

## Análise da integração de nuvens de pontos obtidas por varredura LASER terrestre estática e varredura de luz estruturada cinemática

### RESUMO

A representação e documentação do patrimônio cultural e de obras sacras para registro histórico, reconstrução ou reforma são de inestimável valor. A solução atual é a documentação 3D utilizando sistemas de varredura à LASER (SVL), onde tem-se muitas vantagens devido à alta densidade de pontos e informações radiométricas. Contudo este método pode apresentar grandes oclusões, além de demandar um longo tempo de varredura. Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para integrar duas nuvens de pontos obtidas por SVL terrestre estático (X300) e um sistema de varredura por luz estruturada (SVLE) terrestre móvel (F6). O objetivo deste trabalho é realizar a integração entre as duas nuvens de pontos geradas e avaliar os resíduos das informações obtidas. Os testes numéricos indicaram que o resultado do registro após ser utilizado o ICP (*Iterative Closest Point*) tem o resíduo máximo de 10 mm e quando se realiza medidas lineares tem-se discrepâncias máximas de 15 mm.

**PALAVRAS-CHAVE:** Iterative Closest Point. Mapeamento Estático. Mapeamento cinemático.

**Pedro Henrique Sousa Marques Oliveira**

[pedrocutia@gmail.com](mailto:pedrocutia@gmail.com)  
[orcid.org/0000-0003-3313-1309](https://orcid.org/0000-0003-3313-1309)  
Instituto Federal do Sul de Minas Gerais (IFSULDEMINAS), Inconfidentes, Minas Gerais, Brasil.

**Fabio Luiz Albarici**

[fabio.albarici@ifsulde Minas.edu.br](mailto:fabio.albarici@ifsulde Minas.edu.br)  
[orcid.org/0000-0003-4436-0561](https://orcid.org/0000-0003-4436-0561)  
Instituto Federal do Sul de Minas Gerais (IFSULDEMINAS), Inconfidentes, Minas Gerais, Brasil.

**Henrique Candido de Oliveira**

[hcandido@unicamp.br](mailto:hcandido@unicamp.br)  
[orcid.org/0000-0002-2783-4668](https://orcid.org/0000-0002-2783-4668)  
Universidade de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo, Brasil.

**Leonardo Henrique Rodrigues Ribeiro**

[leonardo.rodrigues@aleziteodolini.com](mailto:leonardo.rodrigues@aleziteodolini.com)  
[orcid.org/0000-0002-7017-7835](https://orcid.org/0000-0002-7017-7835)  
Alezi Teodolini Equipamentos e Comércio, São Paulo, São Paulo, Brasil.

## INTRODUÇÃO

A utilização de modelos 3D, associados ao gerenciamento de bancos de dados, são ferramentas que permitem o usuário extrair informações valiosas do ambiente mapeado, tornando esse tipo de modelagem fundamental no que se refere ao mapeamento tridimensional.

Os modelos 3D têm se tornado cada vez mais relevantes no âmbito das mais diversas áreas que necessitam de geração, documentação e gestão de dados precisos como: engenharias, arquitetura, arqueologia e quaisquer outras áreas que necessitam de Geoinformação e exigem fidelidade desses modelos, que por sua vez possuem a capacidade de descrever as formas reais dos objetos, considerando as mais diversas necessidades do usuário final.

Assim, os setores aqui citados tendem a se beneficiarem com esta tecnologia, pois as imagens e cenários representados por meio dos modelos gerados possuem uma grande riqueza de detalhes capazes de serem mensurados de forma precisa, evitando processos manuais que muitas vezes são custosos, difíceis e perigosos.

Nesse sentido, modelos 3D são cada vez mais utilizados para a documentação do patrimônio histórico, além de serem também utilizados para mapeamento de as-built, onde o responsável pelo empreendimento pode ter o mapeamento preciso de cada etapa da obra, podendo servir como documentação do trabalho executado e como insumo para vistoria e auditoria de contratos.

Os dispositivos mais utilizados neste tipo de documentação são os Sistemas de Varredura à LASER (SVL), que podem ser descritos como sensores ativos capazes registrar medidas angulares (horizontal e vertical) e lineares necessárias para o cálculo de coordenadas tridimensionais. Tais medidas, ao serem realizadas em uma dada frequência de varredura, permite a geração de uma densa nuvem de pontos 3D com boa densidade. Esta nuvem de pontos obtida, permite a extração de dados de interesse, como posição, dimensão e características estruturais dentre outras, visando atender os mais variados objetivos como, por exemplo, reconstrução de superfícies (HOPPE et al., 1992; ROCCHINI et al., 2002; RUCHAY; DOROFEEV; KALSCHIKOV2, 2019).

Para este trabalho além de usar Sistemas de Varredura à LASER (SVL) estático (Stonex X300), utilizou-se também um Sistema de Varredura por Luz Estruturada – (SVLE) móvel (Stonex F6). A partir das nuvens de pontos adquiridas por meio referidos sistemas, este trabalho realizará a integração das nuvens e analisará a acurácia das informações e o nível de detalhamento dos objetos mapeados.

O SVL estático vem sendo utilizado cada vez mais na documentação do patrimônio cultural, o qual visa mapear edificações e artefatos de importância cultural e histórica. Os SVL terrestres e os SVLE móvel possibilitam a geração de modelos fidedignos, além de permitir constatar possíveis danos sofridos aos objetos mapeados (GARCÍA-GÓMEZ; GOROSTIZA; MORAZA, 2011; COSTANTINO; ANGELINI; CAPRINO, 2008).

Conforme destacado em García-Gómez, Gorostiza e Moraza (2011), o SVL estático no mapeamento de patrimônio histórico sofre com oclusões causadas pelos objetos presentes nas cenas. Para tal, é necessário realizar observações de diferentes estações e posteriormente realizar o registro das nuvens. Contudo, para evitar oclusões necessita-se aumentar de forma considerável, o número de

estações de varredura, o que aumenta de forma expressiva o tempo do trabalho, ainda assim, com a aplicação desta metodologia tradicional, os problemas das oclusões permanecem presentes.

Aplicando a metodologia tradicional (ou seja, aumento do número de estações de varreduras) não é sinônimo de resolução do problema de oclusão. Um âmbito prático, quando se pretende realizar a varredura de objetos quadrados, onde seriam necessárias quatro poses de varredura do SVL estático para obter o modelo 3D deste objeto. Entretanto ainda assim observa-se oclusões em mapeamento do patrimônio histórico devido ao grande número de objetos na cena e impossibilidade de uma maior densificação de poses (estações).

Levando-se em conta que o tempo necessário para a tomada de uma cena com o SVL estático é em torno de 16 minutos (STONEX, 2020), e o tempo de captura do SVLE móvel dura aproximadamente 3 minutos para mapear o objeto de maneira completa, tem-se uma diferença de tempo significativa quando compara-se os dois sistemas de varredura.

Uma outra aplicação prática em que se torna inviável a utilização do SVL estático é sua utilização em ambientes de pequenas dimensões, como corredores estreitos ou cômodos pequenos comuns em edificações antigas. Em tais situações não seria possível utilizar SVL estático, pois o equipamento não captura dados a uma distância inferior a 2,5 m (STONEX, 2020), portanto em situações semelhantes as aqui apresentadas é necessário fazer o uso de outras tecnologias que possibilitem o mapeamento detalhado do local.

Diante das questões levantadas, e visando alcançar um nível aceitável de oclusões, além de poupar tempo no levantamento, surge então a possibilidade de utilizar o SVLE móvel, juntamente com o SVL estático - obtendo como resultado uma nuvem de pontos mais detalhada, gerada por meio do registro das cenas obtidas pelos dois equipamentos.

