



Impresión de modelos 3D para fracturas de radio distal: un estudio piloto en el Instituto Nacional de Rehabilitación

Resumen

ANTECEDENTES: a pesar de sus múltiples beneficios, en la planeación preoperatoria de las fracturas, las impresiones 3D no se han implementado de manera rutinaria debido a las dificultades para su acceso.

OBJETIVO: describir las distintas opciones que hoy día tiene la impresión 3D y reportar la experiencia con modelos 3D en fracturas de radio distal que requirieron manejo quirúrgico.

MATERIALES Y MÉTODOS: estudio piloto efectuado en pacientes con diagnóstico de fractura de radio distal y necesidad de tratamiento quirúrgico. Antes de la intervención quirúrgica los pacientes se evaluaron con: radiografías, tomografía con reconstrucción 3D y estereolitografía. La edición de imágenes TAC se efectuó con el programa 3D SLICER® para su impresión en material termoplástico y, finalmente, se aplicó un cuestionario de satisfacción a médicos y pacientes.

RESULTADOS: se estudiaron 10 pacientes con diagnóstico de fractura de radio distal y necesidad de tratamiento quirúrgico. Antes de la operación se confeccionaron los modelos 3D de las fracturas de radio distal. Todos los pacientes entendieron de manera clara la gravedad de su padecimiento. Los médicos refirieron una mejoría de 42% en la clasificación de las fracturas, 90% refirió a la impresión 3D como una herramienta preoperatoria útil.

CONCLUSIONES: las impresiones 3D prometen ser una herramienta no solo para una mejor comprensión y clasificación de las fracturas de radio distal, sino también para un mejor entendimiento por parte de nuestros pacientes.

PALABRAS CLAVE: impresión 3D, estereolitografía, fracturas radio distal.

García-Valadez LR,¹ Espinoza-Gutiérrez A,² Rivas-Montero JA,³ Hernández-Méndez-Villamil E,³ Santiago-García A,⁴ Banegas-Ruiz R,⁵ César-Juárez AA,⁶ Palmieri-Bouchan RB⁷

¹ M.M.C., adscrito al departamento de Ortopedia, Hospital Central Militar, Ciudad de México.

² M.C., jefe del servicio de Cirugía de mano y microcirugía, Instituto Nacional de Rehabilitación, Ciudad de México.

³ M.C., adscrito al servicio de Cirugía de mano y microcirugía, Instituto Nacional de Rehabilitación, Ciudad de México.

⁴ Especialista en realidad virtual y realidad aumentada.

⁵ M.C., residente del curso de alta especialidad en Cirugía de mano, Instituto Nacional de Rehabilitación, Ciudad de México.

⁶ M.C., residente de segundo año de la especialidad de Traumatología y Ortopedia, Instituto Nacional de Rehabilitación, Ciudad de México.

⁷ M.M.C., residente de cuarto año de la especialidad de Traumatología y Ortopedia, Escuela Militar de Graduados de Sanidad, Hospital Central Militar, Ciudad de México.

3D radial fracture printing; a pilot study in the Instituto Nacional de Rehabilitación

Abstract

BACKGROUND: Although it has shown multiple benefits in preoperative fracture planning, 3D impressions have not been routinely implemented due to difficult access.

Recibido: 2 de abril 2017.

Aceptado: 15 de abril de 2017.

Correspondencia

M.M.C., Luis Roberto García Valadez
garciavaladez.luisroberto@gmail.com



MATERIAL AND METHODS: A pilot study was conducted with 10 patients with a diagnosis of distal radius fracture and need for surgical management. Patients were evaluated by radiography, tomography with 3D reconstruction and stereolithography prior to their surgical management. The editing of TAC images was done using the 3D SLICER® program for printing on thermoplastic material and finally a questionnaire of satisfaction was made to doctors and patients.

RESULTS: 3D models of distal radius fractures were performed pre-operatively. 100% of the patients clearly understood the severity of their condition. Doctors, reported a 42% improvement in fracture classification, 90% referred to 3D printing as a useful preoperative tool.

CONCLUSIONS: 3D impressions promise to be a tool not only for a better understanding and classification of distal radius fractures, but also for a better understanding by our patients.

