



## ANAIS do 33º Congresso Brasileiro de Espeleologia

Eldorado SP, 15-19 de julho de 2015 - ISSN 2178-2113 (online)



O artigo a seguir é parte integrando dos Anais do 33º Congresso Brasileiro de Espeleologia disponível gratuitamente em [www.cavernas.org.br/33cbeanais.asp](http://www.cavernas.org.br/33cbeanais.asp)

Sugerimos a seguinte citação para este artigo:

ARAÚJO, R.N.; MUNIZ, F.; SILVA, B.R.; BRANDI, I.. Controle morfológico de cavidades com a utilização de laser *scanner*. In: RASTEIRO, M.A.; SALLUN FILHO, W. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33, 2015. Eldorado. *Anais...* Campinas: SBE, 2015. p.321-327. Disponível em: <[http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe\\_321-327.pdf](http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_321-327.pdf)>. Acesso em: *data do acesso*.

Esta é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia.

Consulte outras obras disponíveis em [www.cavernas.org.br](http://www.cavernas.org.br)

## CONTROLE MORFOLÓGICO DE CAVIDADES COM A UTILIZAÇÃO DE LASER SCANNER

MORPHOLOGICAL CAVES CONTROL WITH THE USE OF LASER SCANNER

Ramon Nunes ARAÚJO (1); Fabrício MUNIZ (2); Bruno Rezende SILVA (2); Iuri BRANDI (1)

(1) Gerência de Espeleologia e Tecnologia, DIPF, Vale S.A, Belo Horizonte MG.

(2) Coffey Brasil, Belo Horizonte MG.

Contatos: [ramon.araujo@vale.com](mailto:ramon.araujo@vale.com); [Fabricio.Muniz@coffey.com](mailto:Fabricio.Muniz@coffey.com); [Bruno.Rezende@coffey.com](mailto:Bruno.Rezende@coffey.com).

### Resumo

A necessidade de detalhamento topográfico do escopo cavernícola em empreendimentos minerários que possuem áreas de influência direta de cavidades tem exigido a adoção de medidas de controle cada vez mais rígidas para o monitoramento das condições de integridade física de cavidades naturais subterrâneas durante as etapas de implantação e operação.

O levantamento topográfico de cavidades com equipamento laser *scanner* permite a obtenção de milhares de pontos com precisão milimétrica, que detalham as feições estruturais e geoespeleológicas da cavidade. Desta forma, o sólido referente à estrutura tridimensional da cavidade fica definido e os seus parâmetros espeleométricos determinados.

Este trabalho tem por objetivo apresentar os procedimentos adotados para o levantamento topográfico com laser *scanner*, das condições geoestruturais e geoespeleológicas de uma cavidade situada na área de influência direta da Cava de N5 no sudeste do Pará.

**Palavras-Chave:** *Laser scanner*; monitoramento, cavernas.

### Abstract

*The need for speleological topographic detail in mining ventures that contain caves direct influence areas requires the adoption of increasingly rigid control measures to monitor the conditions of physical integrity of caves, during implementation and operation stages.*

*Topographic survey of caves with laser scanner equipment allows to obtain thousands of points with millimeter accuracy, that details structural and geological features from the ceiling, floor and walls of the cave. Thus, the solid three-dimensional structure is well defined and its dimension parameters determined.*

*This paper aims to present procedures adopted for topographic assessments with laser scanner, of structural and geological conditions of a cave located in direct influence area of N5 Mining Pit in southeastern Pará.*

**Key-words:** *Laser scanner*; monitoring; caves.

### 1. INTRODUÇÃO

A busca de dados cada vez mais detalhados, replicáveis, padronizados e interativos, faz com que a inevitável evolução do mundo analógico para o digital aconteça, o que se aplica também a espeleologia e principalmente ao mapeamento de cavernas, e o resultado é a inserção de novas tecnologias no ambiente subterrâneo. A tecnologia LIDAR é uma delas, do inglês (*Light Detection And Ranging*), produz grande quantidade de dados de forma segura e rápida. Segundo (Beraldin *et al.*, 2000) a necessidade de aquisição de dados de alta precisão e densidade em curto espaço de tempo tem feito a tecnologia LIDAR ter aplicações cada vez mais crescentes e em diversas áreas.