Em algumas aplicações, a exemplo do apresentado em literatura relacionada (ver PATRUCCO, *et al.*, 2019; ADAMOPOULOS; RINAUDO, 2019), o SVLE apresentou bons resultados quando utilizado para o mapeamento de obras de pequenas dimensões, o qual pode ser usado de forma sinérgica ao SVL estático para mitigar as oclusões. Diante dos problemas de oclusões gerados pelo SVL estático, nota-se a importância em se estudar e validar a integração entre SVL estáticos e SVLE móvel para obter um resultado final com uma quantidade de oclusões que possibilite o registro de patrimônios históricos.

Diversos autores, já trabalharam com os sistemas de varredura aqui descritos para realizar o mapeamento de patrimônio histórico (ver ABED *et al.*, 2015; KADOBAYASHI *et al.*, 2004; GRACIANO *et al.*, 2017; WEI *et al.*, 2010; CASTAGNETTI *et al.*, 2012), dentre outros, entretanto em nenhum dos trabalhos os autores realizaram a união dos dois sistemas de varredura visando alcançar um nível de precisão maior.

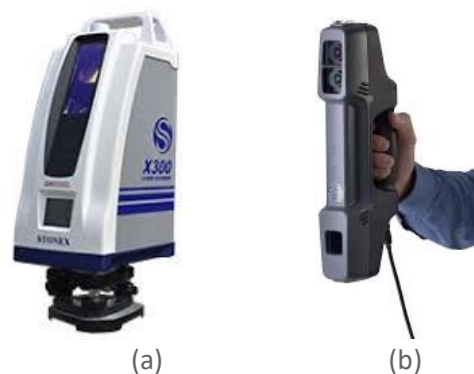
O objetivo dessa pesquisa é comparar e avaliar a sinergia entre as técnicas de mapeamento estático e móvel, via sistemas de varredura à LASER e por luz estruturada, bem como ressaltar suas vantagens de utilização em relação a técnica de mapeamento realizada apenas com SVL estático, além de apresentar possíveis utilizações com foco em registro de patrimônio histórico.

Este texto está organizado em sete seções. Na segunda seção apresenta-se os equipamentos utilizados no trabalho, bem como suas respectivas informações técnicas. Na terceira seção o fluxograma que sintetiza as ações realizadas no trabalho. Na quarta seção é descrito como foi realizado a aquisição de dados bem como o processamento das cenas. Na quinta seção é descrito a forma de como foi realizado a união das cenas. Já na sexta seção os resultados e discussões sobre o trabalho são apresentados, por fim as conclusões e possíveis aplicações do método avaliado compõem a sétima seção.

## MATERIAIS

Os sistemas de varredura utilizados neste trabalho são: Stonex X300 (SVL estático) e Stonex F6 (SVLE móvel), ambos representados na Figura 1. As características de funcionamento e aplicações destes equipamentos são distintas e serão apresentadas brevemente.

Figura 1 - Sistemas de varredura: (a) SVL estático X300 (b) SVLE móvel F6



Fonte: Stonex (2020).

O Stonex X300 é um SVL estático 3D. O princípio de funcionamento deste equipamento se baseia em duas tecnologias *LASER* e *LiDAR* (*Light Detection and Ranging*).

O *LASER* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) segundo SHAN e TOTH (2008), consiste em dispositivo que quando estimulado por uma fonte de energia externa, produz e emite um feixe ou pulso de radiação monocromático (comprimento de onda específico), coerente e colimado.

Já a tecnologia *LiDAR*, consiste na emissão de pulsos de energia *a LASER* em direção ao alvo, em curtos intervalos de tempo, e recepção destes pulsos por uma unidade de recepção (OLIVEIRA, 2013). Esse processo de emissão e recepção permite o cálculo da distância entre SVL e os alvos, por meio da medição do tempo de propagação do sinal (WEHR; LOHR, 1999).

O SVL X300 possui três portas de transmissão sendo: conector GPS, porta USB de alta velocidade e conexão Wi-Fi para a transmissão de dados. Duas câmeras da indústria são definidas dentro do equipamento com 10.7 MP. Além de contar com um campo de visão horizontal de 360° e vertical de 90° (-25° até +65°), possui um alcance de 2,5 a 300 m com uma precisão de 6 mm à 50 m e até 40 mm à uma

distância de 300 m. A frequência de emissão de pulso deste equipamento é de 40kHz (STONEX, 2020).

Contudo, os equipamentos de varredura a LASER têm sua precisão prejudicada a medida que a distância entre SVL e objeto aumenta, devido a lei de propagação de uma onda eletromagnética (DING; LIN; WANG, 2018), comprometendo o mapeamento dos alvos localizados distantes do sistema. Outro limitante (por ser um sistema estático) são as oclusões nas cenas devido à geometria de aquisição causando assim, perda de informações. Tal característica será minimizado com a metodologia utilizada neste trabalho.

Buscando minimizar as oclusões sem ter que realizar diversas outras cenas com SVL estático, o que demandaria expressivamente maior tempo na coleta de dados além de que certas oclusões continuariam a existir, optou-se por uma solução alternativa que consiste em utilizar o SVL X300 em conjunto como o SVLE Stonex F6. Nesse tipo de varredura, padrões luminosos são projetados sobre a superfície do objeto e um instrumento sensor captura a imagem dos padrões que são distorcidos devido ao relevo da superfície de projeção (REISS, 2007).

Segundo Geng (2011), se a cena é totalmente plana, o padrão mostrado na imagem adquirida é semelhante à da luz estruturada projetada. No entanto, quando a superfície da cena não é plana, a forma geométrica da superfície distorce a luz estruturada projetada, modelando assim o padrão luminoso conforme a geometria do objeto, onde em seguida uma unidade computacional processa as informações e gera a nuvem de pontos 3D dos objetos mapeados.

O SVLE móvel F6 funciona como um emissor projetando uma luz infravermelha de ondas curtas (*NIR - Near Infra-Red*) com comprimento de onda de 0,78 a 1,5  $\mu\text{m}$ , enquanto um receptor calcula a distância de cada ponto mapeado por meio de algoritmo de triangulação e da cena 3D por paralaxe estereoscópica (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019). O equipamento possui uma frequência de emissão de pulso de 0,64 MHz, um alcance que vai de 0,5 a 4,5 m, com uma precisão de alcance de 0,1% a 0,2% com relação à distância. A câmera RGB possui uma resolução de 1,3 MP.

O uso do comportamento de onda NIR permite operar em qualquer condição de iluminação sem ter alvos pré-definidos na cena. O equipamento é composto por três sensores, sendo dois deles responsáveis por enviam e recebem a luz infravermelha e mais uma câmera RGB responsável por captar as informações espectrais (PATRUCCO *et al.*, 2019).

Os sensores presentes no F6 utilizam de um algoritmo para executar duas operações de forma simultânea: primeiro ocorre o registro da distância entre o SVLE e objeto, calculado pelo sistema de luz estruturada, e segundo acontece o registro da cor do objeto ao qual é obtido através das câmeras RGB. Assim, o algoritmo associa cor e geometria convertendo esses dois dados em uma nuvem de pontos, colorido e registrando-a quadro a quadro em tempo real. Gerando como resultado uma nuvem de pontos colorida. Entretanto se tal equipamento operar em um local onde não possui iluminação ambiente a nuvem não será colorida, pois o processo de coloração depende dos dados RGB captados pela câmera (PATRUCCO *et al.*, 2019).

