

ESCANEAMENTO 3D A LASER, FOTOGRAMETRIA E MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO PARA GESTÃO E OPERAÇÃO DE EDIFICAÇÕES HISTÓRICAS

3D laser scanner, photogrammetry and bim for historic buildings facilities management and operation

Elóisa Dezen-Kempter¹, Lúcio Soibelman², Meida Chen², Alexandre Victor Müller Filho³

RESUMO Este artigo apresenta os resultados de integração de tecnologias de levantamento híbridas (escaneamento 3D a laser, fotogrametria) para a captura do estado real de uma edificação histórica do campus da University of Southern California em Los Angeles visando sua modelagem BIM. O estudo de caso é um edifício de dois andares construído em 1964 em linguagem modernista, com estrutura metálica aparente, considerado patrimônio histórico recentemente. A escolha da abordagem híbrida pautou-se em critérios como: precisão dos dados levantados; nível de detalhe requerido para cada elemento do edifício; esforço para aquisição e pós-processamento dos dados; e acessibilidade ao elemento a ser capturado. Levando-se em conta os resultados obtidos, apresentamos a avaliação das ferramentas e estratégias empregadas para aquisição dos dados espaciais do edifício, em função dos seguintes critérios: escala, complexidade e alcance dos equipamentos. O modelo tridimensional em forma de nuvens de pontos gerado pela captura constitui a base para a criação de um modelo de informações de construção semanticamente orientado, ferramenta potencial para produzir um inventário abrangente que considere os requisitos de manutenção peculiares de edificações históricas. Esse artigo pretende contribuir para ampliar a discussão sobre a adoção de BIM na área de patrimônio histórico.

PALAVRAS-CHAVE: BIM, Gestão e operação, Patrimônio histórico, 3D laser scanner, Fotogrametria.

ABSTRACT This article presents the results of integrating hybrid-surveying technologies (3D laser scanning, photogrammetry) to capture the real state of a historic building on the campus of the University of Southern California in Los Angeles aiming to create its BIM model. The case study is a two-story building, built in 1964 in modernist language, with apparent steel structure, considered historical heritage recently. The adoption of hybrid approach was guided on the following criteria: accuracy of data collected; level of detail required for each element of the building; effort to acquire and post-processing of data; and accessibility to the element to be captured. Taking into account the results obtained, we present the evaluation of the tools and strategies used to acquire the building's spatial data, according to the following criteria: scale, complexity and range of equipment. The point clouds three-dimensional model, generated by the capturing tools, forms the basis for creating a semantically oriented building information model. BIM is a potential tool to produce a comprehensive inventory that considers the unique maintenance requirements of historic buildings. This article intends to contribute to the discussion on the adoption of BIM in the heritage area.

KEYWORDS: BIM, Facilities management, Historic heritage, 3D laser scanner, Photogrammetry.

¹ Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP

² University of Southern California, USC

³ Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC

How to cite this article:

DEZEN-KEMPTER, E.; SOIBELMAN, L.; CHEN, M.; MÜLLER, A.V. Escaneamento 3D a laser, fotogrametria e modelagem da informação da construção para gestão e operação de edificações históricas. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 113-124, jul./dez. 2015
<http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v10i2.102710>

Fonte de financiamento:

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, processo nº 2014/02951-5

Conflito de interesse:

Declaram não haver

Submetido em: 24 ago. 2015

Aceito em: 31 ago. 2015



INTRODUÇÃO

Na história recente da construção civil, os processos de projeto, construção e gestão têm sido altamente beneficiados com as funcionalidades introduzidas pelas novas Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC), como a Modelagem da Informação da Construção (BIM), particularmente para as edificações complexas. Contudo, esses benefícios alcançam prioritariamente as novas edificações.

Pesquisas recentes indicam que, em grandes cidades, o índice de novas construções está entrando em declínio enquanto aumenta o número de processos de reforma e manutenção do estoque de edifícios existentes, inclusive visando adaptá-los às modernas condições de habitabilidade e sustentabilidade. Nos Estados Unidos, o índice de novas construções está entre 2 a 3% do estoque de edificações existentes por ano (BROWN et al., 2005 apud KLEIN et al., 2012)

Como parte do estoque de edificações existentes, as edificações consideradas patrimônio cultural, devido às suas excepcionais condições de manutenção, conservação e restauro, pouco têm se beneficiado das novas TIC. Elaborar um diagnóstico e documentação adequados para essas edificações torna-se imperativo, a fim de melhorar o seu desempenho, funcionalidade e qualidade ambiental, visando atender aos novos padrões de sustentabilidade. Além disso, esse material pode atuar como documento de preservação do caráter de excepcionalidade que resultou em sua tutela.

Assim, no domínio do patrimônio cultural, a captura de dados precisos e detalhados e a criação de um modelo com a tecnologia BIM apresenta-se como ferramenta potencial para produzir um inventário abrangente que considere os requisitos de manutenção peculiares destas edificações, incluindo documentação sobre o ciclo de vida do edifício até o presente estado.

Este trabalho relata uma pesquisa de pós-doutorado financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e desenvolvida na University of Southern California (USC) em Los Angeles, cujo objetivo foi desenvolver metodologias para a elaboração de modelos BIM de edifícios históricos que possibilitem o compartilhamento e visualização tanto de suas características físico-estruturais como de seus dados históricos.

O artigo apresenta os resultados de integração de tecnologias de levantamento híbridas (3D laser scanner, fotogrametria) para a captura do estado real de uma edificação histórica do campus da USC em Los Angeles e sua modelagem BIM. O estudo de caso é um edifício de dois andares construído em 1964 em linguagem modernista, com estrutura metálica aparente, considerado patrimônio histórico recentemente.

