theoretical model, its limitation is to

¹ Pós-Graduação – Mestrado em Engenharia da Produção pela Universidade Federal do Amazonas – UFAM - vacbm_18@hotmail.com

² Universidade Federal do Amazonas – UFAM.

assertively quantify the level of waste at each stage of the work. This accuracy of waste estimation can be improved by increasing the EAP structure levels, ie improving the detail of each activity, or incorporating the knowledge of the builders and searching for historical data.

Keywords: Environment, Estimation Model and Building Information Modeling.

1. INTRODUÇÃO

Apesar dos benefícios proporcionados à sociedade, como geração de empregos, melhoria na qualidade de vida por meio de construções de moradias, reformas em infraestrutura pública e outros, a construção civil tornou-se uma preocupação mundial devido a grande quantidade de resíduos gerados que acarretam impactos no meio ambiente, na sociedade e na economia de um país (SINDUSCON-MG, 2005).

Atualmente, o grande desafio global é estabelecer planos e diretrizes capazes de nortear os construtores para o desenvolvimento de uma gestão adequada de controle e tratamento de resíduos sólidos.

Uma das etapas importantes da gestão de resíduos sólidos, segundo Marzouk e Azab (2013), é a reciclagem, pois gera maiores benefícios para o meio ambiente do que, por exemplo, o descarte em aterros sanitários, tais como redução de emissão de poluentes, economia de energia e até mesmo contribuição para redução do aquecimento global. Porém é preciso de legislações rigorosas que restrinjam o descarte em aterros e ao mesmo tempo promovam incentivos para encorajar construtores a reciclar seus resíduos.

Compreendendo essa necessidade, as grandes potências industrializadas por meio de seus governos estão empenhadas em melhorar a política de controle de geração de resíduos, como por exemplo a União Européia (EU), que por intermédio do *EU Waste Framework Directive* definiu que os países membros devem atingir a meta de 70% de reciclagem dos resíduos não-perigosos gerados na demolição e construção civil até 2020, como cita Dahlbo *et al.* (2015).

De acordo com *European Commission* (2016), para atingir essa meta, foi criado o *Protocolo de Resíduos de Construção e Demolição da UE*, onde um dos principais aspectos abordados é a melhoria no processo de identificação, separação na origem e recolhimento dos resíduos, ou seja, uma gestão eficiente ainda na fase da construção.

Já no Brasil, o (IPEA, 2012) elaborou um relatório que diagnosticou situação atual dos resíduos da construção por meio de pesquisa bibliográfica e de dados secundários disponíveis subsidiando a elaboração do Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Apesar dessas medidas

governamentais, na maioria dos países em desenvolvimento, incluindo o Brasil, a gestão de resíduos sólidos da construção civil é insuficiente e inapropriada, mesmo sendo um ponto relevante no plano de gestão de projetos segundo Manowong (2010).

Para Souza *et al.* (2015), além de atender as exigências da legislação vigente sobre resíduos sólidos, as empresas brasileiras do setor da construção civil que fazem a gestão de seus resíduos baseado nos indicadores do relatório de sustentabilidade GRI (“Global Reporting Initiative”) conseguem apresentar resultados significativos na redução de geração de resíduos.

Complementado, Mhaske, Darade e Khare (2017) afirmam que gerenciamento adequado dos resíduos produzidos pelas construtoras, incluindo a sua redução, reutilização e reciclagem, tornará o processo construtivo mais rentável e competitivo, além de sustentável.

Além dessas diretrizes voltadas para o desenvolvimento sustentável, as políticas públicas dos maiores países industrializados, segundo Liao *et al.* (2018), estão voltadas para o desenvolvimento do sistema de gestão para atender a demanda da Indústria 4.0, nas quais incluem melhorias nas exportações, apoio ao crescimento econômico, aumento da competitividade no mercado global e produção sustentável que sejam capazes de aumentar a produtividade sem desperdícios. E para que isso seja possível será necessário grande investimento na área de inovação, além da colaboração mútua entre governo, indústria e universidade.

Corroborando com essa ideia, Stock e Seliger (2016) mostram que os sistemas de informação e tecnologia que serão proporcionados pela Indústria 4.0, produtos e serviços inteligentes, oportunizarão o desenvolvimento sustentável no processo produtivo das indústrias.

Diante do exposto, verifica-se a legislação mais rígida no que se refere ao meio ambiente – tendência mundial que visa minimizar ao máximo a sua degradação e a preservação de uma vida mais saudável. Porém não é suficiente para atender a necessidade de diminuição de geração de resíduos e aumento de reciclagem se não vier acompanhada por uma gestão de resíduos sólidos eficiente por parte dos geradores. O objetivo geral deste artigo é apresentar uma proposta de gestão de resíduos sólidos na construção civil com base nos conceitos da Indústria 4.0.

Este trabalho está dividido em quatro partes, incluindo esta introdução. Na primeira parte será apresentado o referencial teórico. A segunda parte refere-se ao campo da pesquisa e aos procedimentos metodológicos utilizados e, em seguida, a terceira parte descreve os resultados e discussão e nas considerações finais serão apresentadas as conclusões e contribuições deste estudo.

