

El evento de Azuara Los claros efectos de choque en las rocas prueban de modo inequívoco el impacto

Qué son las ondas y el metamorfismo de choque, y porqué son tan importantes para el proceso de impacto?



Un avión rompe la barrera del sonido. Foto: Boeing.

Las ondas de choque son bien conocidas por el estallido que se escucha y el traqueteo consecuente de las ventanas cuando un avión rompe la barrera del sonido. En ese instante, la velocidad del avión excede la del sonido (~ 330 m/s) y produce la deformación supersónica del aire. Con posterioridad, esta deformación se propaga como una onda o frente de choque.

Esto es un principio general de la física: cuando la deformación de un material se produce a una velocidad mayor que la del sonido por ese material, se genera una onda choque que penetra el material a velocidades supersónicas. La velocidad del sonido en materiales sólidos se halla comprendida entre 100m/s y alrededor de 1000 m/s. En rocas duras, la velocidad del sonido oscila entre aproximadamente 1 km/s y 6 km/s. De este modo, si una roca es golpeada a gran velocidad, se produce una deformación por choque que se propaga como un frente a través de la roca. En el frente de choque se producen presiones extremas y, después de su paso, una parte de la energía de deformación subsiste en la roca como energía térmica, dando lugar a un súbito y gran incremento de las temperaturas.

Los grandes proyectiles cósmicos que colisionan con la superficie terrestre presentan velocidades entre aproximadamente 10 y 70 Km/s. Por tanto, en la zona de contacto entre ambos (ver l estado de Contacto y Compresión, Poster nº 2) las ondas de choque penetran tanto en el objetivo como en el impactor. En los primeros instantes, las presiones en el frente de choque pueden alcanzar valores de algunos megabars (varios millones de atmósferas), y las temperaturas tras el paso del frente pueden oscilar alrededor de los 10000 grados. Como resultado, el cuerpo impactante se vaporiza totalmente, al igual que un volumen similar del objetivo sito en torno al punto de impacto. A medida que el frente de choque se va propagando a través de los materiales del objetivo, la energía irá decreciendo con el descenso de la presión y de la temperatura. En la zona cercana a la de vaporización, las temperaturas todavía serán capaces de dar lugar a la fusión de las rocas, pero en las siguientes zonas las rocas serán afectadas mecánicamente tan sólo por el ascenso y posterior decrecimiento de las presiones de choque.

Tanto las grandes presiones como temperaturas inducidas por las ondas de choque dan lugar a cambios característicos en las rocas y minerales. Estos cambios, típicos de la deformación por choque, se agrupan bajo el término de **metamorfismo de impacto** (o efectos de choque). De acuerdo con los conocimientos actuales, algunos de estos cambios no ocurren en los procesos geológicos endógenicos "normales", o lo que es lo mismo: no pueden observarse en rocas que se hayan originado a partir de procesos terrestres internos. Por tanto, los efectos de choque específicos presentes en las rocas se consideran como una prueba de impacto meteorítico y sirven para caracterizar cráteres de impacto o estructuras antiguas de impacto.

La importancia de las ondas de choque reflejadas (ondas de rarefacción)

Además de la producción de la mayoría de los efectos de choque microscópicos, las ondas de choque durante el proceso de impacto también juegan un importante papel a una escala mayor. Si estas ondas afectan a las superficies libres o a límites geológicos, pueden ser reflejadas como las ondas de sonido normales (elásticas, sísmicas). En el caso de una superficie libre (interfase aire-roca) o en un límite geológico donde la velocidad del sonido y/o la densidad de la roca decrecen, la onda de choque compresional se reflejara como una onda distensiva de rarefacción. Muchos de los cambios geológicos, movimientos y destrucciones de rocas en las estructuras de impacto son debidos a la acción combinada de las ondas de choque compresivas y las ondas de rarefacción distensivas.