A escolha da abordagem híbrida pautou-se em critérios como: precisão dos dados levantados; nível de detalhe requerido para cada elemento do edifício; esforço para aquisição e pós-processamento dos dados; e acessibilidade ao elemento a ser capturado.

Levando-se em conta os resultados obtidos, apresentamos a avaliação das ferramentas e estratégias empregadas para aquisição dos dados espaciais do edifício, em função de sua escala, complexidade e alcance dos equipamentos, e que servirão de base para a criação de um modelo de informações de construção semanticamente orientado. Este artigo pretende contribuir para ampliar a discussão sobre a adoção de BIM na área de patrimônio histórico visando a adequada e criteriosa manutenção e operação de edifícios desta categoria.

PANORAMA SOBRE CAPTURA DA REALIDADE E MODELAGEM 3D PARA EDIFÍCIOS EXISTENTES

O levantamento de edifícios existentes é um processo de engenharia reversa que, a partir das informações obtidas do objeto real, se reconstrói e interpreta a ideia anterior a sua realização, ou seja, o seu projeto.

Esses processos dependem fortemente de levantamentos manuais para o desenvolvimento de desenhos e modelos. A verificação das condições de construção existentes, incluindo suas dimensões, materiais e estado, são realizadas comumente através de levantamentos de campo que utilizam câmeras digitais, fitas métricas e/ou dispositivos de medição a laser. Esses dados são usados para atualizar desenhos e modelos *as-built* ou, no caso da inexistência de documentação *as-built*, para gerar documentos digitais.

No caso de edificações históricas, o problema torna-se mais complexo, pois muitas sequer possuem o projeto original (*as-designed*) e muito menos o registro das alterações que se sucederam ao longo de seu ciclo de vida. Além disso, os métodos tradicionais de levantamento por medição direta, apesar de mais simples, acabam tornando-se, em função da complexidade e do nível de detalhamento requerido para a finalidade de conservação e restauro, um método caro, moroso e incapaz de registrar fielmente as peculiaridades de todos os componentes arquitetônicos da edificação.

As tecnologias de sensoriamento remoto e varredura apresentam-se como uma alternativa para os procedimentos de levantamento manuais por permitir coletar grande densidade de informações de forma rápida, registrando com precisão a forma real dos objetos, suas irregularidades e imperfeições decorrentes do processo construtivo, e as deformações e desgastes decorrentes do ciclo de vida da edificação (GROETELAARS; AMORIM, 2012)

Portanto, as tentativas de automação do levantamento e modelagem das condições atuais dos edifícios (*as-built/as-is*) incluem alavancar novas tecnologias de sensoriamento remoto, como o escaneamento tridimensional e a fotogrametria, que empregam sensores para capturar informações espaciais tridimensionais a partir de uma dada distância de forma ininterrupta (KLEIN et al., 2012).

Na última década, o uso de tecnologias de digitalização 3D para coletar remotamente informação espacial de edifícios foi popularizado por gerar uma quantidade enorme de dados, comparado com outros instrumentos de levantamento, em curto espaço de tempo e em situações de acesso limitado e/ou perigosa. As tecnologias de escaneamento a laser 3D e de fotogrametria são as tecnologias de digitalização mais empregadas para levantamentos de edificações, e apesar das diferenças de custo de equipamentos e processos de detecção, são sistemas de aquisição tridimensional, automatizadas e sem contato como o objeto analisado, que usam sensores baseados em ondas de luz para a medição, direta ou indireta, do objeto. O Quadro 1 sintetiza as principais características de cada tecnologia.

Quadro 1. Comparação entre as tecnologias de captura da realidade.

Características	Tecnologias	
	Escaneamento a laser 3D	fotogrametria
Precisão	Milímetro	Centímetro
Resolução	Milhões de pontos	Centenas de pontos
Custo do equipamento	Dezenas de milhares	Centenas
Habilidade necessária	Média-alta	Baixa
Portabilidade	Volumoso	À mão
Geração de dados 3D	Captura automática	Pós-processamento
Modelagem 3D	Extração automática da forma	Modelagem manual
Desafios ambientais	Refletividade, textura da superfície, tempo, movimento do alvo, bordas, linha de visão	Repetição, textura da superfície e do material, ângulo e linha de visão

Fonte: KLEIN et al. (2012, p. 163).

Muitas pesquisas têm se debruçado atualmente em comparar métodos de abordagem e tecnologias de captura da realidade visando à elaboração de modelos tridimensionais *as-built/as-is*. Estas pesquisas estão voltadas

tanto para o estoque de edifícios existentes visando otimizar e tornar mais eficiente e racional o seu processo de manutenção e operação (DAI et al., 2013; HUBER et al., 2011; KLEIN et al., 2012; TANG et al., 2010), quanto para edifícios históricos (CHEVRIER et al., 2010; PENTTILÄ et al., 2007; SORIA-MEDINA et al., 2013) visando à elaboração de um inventário abrangente que auxilie na tomada de decisões para sua conservação, restauro preventivo e reabilitação.

