

Use of 3D laser scanning for flatness and volumetric analysis of mortar in facades

Uso do escaneamento 3D laser para análise de planicidade e volumetria de argamassa em fachadas

M. C. ISRAEL^{a, b}
mci0674@gmail.com

R. G. PILEGGI^a
rafael.pileggi@poli.usp.br

Abstract

The ongoing process of industrialization of construction sites encourages the use of new building systems that conflict with traditional techniques associated with the risks of incompatibilities and continuance of control fixed ideas with a significant variability. A practical example is the cement mortar for plastering, commonly used as a corrective factor for facade flatness failures caused by the inaccuracy of the plumb line, rudimentary method used in geometric control of concrete structures and facade of mapping during the execution of the work, favoring the accumulation of errors that reflect the mortar thickness, increasing consumption, losses and defects. Alternatively for improvement, this study analyzed through a case study, the innovative application of 3D laser scanning technology consolidated on the facade of a building to map the surface flatness of the facade and, in an unprecedented manner, to quantify the volume of mortar. The results showed the feasibility of the technique as a solution to accurately identify the critical areas of the facade on the peripheral concrete structure and masonry and calculate, based on the volumes, the financial impact associated with mortar overthicknesses in critical areas compared with the reductions thickness after treatment of these areas.

Keywords: 3D laser scanning; facade; mortar; volumetric.

Resumo

O processo contínuo de industrialização dos canteiros de obra estimula o uso de novos sistemas construtivos que conflitam com técnicas tradicionais associada aos riscos de incompatibilidades e permanência de controles executivos com significativa variabilidade. Um exemplo prático é a argamassa cimentícia para reboco, comumente utilizada como fator corretivo de falhas na planicidade das fachadas causadas pela imprecisão do fio de prumo, método rudimentar usado no controle geométrico das estruturas de concreto e no mapeamento da fachada durante a execução da obra, favorecendo o acúmulo de erros que refletem nas espessuras de argamassa, potencializando consumo, perdas e defeitos. Como alternativa para melhoria, este trabalho analisou através de um estudo de caso, a aplicação inovadora da tecnologia consolidada de escaneamento 3D laser na fachada de um edifício para mapear a planicidade superficial da fachada e, de forma inédita, para quantificar o volume de argamassa. Os resultados mostraram a viabilidade da técnica como solução para identificar com precisão as áreas críticas da fachada sobre a estrutura de concreto periférica e alvenaria e, a partir da volumetria, calcular o impacto financeiro associado às sobressessuras de argamassa nas áreas críticas comparada com as reduções de espessura após tratamento dessas áreas.

Palavras-chave: escaneamento 3D laser; fachada; argamassa; volumetria.

^a Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil;
^b Votorantim Cimentos SA, São Paulo, SP, Brasil.

1. Introdução

Atualmente a concepção de novos empreendimentos imobiliários tem sinalizado um balanço prazo *vs* custo que proporcione redução do tempo de obra e retorno dos investimentos. Relação que implica na necessidade de industrialização dos canteiros através da alteração gradativa de técnicas construtivas rudimentares por modernas em busca de produtividade, mas com riscos de incompatibilidades e permanência de vícios de controles com significativa variabilidade. Eliminar esses riscos é fator crítico para evitar falhas durante a execução das obras e impactos no desempenho técnico dos sistemas, na qualidade e durabilidade das edificações, refletindo nos custos reais e na sustentabilidade dos projetos (BARROS [5]).

Um exemplo prático é a regularização de fachadas com argamassa para reboco, etapa que ao sofrer influência de fases anteriores, pode resultar em aumento de consumo de materiais, do tempo e da mão de obra, quando comparado com o previsto inicialmente em projeto.

As influências na regularização de fachadas têm início no controle geométrico das superfícies de pilares e fachadas pelo fio de prumo, construído com arames presos em uma das extremidades a hastes metálicas ou de madeira alocadas na cobertura da edificação e na outra ponta fixo a pesos normalmente feitos de corpo de prova de concreto ou lata de tinta preenchida com concreto para tencionar o fio de arame e garantir o alinhamento conforme ilustrado na Figura 1-a (BARROS [5]).

Essa técnica rudimentar utilizada para aferir o alinhamento e nivelamento das fôrmas de concretagem de cada pavimento e entre pavimentos, também serve de referência para o mapeamento das espessuras de argamassa na fachada após a execução da alvenaria e, cuja tolerância para desvios (± 15 mm) considerada pela norma ISO 7976-1 é a maior em relação aos demais instrumentos considerados pela mesma norma para a verificação da verticalidade (BARROS [5]).

Apesar do uso do método do fio de prumo durante o processo de

mapeamento da fachada permitir a identificação de alguns pontos críticos de irregularidade do substrato e uma estimativa do volume de argamassa, trata-se de um método manual e artesanal, aonde sua pouca abrangência em relação à área mapeada, aproximadamente 30% do número de paredes externas em cada pavimento, e sua imprecisão resultam no desalinhamento entre os pavimentos e conseqüentemente na falta de esquadro e de prumo da estrutura de concreto e alvenaria (COSTA [8]; OLIVEIRA [16]).

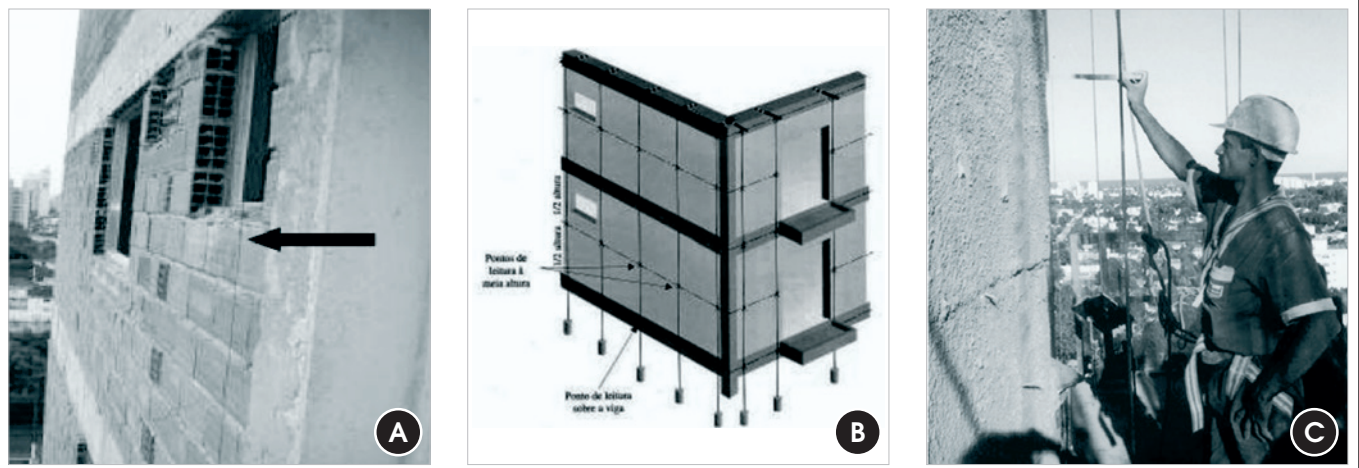
Cabem ainda alguns destaques nesse ponto, como: as dificuldades naturais de se obter perfeito alinhamento das estruturas de concreto (vigas) das periferias, por conta do acesso para apoio das escoras; os problemas de acúmulo de erros em função da transferência de níveis e posições dos elementos estruturais, que muitas vezes é feito de andar para andar, e não a partir de referências externas.

Essa condição favorece o acúmulo de erros e causa variações nas espessuras médias do revestimento de argamassa da fachada, que vão de 26% a 73%, e as espessuras abaixo do intervalo de 2cm a 3 cm, indicado pela NBR13749 (ABNT [3]) como admissíveis para revestimentos externos podem transformar-se em pontos frágeis que provocarão defeitos, comprometendo a função protetora do revestimento, enquanto as sobrespessuras, além de representarem perdas de material que variaram de 6% a 39% e riscos de defeitos oriundos de fissuração dos revestimentos e de cargas adicionais na estrutura (COSTA [8]), são consideradas em muitos estudos como um dos maiores fatores de desperdícios de argamassa (PICCHI [18]; PALIARI [17]; AGOPYAN [1]; SOIBELMAN [21]).

Somado ao custo devido às perdas de material, o aumento de custo associado à mão de obra é bastante representativo, pois, no caso de espessuras de argamassa superior ao recomendado, devem ser adotados cuidados especiais que garantam sua aderência, aumentando a quantidade de H.h/m² (BAIA [4]).

Dessa forma, uma vez estabelecido o fio de prumo como método de alinhamento da estrutura e método de referência da espessura de argamassa, reduz-se a assertividade para o cálculo do volume de argamassa e aumenta-se a dificuldade para corrigir e agir

Figura 1 - (a) Fio de prumo posicionado na fachada; (b) Pontos de leitura para o mapeamento da fachada com fio de prumo (DIOGO, 2007); (c) Mapeamento de fachada (BARROS [5])



de forma efetiva na melhoria da espessura final do revestimento de argamassa.

