

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
UNIVERSIDADE ABERTA DO BRASIL  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
APLICADA AOS PROCESSOS PRODUTIVOS

Carlos Eduardo Weidlich

**ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UMA OBRA COM USO  
DE ESTRATÉGIAS DE EFICIÊNCIA E FERRAMENTAS BIM:  
TERRAPLENAGEM E ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

Panambi, RS  
2017

Carlos Eduardo Weidlich

**ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UMA OBRA COM USO DE  
ESTRATÉGIAS DE EFICIÊNCIA E FERRAMENTAS BIM: TERRAPLENAGEM E  
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

Monografia apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Especialista em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos**.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ísis Portolan dos Santos

Panambi, RS  
2017

**Carlos Eduardo Weidlich**

**ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UMA OBRA COM USO DE  
ESTRATÉGIAS DE EFICIÊNCIA E FERRAMENTAS BIM: TERRAPLENAGEM E  
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

Monografia apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Especialista em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos**.

**Aprovado em 28 de julho de 2017:**

**Cristiano José Scheuer, Dr. (UFSM)**  
(Co-orientador/Presidente)

**Cláudio Roberto Losekann, Dr. (UFSM)**  
(1º Avaliador)

**Ademar Michels, Dr. (UFSM)**  
(2º Avaliador)

**Geomar Machado Martins, Dr. (UFSM)**  
(Suplente)

Panambi, RS  
2017

## RESUMO

### **ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UMA OBRA COM USO DE ESTRATÉGIAS DE EFICIÊNCIA E FERRAMENTAS BIM: TERRAPLENAGEM E ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

AUTOR: Carlos Eduardo Weidlich  
ORIENTADORA: Ísis Portolan dos Santos

O erguimento de uma edificação envolve um alto gasto energético, sendo as fases de terraplenagem e de execução de estruturas as que representam, geralmente, o maior consumo, o qual se reflete também diretamente em custos. Desse modo, a partir da geração de um modelo de edifício de múltiplos pavimentos de tipologia residencial e com uso da ferramenta BIM, através deste trabalho pretende-se avaliar o consumo energético aproximado nas fases de terraplenagem e de execução de estruturas de concreto, por estas representarem a maior demanda energética da obra. Com o uso do estudo de caso, pretende-se demonstrar possíveis estratégias, dentro do planejamento de execução de uma obra, que sejam capazes de reduzir os gastos com combustíveis e eletricidade. Como métodos, dividiu-se o desenvolvimento do trabalho em três etapas principais, iniciando com a proposição de modelo de edificação de múltiplos pavimentos, selecionando as fases mais energo-intensivas com base no modelo proposto, gerando a simulação em 4D para permitir a análise da construtibilidade e, por fim, estudando estratégias possíveis para a redução do consumo energético. Entende-se que este trabalho pode auxiliar na demonstração da utilização do BIM para a tomada de decisão do projetista e construtor, na melhoria da eficiência energética nas fases que mais envolvem consumo de energia em uma construção.

**Palavras-chave:** Consumo Energético. Construção Civil. BIM. Terraplenagem. Estruturas de Concreto Armado.

## ABSTRACT

### ENERGY CONSUMPTION ANALYSIS OF A CIVIL CONSTRUCTION USING EFFICIENCY STRATEGIES SUPPORTED BY BIM TOOLS: EARTHWORK AND REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

AUTHOR: Carlos Eduardo Weidlich

ADVISOR: Ísis Portolan dos Santos

A building erection involves high energy expenditure, being like phases of earthwork and execution of structures as they generally represent the greater consumption, which is also reflected directly in costs. Thus, from the generation of a pavement building model in a residential typology and with the BIM, the objective of this work is to evaluate the approximate energy consumption in the earthwork phase and in the execution of concrete structures, considering they represent the greatest demand energetics on site. With the case study, it is intended to demonstrate the strategy, within the execution planning of a work, which is able to reduce the expenditure of fuels and electricity. As methods, we divided the development of the work into three main stages, starting with a proposal of the model of building of pieces, selecting as phases more energy-intensive based with no proposed model, generating a simulation in 4D to allow a construction analysis and by end, studying possible strategies for reducing energy consumption. It is understood that this work can aid in demonstrating the use of BIM for a decision of the designer and builder, in the best of energy efficiency in the phases that most involve energy consumption in a construction.

**Keywords:** Energy Consumption. Civil Construction. BIM. Earthwork. Reinforced Concrete Structures.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de escavadeira hidráulica.....	15
Figura 2 – Modelo de perfuratriz para estaqueamento.....	15
Figura 3 – O ciclo de uma edificação com uso de BIM .....	18
Figura 4 – Nível subsolo do edifício proposto no modelo.....	21
Figura 5 – Nível térreo do edifício proposto no modelo.....	21
Figura 6 – Pavimento tipo do edifício proposto no modelo.....	22
Figura 7 – Modelo do edifício exportado para o Navisworks .....	24
Figura 8 – Cálculo do volume de terra escavado gerado no Revit.....	25
Figura 9 – Cálculo do reaterro gerado no Revit.....	26
Figura 10 – Sequência construtiva do modelo elaborada em Navisworks .....	33
Figura 11 – Trabalhos iniciais de terraplenagem.....	36
Figura 12 – Execução dos primeiros elementos estruturais pelo lançamento de concreto convencional.....	37
Figura 13 – Concretagem dos pilares do nível subsolo através de balde suspenso pelo guindaste de um caminhão <i>munck</i> .....	38
Figura 14 – Execução dos elementos estruturais pertencentes aos pavimentos tipo através de caminhão munido de lança para o concreto bombeado .....	40
Figura 15 – Confeção dos elementos estruturais finais pertencentes aos níveis da casa de máquinas e reservatório .....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ferramentas BIM com capacidade para 4D .....	19
Tabela 2 – Volumes de concreto para a estrutura de toda a edificação.....	27
Tabela 3 – Quantitativos de horas de uso de equipamentos por atividade .....	30
Tabela 4 – Demanda energética final por equipamento por etapa da obra.....	32
Tabela 5 – Quantitativo de horas de uso de equipamentos por atividade de acordo com alternativas propostas.....	42
Tabela 6 – Demanda energética final por equipamento por etapa da obra de acordo com alternativas propostas.....	43

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Consumo energético por etapa da obra a partir de levantamentos sem um planejamento 4D detalhado.....	34
Gráfico 2 – Consumo energético por etapa da obra considerado o planejamento 4D detalhado.....	43



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
1.1	OBJETIVOS .....	11
1.1.1	<b>Objetivo geral</b> .....	11
1.1.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	11
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	12
2.1	NÍVEIS DE PLANEJAMENTO E A PROGRAMAÇÃO DE RECURSOS .....	13
2.2	PRINCIPAIS DEMANDAS ENERGÉTICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	14
2.3	O BIM PARA ANÁLISES DE CONSTRUTIBILIDADE .....	17
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	20
3.1	ETAPA 1: PROPOSIÇÃO DO MODELO DE EDIFICAÇÃO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS .....	20
3.2	ETAPA 2: PROPOSIÇÃO DO MODELO DE EDIFICAÇÃO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS PROPOSTO .....	22
3.3	ETAPA 3: ELABORAÇÃO DA SIMULAÇÃO 4D – ANÁLISES DE CONSTRUTIBILIDADE.....	23
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	25
4.1	ANÁLISE DO MODELO – LEVANTAMENTO DOS SERVIÇOS DE MOVIMENTAÇÃO DE TERRA .....	25
4.2	ANÁLISE DO MODELO – LEVANTAMENTO DO VOLUME DE CONCRETO .....	26
4.3	LEVANTAMENTO DE MAQUINÁRIO .....	27
4.4	LEVANTAMENTO DO CONSUMO ENERGÉTICO.....	31
4.5	PROCESSOS DE EFICIÊNCIA E PLANEJAMENTO 4D .....	32
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	44
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	45

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil, como em qualquer outro ramo de produção industrial, permanentemente demanda de engenheiros, arquitetos, técnicos e construtores a exigência quanto à “construção enxuta”, um modelo de produção derivada da filosofia *lean*. Deve, portanto, obrigatoriamente preceder todo um processo de planejamento que será o alicerce para o gerenciamento de uma obra, sendo de suma importância para que se consiga ao máximo a eliminação de problemas relacionados à incidência de perdas, de baixa produtividade, e a proteção da produção contra a incerteza e variabilidade. Por envolver uma gama de atividades nas quais são empregados desde pequenas ferramentas manuais a equipamentos de grande porte, sempre há de se considerar um significativo consumo energético durante todo o período de execução de uma obra, o qual se reflete diretamente em custos. Assim, é necessário integrar o conjunto de dados das atividades relacionadas ao processo de construção ao processo de planejamento.

O consumo energético característico na construção civil basicamente é concentrado na operação de ferramentas e máquinas elétricas. Este consumo é ainda maior quando se considera a movimentação e o trabalho de veículos e demais equipamentos alimentados por combustíveis derivados de petróleo. Logo, estratégias visando à otimização desses recursos em campo, previamente definidos durante uma análise de fluxos físicos para uma posterior programação, implicarão no desenvolvimento de uma gestão da energia. Para que planos de eficiência energética possam ser aplicados na prática de canteiros de obras, torna-se necessário inicialmente juntar a informação pertinente a todo o maquinário que será demandado ao longo da construção, elaborar estudos de otimização na utilização dos maquinários, averiguar possíveis inviabilidades técnicas e, por fim, realizar o controle *in loco*.

O processo de planejamento e controle da construção divide-se em três macro etapas: o planejamento estratégico do empreendimento a nível de longo prazo; o planejamento tático a nível de médio e curto prazo (sistema *Last Planner*); e o planejamento operacional em que há o acompanhamento e controle das execuções. Apesar da utilização de todos os comprovados métodos tais como Diagrama de Gantt, Rede CPM (*Critical Path Method*) e Linha de Balanço para nível de longo prazo, e métodos *Lookahead Planning* e *Shielding Production* para nível de

médio e curto prazo, o sistema BIM (*Building Information Modeling*), agrega e potencializa o processo devido a interface 4D, da qual torna-se possível a visualização gráfica de execução da construção de edificações, proporcionado simulações em conjunto com parâmetros estabelecidos em diagramas e outros recursos gráficos. Assim, através de análises de construtibilidade possíveis através das ferramentas BIM disponíveis, planos para o gerenciamento de eficiência energética em obras tornam-se viáveis e muito favoráveis.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Demonstrar estratégias passíveis de execução, através de modelos digitais gerenciados por BIM, no planejamento global de execução de uma obra de construção civil, visando a redução de custos com combustíveis para a movimentação e trabalho de maquinário pesado durante as etapas de terraplenagem e erguimento de toda a estrutura de um edifício.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Propor como estudo de caso um modelo de edificação de múltiplos pavimentos constituído por estrutura de concreto armado e alvenaria (principal tipologia arquitetônica característica no Brasil), baseado em tipologia residencial, gerado por *software* com ferramentas BIM;
- Elencar as fases mais energointensivas com base no modelo proposto, estimando as demandas energéticas relacionadas a estes procedimentos, em função de suas capacidades de produção;
- Gerar uma simulação 4D do erguimento da edificação, a partir da programação do modelo 3D dentro das diversas fases da construção, viabilizando a análise de construtibilidade;
- De posse de uma análise de construtibilidade, verificar as possíveis estratégias no planejamento da obra que venham a proporcionar menor demanda ou operações mais eficientes de instalações e equipamentos mecânicos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Todo o processo de planejamento de uma obra de construção civil, para sua preparação, deve envolver etapas de coleta de informações, de preparação dos planos, de difusão das informações e de sua avaliação, retomando-se ao primeiro sempre que necessário e assim encadeando um ciclo. Segundo Laufer (1990, *apud* BERNARDES, 2003, p. 1) o planejamento é necessário por diversas razões, dentre as quais estão: definir todos os trabalhos exigidos para habilitar cada participante do empreendimento a identificar e planejar a sua parcela de trabalho; disponibilizar uma melhor coordenação e integração vertical e horizontal, além de produzir informações para a tomada de decisões mais consistente; melhorar o desempenho da produção através da consideração e análise de processos alternativos; e fornecer padrões para monitorar, revisar e controlar a execução do empreendimento.

Na implantação de processos de planejamento deve haver esforço e acompanhamento adequado de modo a disponibilizar à equipe de execução do projeto, uma visão clara de como e quando o trabalho deve ser feito, em que condições e em qual custo (NOCÊRA, 2009). Direcionando a temática a empresas construtoras, o processo de planejamento e controle da produção é de extrema importância para o desempenho dessas, porém, geralmente, não é conduzido de forma a explorar todo o seu potencial (BERNARDES, 2003). Os trabalhos de gerenciamento da construção consistem em aplicar eficientemente e economicamente os recursos necessários para a execução de um empreendimento de qualidade aceitável dentro de um prazo e orçamento preestabelecido (HALPIN; WOODHEAD, 2004).

