

# INSPEÇÃO DE MOLDES POR DIGITALIZAÇÃO<sup>1</sup>

*Cristiane Brasil Lima Ulbrich<sup>2</sup>*  
*Flavio Ulbrich<sup>3</sup>*

## Resumo

O objetivo deste trabalho é demonstrar através da digitalização a flexibilidade e aplicação em inspeção dos sistemas portáteis e sem contato como, por exemplo, *Laser Tracker*, braço com scanner, sistema de luz branca, scanners para CMM, máquinas ópticas, etc. Entre os temas abordados estão às etapas da digitalização, preparação de referências, inspeção dimensional, entre outros. Os principais problemas relacionados à aquisição de dados e com suas possíveis soluções enriquecem o conteúdo do trabalho com relatos de estudos de caso.

**Palavras-chave:** Engenharia reversa; Inspeção; Digitalização; Moldes.

## MOULD INSPECTION USING SCANNER TECHNIQUES

## Abstract

The propose of this paper is to demonstrate the use of scanning in mould inspection applications. Some processes are describing as portable systems, *Laser tracker*, portable arm, scanner system, white light scanners, CMM, optical machines, etc. Among the topics covered are the steps of scanning, preparation of references, dimensional inspection, among others. The main problems related to data acquisition and their possible solutions were explaining by some case studies.

**Key words:** Reverse engineering; Inspection; Scanning; Moulds.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 9º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 10 e 11 de agosto de 2011, São Paulo, SP.

<sup>2</sup> Mestre e doutora em Engenharia Mecânica pela UNICAMP, com especialização em prototipagem rápida, inspeção tridimensional e engenharia reversa, sócia da empresa BCS Tecnologia.

<sup>3</sup> Especialista em Engenharia Elétrica pela UNICAMP, sócio da empresa BCS Tecnologia.



## 1 INTRODUÇÃO

A inspeção tridimensional auxilia na detecção de erros dimensionais em moldes e matrizes há vários anos. Sistemas de medição por coordenadas e braços articulados são as ferramentas mais comuns para esta atividade. A inspeção por digitalização ou *scanner* é um processo que se torna cada dia mais usual neste processo pela sua rapidez e extensão de dados capturados.

Digitalizar o molde ou matriz possibilita a comparação entre o modelo desejado e o modelo confeccionado. Assim como os sistemas CAD/CAM podem auxiliar tanto no projeto e manufatura de objetos complexos como na inspeção a partir de tolerâncias apertadas. Ainda existem produtos difíceis de inspecionar pelos métodos convencionais. Por exemplo, um molde, com suas geometrias complexas e, muitas vezes, grandes extensão dimensional. Então, uma inspeção por digitalização faz-se necessária, garantindo que as tolerâncias sejam controladas.

Este artigo tem como objetivo abordar as etapas do processo de inspeção de moldes utilizando a tecnologia de digitalização e comparação de dados por mapa de cores.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O conceito de digitalização abrange principalmente o aspecto de capturar informações com base em pontos em um espaço 3D. O espaço onde o modelo físico encontra-se é referenciado a um sistema de coordenadas cartesianas. A seguir tem-se a conceituação sob o ponto de vista dos principais autores:

Chen e Fan:<sup>(1)</sup> “A digitalização é o processo de captura de coordenadas de pontos das superfícies da peça. O resultado do processo de digitalização é uma nuvem de pontos 2D ou 3D, armazenados como uma imagem.”

Champ:<sup>(2)</sup> “A digitalização a laser é um método rápido e eficiente para a engenharia reversa de superfícies complexas. A técnica é muito utilizada em modelos como *clay* (argila) e espuma. Imagens por alcance, ou *range images* como são conhecidas, são capturadas usando esta técnica e podem criar cópias em escala ou auxiliarem na construção do modelo CAD 3D.”

Boehler, Heinz e Marbz:<sup>(3)</sup> “Um *scanner* 3D ou equipamento de digitalização registra coordenadas 3D de números pontos sobre a superfície de um objeto em um período de tempo relativamente curto.”

A digitalização é uma das etapas do processo de engenharia reversa. Para Daschbach e McNichols<sup>(4)</sup> “A engenharia reversa é o processo de levantar dimensões, com rapidez e exatidão, determinar padrões geométricos tais como áreas e volumes além de definir as tolerâncias de um modelo existente.”