O escaneamento a laser de cavernas é um novo e largo passo nos trabalhos espeleológicos envolvendo o licenciamento ambiental, resultado do crescente investimento técnico e tecnológico. Traz um grande ganho de tempo e segurança aos trabalhos, além da altíssima qualidade nos resultados. No que se refere à precisão, esta tecnologia é imensamente superior aos métodos de mapeamentos espeleológicos típicos utilizados pela sociedade civil e terceiro setor, devido ao detalhamento, precisão e grande quantidade de produtos gerados.

Baseado no princípio da transmissão da luz laser o ambiente é iluminado ponto por ponto e a luz refletida do objeto é detectada, com a ajuda do

chamado método da diferença de fase; podem ser determinados os seguintes valores, independente das condições de luz prevalentes:

- Ω Distância do objeto ao centro do aparelho
- Ω Ângulos vertical e horizontal;
- Ω Intensidade de retorno, refletância do objeto.

Através de regras trigonométricas são utilizadas a distância inclinada, ângulo vertical medido, ângulo horizontal medido e as coordenadas do centro do aparelho para determinar um trio de coordenadas de um ponto escaneado. Estas medidas são realizadas a uma taxa de milhares de pontos por segundo.

Após a aquisição das coordenadas o aparelho fotografa a área levantada e atribui cada ponto uma informação de cor no formato RGB - Red, Green, Blue.

Todos os dados adquiridos desta forma são diretamente atribuídos a um ponto específico para que os resultados sejam representados numa imagem de distância (escala de cinzas ou código de cores), de refletância ou combinados naquilo a que se chama uma nuvem de pontos 3D.

O escaneamento 3D alia grandes quantidades de pontos, na casa das dezenas de milhões, a uma riqueza de detalhes, obtidos em curto espaço de tempo, o que aperfeiçoa e dá maior produtividade ao trabalho. Através do processamento das nuvens de pontos geradas, é possível efetuar medições, cálculos de área, superfície e volume, geração de perfis topográficos transversais e longitudinais e posterior integração em ambiente de realidade virtual, para possibilitar interação com o modelo.

Realidade Virtual (RV) é uma tecnologia de interface avançada entre um usuário e um sistema computacional com o objetivo de recriar ao máximo a sensação de realidade para o indivíduo, levando-o a adotar essa interação como uma de suas realidades temporais. Para isso, a interação é feita em tempo real com o uso de técnicas e de equipamentos computacionais, auxiliando na ampliação do sentimento de presença do usuário. Em um ambiente de realidade virtual tem-se a sensação de estar dentro e fazer parte daquele mundo, o usuário também é capaz de interagir com seu ambiente de várias maneiras significativas (TORRECILLAS, 2009).

Os esforços para este tipo de levantamento estão dentro do programa de monitoramento contínuo da integridade física de cavidades, que prevê o controle sismográfico dos níveis de

vibrações causadas pelas operações de lavra e o controle morfológico de feições estruturais e geoespeleológicas. São realizadas inspeções geotécnicas periódicas, com a elaboração de relatórios formais, contendo os registros fotográficos das condições morfológicas das cavidades.

### 1.1 Área de estudo

A cavidade N5S-17, denominada “Pequiá”, como ilustrado na Figura 1 fica localizada na área de influência direta do empreendimento da cava de N5 Sul na mina de ferro da Serra dos Carajás; ela foi escolhida para a realização deste trabalho por diversos motivos e o principal por ser uma cavidade de relevância máxima.