Na elaboração da documentação *as-built/as-is*, a escolha do melhor método de captura da realidade provou ser um desafio a equacionar (BERALDIN, 2004; MOUSSA et al., 2012; REMONDINO; EL-HAKIM, 2006). De acordo com Moussa et al. (2012), tal desafio é devido à inexistência de uma abordagem ideal adequada para todas as aplicações e suas demandas. O escaneamento terrestre a laser (TLS) lida diretamente com pontos 3D de objetos através de um conjunto de coordenadas, com informações geométricas e espaciais precisas, mas com informações RGB e de textura em baixa resolução. Fotografias contêm informação RGB e de textura em alta resolução, mas não contêm qualquer informação métrica explícita sem etapas de processamento complementares. Além disso, algumas dificuldades na escolha do método de captura foram observadas por Remondino e El-Hakim (2006) devido aos requisitos particulares para cada objeto e local, tais como: alta precisão geométrica; portabilidade; nível de automação, fotorrealismo; baixo custo; flexibilidade e eficiência. Beraldin (2004) enfatiza que para modelar ambientes complexos, aqueles compostos de vários objetos com diferentes características, é essencial combinar dados de diferentes sensores e informações de diferentes fontes.

Modelo *as-built* BIM

A construção de um modelo aprimorado do edifício real, com a possibilidade de exploração de sua informação semântica, na forma de um modelo BIM representa uma abordagem das mais promissoras e de rápido desenvolvimento para a gestão da informação *as-built* (EASTMAN et al., 2011).

De acordo com Akcamete et al. (2010), o uso de modelos BIM para Operação e Manutenção (O&M) é uma nova forma de analisar o comportamento e deterioração do edifício ao longo do tempo, fornecendo informações do estado atual da edificação, além de seu histórico de manutenção e reformas anteriores. Para os autores, BIM tem a capacidade de armazenar informações sobre todo o sistema, integrado no modelo espacial 3D, que não poderiam ser facilmente conseguidas com os formatos de representação de dados tradicionais.

Como muitos pesquisadores apontam, o modelo *as-built* é mais adequado para a gestão de instalações que o modelo *as-designed* BIM (EASTMAN et al., 2011; HUBER et al., 2011; LAGÜELA et al., 2013).

Os potenciais benefícios de se utilizar BIM na gestão e operação de edifícios parece ser significativo em diversas áreas, tais como a melhoria dos fluxos de informação, mitigação de riscos, documentação de inventário, gestão de espaço e energia, planejamento de retrofit, monitoramento e controle dimensional na construção (BOSCHÉ, 2010; BECERIK-GERBER et al., 2012; VOLK et al., 2014).

Arayici (2007) propôs uma abordagem semiautomatizada para o desenvolvimento de modelo *as-built* BIM com a finalidade de reabilitação de edifícios existentes com base em dois estudos de caso (Jacint House, em Manchester, e Peel Building, no campus da Universidade de Salford). Para o autor, o modelo BIM *as-built* resultante da captura a laser é um documento importante no processo de tomada de decisão sobre intervenções em edifícios históricos.

Fai et al. (2011) ampliam a visão do emprego de modelos semanticamente orientados para a gestão do ciclo de vida do crescente estoque de edificações históricas ao enfatizar a potencialidade de BIM como um banco de dados de conhecimento multidisciplinar. Os autores sublinham a contribuição potencial dessa tecnologia para armazenar as informações complexas sobre os aspectos tangíveis e intangíveis relacionadas ao edifício em um banco de dados orientado a objetos.

Apesar dos benefícios apontados, Tang et al. (2010) alertam que a geração do modelo BIM, a partir da nuvem de pontos resultante da digitalização do edifício, é um processo fundamentalmente manual, moroso, de natureza subjetiva e sujeito a erros, que motiva a necessidade de ferramentas de automação ou, pelo menos, semiautomatizadas de reconhecimento de componentes visando a modelagem.

A abordagem multidisciplinar é abordada por Brilakis et al. (2010) ao afirmar que a elaboração de documentação *as-built/as-is* para edifícios em operação é um problema que requer especialistas nas áreas de levantamento (digitalização tridimensional), visão computacional, videogrametria, aprendizado de máquina (*machine learning*) e modelagem paramétrica de objetos.

Com isso, pode-se concluir que desafios específicos do domínio da engenharia reversa e de métodos de reconhecimento de objeto, usados para o desenvolvimento de modelos *as-built* baseados na tecnologia BIM a partir de dados capturados pelas tecnologias de varredura, ainda estão sem solução.

DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

A USC foi fundada em 1880, e seu campus desenvolveu-se rapidamente, assim como o bairro no qual ele está inserido, sendo que em 1919 foi elaborado o primeiro plano diretor para direcionar sua ampliação. Desde então o campus teve quatro planos diretores que guiaram sua expansão, e imprimiram a imagem que ele possui atualmente.

O estudo de caso desta pesquisa é o University Religious Center (URC), concebido segundo as diretrizes do terceiro plano diretor para o campus da USC, desenvolvido pelo escritório de arquitetura de William L. Pereira & Associates em 1961. Durante os 25 anos de vigência deste plano, mais de 20 edifícios foram construídos usando linguagem arquitetônica moderna e inovadora, mas em harmonia com o estilo vernacular da USC (UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA, 2011).

Killingsworth, Brady & Associates projetaram o URC em 1964 aplicando os princípios arquitetônicos básicos do estilo moderno, que incluem volumetria retangular, modulação, estrutura (vigas e pilares) aparente de aço, fenestração rítmica com janelas de vidro do piso ao teto, telhado plano e ausência de ornamentação (Figura 1). Possui acabamento de tijolo aparente nas fachadas principais, material característico dos demais edifícios do campus. O escritório Killingsworth, Brady & Associates fazia parte do grupo influente de arquitetos praticantes do estilo modernista na Califórnia durante os anos 1960. O edifício foi nomeado pela cidade de Los Angeles, em 2013, como monumento cultural por sua distinção arquitetônica.