Este hecho es fácilmente comprensible ya que la resistencia a la distensión de las rocas es generalmente menor que a la compresión, lo que conlleva que la deformación distensiva destruya las rocas de manera más fácil que la compresiva. Lo citado es también importante cuando compramos las deformaciones geológicas (tectónicas) "normales" con las deformaciones por impacto. Las destrucciones distensivas intensas y extensas en las rocas son raramente observadas en procesos tectónicos, mientras que son comunes en los de impacto. Esto es especialmente válido para el evento de Azuara.

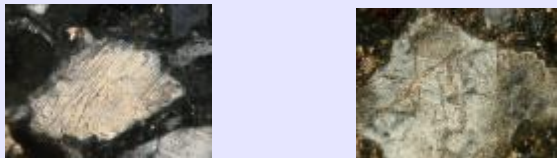
Efectos de choque en el cuarzo y otros minerales



Planos cristalográficos en un cristal de cuarzo

Estructuras de deformación planar (PDFs)

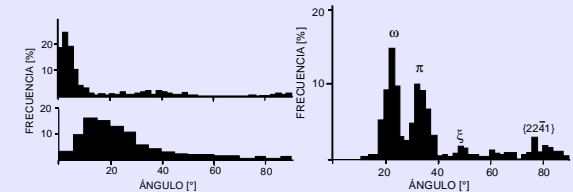
Los rasgos de deformación planar en los minerales son un típico indicador de efectos de choque, siendo especialmente significativos en el cuarzo. Consisten en planos paralelos, de espaciado (entre 2-10 µm) y anchura (< 2-3 µm) pequeños, que se presentan siguiendo la orientación de los planos cristalográficos del cristal afectado. Al cortar el cristal en forma de una sección delgada, las PDFs son visibles como uno o varios conjuntos de líneas estrechamente paralelas que, bajo la luz polarizada, son ópticamente isotropas.



Estructuras de deformación planar (PDFs) en un cuarzo. Estructura de impacto de Ries (Alemania).

Estructuras de deformación planar (PDFs) en un cuarzo. Estructura de impacto de Rochechouart (Francia).

Mediante un microscopio especial, se pueden analizar las PDFs en lámina delgada y medir la orientación cristalográfica de los planos de las mismas (ω , π , ξ , etc). Una medida usual es el ángulo entre los planos de las PDF y el plano basal del cristal.



Histograma de orientaciones de lamelas en cuarcitas deformadas en experimentos de alta presión (445 conjuntos; arriba) y en rocas deformadas tectónicamente (3835 conjuntos; abajo). Según French (1999).

Histograma de orientación de PDFs producidas por impacto. 351 conjuntos de PDFs provenientes de 10 estructuras de impacto. Según French (1999).

Lamelas de deformación (en la mayor parte de casos un único conjunto), se pueden presentar en rocas deformadas por tectónica. Existen, no obstante, diferencias básicas entre las rocas deformadas tectónicamente y las afectadas por impacto; la observación de conjuntos de PDFs ω y π se considera como una prueba clara de deformación por impacto en una roca. El hallazgo de dichas PDFs en rocas procedentes del área de Azuara fue una de las claves para el establecimiento de Azuara como estructura de impacto.

Los claros efectos de choque en las rocas prueban de un modo inequívoco la naturaleza de impacto de la estructura de Azuara.

Hace unos 20 años, geólogos y mineralogistas de la Universidad de Würzburg descubrieron por primera vez efectos de choque en rocas de la estructura de Azuara. Cerca del pueblo de Sta. Cruz de Nogueras, encuentran rocas intensamente deformadas (brechas) que exhibían no tan sólo rasgos de deformación planar (PDFs) y otros efectos típicos del metamorfismo de choque, sino que también contenían vidrio procedente de la fusión de la roca del objetivo.



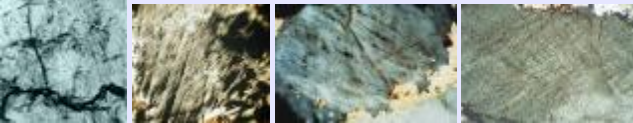
Izquierda: sección de una brecha intensamente chocada procedente de un afloramiento cercano a Sta. Cruz de Nogueras. En esta brecha, fueron halladas por primera vez PDFs producidas por choque. Derecha: PDFs en granos de cuarzo provenientes de la brecha de Sta. Cruz de Nogueras.