Nesta linha, o surgimento de métodos de medição 3D por laser para uma vasta gama de aplicações nos últimos anos (SU [22]), estimulado por necessidades específicas, contribuiu para a disponibilização de diferentes tipos de escâneres 3D no mercado (GRYZAGORIDIS [14]). Associado ao amadurecimento da tecnologia, tornou possível a execução de procedimentos no campo em um tempo relativamente curto e, embora os custos de equipamentos (*hardware* e *software*) ainda representem uma restrição (SU [22]), não é impedimento para suas aplicações em obra.

O desenvolvimento de equipamentos com capacidade de leituras de grandes superfícies, como fachadas, fornecendo medidas exatas e confiáveis, ampliou a possibilidade de aplicação desta tecnologia em obra, permitindo que a técnica ganhasse crescente reconhecimento no setor da construção civil (ZHANG; ARDITI [24]) sendo cada vez mais utilizados em todo o ciclo de vida de um edifício. Geralmente conhecidos como modelos de informação, são usados para muitas finalidades, incluindo a detecção de erros cometidos durante a construção e gerenciamento de manutenção do edifício (XIONG [23]).

O escaneamento 3D laser é uma técnica confiável, prática e funcional para comparar o consumo de materiais previsto em projeto com o efetivamente consumido na obra (ZHANG [24]). Assim, este estudo tem como objetivo verificar por meio de um estudo de

caso, a viabilidade de uso do escaneamento 3D laser para mapear a planicidade da fachada e quantificar o volume de argamassa como uma solução precisa e eficaz voltada à redução do consumo de argamassa, sem passar necessariamente pelo maior controle geométrico da estrutura e vedações (PALIARI [17]), já que apesar do controle geométrico estar presente em todas as fases de construção do edifício e representar uma ferramenta importante na racionalização construtiva (COSTA [8]; BARROS [5]), ainda não é executado integralmente e corretamente em boa parte das edificações no Brasil.

Por se tratar de uma tecnologia relativamente nova para uso em obras (ZHANG [24]) e não ter sido encontrado estudo desta técnica aplicado a volumetria de argamassa, será apresentada na sequência uma breve revisão sobre o funcionamento de escâneres 3D laser.

1.1 Princípios básicos da tecnologia de escaneamento 3D laser

O escaneamento 3D laser é uma tecnologia de medição e digitalização remota de alta precisão e detalhamento nos levantamentos tridimensionais, proporcionando baixo erro em relação aos métodos tradicionais, traduzida na realização de projetos de especial complexidade técnica em diferentes áreas como engenharia, arquitetura e infraestruturas [25].

Tabela 1 – Evolução do escâner laser 3D

Geração	Portabilidade	Frequência de medição (pontos / segundo)	Alcance (m)	Prisma de direcionamento do laser	Velocidade de processamento	Trabalhos em campo	Acessórios
1997	Baixa	1.000 a 5.000	200	Fixo – limitado a uma janela, giro do equipamento manual para obter nuvem no entorno do equipamento	Complexo / lento	Limitados - elevado tempo para execução e quantidade de dados gerados	Não integrados - computador para armazenamento e fonte de energia externos
2000	Baixa	100.000	600	Giro de 360 graus na horizontal	Complexo / lento	Possíveis - mineração	-
2007	Alta	500.000	2.000	-	Amigável / produtivo - integrado	Estendido p/ outras áreas de atuação. Ex: arquitetura	Integrados (armazenamento, bateria e câmera fotográfica)
2010	Alta	1.000.000	4.000	Giro de 360° na horizontal e 270° na vertical – câmeras fotográficas associadas ao movimento	Amigável / uso de complexos algoritmos para modelagem e extração ágil de informações -processamento de dados em campo	Aplicável em muitas áreas de atuação	Integrados

O nome se deu pelo uso do laser para medições lineares, e pelo uso da varredura (escâner) horizontal e vertical para medições angulares e pelo fato de armazenar como dado bruto, essencialmente coordenadas X, Y, e Z (3D), calculadas em tempo real a partir das medições lineares e angulares [11].

Podemos dividir sua evolução até os dias de hoje em quatro gerações (tabela 1).

Há uma variedade de tecnologias para a aquisição digital da forma de um objeto 3D. A classificação divide-se em dois tipos: os que requerem contato com a superfície que está sendo digitalizada, utilizado para pequenos objetos, e aqueles sem contato. Soluções sem contato podem ser subdivididas em duas categorias principais, ativos e passivos. Há uma variedade de tecnologias que se enquadram no âmbito de cada uma dessas categorias, sendo a ativa aquela que interessa para o estudo em questão (CURLESS [9]).

Na tecnologia ativa, o processo físico do escâner laser ocorre através da emissão de uma fonte de luz (laser) e detecção da reflexão, gerando representações tridimensionais precisas da superfície desse objeto. Os principais escâneres utilizados neste tipo de tecnologia são de três tipos, conforme descrito na tabela 2 (ZHANG [24]).

Os atuais escâneres aplicados na engenharia civil e arquitetura são os de varredura esférica, composta pela rotação vertical de um espelho combinada com a rotação horizontal do escâner, assim, o escâner digitaliza todo o seu campo de visão ponto a ponto, mudando a direção do telêmetro, dispositivo de precisão destinado à medição de distâncias em tempo real, porém, o telêmetro a laser só detecta a distância de um ponto em sua direção de visão reproduzindo fielmente a distância da origem do escaner até o objeto [25].

O resultado de uma varredura é uma “nuvem de pontos”, conjunto de pontos (como um arquivo de dados) em um sistema de coordenadas tridimensional (X, Y e Z), representando a superfície externa de objetos (figura 2-a), que depois de capturados por um escâner a laser pode ser processada e combinada em modelos 3D (figura 2-b) precisos compostos por milhões de pontos, utilizando normalmente um *software* próprio (SU [22]). A densidade dos pontos depende da velocidade com que o laser percorre a superfície. Um escâner a laser pode fornecer uma análise rápida de boa qualidade e precisa, além da detecção da característica de qualquer objeto (ZHANG [24]). Medições de pontos individuais podem ter uma precisão de

Tabela 2 – Uso de escâner laser 3D - equipamento vs precisão

Tipo	Princípio	Principais vantagens	Principal vimitação	Precisão máxima final em campo	Frequência de medição (pontos / segundo)	Alcance	Aplicações	
							Tipo	Descrição
Time of flight	Medição do tempo no qual o pulso laser emitido leva para retornar ao equipamento para cálculo das distâncias dos pontos do objeto	Longo alcance	Velocidade de captura de dados baixa - cálculo de apenas um ponto por vez	10 cm	10.000 ~ 100.000	20 km	Engenharia civil: levantamentos topográficos de estradas e edifícios	
Phase based	Medição da mudança de fase da luz de laser para cálculo das distâncias entre escâner e objeto	Velocidade de captura de dados mais alta	Médio alcance: <500m	20 mm	> 1 milhão	500 m	Plantas industriais, engenharia civil ou arquitetura	Definição de espaços Preenchimento de modelos detalhados de informação de construção de instalações existentes
Phase shift	Pulso sobre a fase da onda, associado aos anteriores.	Máxima precisão e menor ruído (imprecisão)	Curto a médio alcance: <150m	0.5mm	> 1 milhão	150 m	Mecânicas, equipamentos, instalações e plantas industriais, engenharia civil e arquitetura	Sempre que a precisão e riqueza de detalhes tiver papel mais relevante

Figura 2 - (a) Ilustração de uma nuvem de pontos capturada pelo escâner (Fonte: T1 Engenharia); (b) modelo 3D processado a partir da nuvem de pontos capturada pelo escâner



alguns centímetros ou menos de um milímetro de acordo com o sensor, o intervalo e a superfície que está sendo digitalizada (XIONG [23]).

Uma característica única de varredura a laser ao longo do levantamento é a capacidade de manipular e visualizar dados em alta resolução, geralmente sem sofrer limitações pelas condições ambientais durante a operação (GOLPARVAR-FARD [13]).

Mais recentemente, sistemas de digitalização móveis tornaram-se disponíveis, reduzindo o tempo de trabalho à custa de alguma precisão da nuvem de pontos registrada. Aplicado às fachadas de um edifício, o método tem como entrada um conjunto de nuvens de pontos que levados a um sistema de coordenadas comum, processo normalmente chamado de alinhamento ou de registro e obtidos a partir de vários pontos da fachada, fundem-se para formar um modelo 3D completo semanticamente rico que contém a informação geométrica e de identidade da fachada (BERNARDINI [6]; XIONG [23]).

Apesar da alta precisão do escâner a laser, um conjunto de limitações e desafios na sua implementação em obras pode reduzir os benefícios observados (GOLPARVAR-FARD [13]). Essas limitações incluem o fato de só poderem retornar dados de objetos que estão dentro da linha de visão do escâner causando descontinuidade da informação espacial por obstáculos/interferências que impedem a leitura pelo laser (JASELSKIS [15]), chamado neste trabalho de zona de sombreamento, podendo criar oclusões no objeto-alvo e até gerar interpretações equivocadas do modelo. Além disso, é dependente de uma série de fatores, incluindo a distância mínima e máxima entre o objeto e o escâner, a refletividade da superfície-alvo, ângulo de medida e tempo para uma varredura completa (AKBARZADEH [2]).

Apesar da maioria dos trabalhos assumir que as oclusões são mínimas ou que as regiões ocultas de um ponto de vista podem ser observadas a partir de outro (FRUEH [12]) (PU; [19]), há muitas soluções propostas para o problema geral de reconstrução de superfícies ocultas em 3D, também conhecido como "preenchimento de buracos" (DAVIS [10]; SALAMANCA [20]).