KEY WORDS: 3D impression; Stereolithography; Distal radius fractures

ANTECEDENTES

Desde su invención en 1986 por el ingeniero estadounidense Charles Chuck y su popularización por el ingeniero Bre Pettis,¹ las impresiones 3D han evolucionado de manera sorprendente en diferentes ámbitos del desarrollo humano, y han pasado de ser herramientas caras y futuristas a herramientas de cada vez más fácil acceso con aplicaciones en diferentes áreas, como la industria, que es la que está explotando su mayor potencial.² Sin embargo, el área médica no se ha quedado atrás. Desde que el presidente Barack Obama las presentó al mundo como “el invento del siglo” en su discurso frente al Congreso estadounidense en el año 2013 las aplicaciones médicas han crecido de manera impresionante.³

¿Qué es la impresión 3D?

Desde su introducción en 2015 a la terminología MESH de la Biblioteca Nacional de Medicina de Estados Unidos las publicaciones han crecido de manera exponencial. Es así como en ese sitio la definen como “el proceso de elaboración

o construcción de objetos físicos a partir de modelos tridimensionales digitales mediante la aplicación de capas sucesivas de material de construcción”.⁴

¿Cómo se realiza una impresión 3D?

La elaboración de modelos 3D se realiza a partir de un archivo DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) que es el formato en que se obtienen las imágenes de la tomografía axial computada (TAC) y la resonancia magnética nuclear (RMN), mismo que es convertido a formato STL (Stereolithography), que es el “idioma” que utilizan las impresoras.⁵ A partir de este formato la impresora recibe los comandos para la construcción de modelos estereolitográficos en los diferentes materiales que pueden aplicarse mediante cuatro diferentes técnicas de prototipado rápido:

1. **Extrusión:** utiliza materiales termoplásticos que, como su nombre lo dice, adquieren la forma semilíquida a temperaturas mayores a 120 grados centígrados,

convirtiéndolo en un material fácilmente aplicable mediante un extrusor que va depositando finas capas sobre una plataforma, hasta la construcción del modelo, que se endurece conforme la temperatura del material disminuye. Esta técnica permite utilizar materiales termoplásticos (por ejemplo PLA, ABS, HDPE, metales eutécticos, e inclusive materiales comestibles).⁶

2. **Granular:** mediante esta técnica se deposita una capa de polvo, de unas décimas de milímetro, en una cuba que se calienta a una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del polvo. Seguidamente, un láser CO₂ sintetiza el polvo en los puntos seleccionados (causando que las partículas se fusionen y solidifiquen). Es un proceso continuo de gran flexibilidad que permite la conversión de una gran variedad de materiales.⁷ Por ejemplo, finos de mineral de hierro, polvos recolectados en filtros y otros materiales que contienen hierro, etc.
3. **Laminado:** el laminado en capas se deposita en orden laminar, las capas de material no termo moldeable, como el papel, aluminio o plástico, para la formación del modelo.
4. **Fotopolimerizado:** esta técnica emplea materiales que polimerizan en contacto con la luz ultravioleta y que son llamados por esta característica como “fotopolímeros”, que casi siempre se utilizan en la creación de circuitos eléctricos, prótesis dentales y otras áreas que no requieren gran detalle en su acabado.⁸

¿Qué aplicaciones tienen los modelos 3D en ortopedia?

Hasta la fecha existen 107 artículos indexados en PUBMED que refieren las distintas aplicaciones médicas de las impresiones 3D en ortopedia, que pueden agruparse en tres categorías:

1. Modelos anatómicos

Los modelos 3D pueden utilizarse para fines educativos para pacientes o estudiantes, médicos en adiestramiento y cirujanos.⁹ Estos modelos pueden jugar un papel importante en el proceso del consentimiento en casos quirúrgicos complejos, puesto que dichos modelos asisten al cirujano a demostrar la complejidad de los casos al paciente y familiares. También son excelentes auxiliares en el entendimiento de la naturaleza del procedimiento a médicos en adiestramiento y especialistas.