A “produção enxuta” ou produção *lean*, voltada a empresas de construção, foi definida com base na filosofia *lean construction* e, surgiu a partir do Sistema Toyota de Produção, na qual são pregados os conceitos de se fazer mais com menos, em menor tempo, utilizando menor espaço, menor esforço humano, menos recursos materiais e de máquinas, sendo que ao final deverá ser entregue ao cliente o que ele espera (DENNIS, 2011). Logo, a *lean construction* é essencial para a redução do desperdício existente na indústria da construção civil (BERNARDES, 2003), e por esse motivo, focar na produção com menor consumo energético possível torna-se eficiente na medida em que máquinas e ferramentas de uso característico da construção civil são operadas dentro de condições favoráveis ao bom desempenho.

## 2.1 OS NÍVEIS DE PLANEJAMENTO E A PROGRAMAÇÃO DE RECURSOS

Segundo Peurifoy *et al* (2016) a aquisição de materiais, a sequência das operações, a logística requisitada conforme configurações do terreno, os prazos da obra e as peculiaridades técnicas do projeto constituem-se nos principais balizadores na seleção de equipamentos para a construção de edificações. Dentro do processo de planejamento da construção, a etapa referente à coleta de informações a qual antecede a de preparação dos planos, toda a documentação pertinente a contratos, desenhos e especificações técnicas, análises das condições do terreno e de instalação do canteiro, de produtividade do trabalho e dos equipamentos a serem utilizados, posteriormente servirão de base para a programação de recursos à obra.

Conforme Formoso (1999, *apud* BERNARDES, 2003, p. 23) a gestão de recursos deve ocorrer desde o nível de planejamento a longo prazo até o de curto prazo, fazendo com que os recursos possam ser programados em momentos específicos durante a execução de edificações. Para tanto, podem ser classificados em: recursos classe 1, que são aqueles caracterizados por baixa repetitividade em ciclos de aquisição; recursos classe 2, cuja programação de compra, aluguel ou contratação devem ser realizados a partir do planejamento tático de médio prazo; e recursos classe 3, que se caracterizam por uma alta repetitividade em ciclos de aquisição. No caso da alocação de recursos em equipamentos e ferramentais que demandem insumos energéticos, deve-se trabalhar dentro do planejamento tático em nível de médio prazo.

Usualmente, uma construtora precisa selecionar os equipamentos mais apropriados para transportar e/ou processar materiais de modo econômico (PEURIFOY *et al*, 2016). A escolha ou definição de equipamentos em uma obra deve passar obrigatoriamente pela análise do projeto, no entanto, jamais deve-se esquecer que os prazos, os materiais a serem utilizados, o local, e a configuração do terreno também interferem na escolha de máquinas e demais equipamentos (MENDONÇA; DAIBERT, 2014). Com o objetivo de se obter a melhor combinação possível de máquinas que atendam às tarefas ao longo das diversas fases da construção de um edifício, torna-se necessário avaliar as capacidades mecânicas de cada máquina, verificando os requisitos de potência (PEURIFOY *et al*, 2016).

Quanto ao uso característico dos equipamentos na construção civil, devem

ser consideradas taxas de produção ou número de unidades de produção que podem ser geradas por hora, dia ou períodos de tempo, limitando-se a unidades de construção pesada como caminhões, motoniveladoras e tratores (HALPIN; WOODHEAD, 2004). As potências disponíveis são controladas pelo tamanho do motor do equipamento e pelo diferencial, no qual permite a transferência de potência para o conjunto de rodas ou potência de arranque. As restrições ao uso de uma potência disponível são devidas ao tratamento da superfície de rolamento, no caso de veículos com pneus e não esteiras, e a altitude na qual se conduz as operações (HALPIN; WOODHEAD, 2004).

## 2.2 PRINCIPAIS DEMANDAS ENERGÉTICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

As fases pertencentes à construção de um edifício, quando comparado a todo o seu ciclo de vida, detêm em torno de 15% a 20% do consumo energético total (UNEP, 2007). E este valor é facilmente explicado ao se deparar com as principais instalações e máquinas que são empregadas em uma obra comparadas ao uso de aparelhos e pequenos equipamentos alimentados por insumos energéticos durante o período de uso da edificação. Reflete-se claramente que o consumo energético direto de uma obra é proveniente da queima de combustíveis fósseis, que neste caso concentram-se nos derivados de petróleo, sendo que um percentual restante resulta de eletricidade.

Na construção de edifícios, a demanda energética para a movimentação e trabalho de máquinas ocorre ao longo de todas as fases de uma obra, porém, são durante as fases de terraplenagem e de execução de estruturas que os insumos energéticos representarão o maior consumo, logicamente por serem as etapas construtivas de maior relevância em logística e complexidade na construção uma vez que erros de locação, nível ou prumo podem vir a comprometer toda a edificação. Peurifoy *et al* (2016) menciona que o desempenho das obras de terraplenagem depende de variáveis relacionadas à própria obra, ou seja, das quantidades de volume ou peso, das distâncias de transporte e dos greides para todos os segmentos de transporte do solo.

A partir dos serviços de terraplenagem, as máquinas geralmente mais utilizadas compreendem pás carregadoras de pequeno porte (*bobcat*), retroescavadeiras com pá carregadora de médio e grande porte (Fig.1),

escavadeiras de médio e grande porte, escavadeiras do tipo concha (*clamshell*) e caminhões de médio e grande porte (PINHEIRO; CRIVELARO, 2014).

**Figura 1** – Modelo de escavadeira hidráulica.



Fonte: John Deere (2017).

Posteriormente, o início dos serviços em que são executadas estruturas de concreto armado, há o emprego de perfuratrizes (Fig.2) e “bate-estacas” durante os trabalhos de fundações, além de caminhões-betoneira e bombas para o lançamento de concreto em todos os elementos que compõem a estrutura global do edifício. Especificamente a respeito do preparo do concreto há de se considerar duas opções: o concreto misturado em usina própria instalada no canteiro ou em usina externa de uma empresa fornecedora, transportado por caminhões-betoneira (PEURIFOY *et al*, 2016).

**Figura 2** – Modelo de perfuratriz para estaqueamento.



Fonte: Liebherr (2017).

As guias são um dos equipamentos mais comumente utilizados para o

transporte vertical e horizontal em obras. No entanto, para que haja uma redução significativa nos custos de mão de obra, é muito importante que a adoção deste tipo de equipamento se justifique frente a tecnologias construtivas como, por exemplo, sistemas de fachadas prontas ou elementos estruturais pré-fabricados, que dependem de içamentos a alturas diversas (MENDONÇA; DAIBERT, 2014). Elevadores de obra, para o transporte de cargas e de operários, que basicamente são do tipo por cabo ou cremalheira, e guindastes móveis como é o caso de caminhões que acompanham esta instalação, como, por exemplo, caminhões *munck*, também são importantes equipamentos para o transporte de cargas.

Entre as máquinas voltadas aos serviços de terraplenagem, destacam-se como mais empregadas, as escavadeiras de médio e grande porte, as retroescavadeiras, as pás carregadeiras de pequeno porte, e os caminhões de carga, que representam um significativo consumo de combustível durante suas operações. Segundo a fabricante de máquinas pesadas Catterpillar (2017), para atingir níveis de eficiência deve-se essencialmente levar em conta a máxima redução de tempo ocioso de motores, a operação por profissionais bem treinados, a correta seleção da máquina, o uso de recentes recursos tecnológicos transmissores de dados e por último, as configurações nos locais de obra que aumentam a eficiência pela menor movimentação de partes das máquinas.

O combustível consumido pelas máquinas da construção civil será variável conforme a intensidade de uso de seus componentes nas atividades às quais se destinam. De acordo com Faria (2012), a medição para estimar o consumo de gasolina ou diesel das máquinas deve ser em hora trabalhada (l/h), e quando não existir essa informação por parte dos fabricantes, para o cálculo será necessário conhecer o consumo característico do tipo de motor, se a gasolina ou diesel, a potência nominal da máquina e a intensidade de uso equivalente a um “fator de potência” do equipamento, o qual será de 40%, 55% e 75% para as intensidades baixa, média e alta, respectivamente.



### 2.3 O BIM PARA ANÁLISES DE CONSTRUTIBILIDADE

As ferramentas de gestão, das quais praticamente não há como serem desassociadas de *softwares* e *hardwares*, progressivamente tendem a proporcionar alto grau de inteligência, na qual os gestores necessitam “saber ouvir e a consultar as máquinas”. Uma das maiores tendências está no *Big Data*, que consiste na enorme quantidade de informações que podem ser armazenadas em servidores e acessadas através da internet, e da análise adequada de grandes conjuntos de dados torna a resolução de problemas complexos passíveis de maior velocidade. Analogamente está o conjunto de informações geradas e mantidas durante todo o ciclo de vida de um edifício, correspondendo enfim ao *Building Information Modeling* – BIM, através do qual o processo torna-se integrado possibilitando a compreensão pormenorizada do empreendimento e harmonizando a visibilidade de todos os resultados.

A indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção – AEC é provida de novas tecnologias que gradativamente fortalecem a aplicação de BIM em empreendimentos. Cada vez mais, os desenhos, memoriais descritivos e listas de materiais são substituídos por modelos tridimensionais que utilizam objetos orientados carregados com informações que descrevem qualquer edifício em todos os seus detalhes (JOHANSSON *et al*, 2015). Do princípio de que todos os dados pertinentes a uma edificação estão disponíveis em seu modelo digital tridimensional, o BIM promove ainda mais o uso de visualizações instantâneas possibilitando trocas de informações entre todos os envolvidos diretos no projeto, construção e manutenção de um empreendimento (JOHANSSON *et al*, 2015).

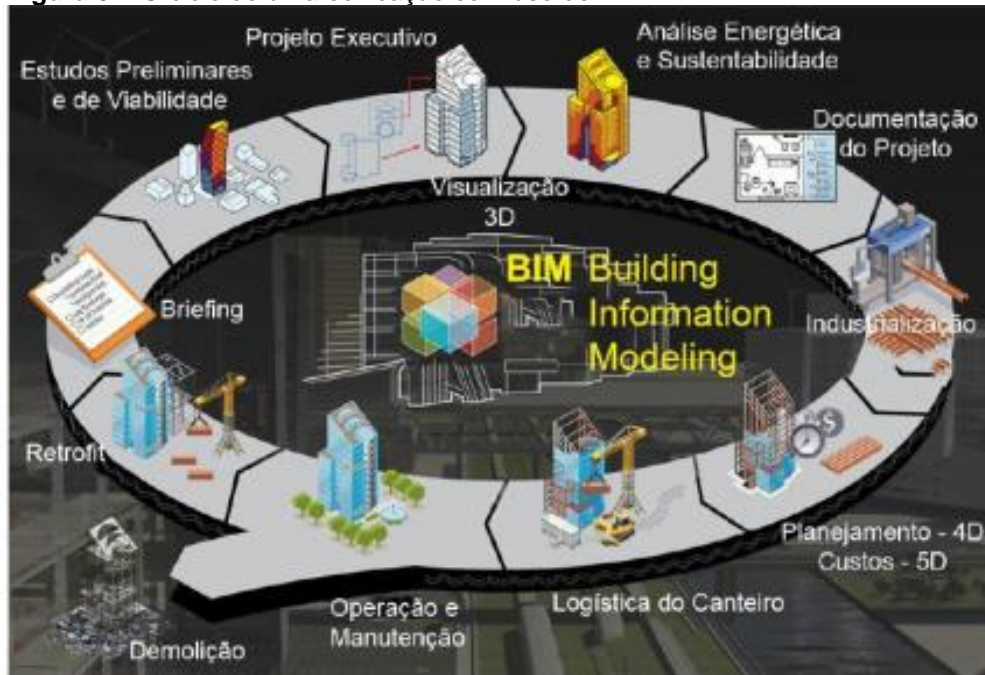
Ao se tratar de análise e planejamento de uma construção, Eastman *et al* (2014) citam dois tipos de tecnologias que evoluíram para tratar de deficiências relativas à compreensão de cronogramas de obra. Uma primeira trata-se do 4D, que pode ser definido como o modelo 3D concebido em uma linha de tempo, o que permite aos planejadores verificar visualmente a realização de atividades no contexto do espaço e do tempo, e um segundo enfoque que consiste em usar ferramentas de análise que incorporam componentes BIM e informações sobre métodos construtivos para otimização da sequência de atividades.

Os principais benefícios de modelos 4D são: a comunicação, em que os planejadores têm a vantagem de informar visualmente o processo construtivo

planejado, o que se torna muito mais eficaz do que a informação através de um tradicional diagrama de *Gantt*; a logística do canteiro, possibilitando administrar com uma menor margem de erros áreas e acessos estratégicos para o armazenamento de materiais e movimentação de equipamentos; e a coordenação de disciplinas, da qual os planejadores podem coordenar o fluxo esperado no tempo e espaço das disciplinas no canteiro.