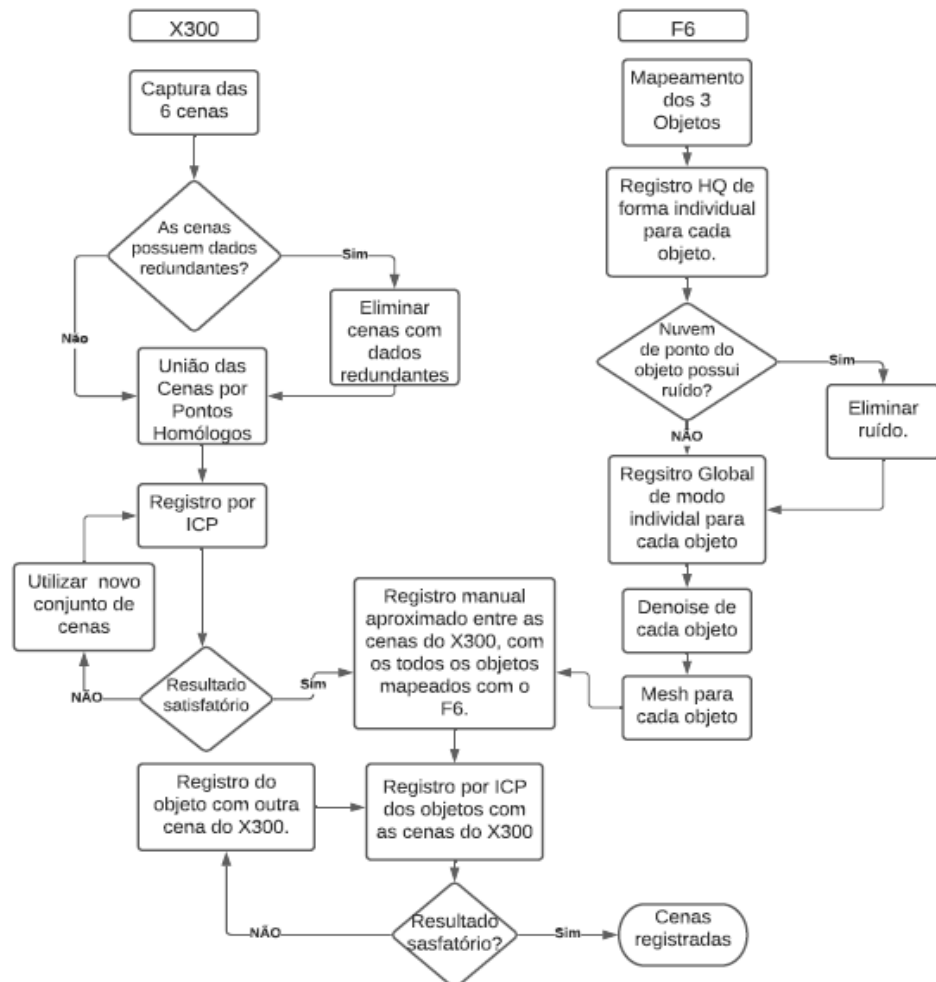
Para determinar um parâmetro de medidas dos objetos observados, e para referenciar as estações de imageamento do X300, utilizou-se a estação total Leica TS06 com precisão angular de 5" e precisão nominal de 2 mm + 2 ppm na distância.

## MÉTODO

O trabalho foi realizado em três etapas, na primeira foram realizados o mapeamento e o processamento dos dados com o X300, a segunda etapa foi realizada com o F6 mapeando os objetos que sofreram as maiores oclusões na etapa anterior. Por fim utilizou-se o *software Stonex Recosnstructor* para o registro das nuvens de ponto obtidas através dos diferentes sistemas de varredura.

O fluxograma da Figura 2 sintetiza o desenvolvimento do trabalho, apresentando as etapas de trabalho detalhadas.

Figura 2 – Fluxograma dos procedimentos realizados



Fonte: Autoria própria (2020).

## AQUISIÇÃO DOS DADOS E PROCESSAMENTO DAS CENAS

As cenas utilizadas nesse trabalho foram tomadas no interior da igreja de São Geraldo Magela, localizada na cidade de Inconfidentes/MG. Visando uma iluminação mais uniforme e reduzir a influência da luz solar sobre a captura das cenas optou-se por tomá-las com as portas da igreja fechadas.

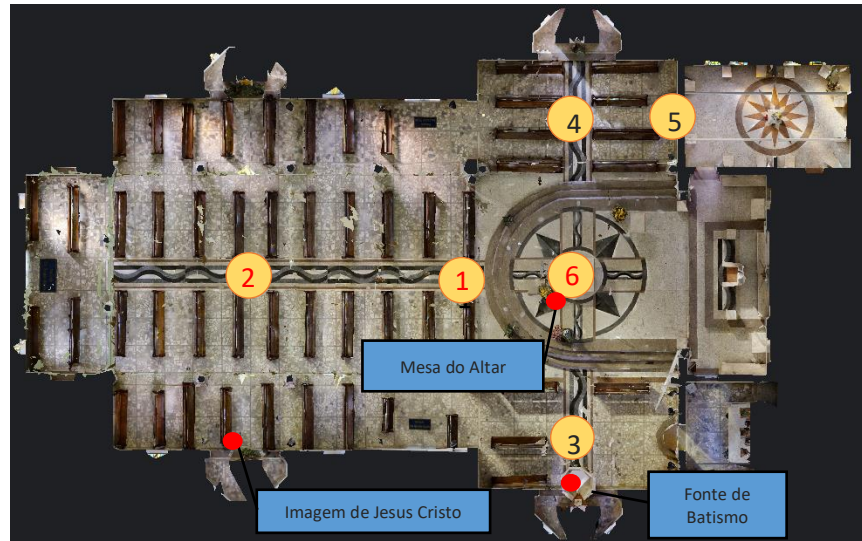
O levantamento se deu em duas etapas, a primeira realizada com o X300 e a segunda etapa com o F6. A tomada das cenas para ambos os equipamentos é fácil e simplificada, tendo apenas alguns requisitos básicos para a conexão. No X300, o controle é realizado através de um smartphone (iOs, Android ou Windows Mobile) ou qualquer outro dispositivo capaz de se conectar com uma rede Wi-Fi. Já o F6 é controlado e configurado por um computador portátil ou um *tablet*. Ambos têm a capacidade de acompanhamento da coleta de observações em tempo real.

Na primeira etapa, para se obter a melhor representação interna do prédio da Igreja, optou-se por realizar a captura das cenas posicionando o SVL X300 em locais mais centralizados, assim tendo uma otimização da varredura sem perda de qualidade. Dessa forma, foram necessárias seis cenas, conforme ilustra a Figura 3. O modo de captura utilizado na tomada das cenas foi: modo padrão de mapeamento, onde a captura leva em torno de 16 mim para a tomada completa da cena (360°) e a aquisição das fotografias. Optou-se pelo modo Padrão devido à grande quantidade de pontos coletados, associado a um tempo de captura relativamente pequeno quando comparado as demais opções de coleta de informação (ver STONEX, 2020 ([https://www.stonex.it/wp-content/uploads/2020/06/X300\\_Brochure\\_ENG.pdf](https://www.stonex.it/wp-content/uploads/2020/06/X300_Brochure_ENG.pdf))), no modo utilizado, o X300 coleta aproximadamente 16 milhões de pontos por cena.

Para fazer a captura das cenas selecionou-se os locais onde o X300 teria a melhor visada (dentro das suas especificações) e com menor impacto de obstáculos internos, para minimizar a quantidade de estações e obter o melhor resultado, ou seja, redução de oclusões (Figura 3). Mesmo com estes cuidados, sabe-se que o X300 possui limitações com a distância e ângulo de varredura das cenas. Como resultado dessas limitações, algumas feições seriam representadas de maneira disforme. De tal modo, utiliza-se o SVLE móvel F6 para reduzir as deformidades e oclusões e melhorar a qualidade da nuvem de pontos gerada pelo X300. Portanto, faz-se indispensável o registro entre as duas nuvens de pontos.