1.1. Gestão de Resíduos Sólidos

Um dos problemas mais frequentes em projetos de construção civil é a gestão inadequada dos resíduos sólidos gerados no canteiro de obra. A taxa de desperdício ultrapassa o limite aceitável, provocando efeitos negativos sobre o lucro do projeto ou no retorno do investimento (MHASKE, DARADE e KHARE, 2017).

Além disso, Mhaske, Darde e Khare (2017) mostram que para reduzir os impactos ambientais gerados pelos resíduos da construção civil, é necessário compreender o processo de geração para posteriormente utilizar técnicas capazes de tornar a gestão dos resíduos efetiva, tais como: plano de gerenciamento de resíduos, modelagem de informações da construção (“*BIM*”) e 3R (Reduzir, Reutilizar e Reciclar).

Porém, para torna-la efetiva, primeiramente é necessário entender o seu conceito fundamental e segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente do Brasil – CONAMA, por intermédio da Resolução nº 307/2002, gestão de resíduos da construção civil é definida como sendo um conjunto de ações voltadas para todas as etapas, desde a sua origem: identificação e separação, até a destinação final ambientalmente adequada conforme o plano de gerenciamento de resíduos sólidos exigidos por legislação.

Essa destinação final dos resíduos de forma correta é fundamental para tornar as atividades da construção civil menos nocivas ao meio ambiente e mais sustentáveis à sociedade. Por isso, para Kucukvar, Egilmez e Tatari (2014), entre o processo de reciclagem, utilização de aterros sanitários e incineração que são estratégias de gestão de resíduos, a reciclagem é a melhor opção para minimizar os efeitos causados pela geração de resíduos quando os critérios de avaliação são a emissão de gases poluentes, o desperdício de água e a eficiência energética.

Outra forma de gerenciar resíduos, é, ao invés de tomar ações e buscar soluções apenas para etapa final do processo de geração de resíduos durante a execução da obra, é possível reduzir os impactos negativos ainda na fase de projetos. Para Lu *et al.* (2017), a aplicação da plataforma *BIM* na gestão de resíduos, tendo como pré-requisitos principais um “algoritmo computacional” e a “prontidão da informação”, é capaz de manipular as informações de modo a facilitar a melhor tomada de decisão para a gestão de resíduos ainda na fase de projetos. A utilização do *BIM* como um ambiente computacional, virtual e menos caro, permite que os projetistas ponderem entre diferentes tipos de projetos e avaliem diferentes cenários de construção visando minimizar a geração de resíduos.

Seguindo essa mesma linha de raciocínio, Li *et al.* (2016) apresentam um modelo de estimação quantitativa de resíduos da construção civil de modo que possa prever a quantidade de vários tipos de resíduos gerados a partir de projetos executivos, rastreando suas origens e dando suporte aos construtores para melhorar sua gestão de resíduos no canteiro de obra.

Contudo, não é suficiente, dominar as técnicas capazes de implementar a gestão de resíduos adequadamente e ou por meio de avanços tecnológicos desenvolver métodos sofisticados para prever e mitigar os impactos da geração de resíduos da construção civil, se essas ações não vierem acompanhadas de políticas públicas que demonstrem uma efetiva preocupação com a geração de resíduos e que norteiem os envolvidos rumo à sustentabilidade.

1.2. Resíduos na Construção Civil

A linha de pesquisa adotada para os conceitos e definições de resíduos da construção civil foi fundamentada sob a legislação brasileira. Assim, para o planejamento, elaboração e execução de uma gestão de resíduos eficiente ainda na fase da construção, primeiramente é preciso definir o conceito de resíduos sólidos, identificá-los, depois separá-los por categorias ou classes de modo que possam ser tratados adequadamente, e por último, reciclá-los e reutilizá-los.

Segundo Pichtel (2005), resíduo sólido pode ser definido como um material sólido com valores econômicos negativos, que tornam o descarte mais barato do que seu uso. Entretanto, essa definição entra em contradição com os parâmetros atuais que ressaltam o valor econômico dos resíduos, como observado na Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, regulamentada pelo decreto 7.404, de 23 de dezembro de 2010, que dispõe sobre a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil e define resíduos sólidos como:

[...] material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

Complementando essa definição, por intermédio do Conselho Nacional do Meio Ambiente do Brasil – CONAMA, no uso das competências que lhe foram conferidas pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto nº 99.274, de 6 de julho de 1990, e tendo em

vista o disposto em seu Regimento Interno, anexo à Portaria nº 326, de 15 de dezembro de 1994, a Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, tendo a sua última alteração realizada pela Resolução nº 469/2015, foi elaborada e publicada para estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil no Brasil e define resíduos sólidos da construção civil como:

[...] são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (BRASIL, 2002).

Ainda segundo a Resolução CONAMA nº 307, os resíduos da construção civil devem ser identificados e separados conforme apresentado no Quadro 1.