O URC apresenta baixa complexidade arquitetônica devido ao seu sistema estrutural metálico, assim como ao emprego de tipologia única de caixilharia e a prevalência de formas geométricas básicas. O elemento arquitetônico de destaque deste edifício é o brise-soleil metálico horizontal de ambos os lados de seu volume frontal independente (Figura 1-A). O edifício possui dois pavimentos, um pátio interno (Figura 1-B e C) e área bruta de cerca de 1040 m².



Figura 1. Fachada principal [A] e pátio interno [B,C] do URC. Fonte: Arquivo pessoal.

MÉTODO

Para aquisição dos dados espaciais do edifício foi usado o Laser Escâner Terrestre (LET), modelo VZ-400, da empresa austríaca Riegl, que trabalha com o sistema de tempo de voo e digitalização de eco. O Riegl VZ-400 possui um alcance máximo de 600 m, campo de visão horizontal de 360° e vertical de 100°, taxa de varredura de 122.000 pontos por segundo e uma precisão de medição de 3 mm em 100 m. O scanner é integrado a uma câmera digital, marca Nikon modelo D700 SLR, que torna possível a captura de dados de cor em alta resolução (12.1 megapixels). O LET VZ-400 fornece aquisição autônoma de dados através de interface de usuário no aparelho, ou remotamente através de computador (conectado no escâner ou via LAN) usando o software RiscanPRO, também da Riegl.

No escaneamento do edifício, o escâner foi controlado via software RiscanPRO e via display. O uso de software permite ao operador armazenar e converter os dados durante o processo de aquisição de dados, registrar os escaneamentos individuais em campo, bem como controlar e verificar visualmente a captura.

Para cobrir os pontos cegos do levantamento feito com o LET foram realizadas tomadas fotográficas com um iPhone 6 Plus da Apple, que possui câmera embutida iSight. Essa câmera tem resolução de 8 megapixels, estabilização óptica e digital, lente de cinco elementos, filtro IR híbrido e abertura fixa de $f/2.2$.

O fluxo de trabalho desenvolvido para a reconstrução geométrica 3D do URC consistiu em: (1) planejamento dos pontos de captura da digitalização a laser para otimizar o tempo do trabalho de campo e cobrir a área máxima possível superando os obstáculos; (2) digitalização 3D a laser; (3) tomadas fotográficas das áreas não cobertas pelo laser; (4) processamento dos dados brutos; (5) fusão das nuvens de pontos geradas pelo escaneamento a laser e pelo processo de fotogrametria para criar o modelo 3D híbrido.

Planejamento da captura

A implantação do URC favorece o posicionamento do LET, pois mantém um distanciamento lateral de 6 m com o edifício a sua direita (College House); à esquerda há um edifício em construção, frontalmente faceia a West 34th Street (rua interna do campus) e ao fundo um estacionamento separa o edifício da West Jefferson Boulevard. Há pouca vegetação e algumas árvores espaçadas no pátio interno, portanto somente a existência do canteiro de obras na lateral esquerda do edifício (Figura 2-B) compromete, de fato, o escaneamento a laser. Assim, foi programada uma poligonal com 19 posições do LET (Figura 2-A) para o escaneamento do exterior do edifício, de acordo com as limitações do equipamento e as obstruções e obstáculos encontrados. As posições 1 a 17 (em vermelho) estão no pavimento térreo

e a 18 e 19 (em azul) no corredor aberto do primeiro pavimento. Optou-se por um processo de varredura sem alvos, para agilizar as tomadas e o pós-processamento.

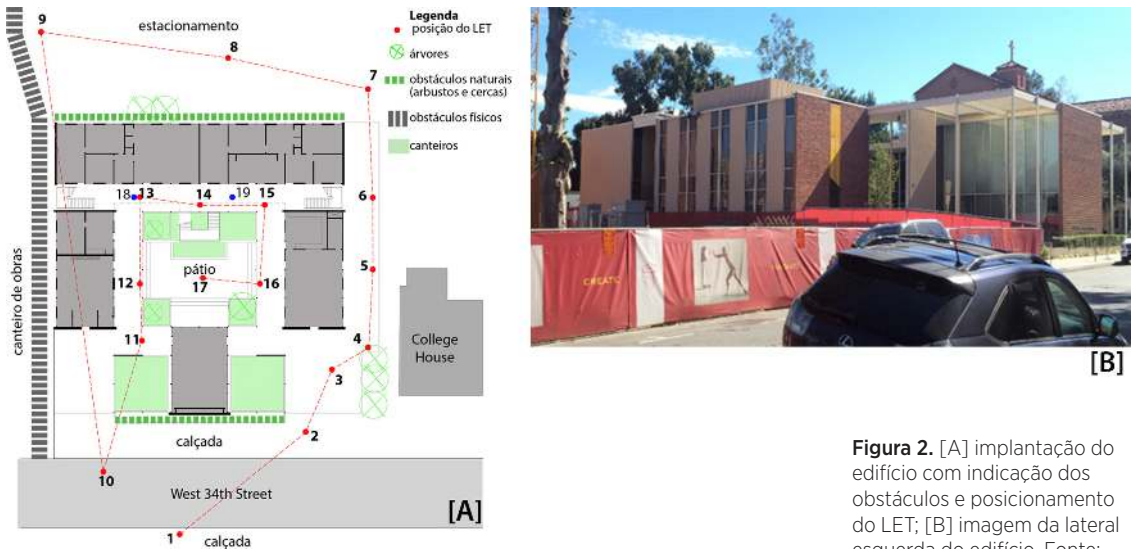


Figura 2. [A] implantação do edifício com indicação dos obstáculos e posicionamento do LET; [B] imagem da lateral esquerda do edifício. Fonte: Arquivo pessoal.