### 2.1 Captura de Pontos

Existem duas maneiras de capturar pontos de um modelo: a primeira é por contato físico (um componente físico conhecido como *probe* toca o produto e copia seu perfil); a segunda, sem contato físico (recursos ópticos e/ou sensores de luz projetam feixes de luz sobre o produto). Uma vez determinada a maneira como os pontos serão capturados, o segundo passo é escolher o método de digitalização de pontos. Os dois principais métodos para esta captura de pontos são: ponto-a-ponto e nuvem de pontos. Apresenta-se a seguir a definição de cada um deles.



### 2.1.1 Digitalização ponto-a-ponto

Segundo VInarub e Kappor<sup>(5)</sup> a digitalização ponto-a-ponto é definida por uma varredura de dados coordenados e armazenados em um arquivo de pontos. Contudo, modelos complexos exigem uma reprodução exata e para este método o tempo requerido é significativamente alto. Estão disponíveis no mercado equipamentos manuais e automáticos, com apalpador ou sensores ópticos de luz. Cada um desses métodos é limitado por um ou outro destes itens: custo, confiabilidade, precisão ou tempo de trabalho. Em adição, os métodos ópticos requerem correções constantes para as profundidades e distâncias no eixo Z variando ao longo da digitalização.

### 2.1.2 Digitalização por nuvem de pontos

Segundo Boehler, Heinz e Marbz<sup>(3)</sup> a digitalização por nuvem de pontos é um método onde vários pontos são capturados simultaneamente, o que torna o processo mais rápido do que a digitalização ponto-a-ponto. O método mais comum de digitalização por nuvem de pontos parte do princípio de projetar uma faixa de laser sobre o objeto. A digitalização, ou seja, a varredura de pontos, é feita usando-se um ou dois espelhos que permitem mudanças do ângulo de deflexão em pequenos incrementos. Com isso, o objeto e/ou o instrumento podem ser rotacionados para alcançar a varredura completa dos pontos tridimensionais. Alta precisão na configuração dos ângulos é um fator muito importante, uma vez que os ângulos juntos com a medição de distâncias determinam a posição do ponto de reflexão.

## 2.2 Sistemas para Aquisição de Dados

Os sistemas para aquisição de dados têm suas origens na metrologia. São equipamentos cujo objetivo é capturar coordenadas de pontos em X,Y,Z de acordo com uma origem pré-estabelecida. Existem duas maneiras de capturar pontos de um modelo:

### 2.2.1 Por contato físico

Um componente físico conhecido como *probe* ou apalpador toca o produto e copia seu perfil em um equipamento conhecido como máquina de medir coordenadas (*Measuring Machine Coordinates - CMM*). Também conhecido como digitalização ponto-a-ponto. É definido por uma varredura de dados coordenados e armazenados em um arquivo de pontos. Contudo, para a reprodução de modelos complexos, muitos pontos deveriam ser capturados, o que torna sua execução inviável devido ao tempo que demoraria.

### 2.2.2 Sem contato físico

Recursos ópticos e/ou sensores de luz projetam feixes de luz sobre o produto. Também conhecido como digitalização por nuvem de pontos. Neste método, vários pontos são capturados simultaneamente, o que torna o processo mais rápido do que a digitalização ponto-a-ponto. Os métodos mais utilizados no mercado projetam um feixe de laser ou “franjas” sobre o objeto e possuem câmeras que capturam estas imagens identificando as suas coordenadas.

## 2.3 Categorias dos Sistemas para Aquisição de Dados

Baseados na maneira de capturar os pontos, os sistemas de aquisição de dados podem ser divididos em quatro categorias conforme a figura a seguir.



### 2.3.1 Laser Scanners tridimensionais

Ou digitalizadores a laser tridimensionais são divididos em três grupos: digitalizadores 3D a laser para máquina fixa de medição de coordenadas, digitalizadores 3D a para braços portáteis e digitalizadores 3D a laser do tipo *stand-alone*.

- *Stand-alone*: Estes sistemas estão sendo vistos como uma substituição para as máquinas de medição de coordenadas (CMM). O cabeçote de digitalização e as plataformas de movimentação são integrados através de *software* de controle ao sistema da máquina. O modelo a ser digitalizado pode ser colocado sobre uma mesa rotativa para facilitar a obtenção das medidas tridimensionais. Este processo também é conhecido como *retrofit*.
- Para CMM fixo: Estes sistemas geralmente oferecem melhor precisão em comparação aos sistemas construídos para braços portáteis. Devido a sua precisão alta, estes modelos são usados geralmente para medições que envolvam moldes (para injeção de peças plásticas, por exemplo).
- Para braço articulado: Estes sistemas geralmente são utilizados para medições em campo, ou para peças com maiores dimensões. Entre as aplicações possíveis estão a medição de moldes de estampo ou forjado, moldes de sopro, de fundição, entre outros.