Quanto a forma de destinação desses resíduos conforme as Classes, a legislação brasileira prevê que os de Classe A podem ser aproveitados no próprio canteiro de obra, mas se não for possível, devem ser encaminhados para usinas de reciclagem ou aterros específicos, que permitem sua reutilização ou reciclagem futura. Com a separação adequada, os de Classe B podem ser destinados à cooperativas de reciclagem ou áreas de transbordo e triagem, que são estabelecimentos privados destinados ao recebimento de resíduos da construção civil, para eventual transformação e posterior remoção e disposição. Os de Classe C, são separados dos demais e enviados, geralmente, para aterros sanitários preparados para esse tipo de recebimento. E por último, os de Classe D, que são separados e destinados aos aterros industriais licenciados. Apesar da importância de identificação e separação dos resíduos sólidos na fase da construção, essas etapas não são suficientes para garantir uma gestão de resíduos eficiente. Para Mhaske, Darade e Khare (2017) também é necessário identificar as principais atividades no canteiro de

obra que geram o maior volume de resíduos para que possam ser mitigadas, gerando impactos positivos para os *stakeholder*.

Quadro 1: Classes de Resíduos da Construção Civil

CLASSE A	
Resíduos reutilizáveis ou recicláveis na própria obra.	
Exemplos:	tijolo, concreto e argamassa
CLASSE B	
Resíduos reutilizáveis ou recicláveis em outros setores.	
Exemplos:	plástico, papel, metais e vidros
CLASSE C	
Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias viáveis que permitam a sua reciclagem.	
Exemplos:	isopor, massa corrida, massa de vidro e gesso
CLASSE D	
Resíduos perigosos que causam risco à saúde humana e ao meio ambiente, podendo ser tóxicos, explosivos, inflamáveis ou capazes de transmitir doenças.	
Exemplos:	Tintas, solventes, óleo e telhas de amianto

Fonte: Sienge, 2018

1.3. Indústria 4.0

Antes de correlacionar a Indústria 4.0 à gestão de resíduos sólidos da construção civil, primeiramente, é necessário compreender a sua origem, bem como seus princípios e impactos de ordem social, econômica e ambiental.

Ao longo da história mundial, a indústria passou por diversas transformações e a primeira ocorreu no final do século XVIII, e foi intitulada como a Primeira Revolução Industrial, onde as máquinas de vapores foram utilizadas como fonte de energia para mecanizar a produção nas fábricas. Mais tarde, no início do século XX, ocorreu a segunda grande mudança, conhecida como Segunda Revolução Industrial, que foi a aplicação de energia elétrica nos processos produtivos industriais, permitindo a produção em grandes escalas por meio de linhas de montagem. Já na década de 70, surgiu a Terceira Revolução Industrial, que por intermédio de sistemas eletrônicos e desenvolvimento da tecnologia da informação, estabeleceu a produção automatizada. E agora, nos últimos anos, deu-se início a uma nova fase, a Quarta Revolução Industrial, a era da digitalização na qual será possível a interação direta entre máquinas por meios de sistemas ciber-físicos como cita Liao *et al.* (2017).

Ainda segundo Liao *et al.* (2017), o governo norte-americano foi a primeira potência industrializada a adotar políticas públicas para investir em novas tecnologias e metodologias de processos industriais. Para isso, o Conselho de Ciência e Tecnologia Americano elaborou um plano chamado “*Advanced Manufacturing Partnership*” (2011) cuja a intenção era criar um ambiente propício para inovação proporcionado pela parceria entre governo federal, indústria e universidade.

Já o termo Indústria 4.0, em 2013, na feira de Hannover, foi apresentado pela primeira vez por meio de um relatório coordenado por Henning Kagermann cujo o objetivo principal era as recomendações para implementação estratégica da Indústria 4.0 ao governo da Alemanha, afim de garantir, num futuro próximo, a competitividade das indústrias alemãs no mercado mundial. A base desse relatório era mostrar a possibilidade de criação de redes inteligentes ao longo de todo o processo produtivo por intermédio da interligação entre máquinas e sistemas digitais, permitindo controle da produção de forma autônoma, ou seja, as máquinas serão capazes de programar manutenções, prever falhas e proceder mudanças nos processos produtivos.

O processo produtivo da Indústria 4.0 adotará um sistema de produção inteligente na qual a tecnologia física irá interagir com o meio digital em todas as etapas do desenvolvimento do produto ou serviço. Segundo Ribeiro (2017), isso será possível se a Indústria 4.0 se basear nos seguintes princípios:

1. Automatização e digitalização dos processos permitindo a distribuição adequada de recursos humanos e materiais, otimizando a produção e a economia de energia;

2. Recebimento e tratamento das informações *online* de forma a auxiliar na tomada de decisão, garantindo um melhor desempenho nos processos e qualidade no produto final;
3. Monitorização e rastreabilidade dos produtos, serviços e processos afim de tornar a rede de produção mais eficiente;
4. Sistematização cyber-física da produção, melhorando o rendimento das máquinas, reduzindo desperdícios e aumentando a produtividade;
5. Customização de produtos e serviços, adaptando-se às necessidades dos clientes.