Em linhas gerais, construtores dependem de uma perfeita compatibilização de projetos para que não ocorram imprevistos durante a execução de serviços em uma construção. Programas computacionais podem receber todos os projetos, podendo gerar inclusive visualizações em três dimensões passíveis de serem consultadas a qualquer momento dentro da obra através de um equipamento acessível como *tablet* (MENDONÇA; DAIBERT, 2014). Este é um grande diferencial do BIM, na formação de um processo totalmente colaborativo entre projetistas e construtores, no qual estes últimos podem perfeitamente contribuir com seus conhecimentos para o projeto (EASTMAN *et al*, 2014). Na figura 3 é demonstrado o modo como deve ocorrer o ciclo de vida de uma construção com uso de ferramentas BIM, podendo ser utilizado desde o *briefing* até estudos de *retrofit*, completando o ciclo de vida.

**Figura 3** – O ciclo de uma edificação com uso de BIM.



Fonte: adaptado de makeBIM (2017).

Na tabela 1 são apresentados alguns *softwares* BIM que apresentam tecnologia 4D, com comentários relativos às possibilidades oferecidas aos usuários pela interface de cada produto.

**Tabela 1** – Ferramentas BIM com capacidade para 4D.

<b>Produto</b>	<b>Comentários</b>
Bentley - Project Wise Navigator	Esta é uma aplicação independente que oferece uma série de serviços para: Importar múltiplos arquivos de projeto 2D e 3D a partir de muitas fontes (DWG, DGN, DWF, etc.) Revisar desenhos 2D e modelos 3D simultaneamente Seguir conexões entre arquivos de dados e componentes Revisar interferências
Autodesk - Revit Architecture	Revit é a única ferramenta BIM com algumas capacidades 4D embutidas para definição básica das fases 4D. Cada objeto do Revit inclui parâmetros para a definição dessas fases, o que permite a usuários atribuir uma “fase” a um objeto e então usar as propriedades de visualização do Revit para visualizar diferentes fases e criar instantâneos 4D. Entretanto, não é possível animar um modelo. Através da API, usuários podem conectar a aplicativos de cronograma e intercambiar dados com ferramentas como MS Project para automatizar a entrada de alguns dados 4D.
Graphisoft – VICO Constructor Simulation Module for ArchiCAD	O sistema para planejamento da construção “Virtual Construction 5D” consiste nos módulos Constructor, Estimating, Control e 5D Presenter. O modelo da edificação é desenvolvido no Constructor. Aos seus objetos são atribuídas composições que definem as tarefas e recursos necessários para sua construção ou fabricação. As quantidades e custos são calculados no Estimator, enquanto as atividades do cronograma são definidas e planejadas usando técnicas de linha de balanço no Control. Então, a simulação do 4D da construção é visualizada no Presenter. Como uma alternativa ao uso do Control, datas dos cronogramas podem ser importadas do Primavera ou do MS Project.

Fonte: Eastman *et al* (2014).

### 3 METODOLOGIA

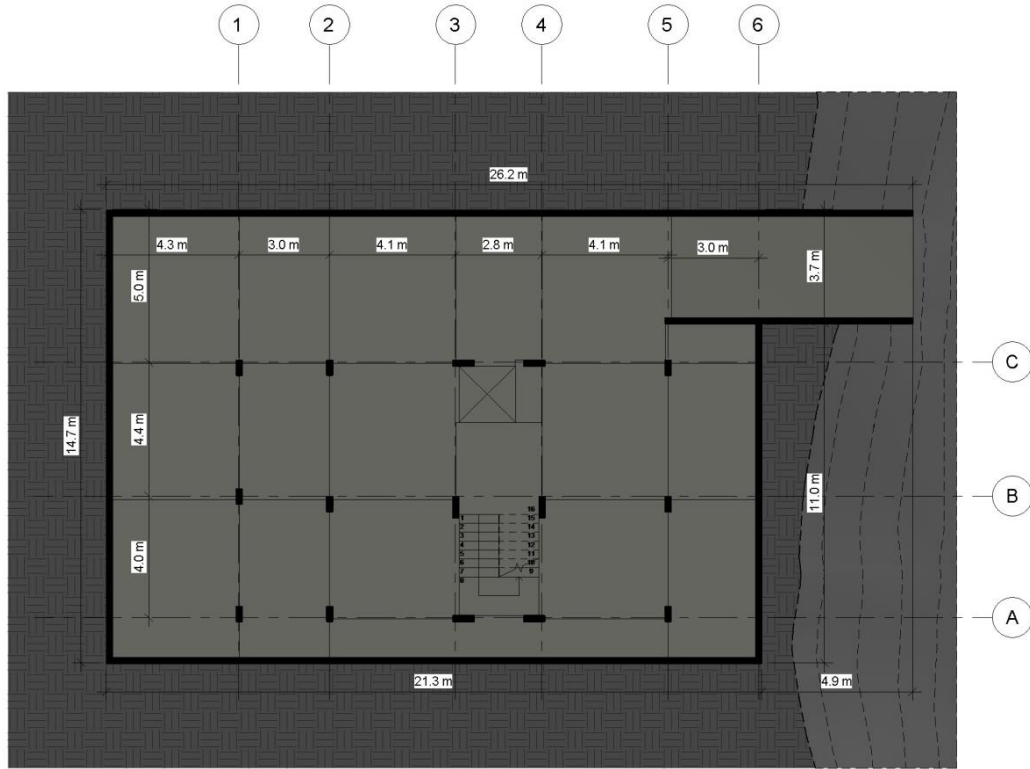
O desenvolvimento do trabalho foi procedeu em três etapas principais, descritas a seguir.

#### 3.1 ETAPA 1: PROPOSIÇÃO DE MODELO DE EDIFICAÇÃO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS

Para a avaliação do consumo energético de uma construção, foi considerado como objeto um modelo de edificação lançado no *software* BIM Autodesk Revit® (Fig. 4, 5 e 6). O edifício escolhido para o estudo de caso foi idealizado em consistência à tipologia residencial, constituído por estrutura de concreto armado, configurando-se arquitetonicamente em uma base composta por áreas de garagem e de entrada do conjunto condominial em dois níveis. O corpo do edifício se divide em oito pavimentos tipo contendo uma única unidade autônoma padrão de dois dormitórios, complementado pelos níveis finais destinados à casa de máquinas e reservatórios superiores de água. A escolha pela estrutura de concreto se fez por se tratar da tecnologia construtiva mais comumente adotada no país.

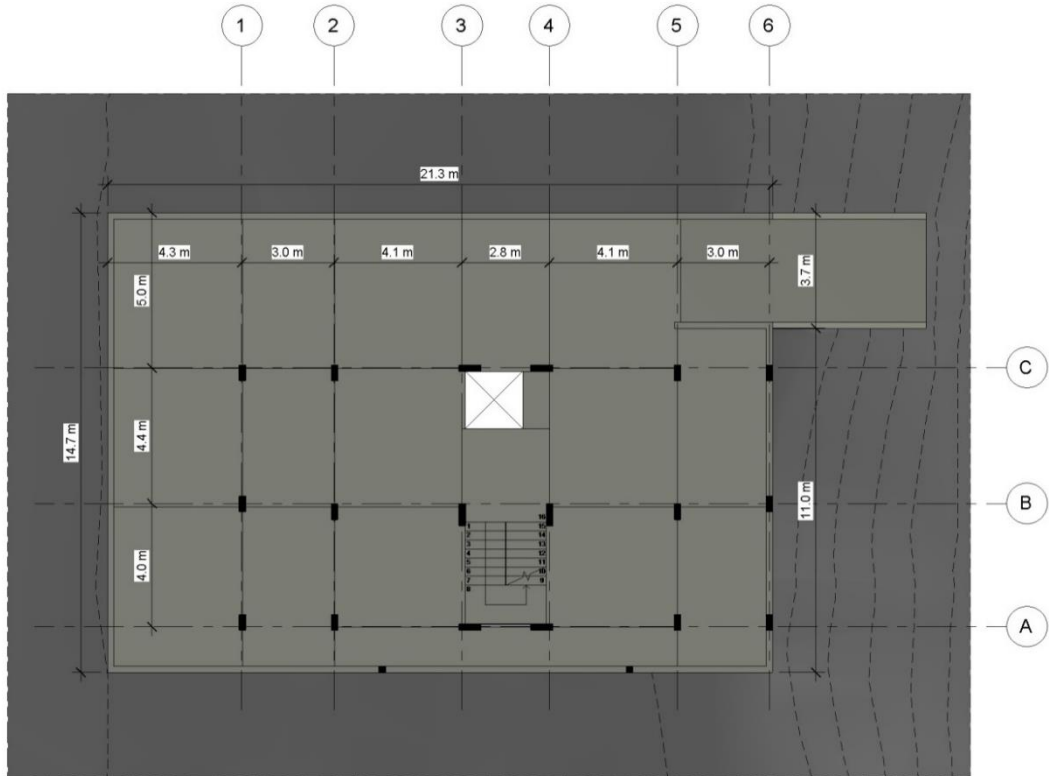
A base do edifício levou em conta um nível de subsolo com área de garagem de 311,72 m<sup>2</sup> e nível térreo apresentando hall de entrada com pequeno espaço aberto acrescentado por área para vagas extras de estacionamento em 473,36 m<sup>2</sup>. Ao longo de todo o corpo cada pavimento tipo apresenta dois apartamentos, perfazendo uma área de 167,80 m<sup>2</sup>.

**Figura 4** – Nível subsolo do edifício proposto no modelo.



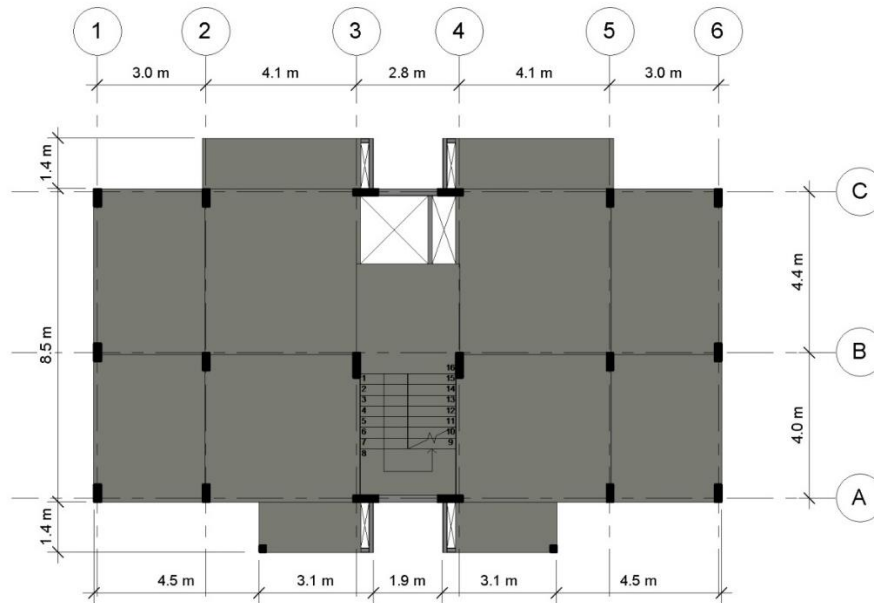
Fonte: o autor.

**Figura 5** – Nível térreo do edifício proposto no modelo.



Fonte: o autor.

**Figura 6** – Pavimento tipo do edifício proposto no modelo.



Fonte: o autor.

### 3.2 ETAPA 2: ELEIÇÃO DAS FASES MAIS ENERGO-INTENSIVAS COM BASE NO MODELO PROPOSTO

De conhecimento de que as fases mais energo-intensivas de uma obra desse porte correspondem às de terraplenagem e de execução de toda sua estrutura global de concreto armado, as demais etapas referentes à completa finalização da edificação não foram considerados pelo fato de que, comparadas às primeiras, representam um percentual mínimo na demanda energética para a realização dos trabalhos.

Assim, o estudo de planejamento considerou o tempo que um conjunto das principais máquinas para os trabalhos de terraplenagem, concretagem dos elementos estruturais e içamentos de materiais e peças, conforme suas respectivas potências levariam para completar os procedimentos de deslocamento e lançamento de materiais. A partir de então, foram estimadas as demandas energéticas dessas máquinas em função de suas capacidades de produção. Para isso, fez-se uso de planilhas compilando as informações mais pertinentes.