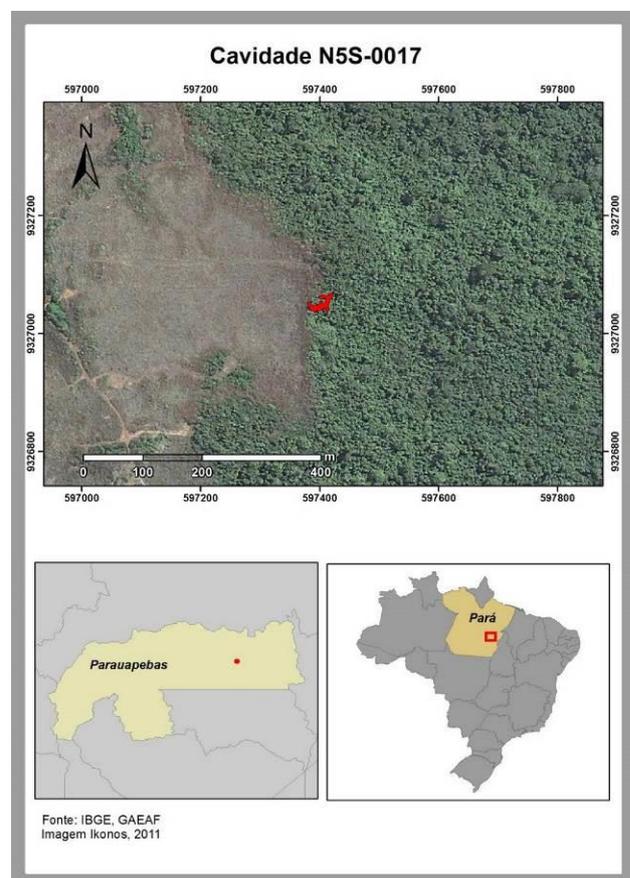


Figura 1. Localização da Cavidade N5s-0017.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho seguiu as seguintes etapas:

- Ω Planejamento das atividades
- Ω Pré-campo
- Ω Escaneamento a Laser

Ω Pós-campo (Processamento de dados)

## 2.1 Planejamento das atividades

Nesta etapa do projeto foram reunidas todas as informações cartográficas e relevantes a respeito das cavidades a serem levantadas, tais como a localização, rotas, pontos de interesse, fotos e plantas espeleotopográficas. Este momento de avaliação é de extrema importância para a viabilidade e rendimento do trabalho de escaneamento, no qual são observados aspectos do meio físico que podem influenciar na atividade, sejam negativos ou positivos, se a morfologia da cavidade permite um levantamento conciso.

## 2.2 Pré-Campo

Para realizar esta etapa com segurança e prevenção de possíveis acidentes, todos os envolvidos tiveram 40 horas de treinamentos teóricos e práticos de segurança do trabalho onde foram ministrados cursos de Plano de emergência, Conceitos e práticas de equipamentos de proteção, proteção respiratória, espaço confinado, primeiros socorros avançados, dentre outros.

Antes do início das atividades de escaneamento, as cavidades e seus acessos foram vistoriados por técnicos de segurança do trabalho juntamente com a equipe de campo responsável pelos levantamentos, com o intuito de identificar e avaliar os riscos da atividade a ser realizada. Nesta etapa foram abertas trilhas para novos acessos facilitando o caminhamento e deslocamento da equipe e dos equipamentos até as cavidades.

## 2.3 Escaneamento a Laser

### 2.3.1 Georreferenciamento das estações

A cavidade não precisa estar previamente mapeada através do método analógico para ser realizada a topografia a laser; necessitando apenas para amarração do sistema de coordenadas um GPS de navegação, mas recomendamos preferencialmente o uso de estação total e GPS geodésico. Para este método de levantamento é necessário se definir duas posições do *laser Scanner*, utiliza-se uma coordenada conhecida e uma direção, direção esta, o azimute do Ponto E1 para o ponto de Ré, como visualizado na Figura 2.

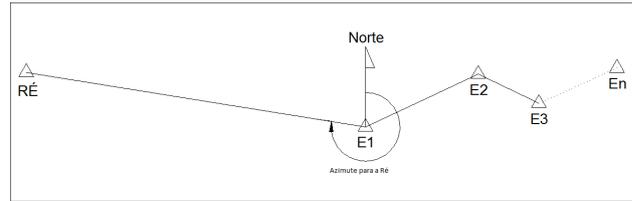


Figura 2. Georreferenciamento das estações.