- a. **Planeación preoperatoria:** cada vez es más frecuente el uso de modelos para la toma de decisiones en casos de fracturas complejas. Los modelos ayudan al cirujano en la planeación preoperatoria a fin de seleccionar el implante ideal, tamaño, posicionamiento sitio específico de la osteotomía y elegir su abordaje, entre otras ventajas.¹⁰
- a. **Educación y adiestramiento:** se ha demostrado su utilidad como auxiliares en la explicación del padecimiento al paciente y con ello conseguir mejor comprensión del mismo, demostrando mayor comprensión y tasas de satisfacción por parte de los pacientes.¹¹

2. Instrumentos quirúrgicos

- a. Instrumentos utilizados en planeación preoperatoria. Se han utilizado placas en fracturas articulares complejas, como acetábulo, osteotomías en displasia del desarrollo de la cadera u osteotomías de alineación, como auxiliares en la planeación y premoldeado de placas, como la selección del implante ideal, así como las dimensiones



de sus componentes, longitud de tornillos, direccionalización y sitios de cuidado en su manejo.¹²

- a. Uso intraoperatorio de instrumentos. La generación de guías de corte en la artroplastia de rodilla, diseñadas de manera más precisa para preservar la mayor cantidad de hueso que dará soporte a los componentes. Zhenzhu describe el uso de guías de policarbonato para la perforación y colocación de tornillos trans-pediculares en cirugía de columna.¹³

3. Implantes y prótesis

La impresión en diversos biomateriales está revolucionando la cirugía ortopédica, no solo en la generación de implantes, sino también en el área de los tejidos blandos.

- a. *Impresión de tejidos y órganos:* la generación de tejidos para cubrir defectos tisulares ha sido siempre un reto en todas las áreas de la cirugía. A partir de la impresión de andamiajes celulares se ha convertido en la más reciente meta. El objetivo aquí es imprimir tejidos y órganos, generados de manera personalizada y que puedan ser implantables en los pacientes.¹⁴
- a. *Generación de implantes:* la impresión de modelos 3D se está aplicando a la generación de implantes personalizados, como: prótesis de rodilla y cadera "hechos a la medida". El modelado rápido de fijadores externos 3D personalizados es ahora una realidad que permite al cirujano tener una experiencia visual y táctil preoperatoria que facilita anticiparse a las dificultades quirúrgicas.¹⁵

¿Qué limitaciones tienen las impresiones 3D?

Si bien es comprensible el entusiasmo por estas nuevas tecnologías, también lo es entender las dificultades que pueden sobrevenir en este camino.

1. *Costos.* A partir de la introducción de las primeras impresoras 3D al mercado de la tecnología en la que los precios oscilaban entre los 13 y 40 mil dólares por equipo,¹⁶ los precios han disminuido de manera considerable dependiendo de las necesidades del equipo. En la actualidad, una impresora 3D apta para la creación de modelos ortopédicos oscila entre los 5 y 50 mil pesos, dependiendo de las necesidades del usuario. Sin embargo, el costo de impresoras de biomateriales para la impresión de implantes, como el titanio, sigue siendo elevado. Los programas para la edición de estos archivos gráficos han evolucionado no solo en su complejidad sino en su accesibilidad; a la fecha se tienen de manera gratuita programas que bien cumplen las necesidades médicas.¹⁷ El costo de los materiales termoplásticos, como ABS y PLA, éste último empleado para este estudio por su fácil acceso y economía han hecho que la impresión de un modelo 3D, de aproximadamente 30 cc, como lo es un radio distal en tamaño 1:1 como el empleado en este estudio, tenga un costo aproximado de 30 pesos.
2. *Aprobación y regulaciones.* La capacidad de adaptación a las nuevas tecnologías requerirá de la aceptación paulatina de médicos y todo el personal de salud implicado en su manejo, así como evolucionaron los estudios como la TAC, RMN hasta su total aceptación y convertirse en estudios necesarios. El tiempo dará la razón al uso del modelado rápido con impresiones 3D en cada una de sus

aplicaciones hasta su total aceptación. La generación de información médica especializada para generación de modelos rápidos para su impresión es una necesidad tangible.¹⁷

MATERIALES Y MÉTODOS

Estudio piloto de pacientes que ingresaron al servicio de mano y microcirugía con el diagnóstico de fractura de radio distal y que requirieron manejo quirúrgico. Todos los pacientes se evaluaron con: radiografías, tomografía con reconstrucción 3D y estereo-litografía antes de la intervención quirúrgica. Se realizó la conversión de archivos DICOM a STL mediante el programa 3D SLICER para su impresión en material termoplástico tipo PLA. Posteriormente se aplicó un cuestionario de satisfacción a médicos y pacientes en relación con el uso de impresiones 3D y se analizaron los resultados.