Em estudos direcionados para o problema da reconstrução de exteriores de edifícios, usando dados do escâner a laser, por exemplo (FRUEH [12]), a ênfase, em geral, tem sido na criação de modelos visuais realistas em vez de geometricamente precisos. Por meio de algoritmos extraem-se correções planas a partir dos dados (nuvem de pontos), mas não se reconhecem explicitamente a identidade dos componentes ocultos (XIONG [23]).

Figura 3 - Escâner SURPHASER 25HSX

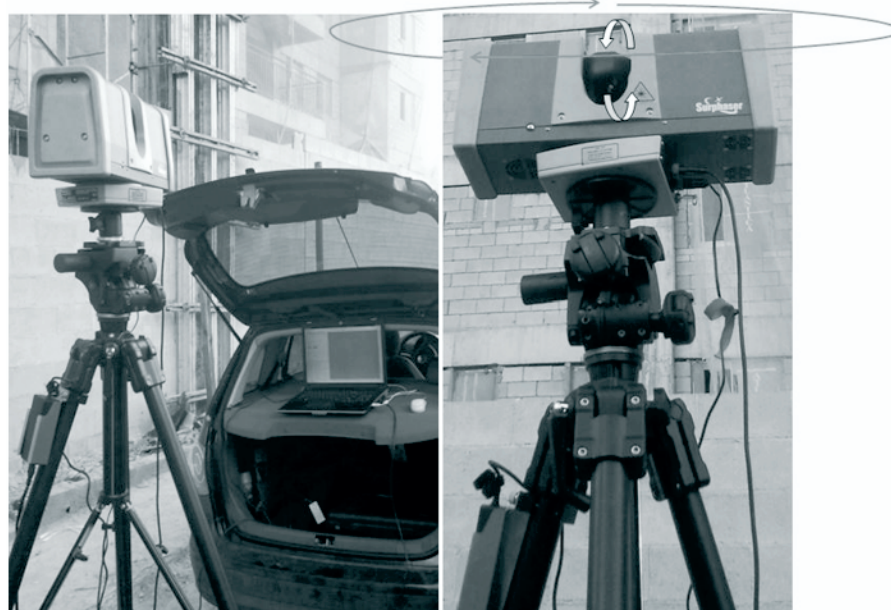
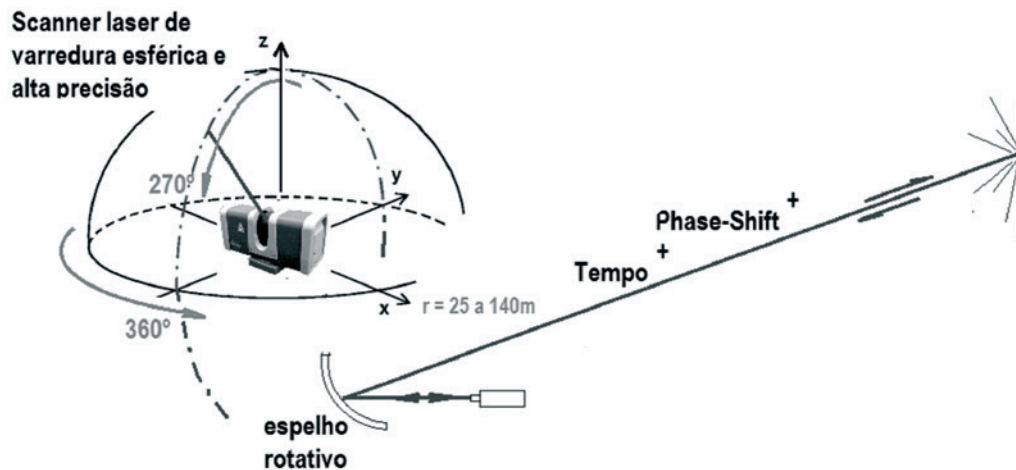


Figura 4 – Esquema de varredura 360°. (Fonte: T1 Engenharia Digital)



2. Materiais e programa experimental

A viabilidade do uso do escaneamento 3D laser em obras passa

por diferentes fatores intervenientes que vão desde a escolha do escâner, passando pelas características do canteiro e do projeto. Para se alcançar o objetivo do trabalho, foi desenvolvido um estudo de caso em um prédio em construção, onde a partir do modelo

Figura 5 – (a) Esquemático de afastamento do escâner em relação à fachada; (b) Esquemático da área de escaneamento da fachada em relação à capacidade do escâner e volume de varredura com 25 metros de raio

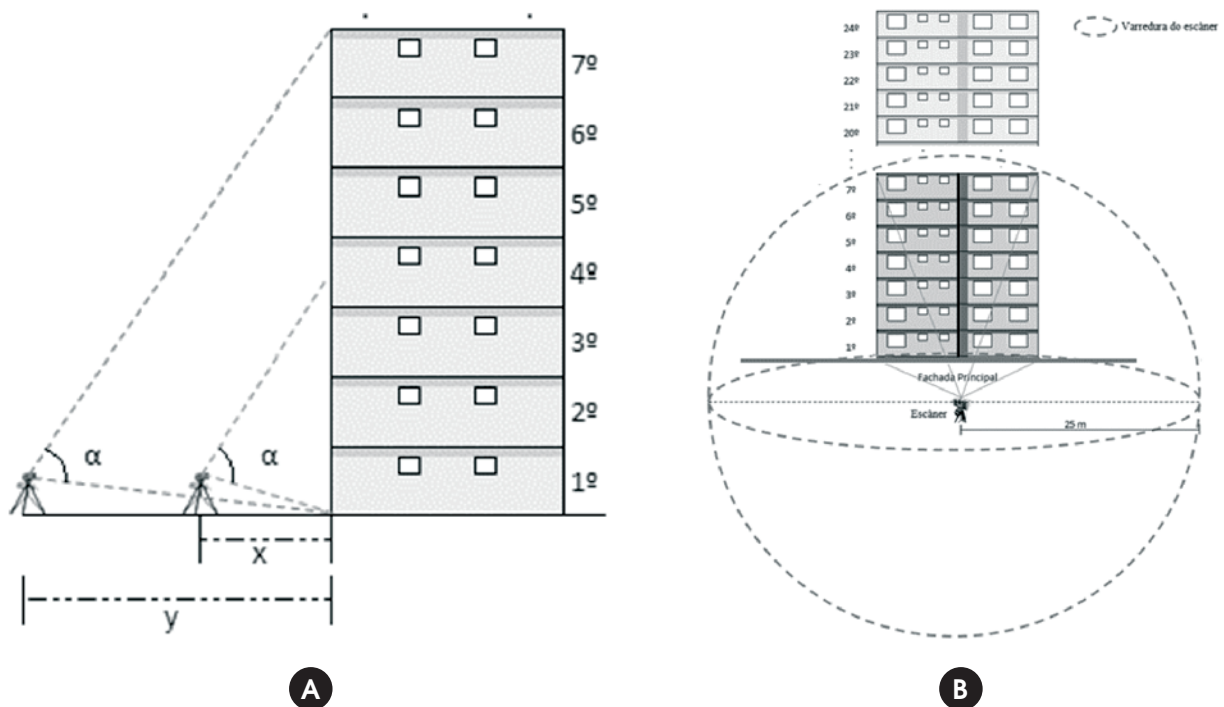
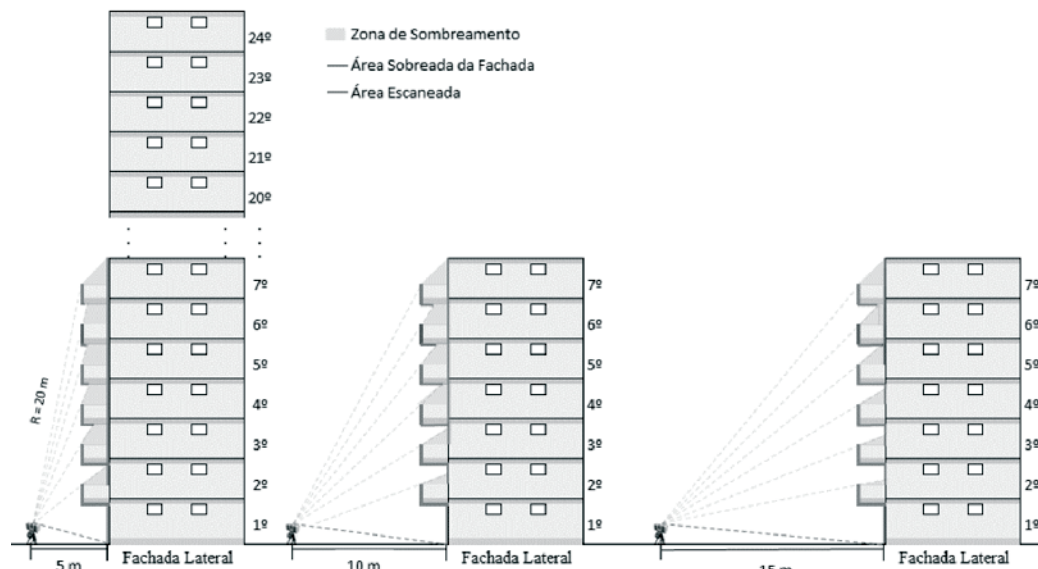


Figura 6 – Redução da área de sombreamento da fachada em função da distância do escâner em relação à fachada do prédio



escaneado de uma das fachadas foram realizadas uma série de análises e interpretações.