Com os avanços tecnológicos na área da engenharia e tecnologia da informação é possível desenvolver esses princípios ao longo de toda a cadeia de produção e, segundo Rübmann *et al.* (2015), os suportes para esse desenvolvimento são: Big Data e análise de dados, robótica, simulação, internet das coisas, ciber-segurança, *cloud computing*, sistemas de integração horizontal e vertical e realidade virtual.

A implementação da Indústria 4.0 na produção de um produto ou execução de um serviço poderá ser um fator de sucesso para as empresas manterem-se competitivas no mercado mundial. Para isso, Gabriel e Pessl (2016) afirmam que as empresas devem considerar os impactos sociais, econômicos e ambientais, como por exemplo, a questão sobre eficiência energética e as profissões do futuro.

Ainda sobre esses impactos, Ribeiro (2017) mostra que a Indústria 4.0 será capaz de otimizar os recursos e diminuir os consumos energéticos, por meio da gestão de dados gerados ao longo de toda a cadeia produtiva. Tais benefícios ajudarão a diminuir a emissão de poluentes na atmosfera, tornando possível a implementação da indústria em ambiente urbano. Este fator trará vantagens sociais pela proximidade dos locais de trabalho e consequente diminuição no tempo de deslocamento.

Além disso, Ribeiro (2017) afirma que esse volume de informações permitirá a rastreabilidade dos produtos, tornando a reciclagem mais eficaz, pois será possível identificar cada componente do produto que poderá ser reutilizado. Assim, haverá uma redução significativa de custos, uma vez que os produtos serão melhores aproveitados.

Então a partir das ferramentas da Indústria 4.0 será possível desenvolver a gestão de resíduos da construção civil de forma mais eficiente e integrada, considerando as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, sob a premissa do desenvolvimento sustentável.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Segundo o plano de estratégia 2025 do governo Britânico para construção civil, o *BIM* será uma ferramenta de grande potencial para reduzir a geração de resíduos ainda na etapa de elaboração de projetos (HM GOVERNMENT, 2013).

Seguindo essa linha, a proposta de gestão de resíduos sólidos da construção civil foi pensada num método na qual a plataforma de Modelagem da Informação da Construção (*BIM*) é combinada com um modelo de estimação capaz de quantificar os resíduos gerados no canteiro de obra na fase de projetos, possibilitando assim, um melhor planejamento da gestão dos resíduos antes de iniciar a execução da obra.

Para Lu *et al.* (2017), *BIM* é uma plataforma capaz estocar e operar diversos tipos de informações sobre o projeto num único banco de dados. Essas informações podem ser geométricas, ou seja, relacionadas ao modelo construtivo, e não-geométricas que incluem especificação de material, cronograma e custo do projeto executivo (PRATT, 2004).

Dessa forma, verifica-se que o *BIM* é uma tecnologia que atende os princípios da Indústria 4.0 apresentados anteriormente por Ribeiro (2014), pois essa integração de informações ainda na fase de projetos permite alocação adequada de mão-de-obra e maior assertividade no quantitativo e escolha do material para cada etapa da execução. Além disso, o tratamento desses dados previamente, auxilia na tomada de decisão, garantindo um melhor desempenho no processo construtivo e diminuindo desperdícios.

Para compor o modelo de gestão de resíduos sugerido, além do *BIM*, é necessário um modelo computacional que consiga estimar o quantitativo de resíduos utilizando as informações de projetos. Segundo Li *et al.* (2016), esse modelo não é capaz apenas de quantificar, mas também de identificar a atividade que gera o resíduo. Dessa forma, o plano de gerenciamento de resíduos tratará melhorias significativas para o tratamento dado aos resíduos gerados na construção.

Ainda sobre esse modelo, Li *et al.* (2016), propõe uma metodologia que aplica o princípio do balanço de massa e análise de fluxo de material para identificar o processo de geração de resíduos por diferentes tipos de materiais. Além disso, o modelo utiliza taxa de conversão para calcular o peso e o volume dos resíduos auxiliando na sua logística. Dessa forma, a estimativa mostra o nível de desperdício em cada etapa da construção, permitindo um melhor controle da geração de resíduos.

Em resumo, a estrutura computacional apresentada pela Figura 1, integra a plataforma *BIM* e o modelo de estimativa para a modelagem da gestão de resíduos.

Figura 1: Modelo de gestão de resíduos

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo computacional abordado nesse artigo para estimar o quantitativo de resíduos baseia-se na proposta desenvolvida por Li *et al.* (2016). Assim, tomando como partida os dados gerados pela plataforma *BIM*, os mesmos são reorganizados dentro de uma Estrutura Analítica de Projeto (EAP), de forma que diferentes processos da construção possa ser representado. Essa geração de dados ocorrerá a partir da elaboração do projeto arquitetônico e os complementares (estrutural, elétrico e hidro-sanitário) utilizando um software que desenvolve os projetos com a tecnologia Building Information Modeling – *BIM*.