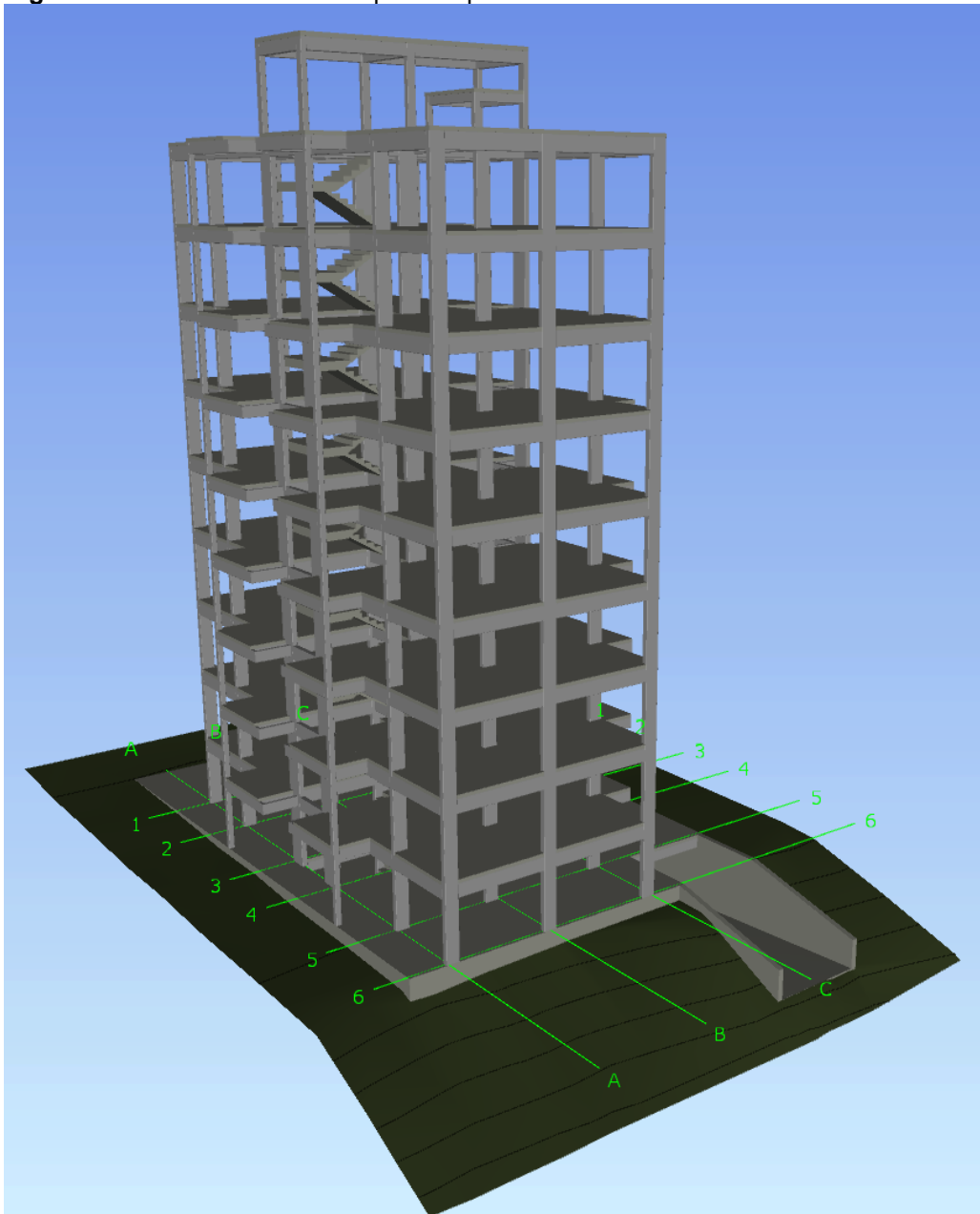
### 3.3 ETAPA 3: ELABORAÇÃO DA SIMULAÇÃO 4D – ANÁLISES DE CONSTRUTIBILIDADE

Nesta etapa, a partir da exportação do modelo para o *software* Autodesk Navisworks Manage®, procedeu-se à análise de como poderiam ser simuladas métodos e estratégias no processo de construção do edifício.

Por fim, para a análise de uma possível redução energética, foram simuladas situações alternativas que envolveriam meios de produção que pudessem ser substituídos e o quanto refletiriam no tempo de execução parcial da obra. Em conjunto com os dados obtidos pela manipulação do modelo no Navisworks (Fig.7), para os cálculos de eficiência foram desenvolvidas em uma planilha em Excel® nas quais foram consideradas para todos os resultados.

A planilha mencionada anteriormente foi elaborada através da inserção de dados obtidos pelos quantitativos gerados pelos *softwares*, juntamente com os dados levantados por uma pesquisa dos principais equipamentos pesados utilizados na indústria da construção civil, conforme descrito no capítulo seguinte. Os valores resultantes nesta planilha têm como finalidade demonstrar, de modo aproximado, o consumo energético, determinado pelo tempo de funcionamento de cada máquina, presente em cada uma das principais fases durante o desenvolvimento da obra simulada.

**Figura 7** – Modelo do edifício exportado para o Navisworks.



Fonte: o autor.

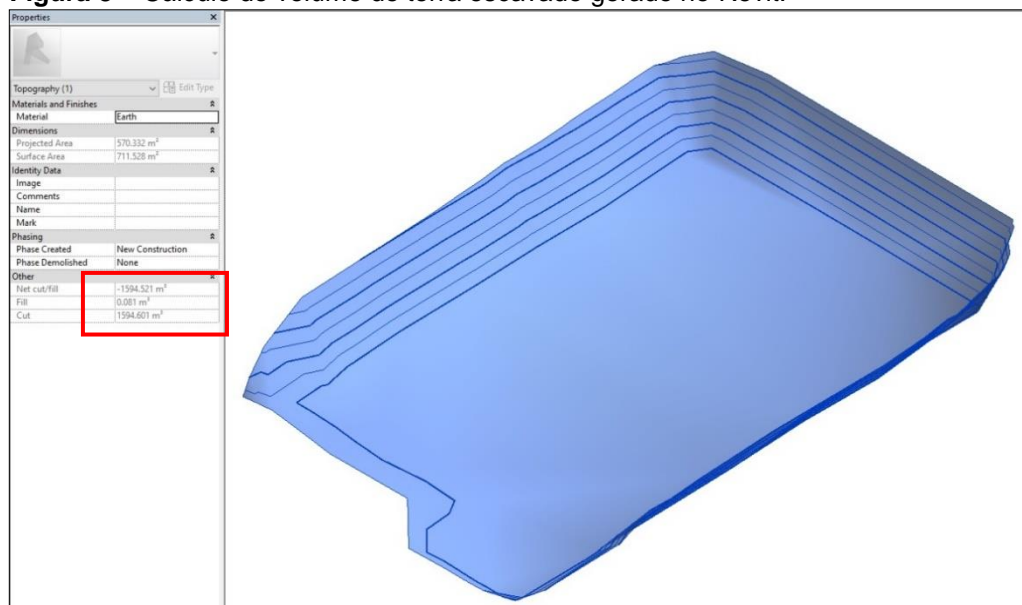


## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISE DO MODELO – LEVANTAMENTO DOS SERVIÇOS DE MOVIMENTAÇÃO DE TERRA

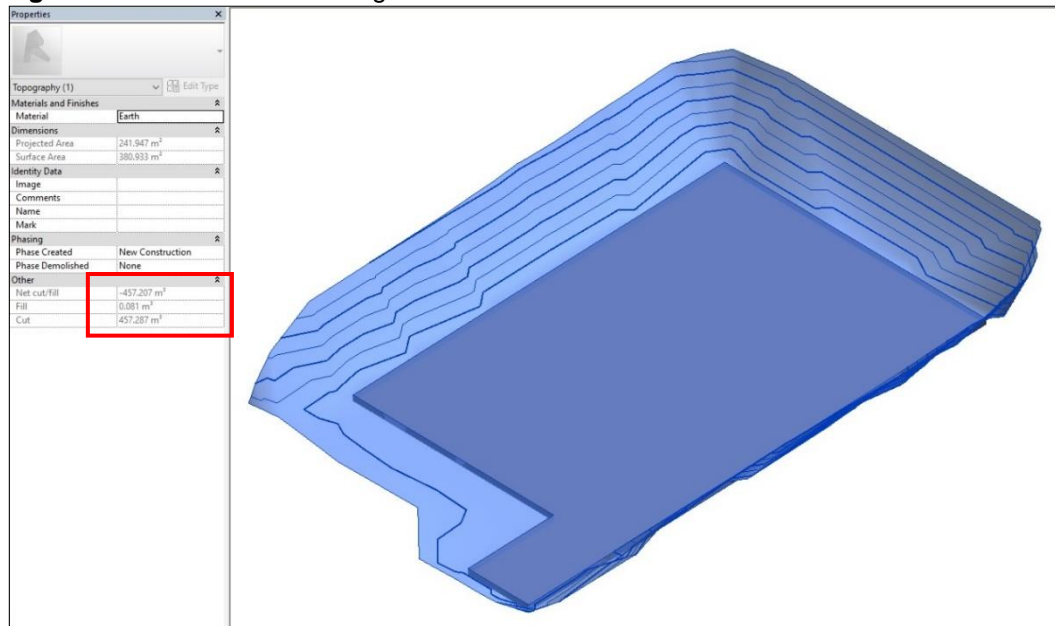
A edificação arbitrada no modelo digital foi basicamente modelada a partir da inserção de objetos orientados contendo todas as propriedades específicas do material de construção concreto armado. Logo, o *software* automaticamente gera todo um quantitativo referente ao volume de concreto e peso de aço, decorrente das geometrias e taxas de armação dos elementos construtivos: estacas e blocos de fundação, cortinas de contenção, pilares e vigas, lajes e escadas. Pelo fato de o modelo apresentar a proposta de um nível subsolo, também foi levantado o volume aproximado de escavação em praticamente quase todo o terreno, sendo este dado calculado pela diferença da topografia inicialmente lançada pela configuração ideal de escavação para fins de exequibilidade de todas as fundações e demais elementos pertencentes ao respectivo nível. Essa escavação foi resultante de diversos pontos inseridos entorno da área de projeção da base do edifício de modo a atingir o nível equivalente à cota final das estacas, considerada para fins de viabilidade do lançamento de todas as fundações. O volume de escavação correspondeu a 1.594,60 m<sup>3</sup> sendo 457,30 m<sup>3</sup> (Fig.8 e 9) de posterior aterro dos elementos estruturais do nível de subsolo.

**Figura 8** – Cálculo do volume de terra escavado gerado no Revit.



Fonte: o autor.

**Figura 9** – Cálculo do reaterro gerado no Revit.



Fonte: o autor.

Com os dados obtidos parte-se para o um levantamento de todos os recursos que serão necessários durante as fases da construção que compreendem os serviços iniciais e finais de terraplenagem assim como a completa execução estrutural em concreto armado. Verificado o volume total em movimentação de terra tendo em vista o atendimento rigoroso ao projeto, indiscutivelmente, podendo-se assim dizer, é descartada qualquer hipótese de somente empregar trabalhos manuais de escavação e aterro, pois a partir de 50 m<sup>3</sup> devem ser adotados processos mecânicos (YAZIGI, 2009). Do conhecimento das principais máquinas utilizadas em serviços de terraplenagem as quais consistem em escavadeiras de médio e grande porte, retroescavadeiras com pá carregadora e pás carregadeiras de pequeno e médio porte, decisões de planejamento devem levar em consideração as capacidades que cada máquina apresenta para obtenção de rendimento e conseqüentemente, velocidade de execução nos serviços de movimentação de terra.

#### 4.2 ANÁLISE DO MODELO – LEVANTAMENTO DO VOLUME DE CONCRETO

Todo o quantitativo indicativo ao volume de concreto da edificação foi transferido para a tabela a seguir (Tab.2), discriminado por níveis e respectivos elementos construtivos. Observação importante deve ser feita com relação à tecnologia para concepção das lajes de entrepiso, na qual muito dificilmente

engenheiros, arquitetos e construtores optam por um sistema convencional de laje maciça de concreto armado, sendo que para a grande maioria dos casos são adotados sistemas de pré-lajes fabricadas e transportadas ao local da obra. Assim, para o quantitativo extraído, foram apenas ratificados os volumes pertinentes à capa de solidarização para todas as lajes. Além das quantidades de concreto detalhados por cada nível e respectivos elementos estruturais, também foi inserido nesta tabela os dados referentes aos volumes de escavação e aterro totais necessárias para a obra.

**Tabela 2** – Volumes de concreto para a estrutura de toda a edificação.

<b>Nível</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>Elemento construtivo</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>
Fundações	-3,25	Estaca hélice contínua	135,70
		Bloco de coroamento	12,60
		Viga baldrame	7,43
Subsolo	-2,80	Contrapiso	52,18
		Cortina	51,22
		Pilar	9,33
		Escada	0,39
Térreo	0,00	Viga	10,39
		Laje de piso	26,53
		Pilar	5,92
		Escada	0,39
Pav. Tipo	2,80 a 22,40	Viga	77,52
		Pilar	47,36
		Escada	3,12
Casa de Máquinas	25,20	Viga	9,99
		Laje de piso	0,78
		Pilar	1,20
Reservatório	28,20	Viga	1,83
		Laje de piso	3,83
<b>Total</b>			<b>457,71</b>

Fonte: o autor.