Digitalização a laser e fotografias

No planejamento da varredura a laser e da tomada fotográfica, a condição essencial a ser respeitada é o nível de detalhe (*level of detail – LoD*), ou seja, a quantidade de informação necessária para a representação de um determinado elemento. A General Services Administration (GSA), em seu guia BIM para imagens 3D (GENERAL SERVICE ADMINISTRATION, 2009), afirma que o nível de detalhe está diretamente relacionado à complexidade do elemento, à quantidade de informação para a sua modelagem e ao tipo de documento da edificação a ser gerado. A Tabela 1 apresenta os requisitos definidos para cada LoD pela GSA.

Tabela 1. Características dos diferentes níveis de detalhe.

Nível de Detalhe (LoD)	Tipo de documentação	Tolerância (mm)	Resolução mm x mm
1	Nuvem de pontos	± 51	152 x 152
2	Documentação 2D, modelo 3D, nuvem de pontos	± 13	25 x 25
3	Documentação 2D, nuvem de pontos	± 6	13 x 13
4	modelo 3D, nuvem de pontos	± 3	13 x 13

Fonte: GENERAL SERVICE ADMINISTRATION, 2009.

O item “tolerância” refere-se ao desvio dimensional admitido entre o levantamento a laser e o objeto real, e o “resolução” refere-se às dimensões do menor componente a ser reconhecido no levantamento.

No caso de projetos voltados para edificações históricas, a General Service Administration (2009) estipula os seguintes níveis de detalhes: para inventário (documentação 2D) LoD1 e 2; para reabilitação LoD2 (documentação 2D) e LoD3 (modelo 3D); e para restauração de fachadas LoD3 (documentação 2D).

Visando atender à normativa da GSA, foram realizados três escaneamentos na primeira posição do plano (Figura 2) utilizando diferentes *setups* de resolução angular (0.025, 0.035 e 0.05) para ajustar a densidade

de pontos no nível de detalhamento requerido. O tempo de levantamento, com resolução angular de 0.025, foi expressivamente superior às demais resoluções e sobrecarregou o computador. A densidade da nuvem de pontos resultante da amostragem com resolução angular de 0.035 (espaçamento entre pontos de 58mm a cada 100m) foi suficiente para cobrir os detalhes mais complexos dos elementos menores e esta foi a resolução adotada para executar a digitalização.

O escaneamento a laser cobriu 80% do exterior do edifício, e foram necessárias 2h36 para realizar as 19 varreduras. Materiais transparentes (vidros), superfícies com água, com reflexão especular (cobre) ou que absorvem o sinal (asfalto) dificultam a obtenção de dados. Para cobrir as oclusões e a cobertura, aproximadamente 700 fotos foram tiradas a partir do telhado com sobreposição mínima de 50%. Visando aumentar a nitidez e a qualidade das imagens, evitando-se sombreamentos e incidência excessiva de luz de fundo, o levantamento fotográfico foi realizado no início da manhã. As imagens desfocadas foram eliminadas manualmente.

Processamento dos dados brutos

Nopós-processamento dos dados do escaneamento a laser foram empregados dois softwares. O registro das varreduras individuais com equipamentos Riegl geralmente é realizado no software proprietário RiscanPRO, que se baseia na correspondência de pontos entre os diversos arquivos a partir de alvos reflexivos. Optou-se por realizar o escaneamento sem alvo para acelerar o processo de digitalização em campo, assim empregou-se o software ReCap Pro da Autodesk para realizar o registro de todas as varreduras.

O fluxo de trabalho do ReCap Pro baseia-se na seleção de 3 pontos nos eixos XYZ em uma digitalização base (Figura 3-A) e o software buscará a correspondência entre esses pontos na outra varredura e assim sucessivamente consolidando as varreduras individuais em uma única nuvem de pontos (Figura 3-B). O usuário define o sistema de coordenadas de referência para o registro total dos escaneamentos individuais.

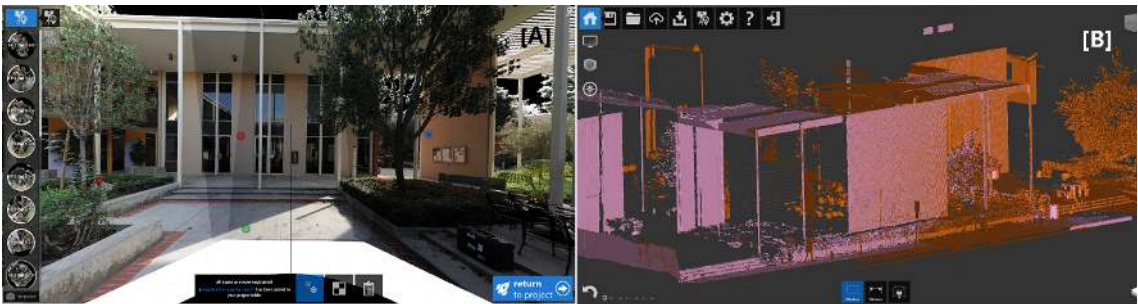


Figura 3. [A] pontos de referência para o Registro [B] Registro das varreduras n.10 e 1. Fonte: Arquivo pessoal.

O software fornece um relatório dos resultados e aponta a qualidade do registro, dando subsídios para o operador aprovar e finalizar o registro ou rejeitar e selecionar novamente outros pontos de referência até o resultado ser satisfatório. O relatório de qualidade do registro apresentado pelo ReCap Pro considera os seguintes requisitos: equilíbrio, percentual de sobreposição de pontos e percentual de pontos com menos de 6 mm. ReCap Pro recomenda pelo menos 30% de sobreposição entre cada varredura a fim de processar o registro corretamente. As varreduras do URC apresentaram sobreposição média de 39,2%.