2.1 Escolha do equipamento

O tempo para uma varredura completa foi apontado em alguns estudos anteriores como uma limitação do escaneamento 3D, dessa forma, o primeiro ponto para viabilizar o uso desta tecnologia em fachada de edifícios foi identificar um equipamento com capacidade de escanear rapidamente a superfície em questão, com portabilidade suficiente para ser facilmente transportado e montado, favorecendo seu deslocamento e uso no canteiro de obras.

O escâner escolhido foi o SURPHASER 25HSX (figura 3-a) que utiliza a tecnologia de varredura hemisférica a laser de alta precisão do tipo phase-shift. O laser é escaneado em torno da cena que está sendo digitalizada, em três dimensões, reunindo medições de distância em intervalos de ângulo especificados (figura 3-b). O equipamento apresenta uma precisão de 0,1mm a 0,2 mm, raio máximo de leitura de 25 metros, ângulo máximo de 85 graus e velocidade de captura que varia de 300.000 a 1.200.000 pontos por segundo, permitindo a varredura de uma fachada em poucos minutos. O nível de ruído (imprecisão) abaixo de 0,2mm associados à densidade de pontos permite capturar detalhes precisos da superfície escaneada.

Para manutenção da estabilidade, o equipamento fica acoplado a um tripé e os dados coletados durante a varredura são armazenados em um notebook conectado ao equipamento por meio de um cabo USB ou via *wireless*.

Conforme ilustrado na figura 4, para produzir um modelo 3D, este tipo de escâner gira o cabeçote azul horizontalmente a 360°, enquanto a cápsula onde se encontra o espelho rotativo, posicio-

nada na parte central do cabeçote, emite o laser infravermelho na medida em que gira 360° na vertical para medir a distância do objeto no seu caminho, viabilizando assim o escaneamento hemisférico e campo de visão de 360° x 270°.

2.2 Condições de contorno

A viabilidade do uso do escaneamento 3D laser em obras também passa por condições de contorno relacionadas a características do canteiro e do projeto. Sendo assim, o segundo passo foi identificar e tratar esses pontos.

Condições para montagem e uso do equipamento na obra

- Ponto de energia nos locais de leitura.
- Local plano de aproximadamente 2 m² para montagem do equipamento (instalado sobre tripé).
- Combinação distância (afastamento) vs ângulo de leitura entre o equipamento e a fachada:
 - Restrições para afastamento ou aproximação do equipamento em relação à edificação podem gerar ângulos de leitura acima de 85 graus que impossibilitem a varredura de toda a fachada com qualidade do modelo suficiente para análise (Figura 5-a).
 - Em edificações acima do raio limite de leitura, o escaneamento deverá ser realizado por um equipamento de maior capacidade ou em mais de um disparo, sendo o modelo posteriormente combinado com auxílio do *software* (Figura 5-b).

Condições para realização da leitura

- Ausência de áreas de sombreamento, ou seja, áreas/pontos que, definida a localização do escâner e ângulo de leitura, geram obstrução (pontos cegos) entre o equipamento e a

superfície a ser avaliada ocultando a leitura pelo escâner. São zonas de sombreamento:

- Varandas e sacadas fora do plano principal da fachada e elementos decorativos.
- Andaimes e telas *fachadeiras*, balancins, muros ou qualquer elemento/objeto localizado entre o escâner e a superfície de leitura.

As áreas de sombreamento podem reduzir ou ser eliminadas

- Dependendo da distância e/ou posição do escâner em relação à fachada (Figura 6). Para viabilizar o posicionamento do escâner fora das zonas de sombreamento é necessário o uso de equipamentos como, por exemplo, pranchas elevatórias (Figura 7-a) ou hastes (Figura 7-b) saindo da fachada. Este procedimento aumenta a complexidade e o custo do serviço, sendo recomendado fazer uma análise de viabilidade, considerando o novo cenário.
- Por meio da reconstrução de superfícies com o uso de *softwares* específicos, porém, como o interesse é capturar a imperfeição da fachada, as técnicas de reconstrução de superfícies com o uso de *softwares* específicos não são efetivas pois trabalham com modelos visuais que não são geometricamente precisos e não reconhecem explicitamente a identidade dos componentes ocultos.

Alinhamento com o cronograma da obra

Para garantir o escaneamento integral da fachada sem ocasionar

alterações na rotina do canteiro ou intervenções em etapas executivas, o alinhamento precisa ser executado no momento em que a etapa de alvenaria esteja finalizada e os andaimes/balancins e telas *fachadeiras*, necessários à execução do revestimento da fachada, ainda não estejam instalados.

2.3 Escolha da obra

Do conjunto de obras disponibilizadas, o estudo foi realizado naquela que melhor se ajustava às condições de contorno e aos requisitos estabelecidos como necessários na etapa de planejamento para uma leitura plena da superfície do substrato.

Características da obra

- Obra em estrutura de concreto armado cujos alinhamentos e nivelamentos das formas de concretagem fossem realizadas pela técnica do fio de arame.
- Alvenaria de vedação em bloco de concreto alinhada e nivelada pela mesma técnica.
- Área de fachada sem *zonas de sombreamento* (ocultações).
 - Fase da obra: estrutura de concreto e alvenaria de vedação concluída, execução de chapisco e regularização em argamassa não iniciada.

A obra escolhida foi um edifício de 24 pavimentos, porém, como o afastamento máximo possível entre o escâner e a fachada foi de 10 m, aproximadamente, e parte da fachada apresentava tela (Figura 8-a), apenas sete pavimentos de uma fachada frontal foram

Figura 7 – (a) Uso de pranchas elevatórias e (b) hastes saindo para fachada como recurso para reduzir as áreas de sombreamento (Fonte: T1 Engenharia Digital)

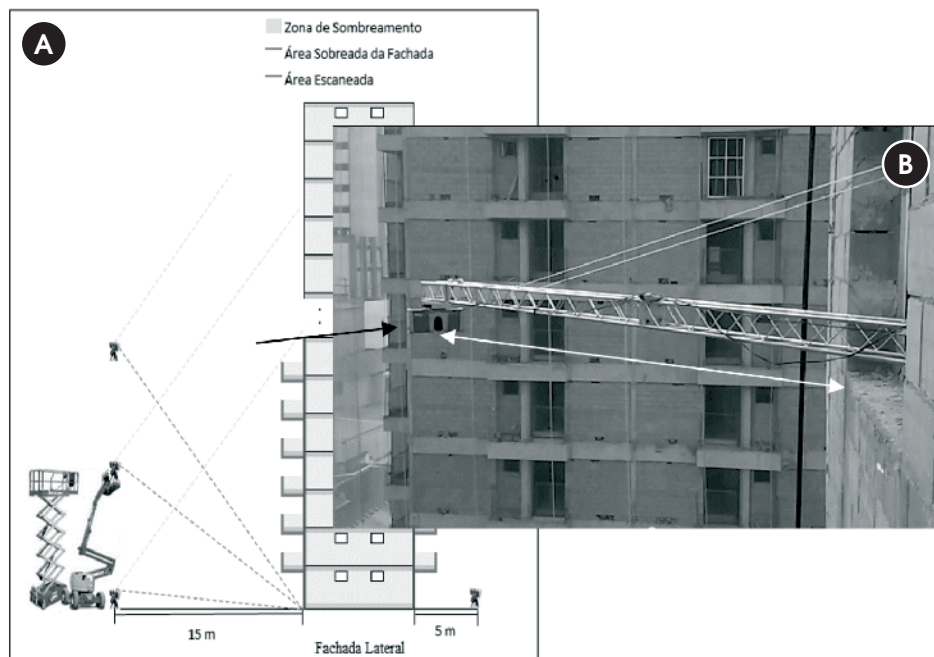
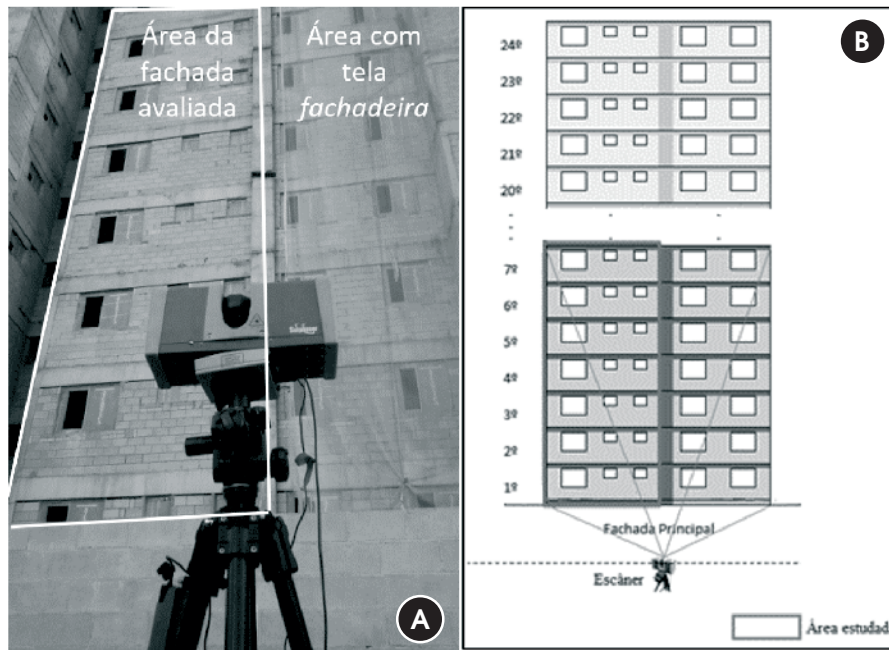


Figura 8 – (a) Imagem da obra com detalhe da fachada avaliada e da tela fachadeira; (b) Esquemático da localização do escâner em relação ao prédio



escaneados, ou seja, a área analisada representou 14,3% dessa fachada conforme ilustrado na Figura 8-b.