Com o término do mapeamento com o X300, fez-se o processamento das observações e o registro das nuvens utilizando-se o *software* proprietário do equipamento (*Stonex Recosnstructor*). Carregou-se as seis nuvens de pontos geradas pelo X300 e utilizou-se a ferramenta de registro por pontos homólogos. Analisando-se as cenas obtidas, notou-se que as cenas 3, 4 e 5 continham muitas informações redundantes (excesso de observações de um mesmo objeto) em relação as cenas 1, 2 e 6 (as quais estão destacadas em vermelho na Figura 3). Esse excesso de observações levou a um grande esforço computacional e um longo tempo de processamento, porém não melhorou o problema de oclusão. Devido este fato, optou-se por utilizar apenas as cenas 1, 2 e 6, reduzindo o esforço computacional, e tempo de processamento. A Figura 3 representa a planta baixa da igreja e ilustra a posição em que as cenas foram tomadas pelo X300, já os pontos em vermelho com o nome destacado em azul, indica as feições tomadas com o F6.

Figura 3 – Planta baixa da Igreja com a respectivas localizações dos objetos mapeados pelo F6 e das cenas do X300



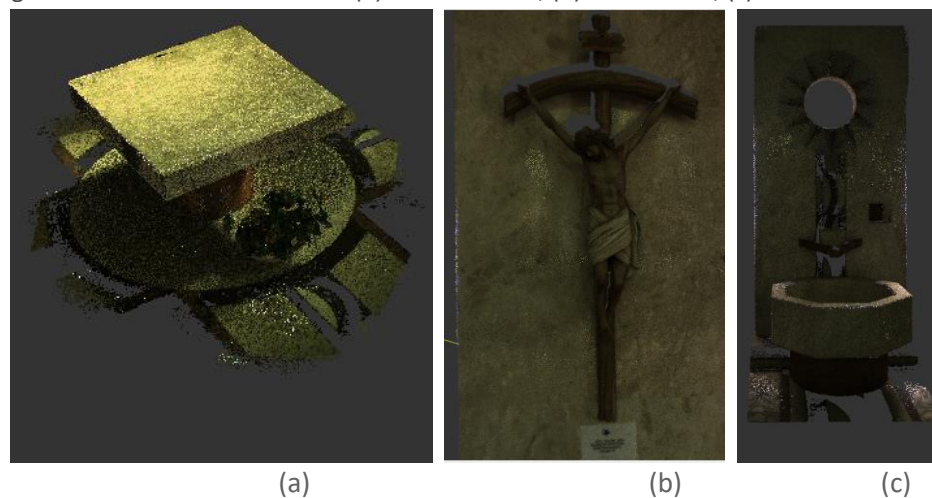
Fonte: Autoria própria (2020).

Definindo-se então as cenas que iriam ser utilizadas no trabalho, realizou-se o registro das cenas utilizando-se da ferramenta “registro por ICP” disponível no *Stonex Reconstructor*, possibilitando assim avaliar a qualidade das cenas.

Com o término do registro das cenas obtidas por meio do X300 verificou-se que a mesa central do altar, a fonte utilizada para batismo e também a imagem de Jesus Cristo (Figura 3) sofreram com as maiores degradações devido as oclusões.

Diante disso, iniciou-se a segunda etapa de mapeamento com o SVLE móvel (F6). Na captura da cena, utilizou-se o modo padrão onde o mesmo possui uma taxa de varredura de 0,64 MHz. As cenas foram tomadas a uma distância de aproximadamente 1,5 m (conforme especificações) de cada objeto, espaço este suficiente para uma boa coleta de dados. A Figura 4 representa a nuvem de pontos resultantes dos três objetos gerados a partir SVLE móvel (F6).

Figura 4 – Cenas obtidas com F6: (a) Mesa do altar; (b) Jesus Cristo; (c) Fonte de batismo



(a)

(b)

(c)

Fonte: Autoria própria (2020).



Com o fim da varredura utilizando o F6, os dados brutos já são armazenados dentro da interface do *software* proprietário *Mantis Vision Echo*, onde procedeu-se todo o processamento da nuvem de pontos.

No processamento das cenas algumas etapas são recomendadas pelo fabricante. (1) Realizar o Registro de alta qualidade (*High Quality*), este procedimento faz a correção do desalinhamento que ocorre durante a varredura da cena. (2) Excluir os segmentos (*Cleanup Segments*) que contém ruídos que não se conectam com a cena principal, ou seja, são ruídos que não descrevem o objeto. Dessa forma, tem-se apenas o segmento principal da cena sem ruídos. (3) Realizou-se o registro global, onde todos os quadros 3D foram unidos em um único sistema de coordenadas, garantindo assim uma melhor precisão da nuvem de pontos.

(4) Aplicou-se, após obter o registro global, a ferramenta *Denoise*, essa ferramenta baseia-se no algoritmo SOR (*Statistical Outlier Removal*), que usa a estatística de vizinho mais próximo para filtrar dados discrepantes (RUCHAY; DOROFEEV; KALSCHIKOV, 2019). Ele calcula primeiro a distância média de cada ponto para seus vizinhos e seus respectivos desvios-padrão, todos os pontos que estiverem fora do intervalo definido pela média e desvio-padrão das distâncias globais são considerados outlier e excluídos (MANTIS VISION, 2018).

A Mantis Vision (2018), informa que os cálculos do algoritmo SOR utilizam-se do Coeficiente Outlier, que assume o valor de 1 para os pontos mais próximos e 10 para os pontos mais distantes, com esta lógica os parâmetros deste coeficiente remove os pontos discrepantes com base na distância do plano de referência e não altera a posição dos pontos existentes.

(5) Para finalizar o processamento das cenas gerados pelo F6 realizou-se o *Mesh*, processo este que converte as nuvens de pontos em um campo de distância volumétrica, a fim de reconstruir a superfície implícita (MANTIS VISION, 2018). As etapas aqui descritas foram realizadas para a nuvens de pontos dos três objetos. Com isso, encerra-se o processamento referente ao SVLE móvel (F6), garantindo assim uma boa qualidade nos dados obtidos.

## UNIÃO DAS CENAS

Para se ter o registro das nuvens de pontos do X300 e do F6 tradicionalmente utiliza-se, o algoritmo *Iterative Closest Point* (ICP) o qual é usado para registrar nuvens de pontos distintas, a fim de formar uma nuvem de pontos única (THOMAS *et al.*, 2020). O método foi originalmente desenvolvido por Besl e McKay (1992), onde apresentaram um algoritmo que inicialmente, estabelece *pseudo* correspondências ponto-a-ponto entre o par de nuvens de pontos 3D.

Os parâmetros de registro do algoritmo são obtidos por meio de uma função erro que minimiza o somatório da distância entre os pontos na nuvem de referência e de pesquisa (SANTOS; KHOSHELHAM, 2015). O algoritmo por sua vez admite que os pontos mais próximos sejam correspondentes. E em seguida de forma iterativa utiliza uma função que minimiza a distância euclidiana entre os pontos e calcula os parâmetros de transformação (PAVAN; SANTOS, 2015). Com isso, o ICP, fixa uma nuvem de pontos de referência, enquanto a outra é movida no espaço até que haja uma máxima correspondência aos dados tomados como referência (BESL; MCKAY, 1992).