### 2.3.2 Coleta da nuvem de pontos

Para aquisição de uma coordenada tridimensional pelo *Laser Scanner*, este emite um feixe laser que ao retornar é calculada a distância entre o centro do equipamento e o ponto visado, neste momento também são armazenadas as leituras dos ângulos horizontal e vertical e através equações trigonométricas, são calculadas as coordenadas do ponto a partir das coordenadas do centro do laser. Este processo é repetido na taxa de 50000 pontos por segundo até que área de abrangência do laser seja levantada em uma posição.

Comparando o *Laser Scanner* com uma lâmpada instalada na mesma posição do equipamento, toda sombra gerada por esta fonte luminosa corresponde a uma área que não será escaneada desta posição. E para alcançar maior abrangência possível deve-se mudar a posição do equipamento diversas vezes.

O equipamento utilizado possui ajuste de densidade da nuvem de pontos que correlaciona a distância entre pontos da nuvem com a distância dos objetos, e este já vem com algumas definições básicas de densidade classificadas, em baixa, média e alta. Cada modalidade implica em um maior ou menor tempo e número de pontos em cada posição. Foi usada para este trabalho a resolução média, de até 100 metros do equipamento, os pontos terão afastamento máximo de 10 centímetros, mínimo de 4,5 mm, com tempo de levantamento de seis minutos e 49 segundos por estação.

O equipamento é compacto e de fácil transporte, possui dimensões de 238 mm x 358 mm x 395 mm, o que possibilita a entrada em pequenos condutos, áreas de rastejo e ou com dificuldades de locomoção sem perder a qualidade nos levantamentos.

Possui um campo de visão de 360° na horizontal e 270° na vertical, com Câmera digital embutida de quatro megapixels com ajuste automático de luminosidade e foco; Tem alcance mínimo de coleta á 10 centímetros do aparelho e alcance máximo de 300 metros em superfície com 90% de refletividade ou 134 metros em superfície

com 18% refletividade; captura uma taxa de cinquenta mil pontos por segundo, com resolução de um ponto medido em até 50 metros de 4,5 mm.

O aparelho é inofensivo à visão humana com comprimento de onda de 532 nm, faixa visível na cor verde.

Após o escaneamento, o equipamento permanece na mesma posição para coleta das imagens. É necessário, então, ligar o aparato de iluminação, dessa forma tem-se a cavidade totalmente mapeada e georreferenciadas na memória interna do equipamento.

### 2.3.3 Coleta das imagens

O equipamento tem um sistema que coleta as imagens na saída oposta do feixe de *laser*, estas imagens são coletadas e armazenadas no formato “raw”, este é como se fosse um negativo da fotografia digital e é de qualidade superior ao formato JPEG.

O fato de a câmera estar posicionada no mesmo ponto de onde são lançados os feixes do laser evita o efeito da paralaxe que é causado quando é utilizada uma câmera externa ao equipamento. O efeito da paralaxe é causado pela diferença da distância focal da câmera e a distância focal do feixe laser este efeito pode deslocar as imagens em relação à nuvem de pontos atribuindo assim uma falsa cor aos pontos coletados.

## 2.4 Pós-campo (processamento dos dados)

### 2.4.1 Tratamento das nuvens de pontos

Após a geração e a montagem das nuvens de pontos, houve a necessidade de limpeza das mesmas com utilização do software Cyclone; devido ao grande número de detalhes e complexidade das geometrias das cavidades, as nuvens foram seccionadas em segmentos de 30 centímetros, como ilustrado na Figura 3, cada para facilitar a execução da limpeza e melhor visualização. O processo de escaneamento pode trazer pontos indesejados que influenciam na geometria real da cavidade, tais como: morcegos se movimentando, vegetação na entrada ou até mesmo a umidade.



Figura 3. Parte da nuvem de pontos seccionada.

### 2.4.2 Criação da superfície

Após a manipulação da nuvem de pontos na etapa de processamento e filtragem, foram geradas superfícies (malhas em 3D) com os pontos coletados. A superfície interna de uma cavidade geralmente é bastante irregular, limitação que implica para a criação de superfícies contínuas, algumas oclusões devem ser interpoladas virtualmente.