2.4 Uso do software Geomagic

Para analisar a planicidade da fachada e quantificar volumetricamente a argamassa com uso do *software Geomagic*, após o escaneamento da fachada, foram cumpridos os seguintes passos:

2.4.1 Planicidade da fachada

- Posicionar o modelo 3D completo em relação ao projeto original;
- Calcular o plano de referência da fachada passando pelo eixo das vigas a partir do ponto médio de suas superfícies;
- Gerar o mapa de cores mostrando visualmente todas as depressões e protuberâncias do substrato no *software*, a partir do plano médio;
- Visualizar as áreas com maiores graus de impacto sobre a planicidade da fachada (estrutura e alvenaria) e identificar os locais com as maiores e menores espessuras de argamassa;
- Calcular planos, simulando diferentes espessuras de argamassa de reboco, mostrando por meio de escala de cores as variações de espessura por meio do cálculo da distância de cada ponto dos planos até a superfície da fachada escaneada;
- Comparar a maior espessura e espessura média de reboco em cada plano com a espessura de 25 mm (média da espessura entre o intervalo de 20 mm a 30 mm para reboco em fachada indicado pela NBR13749 (ABNT [3]));

- Identificar os planos com maior e menor percentual de área com espessura mínima de 25 mm e locais de concentração dessas áreas.

2.4.2 Volumetria de argamassa

- Posicionar o modelo 3D completo em relação ao projeto original;
- Calcular o plano de referência da fachada passando pelo ponto mais externo da fachada, mostrando a distribuição de espessuras nas regiões da fachada atrás do plano por meio de uma escala de cores;
- Gerar o mapa de cores mostrando visualmente o percentual total de área com espessura mínima de 25 mm;
- Calcular planos simulando diferentes espessuras de argamassa de reboco até o limite de 25 mm sobre o ponto mais externo da fachada (100% da fachada com espessura mínima de 25 mm), mostrando por meio de escala de cores as variações de espessura através do cálculo da distância de cada ponto dos planos até a superfície da fachada escaneada;
- Comparar o consumo de argamassa em cada plano **vs** o percentual total de área com espessura mínima de 25 mm;
- Identificar a economia no consumo de argamassa a partir da redução percentual do volume em comparação com o plano onde 100% da fachada, independente das irregularidades, apresenta espessura mínima de 25 mm;
- Analisar a viabilidade econômica do uso da técnica de escaneamento 3D neste estudo de caso.

Figura 9 – (a) Distância do escâner em relação à fachada; (b) 1º Plano de referência; (c) Planos simulando diferentes espessuras de argamassa (5mm - azul / 10mm - vermelho / 15mm amarelo / 20mm - verde / 25mm - cinza) e paralelos ao 1º plano de referência

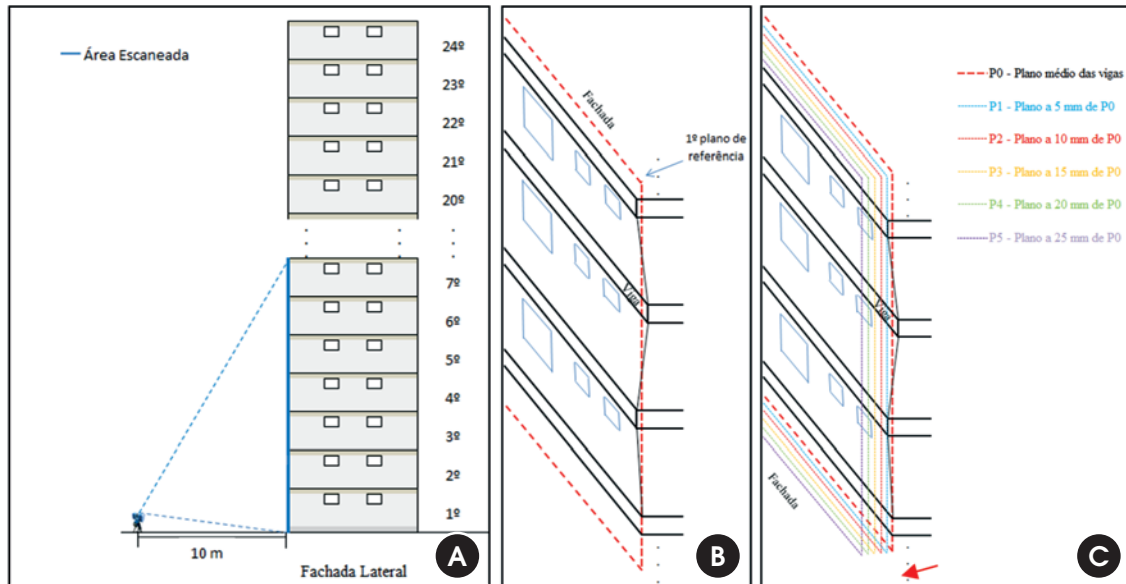
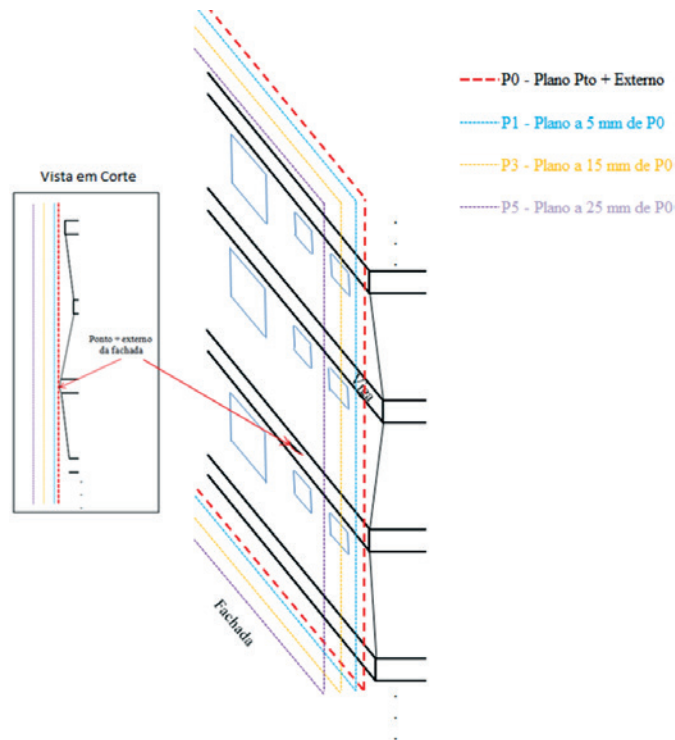


Figura 10 – (a) Detalhe do ponto mais externo da fachada no Plano 0'; (b) Ilustração dos planos a 5mm (azul), 15mm (amarelo) e 25mm (cinza) em relação ao plano (vermelho) traçado a partir do ponto mais externo da fachada



2.5 Experimento realizado e definição de planos de referência

Para a realização da varredura, o escâner foi posicionado de frente para a fachada (Figura 9a). A partir do modelo escaneado e com recursos do *software Geomagic*, desenvolvido pelo próprio fabricante do equipamento, foram criados dois planos de referência utilizados como base para os estudos de consumo de argamassa de reboco.

Conforme ilustrado na Figura 9-b, o primeiro plano de referência P0 corta o eixo das sete vigas passando pelo ponto médio de suas superfícies. A partir dele foram traçados cinco novos planos paralelos nomeados como P1, P2, P3, P4, P5, afastados 5, 10, 15, 20 e 25 mm respectivamente de P0 (Figura 9-c), simulando diferentes espessuras de argamassa de reboco.

Enquanto o primeiro plano de referência foi traçado a partir das vigas da fachada, o segundo plano de referência foi traçado a partir do ponto mais externo da fachada conforme ilustrado na Figura 10-a. A partir dele foram criados três novos planos afastados 5, 15 e 25 milímetros respectivamente (Figura 10-b) com o objetivo de simular um revestimento de argamassa que atendesse a espessura de 25 mm (espessura intermediária entre o intervalo de 2 a 3 cm indicado pela NBR 13749 (ABNT [3]) em 100% da área da fachada comparativamente com revestimentos que não atendessem a esta premissa (5 mm e 15 mm).

3. Resultados e discussões

A partir do modelo escaneado (figura 11) da fachada estudada foram feitas uma série de análises e interpretações, considerando os itens:

- Qualidade executiva do substrato, medido através do detalhamento da planicidade gerada pela imagem 3D;
- A influência do grau de nivelamento da estrutura na planicidade da alvenaria e na espessura da argamassa de reboco;
- Os impactos das áreas críticas mais externas da fachada (geradas pela falta de controle geométrico das estruturas) no consumo de argamassa com base na espessura de reboco necessária para regularizar o substrato e garantir o desempenho do sistema de revestimento;
- Ganhos financeiros vs viabilidade econômica da técnica por causa da redução do consumo de argamassa pela análise volumétrica;
- Vantagens da técnica e possibilidades de seu uso em outras aplicações no canteiro de obras.