De modo geral, as nuvens de pontos contêm alguns pontos que podem ser denominados como “pontos de ruído”. Para evitar este tipo de problema, são adicionados critérios para eliminar ou pelo menos diminuir esse problema (PROCHAZKOVA; MARTISEK, 2018). Um destes critérios é determinar um limite de distância para correlacionar os pontos, garantindo assim que pontos localizados muito distantes do local de referência da nuvem de pontos não sejam unidos, garantindo assim que o registro das nuvens seja mais rápido e mais fidedigno (BESL; MCKAY, 1992).

Para a realização deste trabalho utilizou-se duas nuvens de pontos, onde o ICP foi usado para se obter um registro mais preciso entre as nuvens de pontos do F6 com a nuvem X300, o qual foi tomado como referência. Em resumo, ao utilizar-se uma das nuvens como referência, o ICP encontrará uma transformação que satisfaça a melhor correspondência entre todos os pontos nas duas nuvens (PROCHAZKOVA; MARTISEK, 2018; DONG, *et al.*, 2020).

Com as nuvens de pontos dos dois sistemas já processadas, todas as cenas foram carregadas no *software* proprietário *Reconstructor* para a união das informações coletadas com os dois equipamentos. A nuvem de pontos do X300 foi tomada como base para que, posteriormente, a nuvem do F6 pudesse ser colocada sobre ela. Na primeira etapa foi realizado um registro manual aproximado, onde foi selecionado pontos homólogos as duas nuvens unindo assim, de forma aproximada, as nuvens mapeadas (registro grosseiro). Utilizou-se desta técnica pois Dong *et al.* (2020), afirmam que quando se utiliza o ICP para o registro de cenas, pode ocorrer problemas de alinhamento inicial. Visando evitar o referido problema, um alinhamento inicial de forma grosseira (manual) foi realizado contribuindo para um melhor alinhamento das nuvens. O processo descrito foi realizado para 3 objetos mapeados com o F6.

Quando todas as nuvens de pontos do F6 estavam em seus locais aproximados com relação a nuvem do X300, realizou-se o registro de ICP. O registro se deu de forma que o objeto mapeado pelo F6 a ser registrado na nuvem de pontos do X300 estivesse o mais próximo possível da estação do X300. Como representado na Figura 3, a fonte de batismo está localizada mais próximo da cena 6, logo a fonte foi registrada com relação a cena em questão. Seguindo este mesmo princípio de registro de cenas a imagem de Jesus Cristo foi registrada em relação a cena 1 e a mesa do altar em relação as cenas 2.

O critério usado para o registro de cenas vai de encontro ao descrito por Ding, Lin e Wang (2018), os quais afirmam que os equipamentos de varredura a LASER têm sua precisão prejudicada à medida que a distância entre SVL e objeto aumenta, devido a lei de propagação de uma onda eletromagnética. Como o registro de cenas nesse trabalho foi realizado utilizando as cenas mais próximas o erro de propagação eletromagnética é minimizado, garantindo assim uma precisão maior no registro.

Para que pudesse ter um parâmetro de comparação entre as medidas obtidas com o X300 e o F6 utilizou-se como padrão as medidas obtidas com a estação total de modo a validar as potencialidades de mensuração para diversas finalidades.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizou-se a função registro de uma nuvem em função de outra pelo método do ICP, os resultados estão representados na Tabela 1 a qual contém os valores dos resíduos do registro ICP para cada um dos objetos analisados, bem como as referências de registro para cada cena:

Tabela 1 – Valores de ICP

Objeto	Referência (Cenas X300)	ICP (cm)
Mesa do Altar	Cena 1	1,00
	Cena 1 + cena 6	0,21
Fonte de Batismo	Cena 6	0,37
Imagem de Jesus Cristo	Cena 2	0,15

Fonte: Autoria própria (2020).

Nota-se que o resultado do registro, após ser utilizado o ICP, varia para cada cena, onde o usuário pode definir o valor de tolerância atendido bem como o número de iterações (ver: BESL; MCKAY, (1992)), para este trabalho utilizou-se como parâmetro de parada 20 iterações, que segundo Pribanić e Džapo e Salvi (2009) é suficiente para uma boa convergência utilizando o método ICP para registro. Verifica-se na Tabela 1 que se obteve como máximo o valor de 1 cm, para a mesa do altar e com o menor valor para a imagem de Jesus Cristo, com 0,15 cm.

Explica-se o menor resultado de ICP na imagem de Jesus Cristo, devido a Cena 2 do X300 estar localizada a aproximadamente 7 metros da feição, o que garantiu assim uma boa densidade de pontos e também uma boa resolução espacial. Já a fonte de batismo capturada pela Cena 6 do X300 que se encontrava a uma distância de 10 metros, obteve um resultado de ICP um pouco maior 0,37 cm.

Já a mesa do altar mapeada através da Cena 1, distante a apenas 5 metros do alvo, obteve o pior resultado de registro por ICP com 1 cm. Apesar de estar a uma distância onde o X300 deveria ter boa densidade de pontos, apenas os pontos da parte frontal da feição foi escaneada, logo o único conjunto de ponto utilizado no registro por ICP. Nota-se assim a necessidade de se utilizar o sistema móvel para obter um conjunto de pontos maior e reduzir as oclusões – falta de dados.

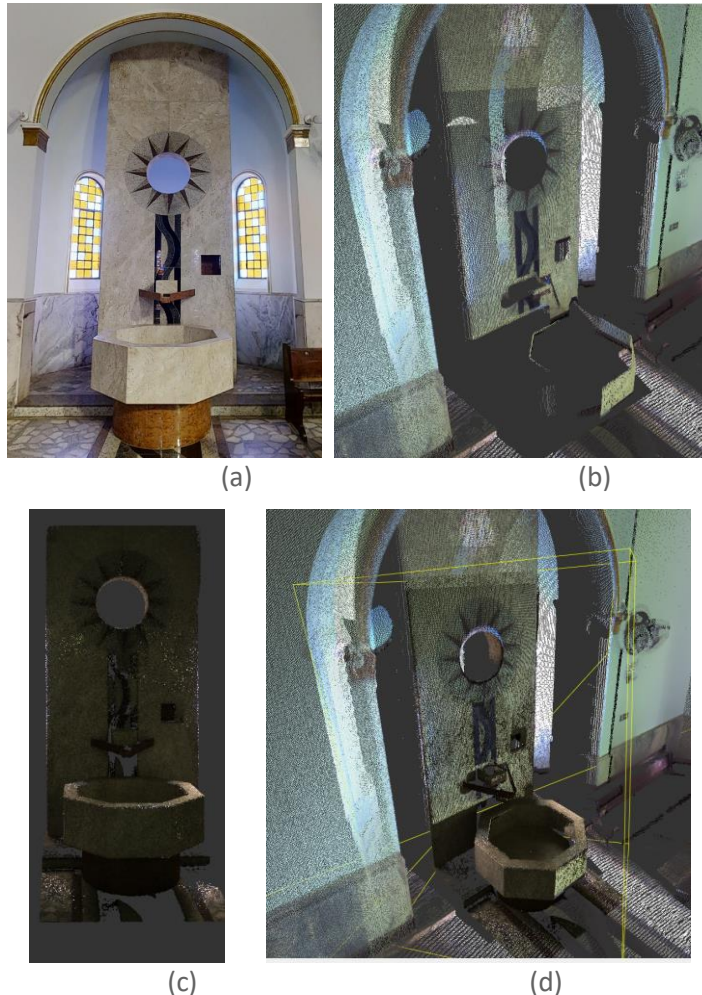
Na tentativa de melhoria do resultado do ICP para a mesa do altar, viu-se que a feição também foi escaneada pela Cena 6, o que possibilitou complementar a nuvem de pontos da referida mesa, assim, realizou-se o registro por ICP da mesa tomando as Cenas 1 e 6 como referência para obter um novo resultado de registro. Diante de uma maior quantidade de pontos homólogos disponíveis para realizar a integração das nuvens de pontos, obteve o resultado de 0,21 cm conforme Tabela 1.