### 2.3.2 Laser Tracker

É um sistema que consiste basicamente em dois componentes: uma esfera sem nenhuma conexão por cabos que pode tocar o modelo físico e um receptor, que identifica (ou persegue a esfera) informando as coordenadas do centro da mesma, podendo estar próximo ou há grandes distâncias. Tem sua aplicação dirigida aos setores aeroespacial, exército e defesa, automotivo, entre outros.

### 2.3.3 Sistemas de Fotogrametria

São equipamentos que trabalham com o princípio da fotografia em suas medições. Padrões como listras ou franjas são projetadas no modelo e câmeras capturam estas imagens fornecendo as coordenadas tridimensionais. Estes sistemas são indicados para trabalhos em altas temperaturas ou quando há um ambiente instável inclusive com vibração e movimento. Entre os setores de aplicação estão o exército e defesa, automotivo, aeroespacial, edificações e construção de navios.

### 2.3.4 Scanners de Luz Branca

Estes sistemas têm como princípio de funcionamento a projeção através de luz branca. São rápidos e precisos na medição de grandes áreas, fazendo ao mesmo tempo um mapeamento adjacente e registrando referências (ou marcas) para garantir a precisão da varredura.

## 2.4 Princípios de Funcionamento da Digitalização

Estes equipamentos funcionam basicamente com um dos princípios de funcionamento descritos a seguir segundo Boehler, Heinz e Marbz.<sup>(3)</sup>

### 2.4.1 Time-of-flight

Um curto impulso elétrico dispara um diodo semiconductor de laser para emitir um pulso de luz. A luz emitida passa por uma lente, que produz um finíssimo raio de laser. O raio laser é devolvido pelo objeto, espalhando alguns raios pela lente receptiva por um fotodiodo, que cria um pulso elétrico. O intervalo de tempo entre os dois pulsos elétricos (transmissor e receptor) é usado para calcular a distância do objeto, usando a



velocidade da luz como uma constante. Pulsos múltiplos são avaliados por um microprocessador do sensor, que calcula o valor de saída aproximado. A saída analógica promove um sinal variável que é proporcional à posição do objeto dentro do limite da janela analógica programável. Uma saída discreta permite a passagem da energia em qualquer lugar onde o objeto esteja dentro da janela. A janela para saída analógica e discreta pode ser a mesma, ou elas podem ser programadas independentemente.

#### 2.4.2 Digitalização por faixa de laser (triangulação)

Este grupo de equipamentos de digitalização é baseado no princípio da triangulação simples. Um ponto ou faixa de laser é projetado sobre a superfície do objeto e é registrado por uma ou mais câmeras CCDs. O ângulo de raio de luz a partir do “scanner” é registrado internamente. O comprimento da base entre a origem do laser e a base é fixo e conhecido a partir da calibração. A distância entre o objeto e o equipamento é geometricamente determinada pelo ângulo registrado e o comprimento da base. Este tipo de scanner alcança pontos 3D com um desvio padrão menor do que um milímetro para distâncias muito próximas (menores do que dois metros). A precisão depende tanto do comprimento da base do scanner quanto da distância do objeto. Com o comprimento da base fixo, o desvio padrão de distância medida pode incrementar proporcionalmente ao quadrado da distância.

#### 2.4.3 Fotogrametria

A fotogrametria como o próprio nome diz, é uma técnica de medição de coordenadas 3D que usa fotografias como base para a metrologia (medição). A fotografia descreve os princípios fotográficos envolvidos na fotogrametria, enquanto que a metrologia descreve as técnicas para produzir coordenadas tridimensionais a partir de fotografias bidimensionais.

#### 2.4.4 Luz Branca

O processo utiliza a projeção de luz branca estruturada para adquirir a superfície da peça a ser digitalizada. Através da projeção de padrões sobre a peça é possível a triangulação e obtenção das coordenadas XYZ de mais de dois milhões de pontos por aquisição. Duas câmeras de alta definição do digitalizador 3D adquirem imagens da projeção de padrões (*fringes*) de luz sobre o objeto a ser digitalizado segundo Spatium.<sup>(6)</sup> Com o auxílio do processamento digital de imagens e baseado no princípio de triangulação, as coordenadas 3D são computadas independentemente e as imagens podem ser calibradas simultaneamente durante a medição segundo Gom.<sup>(7)</sup> O ponto ou padrão projetado é gerado por projetores de luz separados, sem nenhuma função de medição. A projeção consiste no movimento da luz ou linha, no movimento das franjas ou padrões, ou em um padrão estático arbitrário.