Con posterioridad, fueron también halladas PDFs en cuarcitas procedentes del eyecta de la Fm Pelarda, depósito extenso y de cierto espesor localizado entre Fontfria y Oialla. En los últimos 20 años, 3 análisis independientes han sido elaborados por científicos de las universidades de Würzburg, de la Complutense de Madrid y del servicio geológico de Canadá, sobre muestras provenientes de Sta Cruz de Nogueras y de la Formación Pelarda. El más extenso y detallado fue el realizado por la Dra. Ann Thierriault, de Canadá, colaboradora del afamado investigador R.A.F. Grieve. En él llegó a las mismas conclusiones que los realizados por los investigadores de Würzburg y Madrid: en las muestras analizadas había claras estructuras de deformación planar (PDFs), cuyas características eran similares a las que se aceptan por los investigadores en impactos como prueba de génesis por impacto (p.e. Stöffler & Langenhorst, 1994).

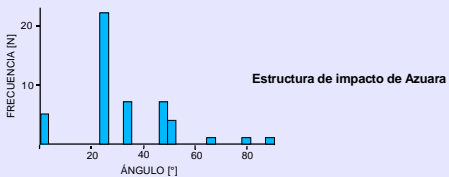


Izquierda: rocas de la denominada Formación Pelarda, localizadas entre Fontfria y Oialla. La Formación Pelarda que se extiende sobre más de 20 Km² y presenta un espesor variable (en algunos casos superior a los 100m), debe ser considerada como formada por la excavación y eyección durante el evento de Azuara. Derecha: dos conjuntos de PDFs en cuarcitas procedentes de la Fm Pelarda visto bajo el microscopio electrónico de barrido. La presencia de abundantes PDFs en las rocas de la Fm Pelarda constituye una fuerte clave para su interpretación como eyecta de impacto. A pesar de la presencia de metamorfismo de choque y de deformaciones macroscópicas en sus clastos, de su situación topográfica y de sobreyacar de modo cooradante sobre los materiales del eoceno superior-Oligoceno inferior de la zona de Salcedillo, los geólogos "no impactistas" la describen como un depósito de derrubios (un "raña") de edad cuaternaria.

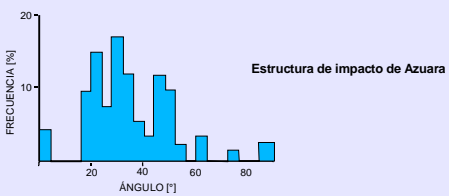
Mientras tanto, también se ha demostrado la existencia de PDFs en rocas de Sierra de Azuara expuestas cerca de Almonacid de la Cuba, Fuendetodos, Jaulín, Muriessa, así como en rocas de la Perra de Herrera. Las mismas estructuras son asimismo abundantes en la cuenca de impacto de Rubielos de la Cérida.



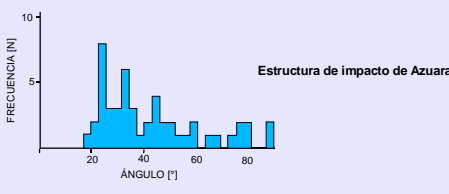
Varias estructuras de deformación planar (PDFs) presentes en cuarzos provenientes de rocas que afloran en la cuenca de impacto de Rubielos de la Cérida.



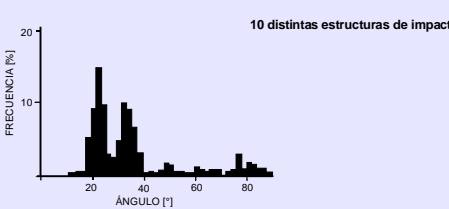
Rasgos de deformación planar en cristales de cuarzo de rocas provenientes de la estructura de impacto de Azuara. Análisis realizado por la Dra. Ann Thierriault, del Geological Survey of Canada. 48 conjuntos.