Detalhando esse processo, primeiramente deve-se compreender que os Programas Computer-Aided Design – CAD tradicionais criam desenhos bidimensionais utilizando entidades geométricas como linhas, retângulos e círculos. Já a modelagem em BIM difere de desenhos CAD na medida em que, ao utiliza-lo, o usuário elabora um projeto usando componentes ao invés de apenas linhas. O modelo contém propriedades pré-definidas, ou propriedades definidas pelo usuário, o que permite rastrear e apurar quantidades de materiais e qualquer outra informação adicional do modelo, contribuindo para o levantamento do escopo do projeto (AUTODESK, 2005).

Após o término do processo de modelagem, os quantitativos serão extraídos a partir do programa Autodesk Quantity Takeoff - AQT, mas antes será necessário que o modelo BIM seja exportado do software em formato DWF. O AQT permitirá a extração dos quantitativos de todos os elementos do modelo, ou apenas dos componentes de escolha do usuário.

Vale ressaltar que na aplicação da tecnologia BIM, as informações são compartilhadas naturalmente, por meio de um formato de dados padrão, denominado Industry Foundation Classes – IFC, que é um formato específico de dados, que permite o intercâmbio de um modelo BIM, sem perda ou distorção de dados ou informação.

Existem hoje, mais de 100 softwares que podem ler, escrever e trocar informações utilizando o padrão IFC. Para garantir a exatidão na importação e exportação dos dados por cada um destes softwares, a Building Smart International definiu um processo de certificação que garante a conformidade com as normas.

Na etapa seguinte, a estrutura organizacional, exemplificada na Figura 2, é dividida em quatro níveis: o primeiro nível é classificado por Sistemas, o segundo é designado por Componentes, o terceiro é representado por Elementos e o quarto nível encontram-se os Sub-elementos. Essa divisão por níveis facilita identificar a quantidade de material necessária para cada atividade e etapa de execução da obra.

A representação desses níveis estabelecidos pela EAP é mostrado a seguir:

- W_s , sendo $s = 1, 2, \dots, S$, e S representa a quantidade total de Sistemas do projeto.
- W_c^s , sendo $c = 1, 2, \dots, C_s$, e C_s representa o número total de Componentes no Sistema s do projeto.

- W_e^{sc} , sendo $e = 1, 2, \dots, E_{sc}$, e E_{sc} representa o número total de Elementos do Componente c no Sistema s do projeto.
- W_d^{sce} , sendo $d = 1, 2, \dots, D_{sce}$, e D_{sce} representa o número total de Sub-elementos do Elemento e do Componente c no Sistema s do projeto.

Então a construção da EAP é expressa como $W = \{W_1, \dots, W_s, \dots, W_S\}$, onde $W_s = \{W_1^s, \dots, W_c^s, \dots, W_{Cs}^s\}$, $W_s^c = \{W_1^{sc}, \dots, W_e^{sc}, \dots, W_{Esc}^{sc}\}$ e $W_e^{sc} = \{W_1^{sce}, \dots, W_d^{sce}, \dots, W_{Dsce}^{sce}\}$.

Figura 2: Estrutura EAP para diferentes processos da construção

Fonte: Adaptado de Li *et al.*, 2016

Além da EAP, esse modelo aplica o Princípio de Conservação da Massa e a Análise de Fluxo de Materiais para investigar o processo de geração de resíduos para diferentes tipos de materiais.

Segundo Fox *et al.* (2016), o primeiro princípio físico o qual é aplicado a relação entre as formulações de sistema e de volume de controle é o Princípio de Conservação de Massa: a massa do sistema permanece constante. A partir daí, Himmelblau (1996) aplica esse conceito dentro do processo de construção, ou seja, os materiais que entram num Sub-elemento, devem sair ou se acumular no Sub-elemento.

Essas entradas e saídas de materiais no processo de construção, representam o fluxo de material de um projeto da construção civil, podendo ser analisado globalmente ou por diferentes tipos de materiais.

O fluxo global de material tem como entradas os materiais da construção juntamente com os materiais de embalagem. Já as saídas incluem os elementos de construção formados e os resíduos de construção gerados. Completando esse fluxo, existem os materiais extraídos que compõem a entrega dos elementos de construção e também parte dos descartados como resíduos. Aplicando o princípio da conservação de massa, a soma dos materiais da construção, materiais de embalagem e materiais extraídos é igual aos elementos de construção e resíduos gerados. O fluxo desses quatro tipos de materiais é resumido da seguinte forma:

1. **Materiais de Construção (M):** referem-se aqueles que são usados para formar os elementos de construção alvo. A maior parte do material de construção é utilizado para formar o elemento de construção alvo e apenas uma pequena porção é descartada como resíduo de construção.
2. **Materiais de Embalagem (P):** são aqueles que embalam os materiais de construção. Não formam os elementos de construção de destino. São geralmente classificados como resíduos.
3. **Materiais Extraídos (E):** referem-se principalmente ao solo escavado no processo de construção. Esses materiais se transformam em resíduos, a menos que sejam utilizados na formação de outros elementos de construção ou em aterros no próprio canteiro de obras.
4. **Elementos de Construção Alvo (T):** são os elementos projetados para construção. A entrega de um elemento de construção pode usar materiais de construção, materiais de embalagem e materiais extraídos. Em alguns casos, parte ou totalidade desses elementos podem se tornar resíduos devido à baixa qualidade de construção ou alterações de projetos.