Para a reconstrução 3D a partir das fotografias empregou-se a tecnologia Dense Stereo Matching a partir de alguns softwares *open source* (Autodesk ReCap360 e VisualSFM) e comerciais (Smart3D Capture), que realizam o processamento de imagens via web ou local. Os resultados alcançados com o Smart3D Capture superaram aqueles dos softwares *open source* em

função da ausência de limite de número de imagens de entrada, tamanho e resolução.

Fusão das nuvens de pontos

A nuvem de pontos resultante da varredura a laser e a malha triangulada gerada no processo de fotogrametria digital foram registradas usando o software *open source* CloudCompare. Este software processa o registro dos dados heterogêneos dos dois tipos de levantamento a partir da seleção automática de pontos comuns, usando a nuvem de pontos da varredura a laser como referência para escalar a malha triangulada, que por natureza não tem referência métrica.

A Figura 4-A apresenta o diagrama de captura e fusão das duas técnicas de levantamento visando à elaboração do modelo BIM, e a Figura 4-B mostra o modelo 3D consolidado da nuvem de pontos.

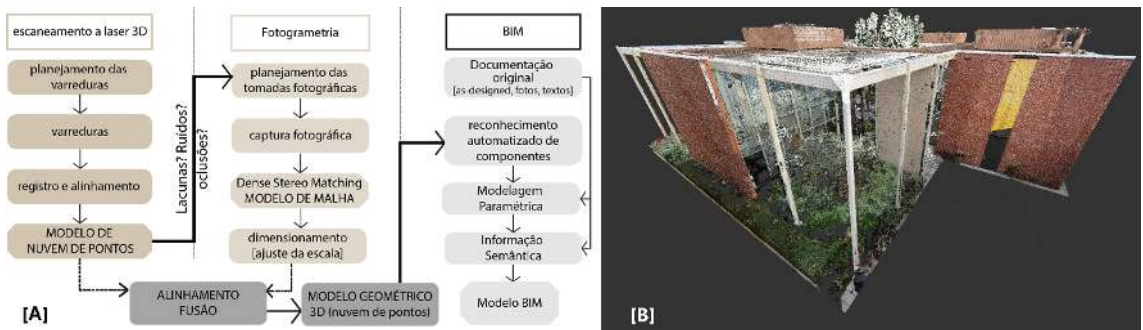


Figura 4. [A] Diagrama de Etapas e [B] Modelo 3D de nuvem de Pontos gerado pela fusão de dados do escâner e das fotografias. Fonte: Elaboração do autor.

Modelagem BIM da disciplina Arquitetura

O Modelo Geométrico 3D de nuvens de pontos constitui a base para a modelagem BIM da disciplina arquitetura, sendo que a técnica de escaneamento digital cobre somente as partes visíveis da edificação. Para efeito de modelagem, foram considerados os detalhes do sistema construtivo constantes na documentação *as-designed* da edificação, pois estes não podem ser capturados através da digitalização 3D.

A modelagem BIM da disciplina arquitetura foi elaborada no software Revit, versão 2015, da Autodesk.

Nesta primeira etapa, não foi empregada previamente nenhuma técnica de reconhecimento automatizado de componentes; assim, o modelo de nuvem de pontos foi importado para o REVIT e todos os componentes foram modelados através de sobreposição a esta base.

Para a modelagem das famílias (portas, janelas, brise-soleil) foi importado um arquivo em formato .dxf, extraído do arquivo de dados brutos (não registrados) da varredura a laser no software RiscanPro da Riegl, pois, primeiramente, o ReCap Pro da Autodesk não exporta esse formato de arquivo e, em segundo lugar, o Revit não importa nuvem de pontos diretamente para arquivos .rfa (family file).

A Figura 5 apresenta imagens da família de janelas de piso a teto modeladas no Revit. No plano de referência [A] podemos ver a nuvem de pontos em azul, assim como na vista exterior [B] e na perspectiva [C], e comparar o modelo geométrico da janela com a imagem na nuvem de pontos capturada pelo escaneamento a laser [D].

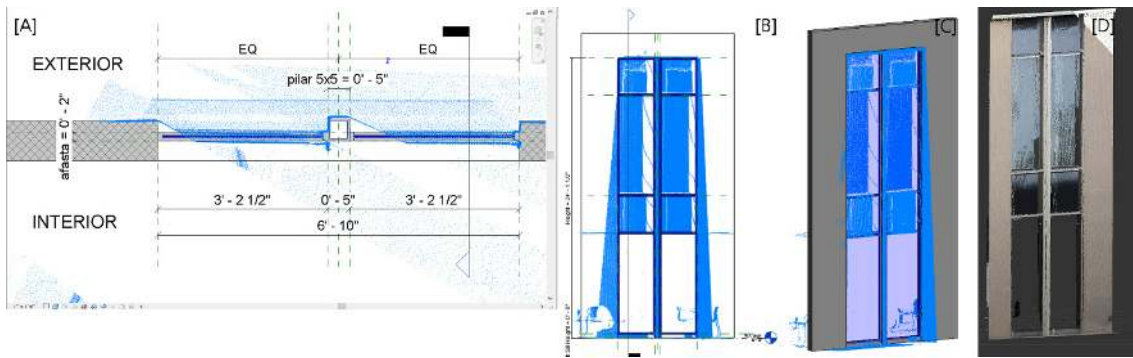


Figura 5. Família de janela modelada no Revit [A, B e C] e vista da nuvem de pontos consolidada [D]. Fonte: Elaborado pelos autores.