Rasgos de deformación planar en cristales de cuarzo provenientes de rocas de la estructura de Azuara. Análisis realizados por el Dr. K. Erntson, de la universidad de Würzburg. 96 conjuntos.



Rasgos de deformación planar en cristales de cuarzo provenientes de rocas de la estructura de Azuara. Análisis efectuados por Eugenio Guerrero Serrano, de la universidad Complutense de Madrid. 90 conjuntos.



Histograma de la orientación de PDFs generadas por impacto. 351 conjuntos de PDFs provenientes de 10 estructuras de impacto. Según French (1999).

Temperaturas extremas, presiones extremas – más efectos de choque procedentes del evento de impacto de Azuara

Las estructuras de deformación planar son buenos indicadores de choque, pero existen otros efectos de metamorfismo de choque en las rocas que requieren mayores presiones de choque. En la zona del evento de impacto de Azuara también podemos hallarlos.

Cristales diapléticos y vidrio diaplético



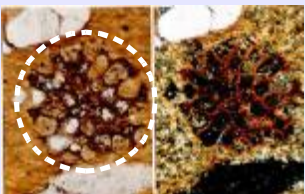
Muriessa - localidad con interesantes rocas de impacto



Foto G. Mayer

Izquierda: En las brechas de impacto cercanas a Muriessa, puede observarse vidrio diaplético (indicador de fuertes efectos de choque Derecha: Un grano de cuarzo observado bajo el microscopio se muestra parcialmente diaplético, como se aprecia en la zona correspondiente a los agujeros negros (cristal diaplético). Dentro de estos agujeros, el cuarzo ha llegado a ser ópticamente isotropo como el vidrio.

Cuando el nivel de choque es muy intenso, la estructura cristalina de minerales como el cuarzo y el feldespatos es dañada parcial o completamente. El cristal pierde sus propiedades ópticas adoptando las propiedades de un vidrio, sin llegar por eso a fundir. Bajo el microscopio de polarización este efecto de choque extremo y el vidrio diaplético resultante pueden ser fácilmente observados. Cabe recordar que diaplético significa simplemente destruido o aplastado.

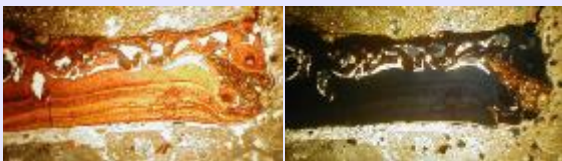


Bajo el microscopio: Un fragmento de anisita (rodeado por un círculo) está formado por granos de cuarzo que se han transformado completamente en vidrio diaplético. La preservación de los bordes de los granos demuestra que han devenido vidrio (vidrio diaplético) por choque pero sin llegar a fundir. El fragmento es observado con un microscopio polarizante, a luz paralela (izquierda) y nicoles cruzados (derecha). Muestra procedente de la brecha intensamente chocada de Sta. Cruz de Nogueras.

Vidrio de fundido y rocas fundidas de impacto

A los niveles más altos de choque, los minerales y las rocas se funden debido a las temperaturas extremas que se producen después del paso de la onda de choque. En este proceso, los minerales y rocas reaccionan de un modo diferente ante el calentamiento por choque. Los minerales silicatados, como el cuarzo, el feldespatos, la mica...etc, así como las rocas formadas básicamente por ellos, se transforman normalmente en vidrio silicatado. Los minerales carbonatados, como la calcita y la dolomita, así como las rocas carbonatadas (calizas y dolomías) compuestas por éstos, reaccionan de un modo diferente. Cuando son calentados por efecto del choque, se produce un fundido carbonatado que difiere del fundido silicatado, aparte de por su composición, por el hecho de que no puede enfriarse dando lugar a un vidrio. En su lugar, el enfriamiento del fundido carbonatado (que suele ser rápido) da lugar a una roca carbonatada de nuevo. Estos relictos de fundido carbonatado al ser observados de manera rutinaria, pueden presentar un aspecto similar al de las rocas carbonatadas "normales". Este hecho posibilita el que sean confundidos por muchos geólogos con costras carbonatadas "normales", rasgos de karst y procesos edáficos. Una inspección geoquímica y petrográfica más detallada, junto con la utilización del microscopio electrónico, permiten la identificación de estos relictos de fundido carbonatado.