Para a quantificação e separação desses materiais por atividades que integram o processo executivo da construção civil foi adotado a metodologia de trabalho da plataforma *BIM*, que

por meio de parametrização e interoperabilidade consegue ler e integrar os metadados do software de projetos, atualizar automaticamente os bancos de dados de custo, definir as etapas de obra ligadas a disciplinas (multidisciplinaridade, interdisciplinaridade e colaboração) e utilizar dados geométricos para validação e visualização. Dessa forma, o *BIM* é capaz de coletar e fazer a leitura de todos os projetos e especificações, medir as dimensões de cada Sub-elemento, calcular as quantidades de materiais de construção necessárias ou materiais extraídos, precificar materiais com base em cotações de fornecedores ou em tabelas padronizadas e por último, resumir as quantidades calculadas para cada etapa do processo construtivo.

Esse banco de dados gerados pela plataforma *BIM* inclui informações como unidades de medida, quantidade de materiais, custos e alocação de mão de obra e maquinário para cada Sub-elemento. Essas informações são muito úteis para o planejamento e controle de projetos e, segundo Li *et al.* (2016), podem ser usadas para conduzir a análise de fluxo de material e monitorar a geração de resíduos de construção no processo de construção.

Agora, supões-se que, no total, existem I tipos de Materiais de Construção, G tipos de Materiais de Embalagem, J tipos de Materiais Extraídos e K tipos de Elementos de Construção Alvo. Então, as quantidades de cada um dos quatro tipos de materiais podem ser determinadas com base no procedimento acima mencionado.

Os materiais requeridos para o Sub-elemento W_d^{sce} é expresso como:

$$Q_{W_d^{sce}}^{XU} = \left[Q_{1W_d^{sce}}^{XU}, \dots, Q_{yW_d^{sce}}^{XU}, \dots, Q_{YW_d^{sce}}^{XU} \right] \quad (1)$$

Onde, $Q_{W_d^{sce}}^{XU}$ representa o Vetor Quantidade de um determinado tipo de material; e $Q_{yW_d^{sce}}^{XU}$ representa a quantidade do y-ésima material na categoria X no Sub-elemento W_d^{sce} , sendo X o tipo de material (“M”, “P”, “E” e “T”) e U indicando a unidade de medida, podendo ser “W” se o material for medido em peso ou “V” se for medido em volume. A relação entre Y e X pode ser denotada como:

$$Y = \begin{cases} I, & \text{if } X = M \\ G, & \text{if } X = P \\ J, & \text{if } X = E \\ K, & \text{if } X = T \end{cases} \quad (2)$$

Quando esses materiais são quantificados, para cada tipo de material existe uma unidade de medida. Por exemplo, o concreto é medido em m³, a madeira em m², ferragem em kg e as embalagens em unidades. Dessa forma, faz-se necessário a utilização de taxas de conversão para transformar várias unidades de medida em uma única medida. Nesse artigo manteremos a linha de trabalho conforme Li *et al.* (2016), onde o peso é a unidade de medida única. Assim o vetor peso de um determinado tipo de material para o Sub-elemento W_d^{sce} é expresso como:

$$Q_{W_d^{sce}}^{XW} = [Q_{1W_d^{sce}}^{XW}, ..., Q_{yW_d^{sce}}^{XW}, ..., Q_{YW_d^{sce}}^{XW}] \quad (3)$$

Dessa forma, $Q_{yW_d^{sce}}^{XW}$ é calculado por meio da multiplicação da quantidade de material na sua unidade pela a taxa de conversão correspondente.

$$Q_{yW_d^{sce}}^{XW} = Q_{yW_d^{sce}}^{XU} \cdot C_y^{XUW}, X \in \{M, P, E, T\} \quad (4)$$

Conforme discutido anteriormente, os resíduos são provenientes de quatro origens: Materiais de Construção, Materiais de Embalagem, Materiais Extraídos e Elementos de Construção Alvo. Essa geração de resíduos, exemplificada na Figura 4, baseia-se também no Princípio da Conservação de Massa.

Para os Materiais de Construção, a maioria deles é consumido na entrega de determinados Elementos de Construção e apenas uma pequena parcela se torna desperdício devido ao manuseio inadequado e sobras. Já o Material de Embalagem e o Extraídos, a maioria é descartado como resíduo de construção. E os Elementos de Construção Alvo se tornam resíduos quando não são mais necessários ao projeto.