Para essa finalidade foi utilizado o software 3D Reshaper, conhecido mundialmente pelo seu potencial de modelagem 3D em superfícies complexas e engenharia reversa. Esse software permite que uma área seja detalhadamente analisada antes de ser “fechada” manualmente com tetraedros (como será mencionado adiante). Nessa análise é verificada a curvatura do entorno do polígono (se é côncava ou convexa) e, ao completar a verificação, uma superfície que melhor se adapte aos pontos do entorno é interpolada. Esse tipo de análise propicia um resultado acurado da forma da cavidade para pequenas áreas em que não foi possível realizar o levantamento. Dentro do software, os procedimentos realizados para obtenção dos valores de volume e área consistiram em limpeza e separação da nuvem de pontos e criação de uma malha 3D.

Para a criação da malha foi necessário realizar várias interpolações combinadas utilizando os parâmetros oferecidos pelo software para, então, encontrar aquelas que propiciassem o melhor resultado. Mediante a pesquisa dessas combinações, a metodologia escolhida foi a de interpolar novos pontos, recurso indicado para aplicação em nuvens de pontos densas que possam conter pontos ruidosos.

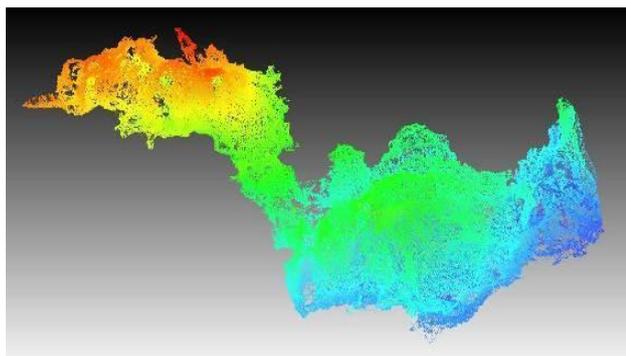


Figura 4. Nuvem de pontos otimizada e pronta para ser convertida em malha 3D.

### 2.4.3 Cálculo de volume e área

Concluídos o refinamento e a geração da malha obtida a partir da nuvem de pontos devidamente tratada, foram feitos os cálculos de área e volume das cavidades no software 3DReshape, que se basearam no conceito de cálculo integral. Através do método trapezoidal de prismas triangulares.

A partir de uma área é criado um tetraedro por face (triângulo), onde os quatro pontos do tetraedro são os três pontos dos triângulos somados ao centro de gravidade da malha. Mesmo que algum triângulo esteja parcialmente fora da malha (devido à sua forma global), ele será sempre compensado por outros tetraedros. Para que esse método seja matematicamente eficiente e preciso, a malha deve estar fechada (sem aberturas). Segue abaixo, de forma simplificada, a fórmula utilizada pelo programa para o cálculo de volume:

$$h_{m_i} = \frac{h_{i1} + h_{i2} + h_{i3}}{3}$$

$$V_i = F_i * h_{m_i} \quad \text{Volume de 1 prisma}$$

$$V = \sum_{i=1}^n V_i = \sum_{i=1}^n F_i * h_{m_i} \quad \text{Volume de todo objeto sobre 1 referência}$$

Onde:

i = nome de 1 triângulo

n = Numero de todos os triângulos

hi1, hi2, hi3 = altura de cada vértice de 1 triângulo

hmi = Altura media de 1 triângulo

V = Volume de 1 objeto

Vi = Volume de 1 triângulo

Fi = Área de 1 triângulo

O volume então pode ser calculado entre o objeto, no caso a cavidade, e um plano de referência ou entre dois objetos. Os blocos de rochas presentes dentro de uma cavidade têm grande influência sobre o valor da área e volume, uma vez que o volume final consiste no resultado do volume da cavidade menos o volume ocupado pelos blocos, enquanto a área final da cavidade é calculada considerando que os blocos fazem parte do piso da cavidade.

### 3. DISCUSSÃO E RESULTADOS

As cavidades ferríferas, devido ao seu espaço reduzido, oferecem grandes dificuldades aos levantamentos e, para o uso dessa tecnologia, os dutos entre galerias devem ter no mínimo 50 cm x 50 cm para a instalação do equipamento, o que não limita o alcance do *laser*.