En el evento de impacto de Azuara, una gran parte del objetivo estaba compuesta por rocas carbonatadas (calizas, margas y dolomías) del Paleozoico, Triásico, Jurásico, Cretácico y Terciario. Así, mientras los vidrios y rocas de fundido silicatado son raros, los relictos de fundido carbonatado presentes en diversos tipos de rocas de fundido carbonatado son abundantes. No obstante, dada la diversidad de capas sedimentarias del objetivo, podrían haberse formado vidrios y rocas de fundido de impacto completamente desconocidas hasta el presente.



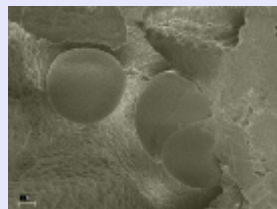
Vidrio producido por choque con una textura de flujo y algunos fragmentos minerales procedente de la estructura de impacto de Azuara (brecha polimictica sita cerca de Sta. Cruz de Nogueras). El vidrio puede observarse al microscopio bajoluz paralela (izquierda) y nicoles cruzados (derecha).



Cerca de Calamocha, entre Navarrete y Barrachina. Una megabrecha y rocas de fundido de impacto.



Vidrio de impacto procedente de una pizarra fundida por el choque.



El mismo vidrio bajo el microscopio electrónico de barrido.

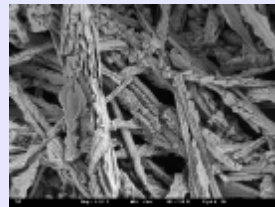
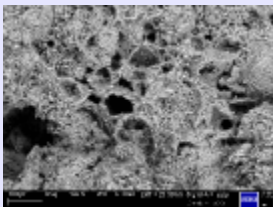
Más rocas peculiares de fundido de impacto provenientes del evento de impacto de Azuara



Izquierda: roca de fundido de carbonato-fosfato (color blanco), procedente de la cuenca de impacto de Rubielos de la Cérida (cerca de Cutanda-Barrachina). Derecha: roca de fundido carbonatado, procedente de la estructura de impacto de Azuara (Jaulín).



Dique de fundido de carbonato cristalizado (a la izquierda) procedente de la cuenca de impacto de Rubielos de la Cérida (Corbalán) y relictos de fundido carbonatado (derecha) procedentes de la cuenca de impacto de Rubielos de la Cérida (cerca de Escorihuela-El Pobo).



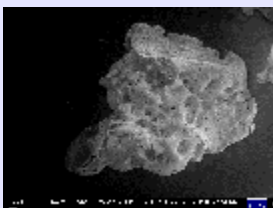
Cristalitos de fundido de carbonato vistos bajo el microscopio electrónico de barrido. Muestra procedente de la cuenca de impacto de Rubielos de la Cérida.



Dique de roca de fundido de carbonato-palimictina tal y como se puede observar en el afloramiento y en detalle. Estructura de impacto de Azuara (Monforte de Moyuela).



Probable roca de fundido de sulfato cálcico (yeso/anhidrita). Derecha: la roca vesicular bajo el microscopio electrónico de barrido. Muestra procedente de la cuenca de impacto de Rubielos de la Cérida (cerca de Cutanda-Barrachina).



Izquierda: Carbón amorfo, probable vidrio de carbón procedente del fundido por choque de carbonos de la Fm. Utrillas. Muestra procedente de la cuenca de impacto de Rubielos de la Cérida (cerca de Cutanda-Barrachina). Derecha: Fluidización enigmática de nódulos de chert presentes en calizas del Jurásico. Muestra, cortesía de Daniel Gorgas, procedente de la estructura de impacto de Azuara (al sur de Fuendetodos).



Vista del extremo sur del levantamiento central de la cadena (hacia Teruel) y del borde sur de la cuenca de impacto de Rubielos de la Cérida (a la izquierda). En esta zona es donde aparece el vidrio de impacto de la derecha.