#### 4.3 LEVANTAMENTO DE MAQUINÁRIO

Tendo como base especificações fornecidas pelos principais fabricantes de máquinas de médio e grande porte, tais como Caterpillar®, John Deere® e New Holland®, voltadas para soluções pesadas de indústrias como a da construção civil, pode se proceder a um estudo com o objetivo de balizar a escolha pela solução mecânica que melhor atender. Logo, as seguintes especificações foram encontradas para retroscavadeiras: potências bruta e líquida de 106 kW e 96 kW, com profundidade máxima de escavação de 5,20 m com capacidade da concha de 0,28 m<sup>3</sup> e altura da carregadeira de 4,40 m com capacidade para até 1,34 m<sup>3</sup>;

escavadeiras de médio porte: potências bruta e líquida de 122 kW e 120kW e profundidade máxima de escavação de 6,70 m com capacidade da concha de 1,19 m<sup>3</sup>; escavadeiras de grande porte: potências bruta e líquida de 322 kW e 311 kW e profundidade máxima de escavação de 7,70 m com capacidade de concha de 3,10 m<sup>3</sup>; e pás carregadeiras: potência líquida de 170 kW e altura da carregadeira de 1,40 m com capacidade da carregadeira de 3,20 m<sup>3</sup>.

Após a conclusão da maior parte dos trabalhos de escavação, o início da concepção das fundações requer o terreno em condições para a operação das máquinas de perfuração e na cota determinada por projeto. Para isso, motoniveladoras de baixa capacidade usadas para a regularização de superfícies do solo tem em potência 138 kW com largura de lâmina de 3,70 metros para 0,60 metros de altura de escarificação.

Em se tratando de fundações profundas, a escolha pelo tipo de estaca a ser executada, influenciará diretamente no maquinário que o construtor precisará implementar na obra e para tanto, deverá ser previsto se o canteiro apresentará condições para a entrada de tais máquinas. Também se ressalta que a escolha pelo tipo de fundação, desde que respeitadas todas as cargas incidentes e características do solo, são definidas pela velocidade de execução. A viabilidade técnica para concepção de estacas possibilita diferentes tipos, dentre as quais as estacas de concreto moldadas *in loco* estão entre as mais adotadas, sendo do tipo Broca, Strauss, Franki, escavada com trado helicoidal, hélice contínua e raiz, também existindo a opção por estacas pré-fabricadas como é o caso de estacas de aço e de concreto armado protendido (REBELLO, 2008).

O maquinário empregado para a execução de estacas moldadas *in loco* dependerá, portanto, da escolha pela tecnologia que melhor for aceita e de concordância pelas partes do projetista e construtor. Considerando o porte da edificação do modelo proposto, as características de solo muitas vezes encontradas pelas verificações de sondagem geotécnica e os coeficientes de segurança fixados por normas, implica que na maioria dos casos as estacas do tipo Broca e Strauss são descartadas, restringindo-se então as do tipo Franki, helicoidal, hélice contínua e raiz. Logo, a escavação no solo é feita por meio de hastes helicoidais incorporados a veículos sobre esteiras, as denominadas perfuratrizes, que de acordo com dados de referência da também fabricante de máquinas pesadas Liebherr®, perfuratrizes com capacidade para escavação de furos com profundidades entre 15 e 17 metros,

o qual equivaleria para o modelo em estudo, apresentam potências em torno de 390 kW.

Trabalhos posteriores de fundações de modo a completar todos os elementos de infraestrutura do edifício, implicam no arrasamento das estacas de modo a receberem os blocos de coroamento. Partindo para a superestrutura, muitos serviços são realizados manualmente, como é o caso da montagem de fôrmas e corte e dobragem de fios, barras e vergalhões para a moldagem de todos os elementos estruturais de concreto armado. Além dos serviços manuais, indispensavelmente ainda devem ser incluídos o apoio de outros equipamentos e veículos. No entanto, esses se limitam a máquinas mais leves e de menor porte, como caminhões betoneira, caminhões munidos de bomba e lança articulada para lançamento de concreto em altura, caminhões *munck* e de transporte geral de materiais. Por fim, estima-se também o uso de pequenas unidades locais para preparo de pequenos volumes de concreto, como é o caso de betoneiras alimentadas por energia elétrica.

Caminhões betoneira, dentro dos modelos mais comumente usados, apresentam capacidades para o transporte de concreto sob agitação, em torno de 9 m<sup>3</sup>, podendo-se assumir esse valor como máximo que um caminhão pode transportar ao canteiro de obra da usina. Quando da necessidade de concreto bombeado e não convencional, em que este é lançado apenas por gravidade, bombas estacionárias para concreto conforme capacidade de vazão, apresentam diferentes potências nominais como, por exemplo, para uma vazão de 71m<sup>3</sup>/h e de 135 m<sup>3</sup>/h correspondem respectivamente a potências de 95 kW e 145 kW. Em situações de concreto bombeado em altura, como nos casos típicos de concretagem de pilares, vigas e lajes de múltiplos pavimentos, implicará na operação dos caminhões equipados com bomba e lança. De acordo com especificações da Liebherr®, diferentes modelos contêm lanças com alcances que vão de 23 a 49 metros em dimensão vertical e de 20 a 45 metros em dimensão horizontal.

De posse de todos os dados levantados, relativos aos quantitativos gerados pelo modelo da construção e de valores unitários de produção das máquinas, através da planilha (Tab.3) foi realizado um estudo inicial com o objetivo de se obter a demanda total, em número de horas, que viria a ser necessária para o erguimento da edificação em toda a sua volumetria. Ressaltando que neste estudo foi ponderado o emprego de máquinas, das quais sem suas implementações no

canteiro de obra, desencadearia em uma construção de elevada dificuldade técnica e com extenso cronograma, o que jamais pode ser aceito por parte de qualquer profissional da área de construção civil como também não é aceito pelas práticas da sociedade como um todo, por sua inexecuibilidade.

**Tabela 3** – Quantitativo de horas de uso de equipamentos por atividade.

Nível	Atividade	Recurso (Equipamento)	Potência (kW)	Nº horas / equipamento
Terreno	Escavação	Escavadeira hidráulica	311,0	43,00
	Reaterro	Pá carregadeira	170,0	12,00
Fundações	Estaca hélice contínua 15 metros	Perfuratriz	390,0	22,00
		Caminhão betoneira	250,0	15,00
		Bomba	95,0	2,00
	Bloco de coroamento	Caminhão betoneira	250,0	2,00
Subsolo	Viga baldrame	Caminhão betoneira	250,0	1,00
		Contrapiso	Caminhão betoneira	250,0
	Cortina	Bomba	95,0	1,00
		Caminhão betoneira	250,0	6,00
	Pilar	Caminhão betoneira	250,0	1,00
		Bomba	95,0	0,15
Térreo	Viga	Caminhão betoneira	250,0	2,00
		Bomba	95,0	0,15
	Laje	Caminhão betoneira	250,0	3,00
		Bomba	95,0	0,50
	Pilar	Caminhão betoneira	250,0	1,00
		Bomba	95,0	0,10
Pav. Tipo	Viga	Caminhão betoneira	250,0	9,00
		Caminhão lança	250,0	9,00
		Bomba	95,0	1,00
	Pilar	Caminhão betoneira	250,0	6,00
		Caminhão lança	250,0	6,00
		Bomba	95,0	1,00
Casa de Máq.	Viga	Caminhão betoneira	250,0	2,00
		Caminhão lança	250,0	2,00
		Bomba	95,0	0,15
	Pilar	Caminhão betoneira	250,0	1,00
		Caminhão lança	250,0	1,00
		Bomba	95,0	0,05
Reservatório	Viga	Caminhão betoneira	250,0	1,00
		Caminhão lança	250,0	1,00
		Bomba	95,0	0,05
	Laje	Caminhão betoneira	250,0	1,00
		Caminhão lança	250,0	1,00
		Bomba	95,0	0,05
<b>Total (Nº horas)</b>				<b>161,20</b>

Fonte: o autor.

Na tabela 3, foi desconsiderado qualquer emprego de maquinário no que tange à execução de todos os lances de escada do edifício e da laje pertencente ao nível da casa de máquinas. Isso pelo fato de se tratarem de elementos construtivos

de área e volume bastante reduzidos e dos quais a confecção pode perfeitamente se dar por técnicas manuais.

Ainda com relação à tabela 3, o fato de ter sido estimada a demanda de caminhão betoneira para praticamente todos os elementos da edificação, seria consequente de uma opção de planejamento em que todo o volume de concreto exigido pelo projeto viria de centrais de usinagem. Estimou-se o uso de caminhão munido de lança e bomba, para que a aplicação de concreto fosse viabilizada diretamente do caminhão betoneira aos elementos a serem moldados ao longo de todos os pavimentos a partir do nível térreo.

Salienta-se o fato de que todas essas são alternativas de modo a proporcionar menor tempo de execução para determinadas atividades da obra, devendo sempre ser avaliado pelos construtores se, para o cumprimento de um prazo estipulado para o erguimento de todo o edifício, há compensações financeiras na requisição por tais métodos.

#### 4.4 LEVANTAMENTO DO CONSUMO ENERGÉTICO

Com base em grades estatísticas anualmente atualizadas, relativas às taxas de produtividade para cada tipo ou grupo de atividades características na construção civil como, por exemplo, a Tabela de Composição de Preços para Orçamentos – TCPO, uma das mais utilizadas fontes de dados para a definição de prazos em obras, são estimados subtotais de horas para o uso de cada máquina.

Com base nas potências médias dos equipamentos e das exigências de intensidade de aplicação de seus mecanismos para o desenvolvimento das atividades, são determinados os “fatores de potência” que neste caso consistem nos seguintes: escavadeira – alta intensidade; carregadeira – média intensidade; retroescavadeira – baixa intensidade; motoniveladora – média intensidade; perfuratriz – alta intensidade; bomba para concreto – alta intensidade e; caminhão betoneira – média intensidade.

Assim, foi constituída a tabela 4 na qual são discriminados os consumos energéticos por cada máquina e por cada etapa da construção atingindo toda a volumetria. Do fato de que o funcionamento de todo o maquinário relacionado é alimentado por motores a diesel, e que 1 litro de óleo diesel equivale a 35,86 MJ ou 9,96 kWh de energia, o valor energético total foi então resultante dos produtos do

número de horas pelos respectivos estimados consumos de combustível dos equipamentos.

**Tabela 4** – Demanda energética final por equipamento por etapa da obra.

<b>Nível</b>	<b>Recurso (Equip.)</b>	<b>Consumo total de óleo Diesel (L)</b>	<b>Valor energético (kW.h)</b>
Terreno	Escavadeira hidráulica	1.000,60	9.966,40
	Pá carregadeira	80,90	805,96
Fundações	Perfuratriz	643,50	6.409,25
	Caminhão betoneira	180,00	1.792,80
	Bomba	10,45	104,10
Subsolo	Caminhão betoneira	130,00	1.294,80
	Bomba	13,10	130,45
Térreo	Caminhão betoneira	60,00	597,60
	Bomba	4,65	46,30
Pav. Tipo	Caminhão betoneira	150,00	1.494,00
	Caminhão lança	206,25	2.054,25
	Bomba	21,75	216,60
Casa de Máq.	Caminhão betoneira	30,00	298,80
	Caminhão lança	41,25	410,85
	Bomba	2,18	21,66
Reservatório	Caminhão betoneira	20,00	199,20
	Caminhão lança	27,50	273,90
	Bomba	1,09	10,83
<b>Total</b>		<b>2.623,31</b>	<b>26.128,20</b>

Fonte: o autor.

Pode-se ilustrar até o presente momento, evidenciado pelos dados obtidos nos levantamentos dos volumes de movimentação de terra, do material concreto para a confecção dos elementos estruturais, e dos recursos em máquinas necessários, a demanda energética total estimada pelo que seria a construção real do modelo da edificação proposta.

De forma a ilustrar esta demanda nas etapas que mais impactam nos custos energéticos da construção, é necessário simular o sequenciamento operacional do processo de construção pelo modelo digital com a utilização das ferramentas BIM. Proporcionando a capacidade de auxiliar na tomada de decisões entre projetistas e construtores, a fim de avaliar futuras alternativas com o intuito de minimizar os recursos necessários a uma construção similar ao modelo proposto, reduzindo procedimentos não eficientes.