3.1 Planicidade da fachada

O escaneamento 3D laser fornece uma visão total do plano e, por meio do modelo gerado (Figura 11), é possível observar detalhes dos elementos que constituem a superfície como, por exemplo, o posicionamento de cada bloco de concreto uns em relação aos outros e em relação à estrutura (vigas), além das condições de aplicação da argamassa de assentamento da alvenaria.

3.2 Refinamento em alinhamento e nivelamento da fachada

Com a imagem do primeiro plano de referência (figura 12-a) fica evidente o efeito da falta de controle geométrico das estruturas na planicidade da fachada, permitindo identificar em 100% da área escaneada os reais pontos críticos de irregularidade, e não

Figura 11 - Imagem escaneada da fachada gerada pelo software.
(Fonte: T1 Engenharia Digital)

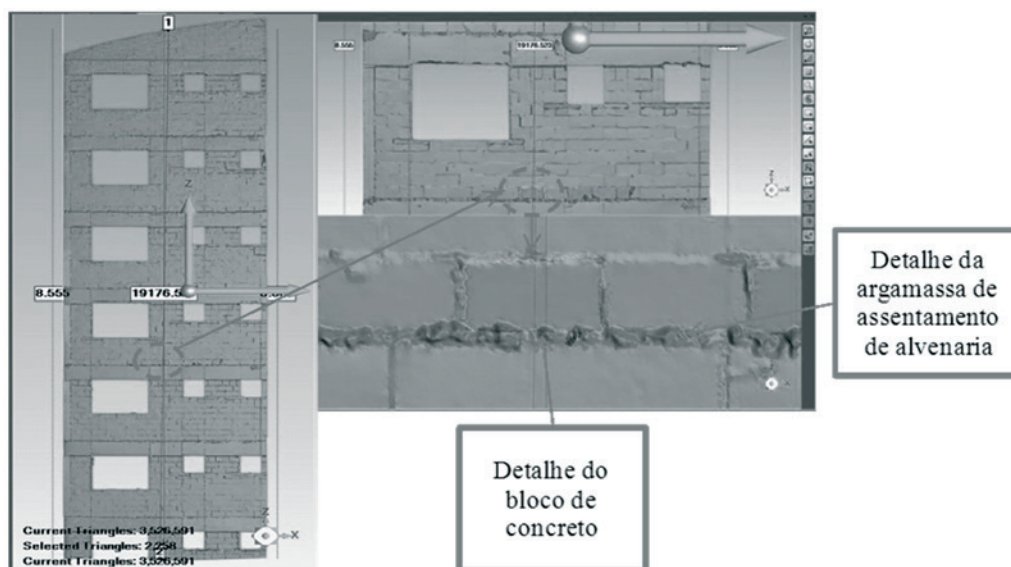
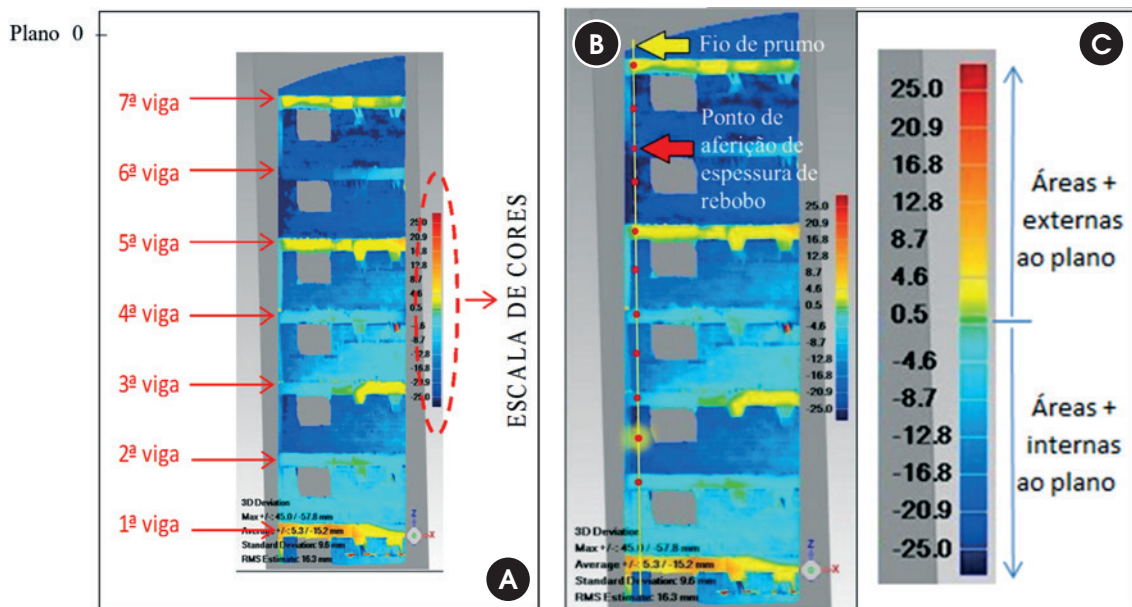


Figura 12 – (a) Imagem do primeiro plano de referência gerado pelo software e identificação das vigas; (b) Pontos críticos de irregularidade em 100% da área da fachada escaneada vs os pontos sob o fio de prumo; (c) Escala de cores. (Fonte: T1 Engenharia Digital)



apenas os pontos sob o fio de prumo (figura 12-b).

Por meio de uma escala de cores (Figura 12-c), o *software* mostra as regiões da fachada à frente e atrás do plano, representadas pelas cores quentes e frias respectivamente. As áreas críticas à

frente do plano normalmente estão localizadas sobre a estrutura e suas irregularidades influenciam o nivelamento e planicidade da alvenaria, em geral posicionada atrás do plano, e ambas determinam a espessura final da argamassa de reboco.

Figura 13 – Imagem dos planos paralelos ao 1º plano de referência a uma distância de: (a) 5mm; (b) 10mm; (c) 15mm; (d) 20mm; (e) 25 mm (Fonte: T1 Engenharia Digital)

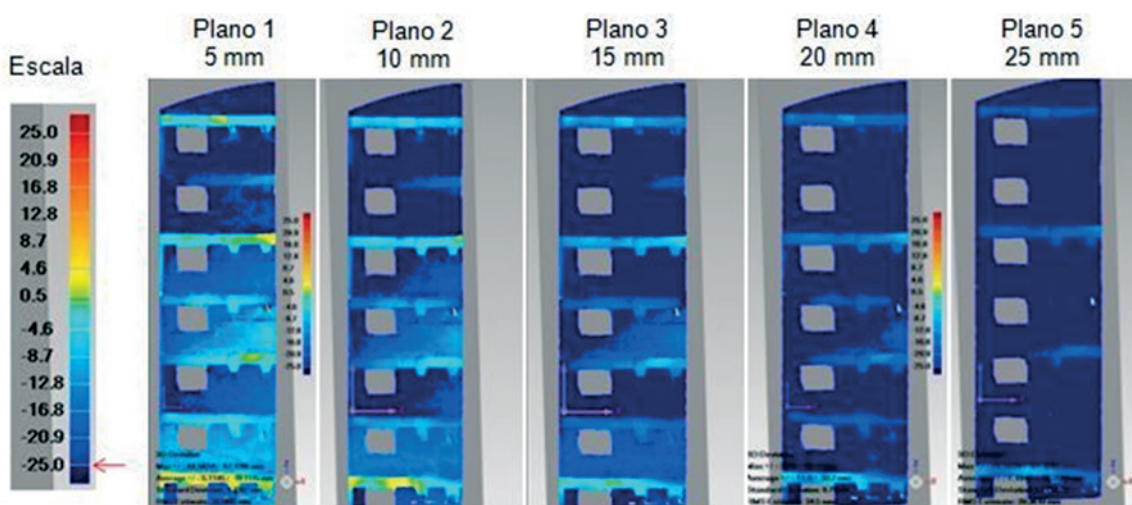


Tabela 3 – Resumo de resultados dos planos traçados a partir do 1º plano de referência em relação à imagem escaneada

Plano	Coluna				
	a'	b'	c'	d'	
	Espessura média do revestimento (mm)	Distância de cada plano ao ponto mais interno do substrato escaneado (mm)	% da área com espessura mínima de 25 mm de reboco	% da área da coluna c' localizada sobre a alvenaria	
Linha a	P0 (eixo das vigas)	19,1	67,1	27%	96%
Linha b	P1 (a 5 mm de P0')	23,6	72,1	42%	95%
Linha c	P2 (a 10 mm de P0')	28,3	77,1	56%	93%
Linha d	P3 (a 15 mm de P0')	33,2	82,1	75%	89%
Linha e	P4 (a 20 mm de P0')	38,2	87,1	86%	81%
Linha f	P5 (a 25 mm de P0')	38,2	87,1	86%	81%

Essas colocações podem ser comprovadas na Figura 12-b através da interpretação da escala de cores em que as áreas em tons esverdeados são aquelas mais próximas do plano de referência:

- As vigas 1, 5 e 7, em tonalidade predominante amarela e/ou laranja, estão mais externas ao plano;
- A viga 1, com cor laranja escuro em boa parte da sua área, encontra-se no ponto mais externo da fachada;
- As vigas 2 e 4, na cor azul claro, encontram-se mais internas ao plano. O leve abaulamento no centro (área esverdeada), provavelmente foi causado por deformação da fôrma durante a concretagem.
- A viga 3 possui a área da direita para fora do plano (amarela) e a área da esquerda para dentro (azul), ou seja, encontra-se transversal ao plano;
- Em menor grau, a viga 6 também encontra-se transversal ao plano, mas totalmente interna com diferentes tonalidades de azul;
- As regiões mais internas encontram-se sobre a alvenaria entre a 5ª e 7ª viga, área representada pela cor azul escura.
- Observa-se um escalonamento de vigas em posição interna e externa. Vigas ímpares mais externas e vigas pares mais internas;
- Os pontos extremos (mais interno e mais externo) encontram-se a 57,8 mm atrás do plano de referência e 45,0 mm à frente, ou seja, variação de 102,8 mm entre o ponto mais interno e o mais externo do substrato.