Para a modelagem da edificação no Revit, o arquivo de nuvem de pontos registrado e consolidado em formato .rcp (ReCap Pro) foi importado para o arquivo de projeto, servindo de base métrica para o desenvolvimento dos elementos construtivos, assim como para as definições de níveis e eixos (Figura 6). Para definições de materiais, acabamentos e detalhes construtivos, recorreu-se aos dados do projeto original (*as-designed*).

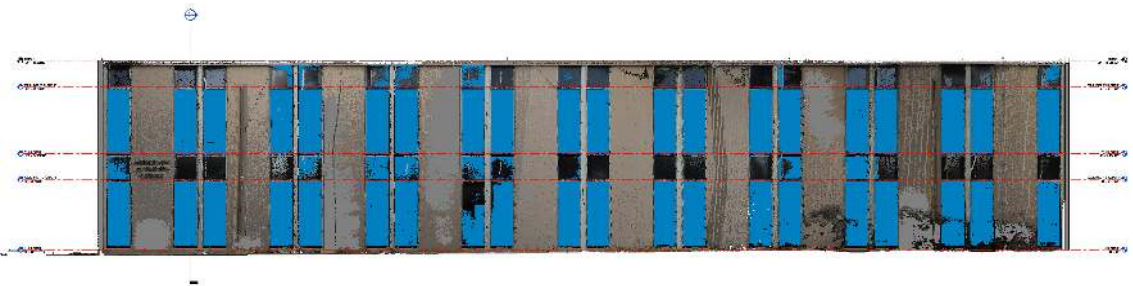


Figura 6. Fachada posterior. Fonte: Elaborado pelos autores.

Durante a modelagem 3D foram constatadas diversas lacunas de informação geométrica que os levantamentos fotográficos e o LET não cobriram. Por tratar-se de um edifício de geometria relativamente simples e que emprega elementos padronizados (como os caixilhos), foi possível a identificação, em outros elementos de geometria idêntica, das informações geométricas e de dimensionamento faltantes. Este procedimento é inviabilizado em estruturas mais complexas e com elementos diferenciados, o que certamente induziria a levantamentos de campo mais detalhados de áreas específicas para a execução precisa da modelagem a partir da nuvem de pontos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou os resultados da integração de tecnologias de digitalização tridimensional de edifícios existentes e sua fusão visando a criação do modelo geométrico 3D na forma de nuvem de pontos. O modelo resultante constitui a referência para a criação do modelo semanticamente orientado visando a documentação das características espaciais e materiais da edificação histórica na modalidade arquitetônica.

Cada tecnologia de digitalização 3D apresenta limitações para a aquisição de dados. Enquanto a varredura a laser produz grande densidade de informação em curto espaço de tempo, e o resultado da captura pode ser conferido em tempo real, a digitalização realizada a partir de fotografias necessita de processamento em softwares baseados na web ou local, o que é um processo lento, e seu resultado só pode ser conferido posteriormente. Além das diferenças de aquisição e processamento, o custo do equipamento

de varredura a laser mais econômico é cerca de 15 vezes superior ao de uma câmera fotográfica de excepcional qualidade, o que acaba sendo o principal impedimento para a disseminação de seu uso. Por outro lado, os softwares proprietários para fotogrametria digital apresentam performance superior e limites mais flexíveis para o *input* de dados do que os *open-source*, mas seu custo é elevado. A questão portabilidade também é um item a ser considerado, principalmente em função do volume e do peso do LET e das exigências de estabilidade para sua instalação e operação. O alcance do equipamento fica limitado à sua instalação e a necessidade de resolver a varredura de locais que o LET não cobre leva obrigatoriamente ao uso de outras formas de captura, inclusive com o emprego de VANT (veículos aéreos não tripulados).

O modelo de nuvens de pontos é um elemento essencial para reconstrução das características espaciais e geométricas do edifício que se pretende documentar, mas constitui apenas a etapa inicial deste processo. De posse da nuvem de pontos, o grande desafio deste projeto foi estabelecer o diálogo entre os diferentes softwares. Nesta pesquisa optou-se por empregar programas de registro de escaneamentos, fotogrametria e modelagem BIM da Autodesk por acreditar-se que a transferência de dados seria mais fácil e rápida entre produtos da mesma empresa, o que acabou não acontecendo. A principal questão enfrentada foi a exportação de formato de arquivo compatível para a leitura da nuvem de pontos pelo Revit no momento de elaborar as famílias de componentes.

O processo de elaboração do modelo *as-built* BIM sem a existência de modelagem anterior ainda está intensamente baseado em trabalho manual, não somente para detecção de componentes na nuvem de pontos gerada no levantamento, mas também para a criação dos elementos paramétricos, o que torna esse processo moroso e sujeito a erros. Além disso, o levantamento das demais disciplinas (hidráulica, elétrica, estrutura) depende de outras tecnologias de sensoriamento.

O método híbrido estabelecido para o levantamento e representação de estruturas arquitetônicas de edificações históricas mostrou-se adequado para o estudo apresentado, contudo a realização de pesquisas avançadas para a interação entre dados, automação de reconhecimento de componentes na nuvem de pontos e no processo de *Scan to BIM* são fundamentais para vencer as limitações apresentadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de pesquisa no exterior concedida, processo nº 2014/02951-5.