O fato da morfologia das cavidades ser muito irregular é difícil imaginar o completo recobrimento do espaço interno de uma cavidade, uma vez que, devido à superfície rugosa e o chão recoberto por blocos irá gerar grande quantidade de sombra nos levantamentos, mesmo com diversas posições do equipamento. Devido aos milhões de pontos coletados e com as rotinas computacionais é possível interpolar superfícies sobre estas áreas não levantadas, com acurácia compatível a acurácia do levantamento. Uma alternativa interessante, no caso do *Scanner* laser, seria aumentar o número de posições para se alcançar um maior recobrimento.

Neste trabalho as nuvens de pontos foram reduzidas para um espaçamento médio entre pontos de um milímetro o que permite um bom detalhamento e um bom processamento dos dados.

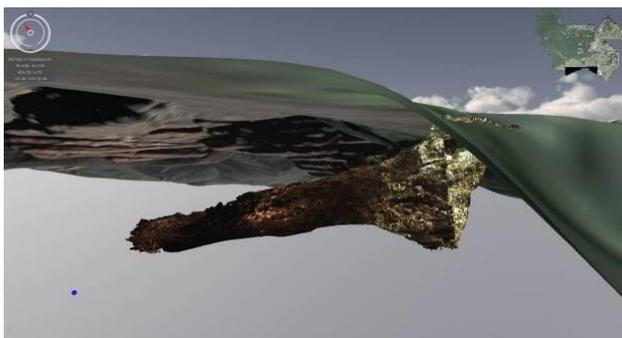
Com estas informações de altíssimo nível de detalhes é possível inseri-las em uma plataforma interativa e imersiva nas quais tomadores de decisão, profissionais que trabalham diretamente com cavernas possam interagir e se capacitar, conhecer e extrair informações deste ambiente que por muitas vezes restritivo.

A densidade de pontos é tamanha que, várias análises são possíveis sobre os dados coletados, como exemplo, levantamentos sistemáticos para análises temporais, análises de rugosidade das estruturas, análises de planos de fraturas e no caso de nuvens de pontos com informações de cor, realizar parte do mapeamento geológico da cavidade em ambiente computacional.

A realidade virtual permite esta interação em um ambiente imersivo, e o software Geovisionary

o meio para integração e visualização dos dados espaciais gerados em 3D estéreo. Promove-se, assim, a interação em tempo real dos dados em ambiente de realidade virtual, tornando a manipulação das nuvens de pontos de forma intuitiva e colaborativa. O software consiste em uma plataforma de integração de diversos dados espaciais georreferenciados em um sistema de informação geográfica com recursos de realidade virtual. Sua utilização permite carregar, simultaneamente e em máxima resolução, o conjunto de dados espaciais georreferenciados como de engenharia de mina, topografia, imagem e cavidades, modelos de blocos, modelos geofísicos e furos de sondagem, etc.

Permite a realização de sobrevoos virtuais nas áreas de estudo para contextualizar a localização da cavidade em relação à topografia e imagem de superfície, permitindo integrar todos os dados do inventário espeleológico em um mesmo ambiente intuitivo e interativo para tomadas de decisões colaborativas avançadas na sala de RV.



**Figura 5.** Cavidade visualizada no software.

O resultado deste trabalho é a geração de diversos produtos para variados usos; as nuvens de pontos coloridas (RGB) auxiliam diretamente na visualização em ambiente virtual do contexto morfológico da cavidade e a sua inserção na paisagem dentro de Modelos Digitais de terreno (MDT), referenciadas ao sistema UTM Datum SAD69.

A malha 3D gerada através das nuvens de pontos levantadas interage com softwares CAD e SIG na geração de subprodutos e possibilita cálculos e estimativas intracavernícola e exocavernícola como a influência deste volume no corpo de minério.

Seções paralelas, comumente chamadas de perfis e cortes, possuem altíssimo detalhamento e precisão, facilitando a localizações de áreas de interesse dentro da cavidade, como ecótonos, espeleotemas, canalículos, contatos geológicos, falhas, fraturas e áreas de instabilidade geotécnica.