### 3 METODOLOGIA

Para a inspeção de moldes utilizando a digitalização foram utilizadas quatro etapas de trabalho: a escolha do modelo CAD que será a referência, a digitalização, o alinhamento entre digitalização e modelo-referência e a comparação entre eles.

PADRÃO: CAD

DIGITALIZAÇÃO

ALINHAMENTO

COMPARAÇÃO

### 3.1 Escolha do Modelo CAD que Será a Referência

O primeiro passo para fazer uma inspeção de moldes é ter em mãos um padrão. Este pode ser um arquivo CAD 3D, uma nuvem de pontos ou até mesmo um outro modelo físico (neste caso também deverá ser digitalização).

### 3.2 Digitalização

A digitalização é o processo que faz a aquisição de dados, ou seja, das coordenadas 3D que representam o modelo físico. Os dados são capturados por um sistema composto por hardware e software e gera como resultado uma nuvem de pontos ou uma malha triangular com a forma digitalizada.

O conceito de digitalização abrange principalmente o aspecto de capturar informações com base em pontos em um espaço 3D (Figura 1). O espaço onde o modelo físico encontra-se é referenciado a um sistema de coordenadas cartesianas.

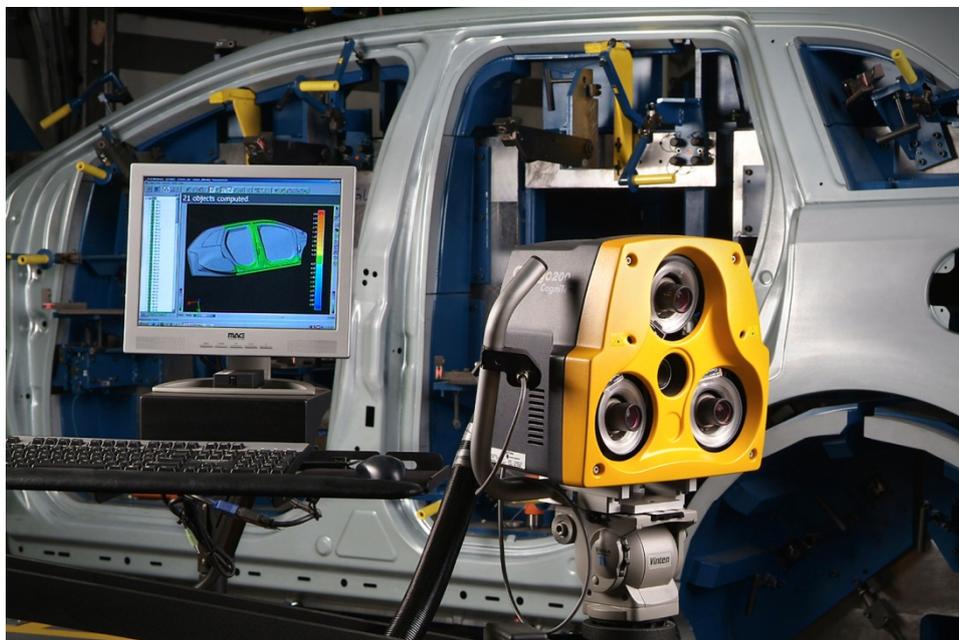


Figura 1. Inspeção de um produto segundo Hexagon.<sup>(8)</sup>

As duas principais funcionalidades exigidas de um equipamento de digitalização são: evitar estragos no protótipo e velocidade de trabalho. Na digitalização obtém-se uma nuvem de pontos sendo que a distância entre eles é muito importante para obter uma captação satisfatória da superfície, especialmente em regiões onde há uma rápida mudança de curvatura.

Não há necessidade de fixação do molde porque normalmente ele é apenas apoiado no desempenho, devido ao seu peso próprio. Caso haja movimentação do mesmo pode-se utilizar bases magnéticas ou grampos para fixá-la sobre a mesa.

O equipamento de digitalização pode ser fixado de duas maneiras: através de base magnética ou sobre um tripé. O tripé é utilizado para peças muito grandes ou quando não possuem locais para fixação no próprio molde ou no desempenho.

### 3.3 Alinhamento

Antes de começar a digitalização faz-se necessária uma rápida avaliação do molde para identificar pontos de referência que possam auxiliar os alinhamentos com o

modelo CAD. Estas referências podem ser regiões planas, furos, placas-guia, planos de fechamento e paredes laterais.

Durante o processo de digitalização, várias tomadas de pontos são realizadas. Isso significa que o equipamento tem um determinado alcance, podendo ou não cobrir toda a superfície do modelo de uma só vez. Quando o ângulo de atuação do equipamento não cobre todo o modelo, outra tomada de pontos é necessária. Referências também são registradas para que o posicionamento destas várias varreduras possa ser alinhado corretamente. O resultado desta etapa é uma densa nuvem de pontos formada por várias tomadas em diferentes ângulos de visão.