Descripción de la técnica de impresión 3D con 3D Slicer®

Se consideró a todos los pacientes que ingresaban al servicio de mano y microcirugía del Instituto Nacional de Rehabilitación en un periodo de tres meses (julio a septiembre de 2016) y que ingresaron con fracturas de radio distal que requirieron tratamiento quirúrgico, según los criterios radiográficos. Luego de hospitalizarlos se les tomó una TAC con reconstrucción tridimensional y se obtuvo el archivo DICOM de la fractura. Enseguida de contar con este archivo se procede a realizar el modelado rápido de la fractura mediante el programa 3D SLICER® con los siguientes pasos:

1. *Carga del archivo.* El archivo DICOM se carga en el programa 3D SLICER® mediante el método de arrastre o barra de herramientas en el submenú cargar (*load*). Se obtienen las imágenes multiplanares en

los ejes axial, sagital y coronal, y se activa la previsualización 3D.

2. *Representación de volumen* (volume rendering). Se selecciona el tejido óseo deseado y se aísla del resto de las estructuras no deseadas, mediante la herramienta de corte (*scissors tool*), realizando este procedimiento en los tres planos de la tomografía.
3. *Edición de la imagen.* Cuando se tiene el modelo de la representación de volumen (*volume rendering model*) se obtiene el modelo de superficialización (*surface rendering model*) y se exporta a un archivo en formato STL.
4. *Guardar el modelo.* Se guardan los cambios efectuados al modelo utilizando la extensión STL, que es un formato reconocible por cualquier impresora 3D para su construcción en los diferentes materiales termoplásticos existentes.

El procesamiento de estas imágenes requiere un equipo con memoria RAM mayor a los 4 gigabytes para la correcta edición de los archivos.

La secuencia del empleo transoperatorio de impresiones 3D para el manejo de fracturas de radio distal cuenta con cuatro pasos básicos:

1. Estudio tomográfico con reconstrucción tridimensional en archivo DICOM. **Figura 1**
2. Impresión de modelo 3D y su empleo transquirúrgico para la medición de la longitud de los pernos en placa de ángulo variable. **Figura 2**
3. Verificación transoperatoria de las características de la fractura utilizando el modelo 3D. **Figura 3**



Figura 1. Tomografía 3D de radio distal.

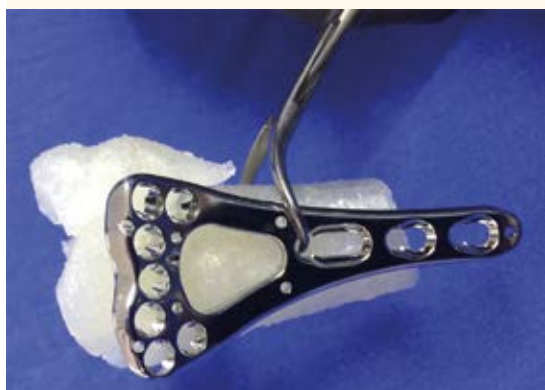


Figura 2. Empleo transquirúrgico del modelo 3D para medición de los implantes ortopédicos.

4. Comprobación radiológica posquirúrgica de la colocación de los implantes ortopédicos.
Figuras 4a, 4b



Figura 3. Verificación de la fractura con modelo 3D.

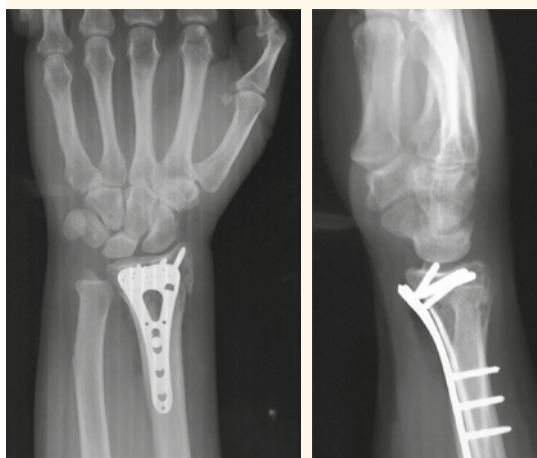


Figura 4. Comprobación radiológica postoperatoria.