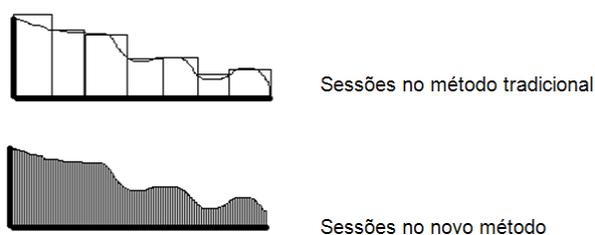
As curvas de nível equidistantes de dez centímetros mostram o verdadeiro escopo cavernícola e sua morfologia na paisagem, matematizando de forma eficaz no que se refere localização espacial.

Aplicativos para visualização no Internet Explorer contendo fotos em 360 graus da cavidade são importantíssimos para a interatividade de todos envolvidos diretamente com a espeleologia, pois a incorporação realística do cenário faz com a resolução dos problemas tenham a mesma visão e foco.

#### 4. CONCLUSÃO

Notaram-se diversas melhorias quantitativas e qualitativas quando se compara o novo método utilizando recursos de escaneamento 3D e interface de Realidade Virtual com os tradicionalmente empregados:

- Ω Menor tempo necessário para levantamento em campo: O levantamento laser necessita em média de 1 dia por cavidade ferrífera, devido ao tamanho para ser realizado, diminuindo assim a exposição da equipe ao ambiente inseguro da cavidade.
- Ω Maior velocidade na extração de volumes, área, geração de perfis; no método tradicional os cálculos são feitos manualmente, oferecendo risco de erro humano, enquanto neste método o processo é semi-automatizado enquanto os cálculos são realizados com maior precisão através de algoritmos contidos no software.
- Ω O cálculo de volume resultante de uma nuvem de pontos laser pode ser considerado mais preciso do que o método tradicional, tendo em vista que utiliza um número infinitamente maior de sessões no cálculo da integral, como ilustra a Figura 6:



**Figura 6.** Detalhamento de seções.

- Ω Interpretações geológicas/geomorfológicas podem ser realizadas em ambiente de Realidade Virtual com a presença de diversos especialistas.

- Ω O equipamento laser utilizado neste trabalho possui características de precisão superior à maioria das Estações Total disponíveis no mercado com a vantagem de coleta de dados sobre toda a área visível da cavidade, o que seria impossível com a utilização das mesmas. Desta forma podemos concluir que os levantamentos utilizados neste trabalho são levantamentos de qualidade superior e igual precisão aos levantamentos da classe XD (BCRA, 2015).
- Ω Em termos de precisão de cálculos de volume, dado à grande quantidade de informações topográficas coletadas e a quantidade infinitamente superior de quadrantes utilizados nos cálculos da integral.
- Ω Proporciona uma redução de possibilidade de erro por utilizar técnicas e instrumentos mais precisos e menos fator humano.
- Ω Permite análises multidisciplinares em sala de RV, treinamentos de segurança para novas equipes em ambiente virtual, melhoria da comunicação, geração e vídeos, navegação virtual pela web e inventário espeleológico para cavidades importantes.
- Ω Facilidade e velocidade na geração de produtos derivados.
- Ω Permite a integração com outras informações georreferenciadas em um Sistema de Informações Geográfico (modelo de blocos, furos, superficiais, etc.) com interface de realidade virtual, para realização de análises espaciais e da relação dos dados de superfície com os de sub-superfície.
- Ω Permite inserção e hiperlinks para resultados obtidos com o inventário espeleológico que podem ser acessados durante as navegações em tempo real ou pela internet.

## **BIBLIOGRAFIA**

- BCRA, British Cave Research Association. Disponível em: <<http://bcra.org.uk/surveying/index.html>>  
Acesso em: 03/01/2015.
- Beraldin J, Blais F, Boulanger P, Cournoyer L, Domey J, El-Hakim SF, Godin G, Rioux M, Taylor J, 2000, Real world modeling through high resolution 3D imaging of objects and structures, ISPRS Journal of Photogrammetry & remote Sensing 55 (2000), pp. 230-250.
- TORRECILLAS, Marcelo. A realidade virtual em jornada das estrelas. 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado em Comunicação) - Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo. 2009.