### 3.4 Comparação de Erros por Mapa de Cores

Um relatório de inspeção tradicional é apresentado na Figura 2. Neste caso, os pontos foram capturados por toque, ou seja, não é uma nuvem de pontos por digitalização. Neste tipo de relatório cada ponto apresenta por cores, o seu desvio em relação ao modelo original e também de forma numérica. Neste processo, o alinhamento é feito antes da captura de pontos. Assim, cada ponto ao ser capturado já apresenta na tela uma posição se está dentro do dimensional ou não.

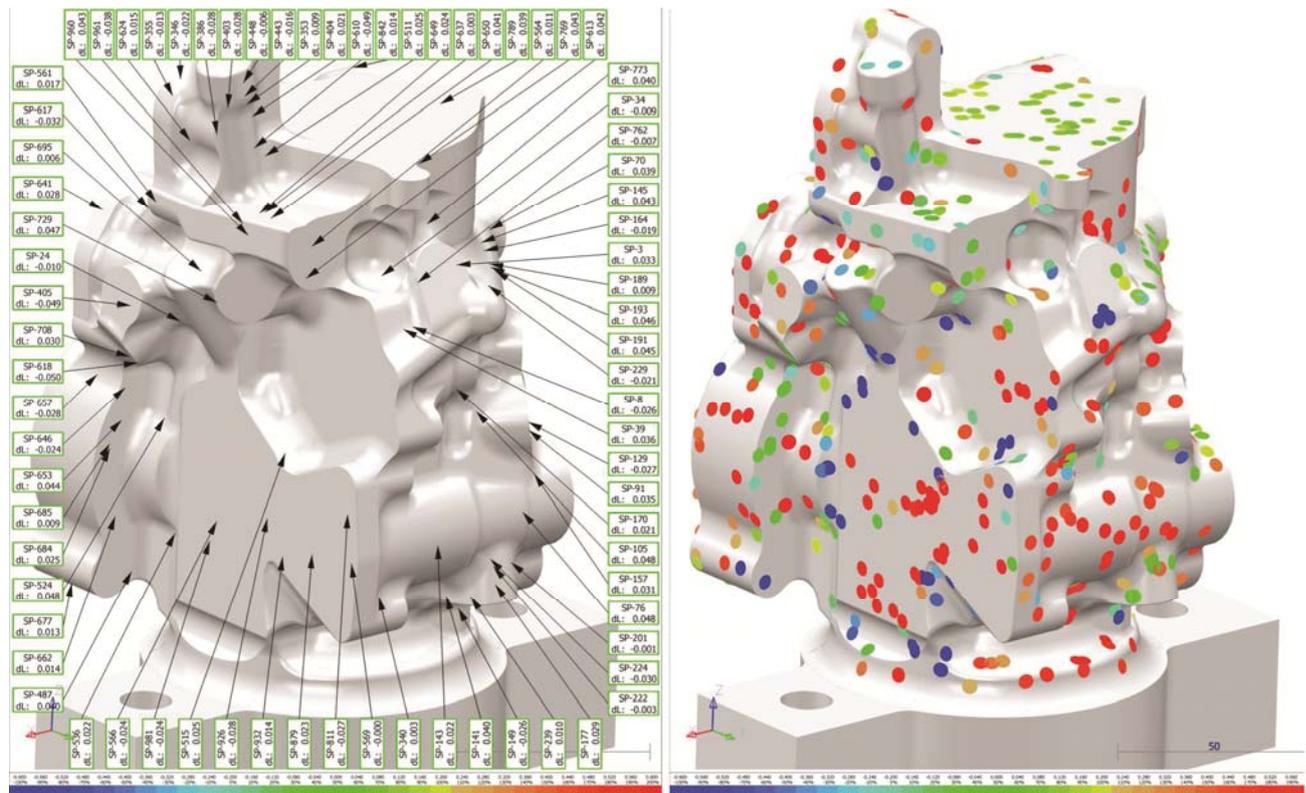


Figura 2. Relatório de inspeção tradicional segundo Delcam.<sup>(9)</sup>

Já a metodologia aqui proposta busca uma digitalização que propicie um maior número de pontos durante o processo de inspeção. A digitalização cria uma malha única que é comparada com o modelo. O relatório apresentado na Figura 2 também permite esta configuração, mas o que foi proposto é o mapeamento de cores (Figura 3).