Os demais planos traçados, simulando diferentes espessuras de argamassa (Figura 13), permitiram medir a distância de cada ponto dos planos até a superfície da fachada escaneada. Com o uso

Figura 14 – Planos traçados a partir do 2º plano de referência. (Fonte: T1 Engenharia Digital)

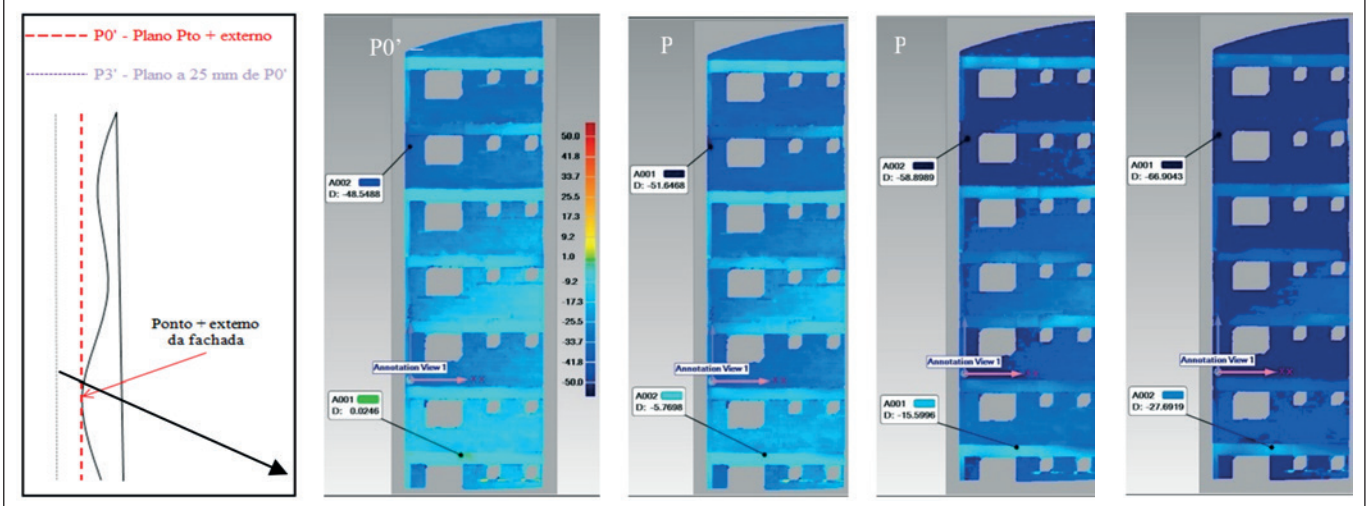


Tabela 4 – Resultados a partir do 2º plano de referência

Plano	Coluna				
	a' Consumo de argamassa (m³)	b' % de aumento de consumo em relação a P0'	c' % da área com espessura mínima de 25 mm de reboco	d' % da área da coluna c' localizada sobre a estrutura de concreto	
Linha a	P0' (ponto mais externo)	2,59	-	39%	46%
Linha b	P1' (a 5 mm de P0')	3,05	18%	53%	57%
Linha c	P2' (a 15 mm de P0')	3,95	53%	82%	100%
Linha d	P3' (a 25 mm de P0')	4,85	87%	100%	0%

do *software*, foram geradas as informações consolidadas na Tabela 3, em que as análises desses dados mostram que:

- Considerando que o volume entre a superfície escaneada da fachada (substrato) e os planos seriam preenchidos com argamassa de regularização, as espessuras médias calculadas em P3, P4 e P5 (coluna a' – Tabela 3) ficaram acima da espessura de 25 mm, intermediária entre o intervalo de 20 mm a 30 mm para reboco em fachada indicado pela norma NBR 13749 (ABNT [3]).
- A distância de cada plano ao ponto mais interno da superfície da fachada (coluna b' – Tabela 3) mostra que nestes locais a espessura de argamassa de reboco em P0, P1, P2, P3, P4 e P5 chegaria a aproximadamente 2,3; 2,5; 2,7; 2,9; 3,1; e 3,3 vezes, respectivamente, a espessura média de reboco (25 mm) para fachada considerada no estudo, representando um elevado desperdício de material e mão de obra, além dos riscos de defeitos.
- Em um comparativo entre as colunas c' e d' da Tabela 3, verifica-se que os planos com maior percentual de área com espessura mínima de 25 mm possuem estas áreas concentradas sobre a alvenaria. Isso comprova que as alvenarias geralmente encontravam-se deslocadas das vigas no sentido interno ao plano e sofreram a influência direta da falta de alinhamento e nivelamento das vigas.
- Considerando que, nos planos da Figura 13, as áreas de cor

azul escura representam os locais em que cada plano está a uma distância a partir de 25 mm do substrato escaneado, então, os planos P4 e P5 possuem aproximadamente 75% e 86% de sua área, respectivamente, com no mínimo 25 mm de argamassa.

3.3 Benefícios em volumetria

Na tecnologia do escaneamento 3D laser, o cálculo de consumo é feito através de volumetria a partir de uma abrangência de 100% da área da fachada. O cálculo dos diferentes volumes de argamassa representa a soma das espessuras entre o modelo escaneado da fachada (Figura 11), considerando todas as irregularidades superficiais e cada um dos diferentes planos de estudo.

Partindo do segundo plano de referência (P0') traçado paralelo a fachada e faceando o ponto mais externo da superfície escaneada, conforme ilustrado na figura 14, observou-se que para atender a condição ideal, em que toda a fachada apresentasse 25 mm de espessura de reboco (Figura 14-e) havia um aumento representativo do consumo de argamassa, potencializando o custo, impacto ambiental e o risco de falhas e defeitos futuros no revestimento.

Por outro lado, as imagens da Figura 14 nos mostra que tanto o plano P1', a 5 mm de P0', quanto o P2' a 15 mm registram uma área representativa de recobrimento com a espessura recomendada de 25 mm e com reduções expressivas de consumo de

Tabela 5 – Volumes vs custos da argamassa nos diferentes planos de estudo

Plano de Estudo	Espessura (mm)	Consumo de argamassa (t)		Custo* (R\$)	Redução de volume em relação a P3' (%)	Redução de custo em relação a P3' (R\$)
		Na área escaneada (7 pavimentos)	Na fachada			
P0'	0	4,4	15,1	R\$ 12.582,96	-47%	-R\$ 11.222,64
P1'	5	5,3	18,1	R\$ 15.060,69	-37%	-R\$ 8.744,91
P2'	15	6,8	23,3	R\$ 19.433,14	-18%	-R\$ 4.372,46
P3'	25	8,3	28,6	R\$ 23.805,60	0%	R\$ -

*Custo de argamassa aplicada: R\$ 1.417,00/m³ | Consumo de argamassa: 1,7 t/m³

argamassa (Tabela 4). Sendo assim, tratar os pontos que não atendem a espessura de 25 mm a fim de garantir seu desempenho pode representar ganhos representativos de qualidade, durabilidade e econômicos.

Os resultados consolidados na Tabela 4 mostram que:

- O plano de referência P0' consome um volume de 2,59 m³ de argamassa, porém, apenas 39% da área total escaneada apresenta espessura mínima de 25 mm;
- O plano P3' localizado a 25 mm de P0', ou seja, situação em que 100% da fachada apresentaria um revestimento mínimo 25 mm de argamassa, aumentou o consumo em 87%, totalizando 4,85 m³;
- Em contrapartida, o plano P2' a 15mm da referência apresentou um aumento de consumo de 53%, total de 3,95 m³ de argamassa e 82% da área com espessuras a partir de 25 mm;
- Já no plano P1', a 5 mm de P0', há um aumento de apenas 18% no consumo, representando um recobrimento da fachada de 53% com espessuras mínimas de 25mm;
- Nos planos P1' e P2', 57% e 100%, respectivamente, da área com espessura mínima de 25 mm estão sobre a estrutura de concreto (coluna d'), sendo possível pensar em uma solução para este substrato atuar com espessuras menores sem comprometer o desempenho e durabilidade.