Portanto, com base nos resultados gerados na Tabela 1, verifica-se que a união das nuvens de pontos se mostrou exequível, além de se mostrar bons resultados obtidos no registro oriundos do ICP.

Com a comprovação da integração das nuvens de pontos plenamente possível, pode-se visualizar que com a integração das nuvens de pontos houve uma

redução nas oclusões nas nuvens geradas pelo X300. A Figura 5 ilustra esta situação.

Figura 5 - (a) Imagem Original da Fonte; (b) Fonte com o X300; (c) Fonte com F6; (d) Fonte com união das cenas



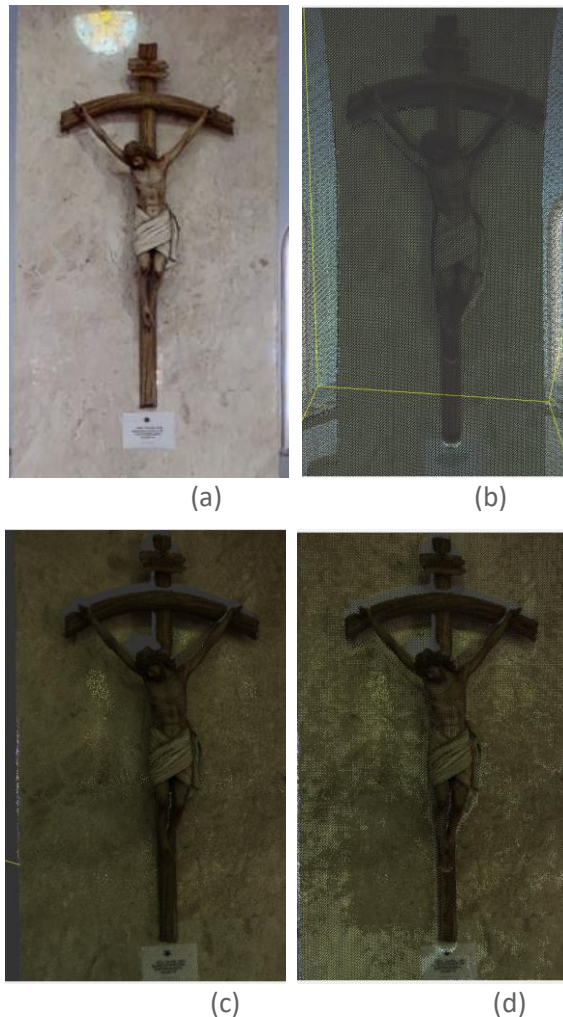
Fonte: Autoria própria (2020).

Na Figura 5b, tem-se o melhor ângulo na obtenção das informações sobre a fonte na cena do X300, e na Figura 5c, a qual foi gerada pelo F6, percebe-se que além de uma menor quantidade de oclusões quando comparado com a nuvem de pontos do X300, a nuvem de pontos gerada pelo F6 é mais densa. Com a integração destas duas cenas (Figura 5d) tem-se a complementação das oclusões na Figura 5b. Logo, ao compararmos a Figura 5a (original) com a Figura 5d (integrada pelos dois scanners) nota-se a qualidade dos detalhes da fonte, além da potencialidade para documentação histórica, por exemplo de museus.

Outro ponto importante a ser observado é a obtenção de uma nuvem de pontos do interior da cavidade onde a água fica armazenada no rito de batismo (Figura 5d), tal cavidade não seria possível de ser bem mapeada com SVL estático devido sua geometria e o seu posicionamento na igreja, fato este que não permitiria o X300 percorrer o entorno da fonte. Diante de tal situação podemos ver mais uma vantagem de se integrar a nuvem de pontos dos equipamentos de distintas tecnologias.

Na Figura 6 tem-se a feição que mostra a imagem de Jesus Cristo. A Figura 6a é a imagem original, na Figura 6b, tem-se a cena do X300, e na Figura 6c, a cena do F6.

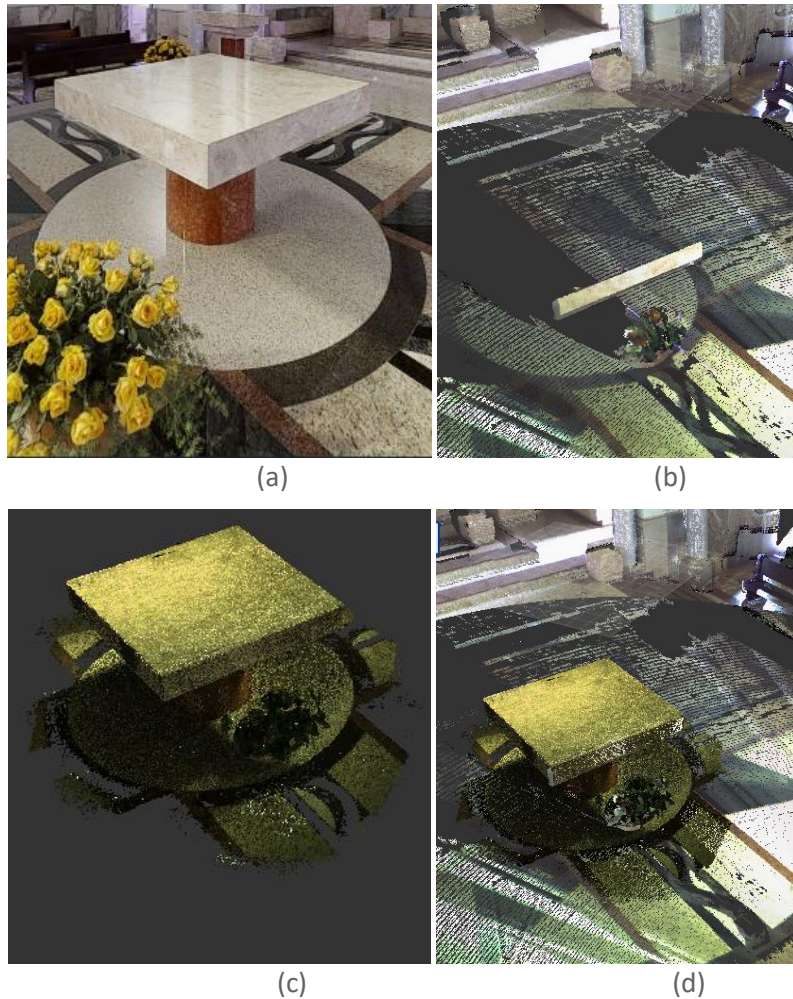
Figura 6 - a) Imagem Jesus original (b) Jesus com o X300; (c) Jesus com F6; (d) Jesus com união das cenas



Fonte: Autoria própria (2020).

Ao se analisar as cenas das Figuras 6b e 6c, consegue-se notar a maior resolução espacial e melhor visualização na Figura 6c. A Figura 6b, ilustra o problema clássico dos SVL terrestre estático, limitado às distâncias e também a obstáculos ou simplesmente a baixa densidade de pontos na cena. A Figura 6b ao ser integrada (ou complementada) pela Figura 6c (SVLE móvel), resulta na Figura 6d, onde tem-se uma melhora de forma determinante à cena. Pode-se verificar a mesma situação na Figura 7. Na Figura 7b, o X300 obteve apenas a parte frontal do altar (limitado pela grande distância da feição e pela geometria do objeto) não tendo a possibilidade de mensuração ou reconstrução histórica de qualquer tipo, mas ao adicionar-se a cena do F6 (Figura 7c), têm-se a Figura 7d, onde pode-se notar a feição com sua forma e dimensão natural. A Figura 7a (original), quando analisada com a Figura 7d (nuvens de pontos integrada), observa-se a melhora na resolução espacial e radiométrica, além de um complemento da nuvem de pontos do objeto.