Após a digitalização e alinhamento dos dados capturados, os dois modelos podem ser comparados na inspeção. Durante todo o processo, deve-se definir qual é a tolerância aceitável (no caso fica representado na caixa verde). Nesta comparação pode-se verificar qual é o erro dimensional do modelo (Figura 3).

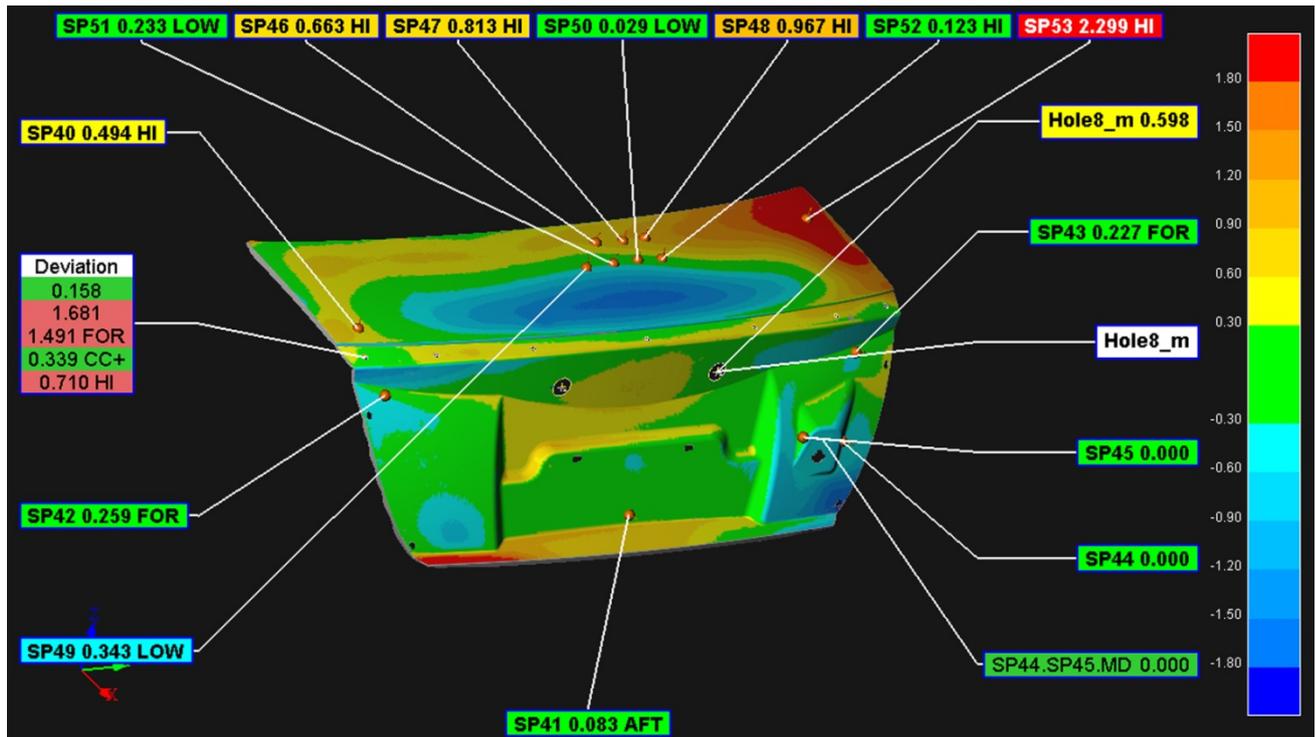


Figura 3. Mapa de erros mostra a diferença entre digitalização e CAD padrão segundo Hexagon.<sup>(8)</sup>

### 3.5 Recomendações

Segundo Varady, Martin e Coxt<sup>(10)</sup> e Ulbrich,<sup>(11)</sup> existem vários tipos de problemas operacionais na digitalização relativos à especificação dos dados. Os principais são: calibração, precisão, acessibilidade, oclusão, fixação, vistas múltiplas, ruídos, falhas ou dados incorretos, distribuição estatística do modelo e superfície de acabamento. Apresenta-se abaixo cada um deles em detalhes:

#### 3.5.1 Calibração

É uma parte essencial para a configuração e operação de um sistema de medidas. Erros sistemáticos dos sensores podem ocorrer devido a distorções nas lentes, desalinhamento eletrônico nas câmeras e situações similares. Todo sensor deve ser calibrado para determinados parâmetros de precisão com pontos da câmera e orientações, e para modelar e conceder os dados dentro dos limites de erros sistemáticos possíveis. Muitos artigos discutem a precisão do alcance dos vários tipos de digitalizadores, mas todos os métodos de captura de pontos requisitam a calibração do equipamento. Os digitalizadores ópticos típicos dependem da extensão (largura) da resolução do sistema de vídeo em uso. As distâncias a serem medidas e as partes móveis do equipamento contribuem para o acúmulo de erros.