3.4 Potencial econômico da técnica

Embora Boehler [7] tenham classificado a varredura a laser como uma técnica de custo proibitivo na época de seu estudo, já era percebido o retorno sobre o investimento em comparação com os métodos de levantamento convencionais. Assim, um ponto de suma importância levantado durante o estudo foi a viabilidade econômica do uso da técnica em face dos ganhos financeiros reais gerados. Para isso, calculou-se a economia gerada pela redução de espessura da argamassa nos planos P0', P1' e P2' em relação ao plano P3' e comparou-se com o custo para realização do escaneamento.

A análise levou em consideração o consumo de argamassa calculado pelo *software* em cada um dos planos e o custo da argamassa de regularização de fachada aplicada de R\$1.417,00/m³, valor médio praticado na cidade de São Paulo no primeiro semestre de 2013 (Fonte: Sinduscon – SP). Neste custo está considerado material, mão de obra e equipamento e os valores encontrados com base na área dos sete pavimentos escaneados de uma das fachadas foram extrapolados para os 24 pavimentos desta mesma fachada.

Com isso, pelos resultados da Tabela 4 e da Tabela 5, observam-se:

- Plano P0' - 39% da área com espessura mínima de 25 mm (Tabela 4 – coluna c') e uma redução de 47% em relação a P3' no consumo de argamassa (Tabela 5), resultando em uma economia de R\$ 11.222,64;
- Plano P1' - 53% da área com espessura mínima de 25 mm (Tabela 4 – coluna c') e uma redução de 37% em relação a P3' no consumo de argamassa (Tabela 5), resultando em uma economia de R\$ 8.744,91;
- Plano P2' - 82% da área com espessura mínima de 25 mm (Tabela 4 – coluna c') e uma redução de 19% em relação a P3' no consumo de argamassa (Tabela 5), resultando em uma economia de R\$ 4.372,46.

Levando em consideração um valor estimado de R\$ 5.000,00 (cinco mil reais) para realização do escaneamento em uma fachada com a análise dos dados incluída, o uso da tecnologia se pagou e gerou um saldo positivo nos planos P0' e P1', porém, apenas 39% e 53% da área apresentava-se com espessura mínima de 25 mm. Já no plano P2', apesar do déficit de R\$627,54 para cobrir o custo do serviço de escaneamento, verificou-se um percentual de 82% da área com espessura mínima de 25 mm.

3.5 Outras aplicações

Durante o uso do equipamento no canteiro e o aprofundamento das análises, foram identificadas outras aplicações relacionadas à fachada. São elas:

- Uso do elevado grau de detalhamento da superfície gerado pelo modelo escaneado, para verificar a regularidade de alinhamento dos blocos, posicionamento da alvenaria em relação a vigas e pilares, espessura da argamassa de assentamento da alvenaria, atribuindo à técnica a possibilidade de uso como método de controle de qualidade do processo produtivo/executivo da etapa de alvenaria;
- Uso durante a execução da estrutura para aferir e corrigir as falhas de alinhamento e nivelamento das fôrmas, permitindo corrigir as falhas antes da concretagem.

Estas duas aplicações citadas são consideradas medidas preventivas, impedindo que as falhas ocorram e reflitam nas etapas seguintes, ao contrário do uso corretivo proposto neste trabalho.

4. Conclusões

- Na obra foco desse estudo, o objetivo do trabalho foi alcançado à medida que o escaneamento 3D laser mostrou-se preciso e economicamente viável, para levantamento volumétrico do consumo de argamassa da fachada por meio da aplicação do método proposto, sinalizando redução de custo de argamassa aplicada que variava de 18% a 47% ao identificar as sobressessuras geradas pelas imperfeições na planicidade da fachada.
- Também mostrou ser uma ferramenta eficiente para o mapeamento da fachada, expondo a influência do grau de controle geométrico da estrutura na regularidade superficial da fachada, podendo contribuir nas tomadas de decisão referentes às medidas corretivas das imperfeições que impactam nas espessuras de argamassa mediante a abrangência das áreas críticas.
- Pela análise dos dados, pequenas áreas críticas representadas por pontos mais internos, localizados em sua maior parte sobre a alvenaria, e pontos mais externos, localizados principalmente sobre a estrutura, influenciam a espessura final de argamassa de reboco chegando a 3,3 vezes a espessura referência de 25 mm na obra estudada, representando um elevado desperdício de material e mão de obra, além de potencializar os riscos de defeitos.
- O nível de detalhamento das imagens, alcance e portabilidade dos equipamentos atualmente disponíveis e grau de desenvolvimento dos *softwares* tornam a técnica de escaneamento 3D laser superior ao fio de prumo para mapeamento da fachada, porém, seu uso depende de cumprir condições de contorno intrínsecas ao canteiro de obras.

- Os pontos mais críticos são as áreas de sombreamento, que geram intervenções, dificultando ou inviabilizando a captura das imperfeições da fachada nestes locais, para o cálculo preciso do volume de argamassa e a necessidade de alterações ou intervenções na rotina/etapas da obra para permitir a realização do escaneamento e atraso na instalação de andaimes e remoção de telas fachadeiras que atuam como obstruções à leitura do escâner.

5, Agradecimentos

O autor agradece a Votorantim Cimentos por patrocinar esta pesquisa, a empresa T1 Engenharia Digital pela realização do escaneamento 3D laser do edifício estudado e disponibilização dos dados utilizados nas análises e aos colegas Vanderley Moacyr John e Roberto Cesar de Oliveira Romano pelo apoio na revisão deste trabalho.

6. Referências Bibliográficas

- [1] AGOPYAN, V. et al. Alternativas para redução do desperdício em canteiros de obra. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1998.
- [2] AKBARZADEH et al. Proc: Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, 3DPVT, 2006.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13749: revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – especificação. Rio de Janeiro, 1996.
- [4] BAIA, L.L.M.; SABBATINI, F.H. Projeto e execução de revestimento de argamassa. CTE, São Paulo: O Nome da Rosa, 2000. P. 82.
- [5] BARROS, E. O. Controle geométrico da estrutura de concreto de edifícios como ferramenta da racionalização construtiva. Tese de Doutorado. Dissertação (mestrado)-Escola Politécnica- USP. São Paulo, 136 p. 2001.
- [6] BERNARDINI, F.; RUSHMEIER, H. The 3D Model Acquisition Pipeline. Computer Graphics Forum, v. 21, n. 2, p. 149-172, jun. 2002.
- [7] BOEHLER, W. et al. Investigating laser scanner accuracy. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 34, n. Part 5, p. 696-701, 2003.
- [8] COSTA, Fernanda Nepomuceno. Processo de produção de revestimento de fachada de argamassa: problemas e oportunidades de melhoria. 2005.
- [9] CURLESS, Brian. From range scans to 3D models. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, v. 33, n. 4, p. 38-41, 1999.
- [10] DAVIS, J. et al. Filling holes in complex surfaces using volumetric diffusion. In: 3D Data Processing Visualization and Transmission, 2002. Proceedings. First International Symposium on. IEEE. P. 428-441, 2002.
- [11] Evolução histórica dos levantamentos a laser | MundoGEO. Disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2013/06/05/evolucao-historica-dos-levantamentos-a-laser/>>. Acesso em: 12 abr. 2015.
- [12] FRUEH C. et al. Data processing algorithms for generating textured 3D building facade meshes from laser scans and camera images. International Journal of Computer Vision (IJCV) 61 (2). P 159-184, 2005.
- [13] GOLPARVAR-FARD, M. et al Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques. Automation in Construction, v. 20, n. 8, P 1143-1155, dez. 2011.
- [14] GRYZAGORIDIS, J. Laser Based Nondestructive Inspection Techniques. Journal of Nondestructive Evaluation, v. 31, n. 4. P 295-302, dez. 2012.
- [15] JASELSKIS, E. J.; GAO, Z. Pilot Study on Laser Scanning Technology for Transportation Projects. Proceedings of the 2003 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, August 2003.
- [16] OLIVEIRA, M. et al. Sistema de indicadores de qualidade e produtividade para a construção civil: manual de utilização. 2. ed. rev. Porto Alegre: Serviço de Apoio as Micro e Pequenas Empresas do Rio Grande do Sul - SEBRAE/RS, 1995.
- [17] PALLIARI, J.C. et al. Levantamento de perdas/consumo de argamassa de revestimento em obras de construção em edifícios brasileiros. In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Vitória, 1999. Anais, p. 715-724.
- [18] PICCHI, F. A. Sistemas da Qualidade: uso em empresas de construção de edifícios. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, São Paulo. 1993. 280 p.
- [19] PU, S.; VOSELMAN, G. Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 64, n. 6, p. 575-584, nov. 2009.
- [20] SALAMANCA, S. et al. Filling holes in 3D meshes using image restoration algorithms, Proceedings of the Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission. (Atlanta, GA), 2008.
- [21] SOIBELMAN, L. As perdas de materiais na construção de edificações: Sua incidência e controle. Porto Alegre, 1993.
- [22] SU, Y. Y. et al.. Integration of Construction As-Built Data Via Laser Scanning with Geotechnical Monitoring of Urban Excavation. Journal of Construction Engineering and Management, v. 132, n. 12, p. 1234-1241, dez. 2006.
- [23] XIONG, X. et al. Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data. Automation in Construction, v. 31, p. 325-337, maio 2013.
- [24] ZHANG, C.; ARDITI, D. Automated progress control using laser scanning technology. Automation in Construction, v. 36, p. 108-116, dez. 2013.
- [25] 3D scanner - Wikipedia, the free encyclopedia. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanner>. Acesso em: 12 abr. 2015.