RESULTADOS

Se realizaron exitosamente los modelos 3D de las fracturas de radio distal de manera preoperatoria de los 10 pacientes incluidos en este estudio, mismos que recibieron el “Cuestionario de satisfacción a pacientes”. **Cuadro 1**

La distribución por género fue de 70% para el masculino y 30% para el femenino. El dominio derecho fue de 70% y la edad de los mismos da un promedio de 56 años con edades entre 26 y

Cuadro 1. Cuestionario de satisfacción de uso de impresiones 3D a pacientes.

	Opciones	Resultados
1. ¿Habías visto anteriormente un modelo 3D impreso de alguna parte de tu cuerpo?	S/N	SI-0% NO-100%
2. ¿Qué tan bien pudiste entender la gravedad de tu fractura después de haber sido explicada por tu médico utilizando los rayos X y la tomografía?	1 a 10	5.6
3. ¿Qué tan bien pudiste entender la gravedad de tu fractura después de verla impresa en modelo 3D?	1 a 10	9.8
4. ¿Qué tan importante fue para ti observar una impresión 3D de tu fractura previo a tu cirugía?	1 a 10	9.0
5. ¿Recomendarías a otros pacientes que su cirugía fuera planeada mediante un modelo 3D?	1 a 10	9.8

78 años. La elaboración del modelo 3D tomó, en promedio, 1 día a partir de la tomografía axial computada con reconstrucción 3D.

La totalidad de los pacientes tuvo la oportunidad de observar una impresión 3D de alguna parte de su cuerpo por primera vez en su vida. Entendieron de manera clara la gravedad de su padecimiento y obtuvieron 9.6 /10 en la escala cuantitativa propuesta por el investigador principal para este estudio, con mejoría en el entendimiento de 42% en comparación con la explicación de su padecimiento con los medios convencionales (radiografías y tomografía).

Satisfacción con el método

Los médicos refirieron una mejoría de 42% en la clasificación de las fracturas; 90% refirió a la impresión 3D como una herramienta preoperatoria útil. **Cuadro 2**

A pesar de la disminución del tiempo quirúrgico con las impresiones hubo opiniones positivas de su empleo en la planeación preoperatoria, con menor tiempo quirúrgico, mejor planeación preoperatoria; el estudio se consideró trascendente para la determinación de la vía de abordaje. Se confirmó la hipótesis en que las impresiones 3D se considerarían una herramienta positiva en todos los aspectos del paciente y médicos que las utilizaron.

Sin embargo, al estar en contacto con los médicos nos dejaron saber que, a pesar de las múltiples ventajas de las impresiones, la falta de disponibilidad para realizar sus propias impresiones, además del tiempo requerido para la impresión de los modelos por el investigador principal (en promedio 2 horas), el costo del equipo y su portabilidad, fueron las principales limitantes que se observaron en este estudio.

CONCLUSIONES

Las impresiones 3D prometen ser un método innovador para el tratamiento de las fracturas de radio distal para médicos y pacientes. A pesar de que esta tecnología aún no es de dominio público entre los cirujanos de mano, existe gran entusiasmo para su implementación, al grado que el costo parece no ser impedimento para su uso.

Los pacientes se mostraron entusiastas con el uso de las impresiones para el tratamiento de su fractura, a pesar de no haber tenido contacto previo con este tipo de tecnología. La comprensión de su padecimiento mostró una mejoría en la explicación médica tradicional que emplea radiografías y tomografía. La confianza en el cirujano también se vio favorecida con las impresiones, a pesar de no existir una escala para su medición, al grado de sentirse en condiciones de recomendar a otras personas las

**Cuadro 2.** Aplicación de cuestionario de satisfacción de uso de impresiones 3D a médicos y pacientes

Cuestionario de satisfacción de impresiones 3D para médicos		
	Escala	Promedio
1. ¿Qué tan fácil fue para usted clasificar la fractura de radio distal utilizando solamente las radiografías y la tomografía?	1 a 10	5.4
2. ¿Qué tan fácil fue para usted clasificar la fractura de radio distal utilizando la impresión 3D además de las radiografías y la tomografía?	1 a 10	9.6
3. ¿El contar con una impresión 3D te ayudó en la planeación preoperatoria?	S/N	S- 90% N-10%
4. ¿El modelo 3D de la fractura de radio distal te ayudó en la elección del implante?	S/N	S- 90% N-10%
5. ¿Utilizarías un modelo 3D para la planeación preoperatoria de cualquier otra fractura y lo recomendarías a otros colegas?	S/N	S- 90% N-10%

impresiones para el tratamiento de este tipo de padecimientos.