A quantidade de resíduos gerados de um determinado material de um Sub-elemento pode ser medida como uma porcentagem da quantidade necessária para construir os Elementos de Construção. Essa porcentagem é referida como o Nível de Desperdício em relação a um determinado material de um Sub-elemento específico. Dessa forma, a quantidade desses resíduos gerados por um determinado material é calculada multiplicando-se o a quantidade total de Material da Construção exigido pelo nível de desperdício correspondente.

$$R_{yW_d^{sce}}^{XW} = Q_{yW_d^{sce}}^{XW} \times L_{yW_d^{sce}}^X, \quad y = 1, 2, ..., Y \quad (5)$$

$$: R_{yW_d^{sce}}^{XW}$$

Onde, é a quantidade de resíduos medida em peso do y-ésimo material na categoria de material X do Sub-elemento W_d^{sce} e $L_{yW_d^{sce}}^X$ é o Nível de Desperdício do y-ésimo material na categoria de material X do Sub-elemento W_d^{sce} .

Aplicando o Princípio de Conservação de Massa, temos as seguintes formulações para geração de resíduos em cada nível da EAP:

- Nível 4: Total de Resíduos Gerados pelos Sub-elementos

$$R_{W_d^{sce}}^{AW} = \sum_{i=1}^I R_{iW_d^{sce}}^{MW} + \sum_{g=1}^G R_{gW_d^{sce}}^{PW} + \sum_{j=1}^J R_{jW_d^{sce}}^{EW} + \sum_{k=1}^K R_{kW_d^{sce}}^{TW} \quad (6)$$

- Nível 3: Total de Resíduos Gerados pelos Elementos

$$R_{W_e^{sc}}^{AW} = \sum_{i=1}^I R_{iW_e^{sc}}^{MW} + \sum_{g=1}^G R_{gW_e^{sc}}^{PW} + \sum_{j=1}^J R_{jW_e^{sc}}^{EW} + \sum_{k=1}^K R_{kW_e^{sc}}^{TW} \quad (7)$$

- Nível 2: Total de Resíduos Gerados pelos Componentes

$$R_{W_c^s}^{AW} = \sum_{i=1}^I R_{iW_c^s}^{MW} + \sum_{g=1}^G R_{gW_c^s}^{PW} + \sum_{j=1}^J R_{jW_c^s}^{EW} + \sum_{k=1}^K R_{kW_c^s}^{TW} \quad (8)$$

- Nível 1: Total de Resíduos Gerados pelos Sistemas

$$R_{W_s}^{AW} = \sum_{i=1}^I R_{iW_s}^{MW} + \sum_{g=1}^G R_{gW_s}^{PW} + \sum_{j=1}^J R_{jW_s}^{EW} + \sum_{k=1}^K R_{kW_s}^{TW} \quad (9)$$

Com essas formulações, Li *et al.* (2016) mostra que os resíduos gerados num determinado nível será sempre a soma dos resíduos gerados pelo nível inferior sucessivo. Portanto, a quantidade de resíduos gerados num determinado projeto pode ser expresso da seguinte forma:

$$R_W^{AW} = \sum_{i=1}^I (10)^V + \sum_{g=1}^G R_{gW}^{PW} + \sum_{j=1}^J R_{jW}^{EW} + \sum_{k=1}^K R_{kW}^{TW}$$

4. CONCLUSÃO

A estimativa precisa de resíduos de diferentes tipos de projetos contribui significativamente para uma gestão efetiva de resíduos gerados na construção civil. Este artigo propõe uma gestão de resíduos ainda na fase de projetos, na qual utiliza a plataforma *BIM*, que é uma tecnologia que se baseia nos princípios da Indústria 4.0, para gerar informações mais rápidas e precisas sobre o quantitativo de material de construção necessário ou material extraído em cada etapa do processo construtivo. Além disso, adota-se também um modelo de estimativa capaz de reorganizar numa estrutura EAP os dados gerados pelo *BIM* e identificar a origem dos resíduos em cada atividade de execução da obra por meio do Princípio de Conservação de Massa, Fluxo de Materiais, Taxas de Conversão e definição do Nível de Desperdício em cada etapa da execução da obra.

Essa gestão combinada entre a metodologia *BIM* e modelo de estimativa, possibilita um planejamento adequado para a gestão dos resíduos antes de iniciar a execução da obra, auxiliando na tomada de decisão e garantindo um melhor desempenho no processo construtivo, consequentemente a diminuição de desperdícios.

Por ser um modelo teórico, sua limitação é atribuir uma porcentagem assertiva para o Nível de Desperdício em cada etapa da obra. Essa precisão de estimativa de desperdício pode ser aprimorada aumentando os níveis da estrutura EAP, ou seja melhorando o detalhamento de cada atividade, ou incorporando o conhecimento das construtoras e buscando dados históricos. Essa experiência e o conhecimento de projetos similares podem efetivamente ajudar a determinar os níveis adequados de desperdício, possibilitando a identificação de melhorias para gerenciar os fluxos de resíduos mais significativos.

Para futuros trabalhos, propõe-se um estudo de caso para validar o modelo de gestão de resíduos na construção civil adotado nesse artigo, na qual o objetivo geral será a comparação dos

resultados reais da geração de resíduos por meio de acompanhamento da execução de uma obra com o resultados gerados por esse modelo teórico.