Figura 7 – (a) Imagem Mesa do Altar original (b) Mesa do Altar com o X300; (c) Mesa do Altar com F6; (d) Mesa do Altar com união das cenas



Fonte: Autoria própria (2020).

Se pensarmos em arqueologia, arquitetura e principalmente em documentação de patrimônio histórico, a Figura 7 ilustra perfeitamente a riqueza de detalhes alcançados com tecnologia dos SVL, percebe-se ainda que com o uso da metodologia proposta nesse trabalho é possível reduzir de forma expressiva as oclusões na nuvem de pontos resultante.

De modo a corroborar com o potencial metodológico aplicado neste trabalho, fez-se uma análise numérica através de medições como largura, espessura, altura e comprimento das feições utilizando-se das nuvens a nuvem do X300 e a nuvem formada pela integração das nuvens geradas pelo X300 e pelo F6, chamada no texto de união de cenas.

Tomando como referência as medidas obtidas com a estação total. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Medições comparativas

Objeto	Dimensão	X300 (m)	União de Cenas F6 /300 (m)	Estação Total (ET) (m)	Discrepância ET/união de cenas (mm)	Discrepância X300/ ET (mm)
Mesa do Altar	Largura do Tampo	1,484	1,492	1,490	-2,0	6,0
	Espessura do Tampo	0,203	0,200	0,199	-1,0	-4,0
Fonte de Batismo	Comprime nto do Sextavado	0,612	0,623	0,615	-8,0	3,0
	Altura do Sextavado	0,479	0,489	0,492	3,0	13,0
Imagem de Jesus Cristo	Altura da Cruz	2,100	2,084	2,085	1,0	-15,0
	Largura da Cruz	0,977	0,987	0,986	-1,0	9,0

Fonte: Autoria própria (2020).

Nota-se que há uma pequena diferença entre os valores de medidas obtidos com cada um dos equipamentos, parte dessas discrepâncias podem ser atribuídas ao erro de pontaria, cometido do ato da seleção de pontos no *software*, visto que a seleção de pontos não é idêntica nas diferentes cenas. As discrepâncias foram analisadas em relação à estação total (referência). Para a mesa do altar as discrepâncias máximas foram obtidas com o X300, na fonte de batismo o comprimento foi pior na união de cenas e a altura no X300, a Imagem de Jesus Cristo em ambos os casos a discrepância foi pior quando se utilizou apenas a nuvem de pontos obtidas com o X300.

As discrepâncias máximas obtidas pelo X300 podem ser explicadas por dois fatores: o primeiro é a degradação da qualidade da cena em função da relação distância do equipamento para o objeto imageado, isso aconteceu na discrepância de 15 mm na altura da cruz. O segundo e não menos importante, é a baixa resolução espacial da cena, causadas por oclusão, esse problema ocorreu principalmente na fonte de batismo, onde a discrepância do X300 tem valor de 13 mm.

Diante da Tabela 2 nota-se que na maioria dos casos o resultado da união das cenas se mostrou mais próximo as medidas tidas como referência do que as dimensões mapeadas apenas com o X300. A maior discrepância encontrada para a união das cenas foi de foi de 8 mm obtida no comprimento do sextavado da fonte de batismo, contudo o erro pode ser considerado pequeno, e atende a muitas aplicações nas áreas de engenharia, arquitetura e documentação histórica e de obras sacras.

## CONCLUSÃO

Muitos trabalhos que se utilizam de nuvens de pontos necessitam de boa acurácia e boa resolução espacial, porém alguns limitantes como, distância e obstáculos na aquisição das cenas, podem ocasionar depreciação na resolução

espacial e com isso uma depreciação na obtenção das informações confiáveis/precisas.

Neste trabalho apresentou-se a integração de duas nuvens de pontos obtidas através de um SVL estático X300 e um SVLE móvel F6. A metodologia proposta foi capaz de se obter informações como, largura, espessura, comprimento e altura de feições com nível milimétrico.

Nos resultados apresentados na Tabela 1, verifica-se que o registro de duas nuvens de pontos adquiridas com equipamentos distintos se mostrou possível, apresentando pequenas discrepâncias com relação aos resultados oriundos do registro por ICP, comprovando assim a eficiência do método aqui apresentado.

A Tabela 2, evidencia que a união das cenas comparado ao mapeamento feito apenas com o X300, apresenta resultados mais próximos aos valores tomados como referência, provando assim que a metodologia apresentada neste trabalho contribui para uma melhora na precisão dos dados gerados.

Mas a principal vantagem da metodologia apresentada é a possibilidade de não necessitar refazer o trabalho/projeto novamente, caso alguma feição no ato da aquisição das cenas com SVL estático (X300) tenha baixa resolução espacial ou baixo número de pontos homólogos, tal problema pode ser resolvido com uma nuvem de pontos do SVLE móvel, o qual melhorará o resultado a ser apresentado tanto no complemento das oclusões quanto na densidades da nuvem de pontos (conforme Figura 5, 6 e 7).

Diante dos bons resultados obtidos e das diversas vantagens apresentadas pode-se explorar as aplicabilidades desse sistema de mapeamento. Contudo, a metodologia aplicada neste trabalho pode ser utilizada, por exemplo, em *as-built*, documentação histórica e de obras sacras, arqueologia e arquitetura, onde tem-se a escanerização de uma área/local por completo, caso exista alguma modificação na área mapeada, para fazer a atualização do projeto não é necessário que realizar novamente o levantamento por completo, mas apenas o local onde houve a alteração, agilizando de forma significativa o processo de atualização do projeto.



# Analysis of the integration of point clouds obtained by static terrestrial LASER scanning and Kinematic structured light scanning

## ABSTRACT

The representation and documentation of cultural heritage and sacred works for historical registration, reconstruction or renovation are invaluable for society. The current solution is 3D documentation using LASER scanning systems (SVL), where there are many advantages due to the high density of points and radiometric information. However, this method can present major occlusions, in addition to requiring a long mapping time. This work presents a methodology to integrate two point clouds obtained by static terrestrial SVL and a mobile terrestrial structured scanning system (SVLE). The purpose of this work is to perform the integration between the two point clouds generated and to evaluate the residual information obtained. The numerical tests indicated that the registration result after using the ICP (Iterative Closest Point) has a maximum value of 0.01 m and for linear a maximum discrepancy of 15 mm, 1.1 mm was obtained.

**KEYWORDS:** Iterative Closest Points . Static Scanner. Mobile Scanner.

## AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à empresa Alezi Teodolini Equipamentos Topográficos e Comércio pela prontidão ao empréstimo do SVL estático e SVLE móvel utilizados, agradecem também ao IFSULDEMINAS Campus Inconfidentes pelo empréstimo da estação total, e a paróquia São Geraldo Magela por ceder o espaço utilizado para o desenvolvimento do trabalho.

## REFERÊNCIAS

ABED, F.; IBRAHIM, O.; JASIM, L.; KHALAF, Y.; HAMEED, H.; HUSSAIN, Z. Terrestrial Laser Scanning to Preserve Cultural Heritage in Iraq Using Monitoring Techniques. *In: PROCEEDINGS OF THE 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE OF BUILDINGS, CONSTRUCTION AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING, Anais [...]*. Baghdad: Iraq, 2015.

ADAMOPOULOS, E.; RINAUDO, F. An Updated Comparison on Contemporary Approaches for Digitization of Heritage Objects. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON METROLOGY FOR ARCHAEOLOGY AND CULTURAL HERITAGE, 4., Florence. Anais [...]*. Florence: International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, 2019.