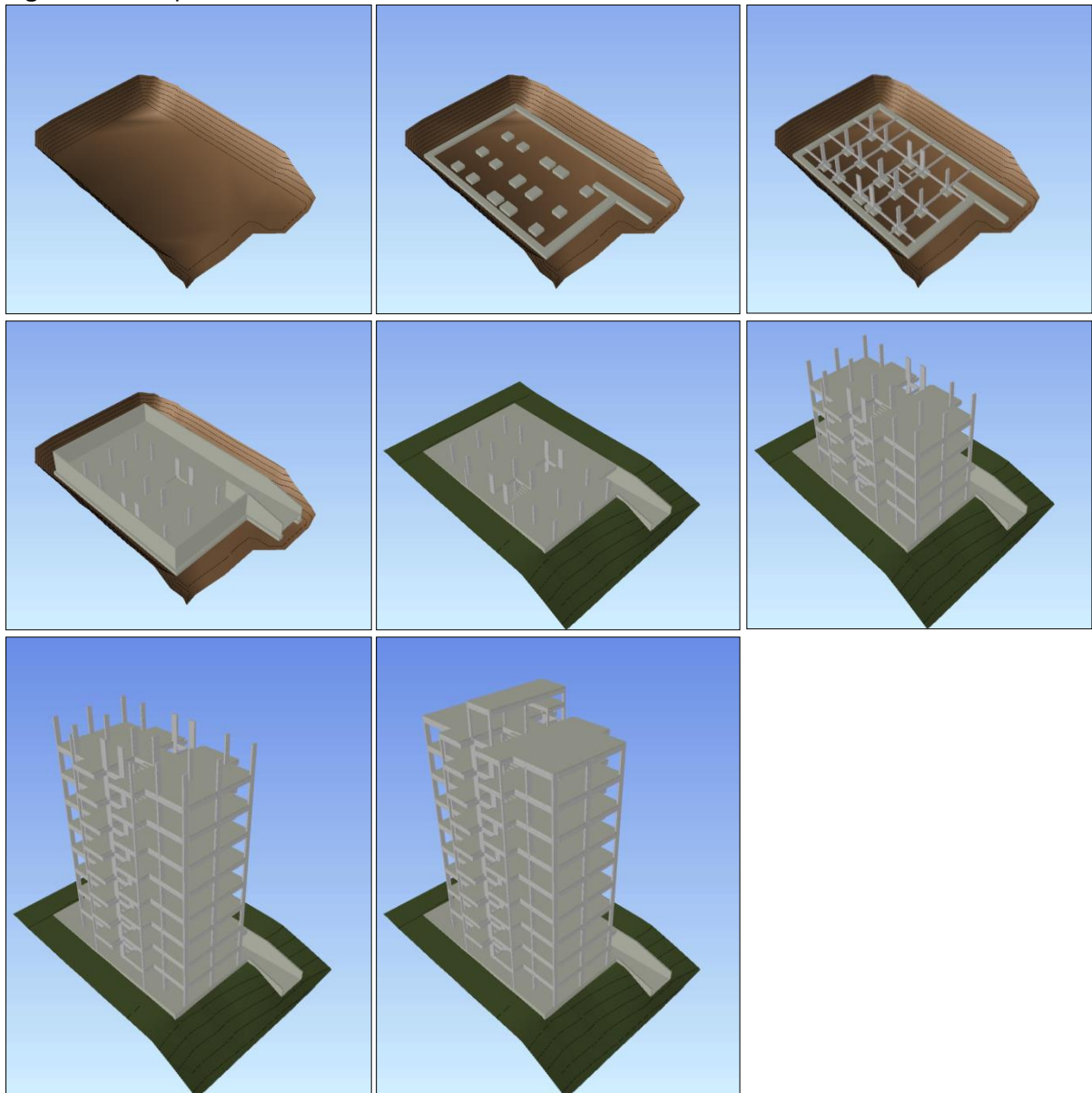
#### 4.5 PROCESSOS DE EFICIÊNCIA E PLANEJAMENTO 4D

Configurando o modelo digital para um sequenciamento da construção de



acordo com um planejamento macro, sem ter passado por estudos mais detalhados de operacionalização das diferentes etapas da obra, a simulação 4D da edificação, considerados os recursos de equipamentos constantes na tabela 3, estaria ilustrada conforme a figura 10 a seguir (da esquerda para a direita e de cima para baixo). O gráfico 1 em seguida, representa a energia consumida para cada uma dessas etapas.

**Figura 10** – Sequência construtiva do modelo elaborada em Navisworks.



Fonte: o autor.

Partindo para o desenvolvimento de planos de construção do edifício e com vistas a obter processos mais eficientes no emprego das máquinas, estudos devem representar um sequenciamento lógico no qual determinados procedimentos

operacionais venham a proporcionar aplicações de forças por parte dos serviços mecanizados em menor intensidade. Como exemplos estariam estudos que pudessem viabilizar a execução dos elementos estruturais enterrados reduzindo ao máximo os volumes de escavação, e também o aproveitamento de níveis superiores a esses elementos em que as atividades de montagem de fôrmas e armaduras assim como de posterior concretagem, viessem a ser favorecidas pela gravidade e, portanto, dispensado o uso de bombas. Obviamente que processos em que há menor uso de maquinário acaba resultando em elevação dos intervalos de tempo na efetivação dos serviços, porém deve-se, contudo, obter números comparativos que indiquem em válidas vantagens na compensação do acréscimo de horas de construção em prol na economia dos custos energéticos, e com isso alcançando a melhor relação que represente a eficiência aplicada aos processos produtivos.

**Gráfico1** – Consumo energético por etapa da obra a partir de levantamentos sem um planejamento 4D detalhado.



Fonte: o autor.

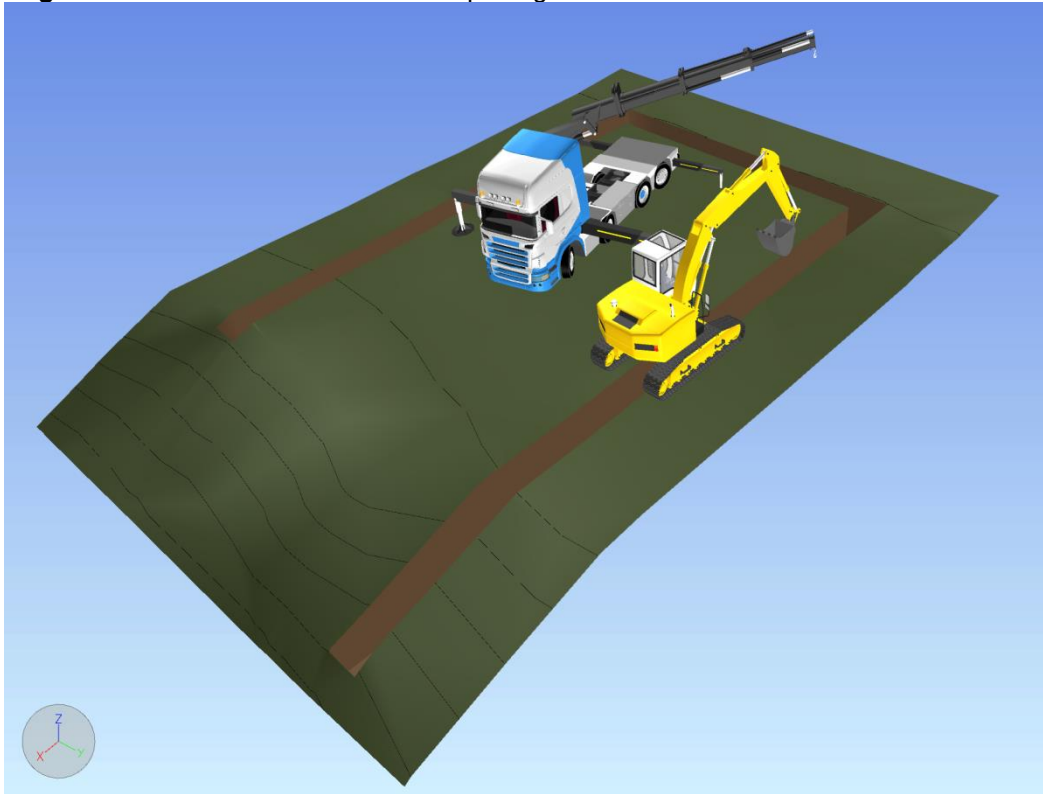
Pela análise da tabela 4 nota-se que os equipamentos destinados aos serviços de movimentação de terra correspondem a 41% de toda a demanda energética referente à completude da obra. Obviamente que o fato de o projeto exigir a concepção de um nível enterrado reflete diretamente nesse valor de grande impacto, devendo assim o planejamento dos serviços de terraplenagem prever alternativas para a redução desse custo energético. Em se tratando dos serviços de movimentação de terra, há a escavação de grandes volumes que envolve o

deslocamento de um volume substancial de material na qual a profundidade e extensões horizontais são consideráveis, enquanto que a escavação estrutural é outro tipo de atividade em que é realizada para servir de suporte à execução de outros elementos estruturais, sendo geralmente feito em uma área confinada podendo os taludes exigirem sistemas de contenção (PEURIFOY *et al*, 2016).

Do conhecimento de que as atividades de terraplenagem se constituem em uma alta parcela do consumo energético, o planejamento da construção inicia-se então com estudos de modo a se verificar a substituição de escavação única do inteiro volume de 1.594,60 m<sup>3</sup> para a concepção de todo o nível subsolo do projeto, por sucessivas escavações de volumes restritos à confecção das estruturas parciais. Com base na norma NBR 9061:1985, que trata dos procedimentos para escavações a céu aberto, tem-se que aberturas de valas no terreno são possíveis desde que prevista a estabilidade de taludes ou a proteção das paredes da escavação por um sistema de escoramentos, sendo que uma classe mista compreende de um lado paredes em talude e do lado oposto uma parede com escoras. Analisando o modelo, conforme sequência construtiva apresentada na figura 10, tem-se que a cortina de fundo da edificação juntamente com as duas cortinas adjacentes, compõem praticamente quase a totalidade da área de subsolo e logo, para a execução destas, seriam iniciados os trabalhos de escavação com a adoção da classe mista tendo a formação de três valas até ao nível -3,75 m correspondente à cota de assentamento das fundações.

A estratégia na idealização de início das escavações pela abertura de valas estaria em uma maior limitação de uso das escavadeiras hidráulicas uma vez que o perímetro externo formado pelas três cortinas constituir-se-iam nas laterais que receberiam o escoramento, enquanto que ao longo do perímetro interno seriam gerados taludes (Fig. 11).

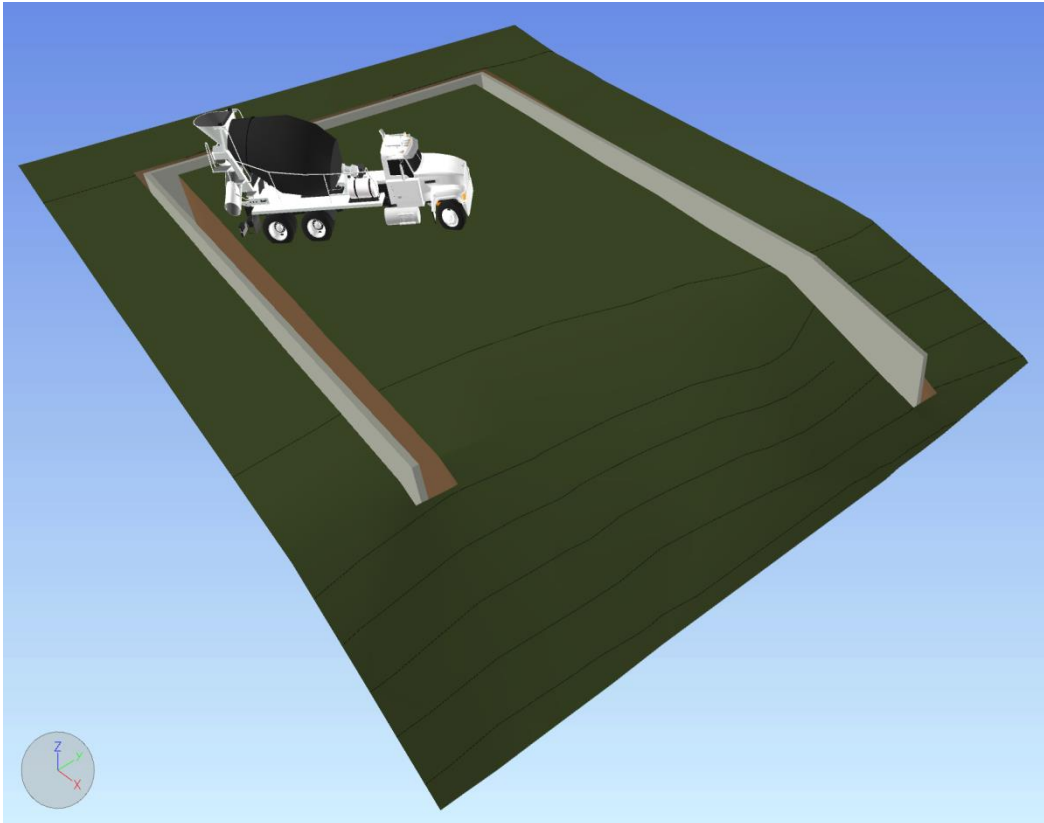
**Figura 11** – Trabalhos iniciais de terraplenagem.



Fonte: o autor.