REFERÊNCIAS

AUTODESK. **Parametric building modeling: BIM's foundation**. 2005. Disponível em: <http://images.autodesk.com/adsk/files/Revit_BIM_Parametric_Building_Modeling_Jun05.pdf>..

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: Diário Oficial da União, 2010.

BRASIL, **Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 307: diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Brasília, de 5 de julho de 2002; Publicada no DOU nº 136, de 17/07/2002, págs. 95-96. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 23 out. 2018.

DAHLBO, Helena e colab. **Construction and demolition waste management - A holistic evaluation of environmental performance**. Journal of Cleaner Production, v. 107, p. 333–341, 2015.

EUROPEAN COMMISSION. **Protocolo de Gestão de Resíduos de Construção e Demolição da UE**. p. 59, 2016.

FOX, Roberto W. e colab. **Introduction to Fluid mechanics**. Editora LTC, 8 ed., 2016.

GABRIEL, Magdalena e PESSL, Ernst. **Industry 4.0 and sustainability impacts: critical discussion of sustainability aspects with a special focus on future of work and ecological consequences**. Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering . May2016, Vol. 14 Issue 2, p131-136. 6p.

HENNING, KAGERMANN(NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE AND ENGINEERING). WOLFGANG, WAHLSTER (GERMAN RESEARCH CENTER FOR

ARTIFICIAL INTELLIGENCE). JOHANNES, Helbig (Deutsche Post Ag). **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0**. Final report of the Industrie 4.0 WG, n. April, p. 82, 2013.

HIMMELBLAU, D.M., 1996. **Basic Principle and Calculation in Chemical Engineering**. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, United States, 1996.

HM Government 2013. **Building Information Modelling Industrial strategy: government and industry in partnership**. London, UK. Available at: <https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/>

IPEA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da construção civil**. Relatório de Pesquisa, p. 34, 2012. Disponível em: http://ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120911_relatorio_construcao_civil.pdf.

KUCUKVAR, Murat e EGILMEZ, Gokhan e TATARI, Omer. **Evaluating environmental impacts of alternative construction waste management approaches using supply-chain-linked life-cycle analysis**. Waste Management and Research, v. 32, n. 6, p. 500–508, 2014.

LI, Yashuai e colab. **Developing a quantitative construction waste estimation model for building construction projects**. Resources, Conservation and Recycling, v. 106, n. January, p. 9–20, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.11.001>.

LIAO, Yongxin e colab. **The impact of the fourth industrial revolution: a cross-country/region comparison**. Production, v. 28, n. 0, 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132018000100401&lng=en&tlng=en.

LU, Weisheng e colab. **Computational Building Information Modelling for construction waste management: Moving from rhetoric to reality**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 68, n. November 2015, p. 587–595, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.029>.

MANOWONG, Ektewan. **Investigating factors influencing construction waste management efforts in developing countries: An experience from Thailand.** Waste Management and Research, v. 30, n. 1, p. 56–71, 2012.

MARZOUK, Mohamed e AZAB, Shima. **Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system ...** Resources, Conservation & Recycling, v. 82, n. January, p. 41–49, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.015>>.

MHASKE, Monika e DARADE, Milind e KHARE, Pranay. **Construction waste minimization.** International Research Journal of Engineering and Technology, p. 2395–56, 2017.

MOLNAR, Mike e HOUTMAN, Carrie. **The Advanced Manufacturing Partnership and The Advanced Manufacturing National Program Office.** National Institute of Standards and Technology, 2011.

PICHTTEL, J. **Waste management practices: municipal, hazardous, and industrial.** Boca Raton: Taylor & Francis. 649 p, 2005.

PRATT, Mj. **Extension of ISO 10303, the STEP standard, for the exchange of procedural shape models.** IEEE Proc Shape Model Appl 2004:317–26.

RIBEIRO, Joaquim Meireles. **O conceito da indústria 4.0 na confecção: análise e implementação.** 2017. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/49413>>.

RÜSSMANN, Michael e colab. **Industry 4.0.** The Boston Consulting Group, p. 20, 2015.

SINDUSCON-MG. **Cartilha de gerenciamento de resíduos sólidos para a construção civil.** Belo Horizonte. Sinduscon-MG, p. 38p., 2005. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Cartilha+de+gerenciamen>>

to+de+res?duos+s?lidos+para+a+constru??o+civil#0>.

SOUZA, Fabiana Frigo e colab. **Gestão de resíduos sólidos na construção civil: uma análise do relatório GRI de empresas listadas na BM&FBOVESPA**. Navus - Revista de Gestão e Tecnologia, v. 5, n. 4, p. 78–95, 2015. Disponível em: <<http://navus.sc.senac.br/index.php/navus/article/view/251>>.

STOCK, T. e SELIGER, G. **Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0**. Procedia CIRP, v. 40, n. 1, p. 536–541, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>>.

UNION, European e REGIONAL, European e FUND, Development. **Interreg Europe Programme Manual 13 April 2016 Sharing solutions for better regional policies**. v. 2016, n. April, p. 1–172, 2016. Disponível em: <<http://www.interregeurope.eu/help/glossary/>>.