#### 3.5.2 Acessibilidade

É uma limitação operacional da digitalização que não é facilmente alcançada devido tanto a configuração quanto à topologia do modelo. Usualmente requer diferentes vistas, mas pode haver algumas regiões onde é impossível garantir a digitalização em certos métodos. Um típico exemplo é dentro de furos, onde é impossível acessar sua região interna.



### 3.5.3 Oclusão

É o bloqueio da digitalização por sombra ou obstrução. Este é primariamente um problema que ocorre com digitalizadores ópticos. Contudo, digitalizadores acústicos ou magnéticos também podem apresentar este problema. Mecanismos de digitalização múltiplas não costumam ter este problema.

### 3.5.4 Fixação

A geometria dos dispositivos de fixação também passa a fazer parte do modelo. A eliminação destas áreas é difícil e freqüentemente requer digitalizações múltiplas. As digitalizações múltiplas introduzem erros no processo porque tem problemas com o registro de dados (ver mais detalhes a frente).

### 3.5.5 Ruídos, falhas ou dados incorretos

A eliminação de ruídos na amostragem de dados é uma questão difícil. Os ruídos podem ser introduzidos por diversos motivos, vibrações fortes, reflexões etc. Existem diversos tipos de filtros que podem ser usados nestas situações. Uma importante questão é quando eliminar o ruído, antes, durante ou depois do modelo ser construído. Existem momentos nos quais o ruído não deve ser eliminado por completo. Filtrar ruídos contudo, é um passo inevitável na ER, mas note que, isso sempre destrói os cantos-vivos do modelo. Para filtrar ruídos usa-se a suavização e os cantos desaparecem quando suavizados. Em alguns casos isto é desejável, mas em outros, isto pode trazer grandes problemas.

### 3.5.6 Restaurações

Um problema semelhante ocorre na restauração de dados perdidos. Isto é em parte necessário quando ocorrerem problemas de inacessibilidade ou oclusões (omissões). Mais que isso, por causa da natureza dos sistemas ópticos, os dados próximos ao contorno são justamente ilusórios. Finalmente existem situações onde apenas partes de uma certa superfície podem ser mensuradas, existem regiões que foram perdidas ou obstruídas por outros elementos, mas elas são necessárias para reconstruir a superfície toda tendo apenas as partes visíveis. Outras maneiras de se restaurar os dados perdidos podem ser por extensão de superfícies, intersecção e preenchimento de furos.

### 3.5.7 Distribuição estatística

Lida-se com o fato de que qualquer parte que é digitalizada representa apenas uma amostragem da população. Quando os métodos de Engenharia Reversa são utilizados para reproduzir uma forma, a tolerância da distribuição da parte digitalizada deve ser considerada. Isto dá razão para que várias partes sejam digitalizadas e um resultado médio seja escolhido. Contudo, isto se torna impraticável, pois muitas vezes só existe uma única peça.

### 3.5.8 Superfície de acabamento

O tipo de superfície do modelo também é uma questão importante. Maciez e determinadas pinturas podem afetar dramaticamente o processo de captura. Métodos ópticos ou por toque irão produzir mais ruídos (falhas) em uma superfície grosseira do que em uma lisa. A reflexão do material também pode afetar nos métodos ópticos. Quando se digitaliza uma face humana, falhas são introduzidas quando a luz reflete nos olhos. O cabelo é um exemplo de superfície grosseira e apresenta dificuldades para a digitalização.



### 3.6 Protótipos Visuais como Complemento da Inspeção

Segundo Ulbrich<sup>(12)</sup> e Ulbrich e Fagali,<sup>(13)</sup> em alguns casos o relatório de inspeção, pode ser complementado com o uso de protótipos visuais (Figura 4). A comparação apresentada pelo mapa de cores pode ser transformada em um modelo virtual (usualmente no formato VRML) e impresso em um equipamento de prototipagem rápida por cores. Neste processo o protótipo é criado camada por camada pela adição de material. As cores são conferidas ao modelo por um sistema de impressão embutido no sistema que trabalha com composição RGB e cabeçotes de impressora convencionais. Uma camada de resina é aplicada ao modelo na etapa de pós-processamento para aferir um melhor acabamento ao mesmo.