As vantagens desse processo inicial seriam: inexistência de reaterros, pois os escoramentos pelo lado externo das paredes das valas serviriam já como pré-formas das cortinas, enquanto que pelo lado interno seriam formados taludes, os quais facilitariam na posterior continuidade de escavação para a conformação da área de subsolo; dispensa no emprego de retroescavadeiras ou pás carregadeiras pela inexistência de reaterros; dispensa na aplicação de concreto bombeado pela possibilidade da aproximação de caminhão betoneira ao longo do perímetro externo das valas para o lançamento de concreto por modo convencional (Fig. 12). A desvantagem encontrada viria a ser a demanda de horas no uso de caminhão *munck* para a colocação das escoras nas valas. O volume escavado nessa etapa seria de apenas 269,50 m<sup>3</sup>.

**Figura 12** – Execução dos primeiros elementos estruturais pelo lançamento de concreto convencional.



Fonte: o autor.

Com a finalização dos primeiros elementos estruturais, constituídos por essas três cortinas do nível subsolo, em conseqüente haveria a escavação da área delimitada pelas estruturas até a cota -2,80 m, o que equivaleria no volume de 1.025,35 m<sup>3</sup>. Da conclusão de todo o corte, ocorreria a entrada de motoniveladora para a conformação do terreno e posteriormente, a entrada de máquina perfuratriz para a execução das 72 estacas hélice contínua, sendo que os procedimentos para escavação da área necessária para a montagem de formas e armaduras dos blocos de coroamento como de arrasamento das estacas, são de práticas manuais.

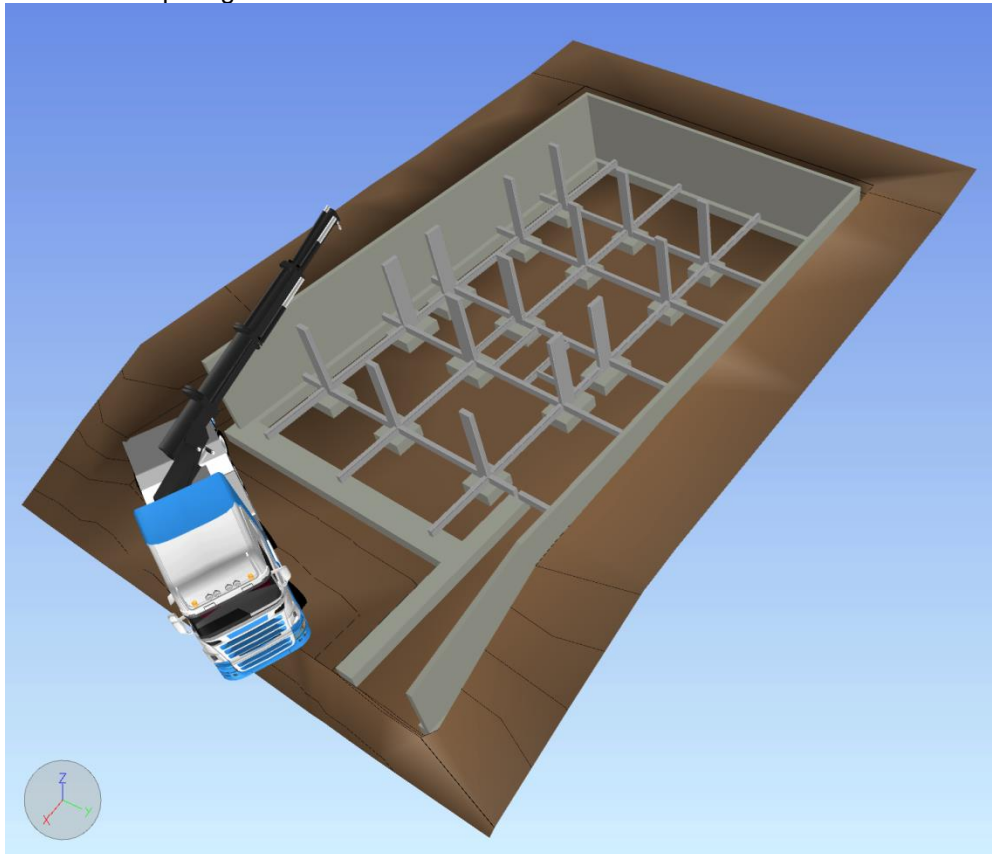
Para a confecção das vigas de baldrame, no entanto, pode-se ponderar o uso de retroescavadeira na abertura das valas, e a concretagem dos elementos da fundação, com exceção das estacas, nas quais o concreto é lançado pelo próprio equipamento perfuratriz quando do tipo hélice contínua, também apresenta a completa viabilidade por método convencional com o deslocamento de caminhão betoneira.

A etapa seguinte da obra viria a ser o arranque de pilares sobre os blocos de fundação, anteriormente à confecção das duas últimas cortinas de contenção com o

objetivo de assim facilitar a entrada de materiais e equipamentos à área. Após a montagem de fôrmas e armaduras dos pilares, o bombeamento de concreto viria a ser substituído pelo lançamento com o auxílio de balde suspenso por guindaste, que no caso, envolveria a operação de um caminhão *munck* (Fig. 13), equipamento este com potência em torno de 215 kW e capacidades de carga na faixa de 20 toneladas. Liberada a área para a execução das duas últimas cortinas do nível subsolo, a concretagem no caso destas, indispensavelmente seria realizada com o uso de bomba pelo fato de que não existiria área aterrada para aproximação de caminhão betoneira a nível superior, como proposto na execução das três primeiras cortinas.

Na conclusão das cortinas restaria o reaterro dessas com uso de pá carregadeira e por fim, conformando a configuração final de projeto do terreno entorno da base da edificação e finalizando o nível subsolo com a aplicação de concreto bombeado para composição de seu contrapiso. Com isso, o volume de reaterro se restringiria a apenas 92,00 m<sup>3</sup>, incluído o percentual de empolamento previsto.

**Figura 13** – Concretagem dos pilares do nível subsolo através de balde suspenso pelo guindaste de um caminhão *munck*.

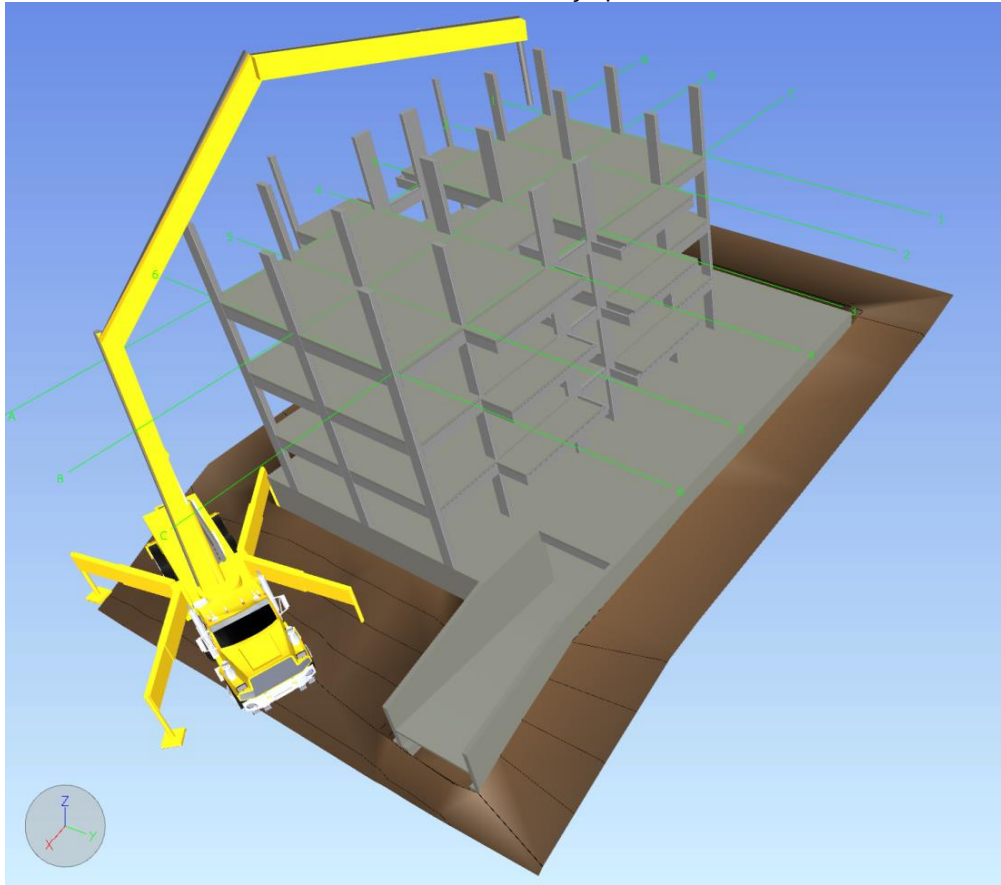


Fonte: o autor.

Iniciando os trabalhos para construção do nível térreo, haveria todo um período de tempo destinado à montagem de fôrmas e armações das lajes e vigas deste nível, em que todos os elementos poderiam perfeitamente receber o concreto de forma a efetuar uma moldagem conjunta. Logo, a situação imprescindivelmente requeria o emprego de lançamento de concreto bombeado visto que pela extensa área não haveria condições técnicas de exequibilidade por método convencional e sendo assim, o consumo energético para o trabalho de caminhões e bombas a princípio não sofreria alterações da previsão original. À medida que lajes e vigas progressivamente venham a ser consolidadas pela cura do concreto, seria dado início aos serviços de fôrmas e armaduras nos pilares do nível térreo, podendo a moldagem destes ocorrer também com o auxílio de balde suspenso pelo guindaste de caminhão *munck*, já que a circulação do equipamento no entorno da base do edifício possibilitaria a operação.

Da partida nos níveis correspondentes aos 08 pavimentos tipo da edificação, a impossibilidade técnica pela adoção de estratégias para a redução de maquinário e da conseqüente demanda energética, surge pela razão de que na concepção de níveis gradativamente superiores às cotas do terreno, impõem o uso de bombas, e inclusive, de caminhão munido de lança para a aplicação do concreto (Fig. 14). Não havendo então mínimas alternativas em promover a eficiência energética dos processos. Alcançando a estrutura global do edifício o nível 25,20 m, no qual consiste a laje de cobertura e sobre o mesmo também, uma pequena área destinada no projeto, para a casa de máquinas, a instalação de um elevador de carga externo teria nesta etapa da obra sua completa vantagem, pois proporcionaria o transporte de equipamentos e materiais àquele nível, além de, obviamente, ser uma demanda em obras de edificações de múltiplos pavimentos.

**Figura 14** – Execução dos elementos estruturais pertencentes aos pavimentos tipo através de caminhão munido de lança para o concreto bombeado.

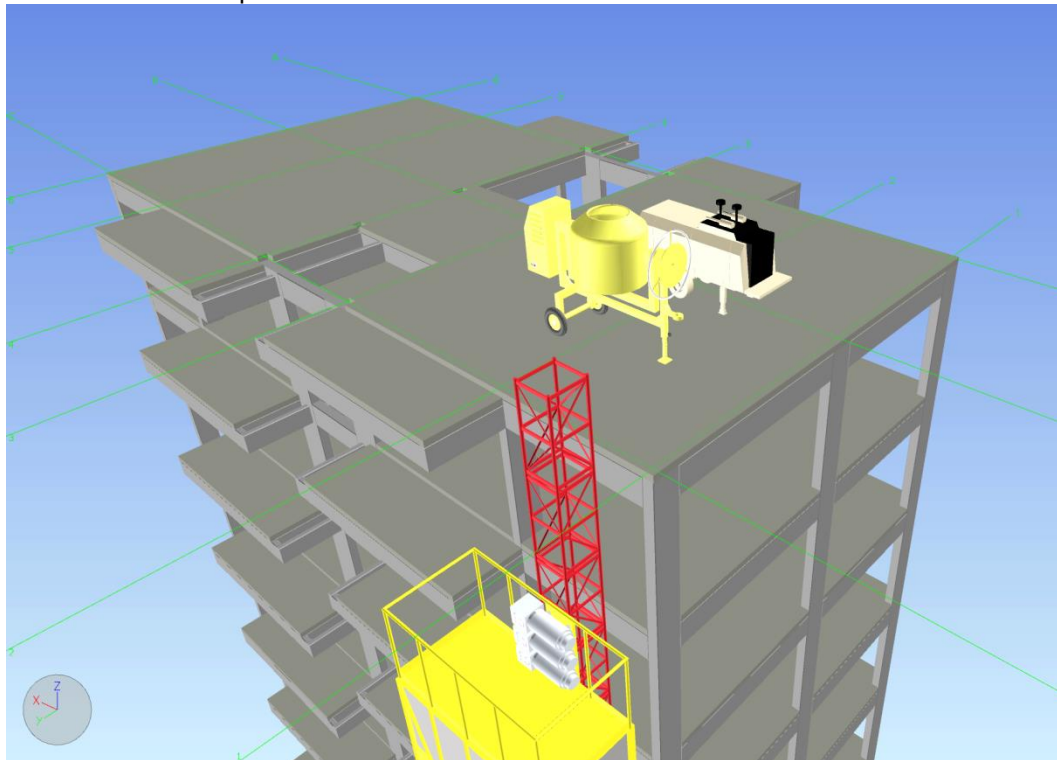


Fonte: o autor.