Hace falta información que popularice el uso de esta tecnología y muestre que requiere pocos conocimientos de computación, a fin de validar su uso con estudios multicéntricos en diferentes áreas de la ortopedia de nuestro país.

REFERENCIAS

- Oppenheimer A. ¡Crear o morir! La esperanza de Latinoamérica y las cinco claves de la innovación. Ciudad de México: Debate, 2014.
- Brown GA, Firozbakhsh K, DeCoster TA, Reyna JR Jr, Moineim M. Rapid prototyping: the future of trauma surgery?. *J Bone Joint Surg. Am.* 2003; 85 (4): 49–55.
- Rengier F, Mehndiratta A, von Tengg-Kobligh H, Zechmann CM, Unterhinninghofen R, Kauczor HU, Giesel FL. 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2010; 5(4): 335–341.
- Bizzotto N, Sandri A, Regis D, Romani D, Tami I, Magnan B. Three-dimensional printing of bone fractures: A new tangible realistic way for preoperative planning and education. *Surg Innov* 2015; 22(5): 548–551.
- Fuller SM, Butz DR, Vevang CB, Makhlof MV. Application of 3-dimensional printing in hand surgery for production of a novel bone reduction clamp. *J Hand Surg Am.* 2014; 39: 1840–1845.
- Fedorovich NE, Alblas J, Hennink WE, Oner FC, Dhert WJ. Organ printing: the future of bone regeneration? *Trends Biotechnol.* 2011; 29: 601–606.
- Wu XB, Wang JQ, Zhao CP, Sun X, Shi Y, Zhang ZA et al. Printed three-dimensional anatomic templates for virtual preoperative planning before reconstruction of old pelvic injuries: Initial results, *Chin Med J*; 2015; 128(4): 477–482.
- Liu A, Xue GH, Sun M, Shao HF, Ma CY, Gao Q, et al. 3D printing surgical implants at the clinic: A experimental study on anterior cruciate ligament reconstruction. *Sci Rep.* 2016; 6: 21704
- Wu XB, Wang JQ, Zhao CP, Sun X, Shi Y, Zhang ZA et al. Printed three-dimensional anatomic templates for virtual preoperative planning before reconstruction of old pelvic injuries: Initial results. *Chin Med J.* 2015; 128(4): 477–482.
- Li Z, Li Z, Xu R, Li M, Li J, Liu Y et al. Three-dimensional printing models improve understanding of spinal fracture--A randomized controlled study in China. *Sci Rep*, 2015; 5:11570.
- Esses SJ, Berman P, Bloom AI, Sosna J. Clinical applications of physical 3D models derived from MDCT data and created by rapid prototyping. *AJR Am J Roentgenol.* 2011; 196(6):W683–688.
- Malik HH, Darwood AR, Shaunak S, Kulatilake P, El-Hilly AA, Mulki O et al. Three dimensional printing in surgery: a review of current surgical applications. *J Surg Res.* 2015; 199(2): 512–522.
- Fuller SM, Butz DR, Vegang CB, Makhlof MV. Application of 3-dimensional printing in hand surgery for production of a novel bone reduction clamp. *J Hand Surg Am.* 2014; 39(9):1840–1845.
- Jeong HS, Park KJ, Kil KM, Chong S, Eun HJ, Lee TS et al. Minimally invasive plate osteosynthesis using 3D printing for shaft fractures of clavicles: technical note. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2014; 134(11): 1551–1555.
- Qiao F, Li D, Jin Z, Gao Y, Zhou T, He J et al. Application of 3D customized external fixator for fracture reduction. *Injury.* 2015; 46(6): 1150–1155.
- Berman B. 3D printing, the new industrial revolution. *Bus Horiz.* 2012:155–162.
- Hurson C, Tansey A, O'Donnchadha B, Nicholson P, Rice J, McElwain J. Rapid prototyping in the assessment, classification and preoperative planning of acetabular fractures. *Injury* 2007; 38(10): 1158–1162.