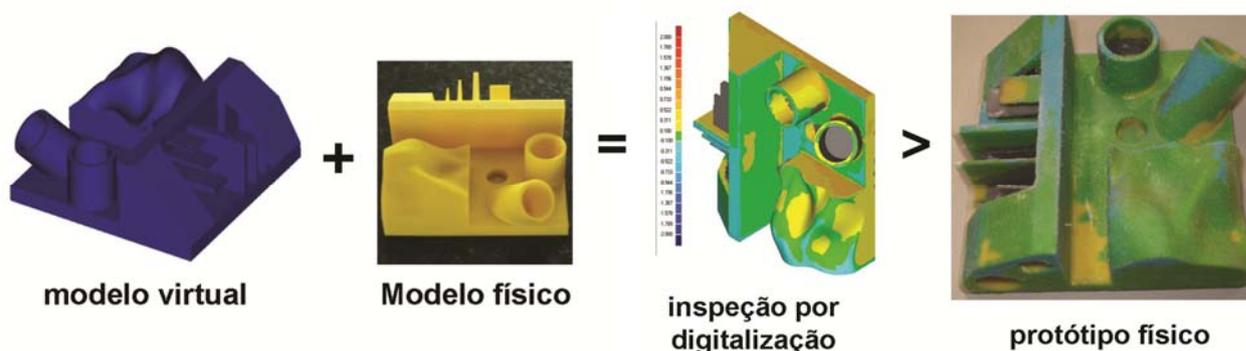


Figura 4. Sugestão de protótipo físico para complementar inspeção por digitalização.

## 4 CONCLUSÃO

Este trabalho buscou abordar as diferentes etapas que sucedem a inspeção de moldes por digitalização. A metodologia apresentada propõe quatro etapas de trabalho: a escolha do modelo CAD que será a referência, a digitalização, o alinhamento entre digitalização e modelo-referência e a comparação entre eles. Algumas recomendações foram apresentadas com relação às principais dificuldades do processo. Uma sugestão de etapa futura é a apresentação de protótipos coloridos como complementação aos relatórios tridimensionais. A inspeção por digitalização foi apresentada neste trabalho como uma solução tecnológica para verificar a precisão dimensional de moldes assegurando a qualidade e a agilidade deste processo.

## REFERÊNCIAS

- 1 Chen Dong-Fan; Fan ming-Lun. Reconstruction Technique in Reverse Engineering. **Proceedings...** Proceedings of The IEEE International Conference on Industrial Technology. 1996, p.37-41.
- 2 CHAMP, Peter. Reverse Engineering in Industrial Application using Laser Stripe Triangulation. 3D Imaging and Analysis of Depth/Range Images. **IEE Colloquium on**. Mar, 1994, p. 1-4.
- 3 BOEHLER, W.; HEINZ, G.; MARBZ, A. The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording. CIPA Working Group VI, 2001, 8 p.
- 4 DASCHBACH, Abella; McNichols. Reverse Engineering: A Tool for process planning. **17<sup>th</sup> Internacional Conference on Computers and Industrial Engineering**. Elsevier Science Ltd. Vol. 29, No. 1-4, pp. 637-640. Setembro 1995.
- 5 VINARUB, Edmond; KAPPOR, Naval. Reverse Engineering "A New Definition for the Nineties". Aerospace and Electronics Conference. NAECON 1992. **Proceedings of the IEEE 1992 National**. Vol. 3, pp. 1213-1219. Maio 1992.



- 6 SPATIUM, disponível em <http://www.spatium3d.com>, acesso em 20 de maio de 2009.
- 7 GOM, disponível em <http://www.gom.com>, acesso em 02 de abril de 2005.
- 8 HEXAGON, disponível em <http://www.hexagonmetrology.com.br>, acesso em 29 de abril de 2011.
- 9 DELCAM, disponível em <http://www.delcam.com>, acesso em 29 de abril de 2011.
- 10 VÁRADY, Tamás; MARTIN Ralph R.; COXT Jordan. Reverse Engineering of geometric models – an introduction. **Computer-Aided Design. Elsevier Science Ltd.** Vol. 29, No. 4, pp. 255-268. Abril 1997.
- 11 ULBRICH, C.B.L. Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP, Universidade Estadual de Campinas, área de Processos de Fabricação, intitulada **Engenharia Reversa e Prototipagem Rápida – Estudo de Casos**, defendida e aprovada em 20 de outubro de 2003.
- 12 ULBRICH, C.B.L. Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP, Universidade Estadual de Campinas, área de Mecânica dos Sólidos e Projetos, intitulada **Inspeção por digitalização em aplicações de prototipagem rápida na medicina**, defendida e aprovada em 25 de julho de 2007.
- 13 ULBRICH, C.B.L.; FAGALI, A.S. “Engenharia Integrada por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC”. Editora Artliber. 336p. 2009.