Os serviços finais de confecção dos pequenos pilares, vigas e lajes que compõem a estrutura até o nível 28,20 m, poderiam ser realizados inteiramente sobre a laje de cobertura do edifício com a instalação de betoneiras elétricas, dentre os quais há modelos comercialmente disponíveis de 400 litros e 1.470 kW de potência, com produtividades de até 4,10 m<sup>3</sup>/h para a preparação e dosagem do volume de concreto restante. O maior tempo para execução desses elementos estruturais, decorrente da substituição de procedimentos mecanizados por tarefas manuais, não interferiria no prazo estipulado para a conclusão de toda obra, uma vez que, simultaneamente estariam ocorrendo todas as demais atividades pertinentes à construção tais como levantamento de alvenarias e divisórias, colocação de esquadrias, instalações prediais, acabamentos, entre outros. Com a dispensa de maquinário para o erguimento dessa estrutura de 3 metros de altura, a redução energética seria bastante significativa no fechamento deste volume (Fig. 15).



**Figura 15** – Confeção dos elementos estruturais finais pertencentes aos níveis da casa de máquinas e reservatório.



Fonte: o autor.

Partindo-se das adequações propostas anteriormente, referentes a alternativas estratégicas para a redução do consumo energético no erguimento da edificação no modelo digital proposto, os quantitativos inicialmente estimados, com base na simulação demonstrada através das figuras 11 a 15, foram reavaliados. Com isso, a Tabela 3 foi revisada e sua modificação apresenta-se na Tabela 5 a seguir.

**Tabela 5** – Quantitativo de horas de uso de equipamentos por atividade de acordo com alternativas propostas.

Nível	Atividade	Recurso (Equipamento)	Potência (kW)	Nº horas / equipamento
Terreno	Escavação	Escavadeira hidráulica	311,0	35,00
	Reaterro	Pá carregadeira	170,0	2,50
Fundações	Estaca hélice contínua 15 metros	Perfuratriz	390,0	22,00
		Caminhão betoneira	250,0	15,00
	Bloco de coroamento	Bomba	95,0	2,00
		Caminhão betoneira	250,0	2,00
Subsolo	Viga baldrame	Caminhão betoneira	250,0	1,00
		Bomba	95,0	1,00
	Contrapiso	Caminhão betoneira	250,0	6,00
		Bomba	95,0	1,00
	Cortina	Caminhão betoneira	250,0	6,00
		Bomba	95,0	0,15
Pilar	Caminhão betoneira	250,0	1,00	
	Caminhão <i>munck</i>	215,0	1,00	
Térreo	Viga	Caminhão betoneira	250,0	2,00
		Bomba	95,0	0,15
	Laje	Caminhão betoneira	250,0	3,00
		Bomba	95,0	0,50
	Pilar	Caminhão betoneira	250,0	1,00
		Caminhão <i>munck</i>	215,0	0,10
Pav. Tipo	Viga	Caminhão betoneira	250,0	9,00
		Caminhão lança	250,0	9,00
		Bomba	95,0	1,00
	Pilar	Caminhão betoneira	250,0	6,00
		Caminhão lança	250,0	6,00
		Bomba	95,0	1,00
Casa de Máq.	Viga	Betoneira	1.470,0	2,40
		Bomba	95,0	0,15
	Pilar	Betoneira	1.470,0	0,30
		Bomba	95,0	0,05
Reservatório	Viga	Betoneira	1.470,0	0,45
		Bomba	95,0	0,05
	Laje	Betoneira	1.470,0	0,90
		Bomba	95,0	0,05
<b>Total (Nº horas)</b>				<b>138,35</b>

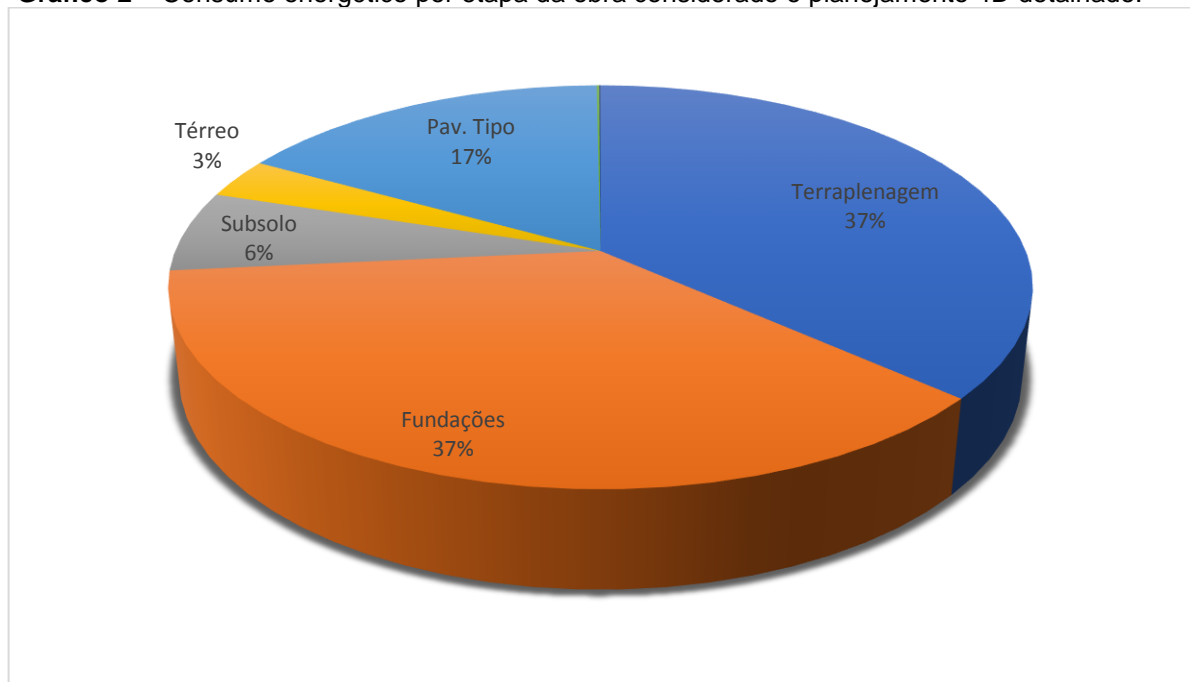
Fonte: o autor.

Da mesma forma procede-se com a reavaliação da Tabela 4 da qual, comparando-se o consumo total obtido pela exclusão de utilização do maquinário em parte das horas e também pela substituição por equipamentos de menor porte e potência para certos processos construtivos, com o consumo total estimado pelo estudo inicial, obteve-se a redução energética final em 13,7%. O resultado assim pode ser comparado com o gráfico 2.

**Tabela 6** – Demanda energética final por equipamento por etapa da obra de acordo com alternativas propostas.

Nível	Recurso (Equip.)	Consumo total de óleo Diesel (L) e eletricidade (kW.h)	Valor energético (kW.h)
Terreno	Escavadeira hidráulica	811,71	8.084,63
	Pá carregadeira	16,32	162,55
Fundações	Perfuratriz	643,50	6.409,25
	Caminhão betoneira	180,00	1.792,80
	Bomba	10,45	104,10
Subsolo	Caminhão betoneira	130,00	1.294,80
	Caminhão <i>munck</i>	8,60	85,66
	Bomba	7,91	78,77
Térreo	Caminhão betoneira	60,00	597,60
	Caminhão <i>munck</i>	8,60	85,66
	Bomba	4,13	46,30
Pav. Tipo	Caminhão betoneira	150,00	1.494,00
	Caminhão lança	206,25	2.054,25
	Bomba	21,75	216,60
Casa de Máq.	Betoneira	3,97	3,97
	Bomba	2,18	21,66
Reservatório	Betoneira	1,98	1,98
	Bomba	1,09	10,83
<b>Total</b>		<b>2.268,44</b>	<b>22.540,29</b>

Fonte: o autor.

**Gráfico 2** – Consumo energético por etapa da obra considerado o planejamento 4D detalhado.

Fonte: o autor.

## 5 CONCLUSÕES

Esse trabalho buscou demonstrar, por meio de um exemplo hipotético, porém de tipologia bastante frequente no cenário brasileiro da construção civil, como práticas em BIM poderiam contribuir para estudos de eficiência energética durante as etapas mais intensas de uma obra. Para tanto, o conhecimento aprofundado acerca de técnicas construtivas e dos principais e mais utilizados equipamentos mecânicos, são de fundamental importância para efetivos resultados gerados nas práticas de canteiros.

Por meio de comparações entre diferentes cenários, gerados através de simulações computacionais as quais auxiliaram na implementação de estratégia, foi possível reavaliar uma programação de equipamentos. Com isso, a eficiência foi conseguida do menor tempo de operação de determinados equipamentos e a substituição por outros equipamentos de menor potência requerida. O uso de BIM por uma equipe multidisciplinar comprova que a elaboração de um planejamento pode ser muito bem detalhado e vir a proporcionar uma perfeita execução seguindo os princípios da construção enxuta.

A metodologia apresentada tem como objetivo instigar profissionais diretamente envolvidos em projetos e construções de edifícios, a buscarem o suporte de BIM e com isso, obter as vantagens que este conceito aliado à tecnologia disponível tem a oferecer para a eficiência de todos os processos e especialmente, a eficiência no consumo energético.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9061: Segurança de escavação a céu aberto – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 1985.

BERNARDES, MAURÍCIO MOREIRA E SILVA. **Planejamento e controle da produção para empresas de construção civil**. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

CATERPILLAR. **CAT Construction Equipment**. Disponível em <[http://www.cat.com/en\\_US/by-industry/construction.html](http://www.cat.com/en_US/by-industry/construction.html)>. Acesso em 18 de maio de 2017.

CATERPILLAR. **Fuel Efficiency Fundamentals**. Disponível em <[http://www.cat.com/en\\_US/by-industry/construction.html](http://www.cat.com/en_US/by-industry/construction.html)>. Acesso em 20 de maio de 2017.

DENNIS, PASCAL - Apresentação de Shook. **Produção Lean Simplificada - Um Guia para Entender o Sistema de Produção mais Poderoso do Mundo**, 2ª edição. Bookman, 04/2011.

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **Manual de BIM: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores**. Porto Alegre: Bookman, 2014.

FARIA, RENATO. Aprenda a estimar o consumo horário de gasolina ou óleo diesel usado nos grandes veículos de obras. **Equipe de Obra**. São Paulo, V.43, 2012.

HALPIN, W.; WOODHEAD, W. **Administração da Construção Civil**, 2ª edição. LTC, 05/2004.

JOHANSSON, M.; ROUPÉ, M.; BOSCH-SIJTSEMA, P. **Real-time visualization of building information models (BIM)**. Automation in Construction, 2015.

JOHN DEERE. **Máquinas pesadas e equipamentos para construção**. Disponível em <[https://www.deere.com.br/pt\\_BR/industry/construction/construction.page?>](https://www.deere.com.br/pt_BR/industry/construction/construction.page?>). Acesso em 17 de maio de 2017.

LIEBHERR. **LIEBHERR Construction Machines**. Disponível em <<https://www.liebherr.com/en/bra/products/construction-machines/construction-machines.html>>. Acesso em 19 de maio de 2017.

MAKEBIM. Disponível em <<http://www.makebim.com>>. Acesso em 15 de abril de 2017.

MENDONÇA, ANTÔNIO VALTER RODRIGUES DE, DAIBERT, DALTON. **Equipamentos e Instalações para Construção Civil**. Érica, 06/2014.

NEW HOLLAND. **NEW HOLLAND Construction**. Disponível em <<https://construction.newholland.com/lar/pt>>. Acesso em 22 de maio de 2017.

PEURIFOY, L.; SCHEXNAYDER, J.; SHAPIRA, AVIAD; SCHMITT, ROBERT.

**Planejamento, Equipamentos e Métodos para a Construção Civil**, 8th edição. AMGH, 01/01/2016.

PINHEIRO, ANTÔNIO CARLOS DA BRAGANÇA; CRIVELARO, MARCOS. **Tecnologia de Obras e Infraestrutura**. Érica, 06/2014.

REBELLO, YOPANAN C. P. **Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento**. São Paulo: Zigurate Editora, 2008.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **BUILDINGS AND CLIMATE CHANGE Status, Challenges and Oportunities**. 2007. Disponível em: <<http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx0916xPA-BuildingsClimate.pdf>>

YAZIGI, WALID. **A técnica de edificar**. São Paulo: Pini: Sinduscon, 2009.