REFERÊNCIAS

- AKCAMETE, A.; AKINCI, B.; GARRET Jr, J. H. Potential utilization of building information models for planning maintenance activities. In: INTERNATIONAL CONFERENCE COMPUTING IN CIVIL AND BUILDING ENGINEERING, 2010, Nottingham. **Proceedings...** Nottingham: Nottingham University Press, p. 151-157.
- ARAYICI, Y. An approach for real world data modelling with the 3D terrestrial laser scanner for built environment. **Automation in Construction**, v. 16, n. 6, p. 816-829, set. 2007. DOI:10.1016/j.autcon.2007.02.008.
- BECERIK-GERBER, B.; JAZIZADEH, F.; LI, N.; CALIS, G. Application Areas and Data Requirements for BIM-Enabled Facilities Management. **Journal of Constr. Eng. and Management**, v.138, n.3, p. 431-442, mar. 2012. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000433](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000433).
- BERALDIN, J. A. Integration of Laser Scanning and Close-Range Photogrammetry – the Last Decade and Beyond. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 20., 2004, Istanbul.

Proceedings... Istanbul: ISPR, 2004, p. 1031-1042.

BOSCHÉ, F. Automated recognition of 3D CAD model objects in laser scans and calculation of as-built dimensions for dimensional compliance control in construction. **Advanced Engineering Informatics**, v. 24, n. 1, p. 107-118, jan. 2010. DOI: 10.1016/j.aei.2009.08.006.

BRILAKIS, I.; LOURAKIS, M.; SACKS, R.; SAVARESE, S.; CHRISTODOULOU, S.; TEIZER, J.; MAKHMALBAF, A. Toward automated generation of parametric BIMs based on hybrid video and laser scanning data. **Advanced Engineering Informatics**, v. 24, n. 4, p. 456-465, nov. 2010.

CHEVRIER, C.; CHARBONNEAU, N.; GRUSSENMEYER, P.; PERRIN, J-P. Parametric Documenting of Built Heritage: 3D Virtual Reconstruction of Architectural Details. **International Journal of Architectural Computing**, v. 8, n. 2, p. 135-150, jun. 2010

DAI, F.; RASHIDI, A.; BRILAKIS, I.; VELA, P. Comparison of Image-Based and Time-of-Flight-Based Technologies for Three-Dimensional Reconstruction of Infrastructure. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 139, n. 1, p. 69-79, jan. 2013.

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors**. 2. ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

FAI, S.; GRAHAM, K.; DUCKWORTH, T.; WOOD, N.; ATTAR, R. Building information modeling and heritage documentation. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR DOCUMENTATION OF CULTURAL HERITAGE (CIPA), 23., 2007, Praga. **Proceedings...** Praga: CIPA. Não paginado.

GENERAL SERVICE ADMINISTRATION. **BIM Guide for 3D Imaging**. Washington, DC: GSA, 2009

GROETELAARS, N. J.; AMORIM, A. L. Um panorama sobre o uso de nuvens de pontos para criação de modelos BIM. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DOCUMENTAÇÃO DO PATRIMÔNIO ARQUITETÔNICO COM O USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS, 2., 2012, Belém. **Anais...** Belém: UFPA, 2012.

HUBER, D.; AKINCI, B.; ADAN, A.; ANIL, E.; OKORN, B.; XIONG, X. Methods for automatically modeling and representing as-built building information models.

NSF CMMI RESEARCH INNOVATION CONFERENCE, 2011, Atlanta. **Proceedings...** Atlanta: NSF, 2011, p. 1-8.

KLEIN, L.; LI, N.; BECERIK-GERBER, B. Imaged-based verification of as-built documentation of operational buildings. **Automation in Construction**, v. 21, p. 161-171, jan. 2012. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.05.023.

LAGÜELA, S.; DIAZ-VILARIÑO, L.; MARTÍNEZ, J.; ARMESTO, J. Automatic thermographic and RGB texture of as-built BIM for energy rehabilitation purposes. **Automation in Construction**, v. 31, p. 230-240, maio 2013. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.12.013.

MOUSSA, W., ABDEL-WAHAB, M., FRITSCH, D. Automatic Fusion of Digital Images and Laser Scanner Data for Heritage Preservation. In: IOANNIDES, M.; FRITSCH, D.; LEISSNER, J.; DAVIES, R.; REMONDINO, F.; CAFFO, R. (Eds.). **Progress in Cultural Heritage Preservation**. Berlim-Heidelberg: Springer, 2012, p. 76-85.

PENTILLÄ, H. Early Architectural Design and BIM. In: INTERNATIONAL CAAD FUTURES CONFERENCE, 12., 2007, Sydney. **Proceedings...** Sydney: CAAD, 2007, p. 291-302.

REMONDINO, F.; EL-HAKIM, S. Image-based 3D modeling: a review. **The Photogrammetric Record**, v. 21, n. 115, p. 269-291, set. 2006

SORIA-MEDINA, A.; MARTINEZ, J.; ARIAS, P.; ARMESTO, J.; BUFFARA-ANTUNES, A. Z. Three-Dimensional Modeling of the Romanesque Church of Santa Maria de Castrelos (Vigo - Spain) Using Terrestrial Laser Scanner. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XL-5/W2, p. 601-604, jul. 2013. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-601-2013.

TANG, P.; HUBER, D.; AKINCI, B.; LIPMAN, R.; LYTLER, A. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. **Automation in Construction**, v. 19, n. 7, p. 829-843, nov. 2010. DOI: 10.1016/j.autcon.2010.06.007.

UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA. **2030 Master Plan**. Adaptive Mitigation Management Approach, maio 2011.

VOLK, R.; STENGEL, J.; SCHULTMANN, F. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. **Automation in Construction**, v. 38, p. 109-127, mar. 2014. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.

Eloisa Dezen-Kempton
elo@ft.unicamp.br

Lúcio Soibelman
soibelman@usc.edu

Meida Chen
meidache@usc.edu

Alexandre Victor Müller Filho
alexandremullerfilho@gmail.com