BARBOSA, C. C. F., NOVO, E. M. L. M., MARTINS, V. S. **Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos – Princípios e Aplicações**. 1 ed. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. P.161. E-Book.

BESL, P.J.; MCKAY, NEIL D.. A method for registration of 3-D shapes. **IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence**, v. 14, n. 2, p. 239-256, fev. 1992. <http://dx.doi.org/10.1109/34.121791>.

CASTAGNETTI, C.; BERTACCHINI, E.; CAPRA, A.; DUBBINI, M. Terrestrial Laser Scanning for Preserving Cultural Heritage: Analysis of Geometric Anomalies for Ancient Structures. *In: PROCEEDINGS OF THE FIG WORKING WEEK2012 ON KNOWING TO MANAGE THE TERRITORY, PROTECT THE ENVIRONMENT, EVALUATE THE CULTURAL HERITAGE, Rome. Anais [...]*. Roma: FIG Working Week 2012, 2012.

COSTANTINO, M. D., ANGELINI, M. G., CAPRINO, G. Planning of a metric historical and documental archive for the realization of a city's cultural portal. *In: THE 14<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON VIRTUAL SYSTEMS AND MULTIMEDIA*. Limassol, **Anais [...]**. Limassol: Conference: 14th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia, 2008.

DING, H., LIN, H.; WANG, X.. Ranging Precision Analysis of Stonex X300 3D Laser Scanner. **Materials Science and Engineering Conference Series**. v. 423, n. 1, p. 1-6, 2018. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/423/1/012146>.

DONG, Z., LIANG, F., YANG, B., XU, Y., ZHANG, Y., LI, J., WANG, Y., DAI, W., FAN, H., HYYPPA, J., STILLA, U.. Registration of Large-scale Terrestrial Laser Scanner Point Clouds: A Review and Benchmark. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v. 163, p.327–342, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.03.013>.

GARCÍA-GÓMEZ, I., GOROSTIZA, M. F. de., MORAZA, A. M.. Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios. **Arqueología de La Arquitectura**, n. 8, p. 25-44, dez. 2011. <http://dx.doi.org/10.3989/arqarqt.2011.10019>.

GENG, J.. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. **Advances. Optics And Photonics**, v. 3, n. 2, p. 135-150, 31 mar. 2011. <http://dx.doi.org/10.1364/aop.3.000128>.

GRACIANO, A., ALVARADO, L.O., SÁNCHEZ, R.J.S., HIGUERUELA, F.R.F.. Digitization of religious artifacts with a structured light scanner. **Virtual Archaeology Review**, v. 8, n. 17, p. 49-56, 26 jul. 2017. <http://dx.doi.org/10.4995/var.2016.4650>.

HOPPE, H., DEROSE, T., DUCHAMP, T., MCDONALD, J., STUETZLE, W.. Surface Reconstruction from Unorganized Points. **The 19<sup>th</sup> Annual Conference On Computer Graphics And Interactive Techniques**. v. 2, n. 26, p. 71-78, 1992. <http://dx.doi.org/10.1145/133994>.

KADOBAYASHI, R., KOCHI, N., OTANI, H., FURUKAWA, R.. Comparison and evaluation of laser scanning and photogrammetry and their combined use for digital recording of cultural heritage. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 35. n. 5, p. 401-406, 2004.

MANTIS VISION. **F6 SMART™ Echo: volumetric handheld camera user guide**. 2018. 115 p. Disponível em: <https://mantis-vision.com/professional-solutions/echo-software-about/>. Acesso em: jun. 2020.

OLIVEIRA, H. C. **Detecção de áreas de oclusão para geração de ortoimagem verdadeira utilizando dados laser**. 2013. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas), Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2013.

PROCHAZKOVA, J.; MARTISEK, D.. Notes on iterative closest point algorithm. *In*: CONFERENCE ON APPLIED MATHEMATICS APLIMAT. Bratislava. **Anais [...]**. Bratislava: 17th Conference on Applied Mathematics APLIMAT 2018, 2018.

PATRUCCO, G., RINAUDO, F., SPREAFICO, A.. A New Handheld Scanner for 3D Survey of Small Artifacts: the Stonex F6. **The International Archives of the**

**Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLII-2/W15, p. 895–901. 2019.. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-895-2019>.

PAVAN, N. L.; SANTOS, D. R.. Um Método Automático para Registro de Dados Laser Scanning Terrestre usando Superfícies Planas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 3, p. 572-589, set. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702015000300032>.

PRIBANIĆ, T., DŽAPO, H., SALVI, J.. Efficient and Low-Cost 3D Structured Light System Based on a Modified Number-Theoretic Approach. **Journal on Advances in Signal Processing**, 2009. <https://doi.org/10.1155/2010/474389>.

REISS, M. L. L. **Reconstrução Tridimensional Digital de Objetos à Curta Distância por Meio de Luz Estruturada**. 2007. 256 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2007.

ROCCHINI, C., CIGNONI, P., MONTANI, C., PINGI, P., SCOPIGNO, R.. A Low Cost 3D Scanner Based on Structured Light. **Computer Graphics Forum**, v. 21, n. 1, p. 83-84, 9 nov. jul. 2002. <https://doi.org/10.1111/1467-8659.00522>.

RUCHAY, A. N.; DOROFEEV, K. A.; KALSCHIKOV, V. V.. Accuracy analysis of 3D object reconstruction using point cloud filtering algorithms. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGY, Samara. **Anais** [...]. Samara: V International Conference on "Information Technology and Nanotechnology", 2019.

SANTOS, D. R.; KHOSHELHAM, K.. Mapeamento 3D de Ambientes Internos Usando Dados RGB-D. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 3, p. 442-464, set. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702015000300025>.

SHAN, J.; TOTH, C. K. (Ed.). **Topographic laser ranging and scanning: principles and processing**. CRC Press, 2008. P.590. *Ebook*.

STONEX. **X300 Laser Scanner**. 2020. Disponível em: [https://www.stonex.it/wp-content/uploads/2020/06/X300\\_Brochure\\_ENG.pdf](https://www.stonex.it/wp-content/uploads/2020/06/X300_Brochure_ENG.pdf). Acesso em: 20 mar.2020.

THOMAS, A., SUNILKUMAR, A., SHYLES, S., ABAHAI, A., METHIRUMANGALATH, S., CHEN, D., PEETHAMBARAN, J.. TCM-ICP: Transformation Compatibility Measure for Registering Multiple LIDAR Scans. **Journal ArXiv**, Nova York, v. 1, jan. 2020. <https://arxiv.org/abs/2001.01129v1>.

WEI, C. O., CHIN, S. C., MAJID, Z., SETAN, H.. 3D documentation and preservation of historical monument using terrestrial laser scanning. **Geoinformation Science Journal**, v. 10 n. 1, p.73- 90. 2010

WEHR, A.; LOHR, U.. Airborne laser scanning—an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2, p. 68-82, 1999.

**Recebido:** 11 dez. 2020

**Aprovado:** 22 jun. 2021

**DOI:** 10.3895/rbgeo.v9n4.13601

**Como citar:** OLIVEIRA, P. H. S. M.; ALBARICI, F. L.; OLIVEIRA, H. C.; RIBEIRO, L. H. R. Análise da integração de nuvens de pontos obtidas por varredura LASER terrestre estática e varredura de luz estruturada cinemática. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 9, n. 4, p. 273-293, out./dez. 2021. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

**Correspondência:**

Pedro Henrique Sousa Marques Oliveira

Rua São Lucas, 706, CEP 35530-000, Cláudio, Minas Gerais, Brasil.

**Direito autoral:** Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

