

LE GOCCE DI RUPERT

di Federico Granata, Gianni Di Paolo, Lisa Pelaccia,
Virginia Josetta D'Alanno, Tommi Cinquepalmi *

Cinque studenti del Liceo Scientifico "Galileo Galilei" di Pescara raccontano una attività sperimentale extracurricolare in cui hanno studiato il comportamento delle gocce di Rupert, un esempio della straordinaria varietà della struttura della materia. Si tratta di una esperienza in cui hanno messo in campo la loro creatività e le loro competenze. Dopo aver approfondito storicamente il tema hanno riprodotto le gocce di Rupert, con il rapido raffreddamento di vetro fuso in acqua e hanno verificata le loro caratteristiche peculiari. Un interessante esempio in cui si coniugano le dimensioni fondamentali del sapere fisico: storica, conoscitiva, sperimentale.

** L'attività, coordinata dall'insegnante di Matematica e Fisica, Giorgio Guidi, è stata presentata alla XVII edizione del Concorso ScienzaFirenze 2020 dal titolo «La materia: le sue forme, le sue strutture, la sua straordinaria varietà», riportando una menzione d'onore*

Nel nostro lavoro abbiamo voluto ricreare le cosiddette «gocce del Principe Rupert». Esse prendono il nome da un principe di Baviera vissuto nel XVII secolo. Sono anche denominate «lacrime Bataviche»; Il nome deriva da *Batavia*, regione dei *Paesi Bassi*. Queste gocce si ottengono da vetro fuso, fatto colare in un recipiente di acqua fredda dove solidifica molto velocemente. Siamo stati attratti dalle proprietà particolarissime delle «gocce», caratterizzate da una estrema resistenza e, al tempo stesso, da una eccezionale fragilità: non importa quanto violentemente si tenti di rompere la testa della goccia, ma questa rimarrà intatta, mentre, appena si sfiorerà la coda, la goccia si frantumerà istantaneamente in mille pezzi

Un po' di storia

L'origine di queste lacrime di vetro è incerta. Esse divennero oggetto dell'interesse dei dotti nel XVII secolo. Secondo alcune testimonianze, erano un prodotto delle normali operazioni di lavorazione del vetro da parte degli artigiani vetrai nella Germania della prima metà del XVII secolo. Dunque, anche se nel XX secolo non era ancora conosciuto il meccanismo alla base della loro formazione e delle loro caratteristiche, esse erano conosciute da secoli. Nel 1640 il principe Rupert di Baviera portò all'attenzione del Re la scoperta di quelle che sono note da allora come le «gocce del principe Rupert».

Le gocce venivano impiegate a corte come scherzo: il Re faceva tenere nel palmo della mano le gocce per la testa, poi rompeva la coda provocando una piccola esplosione che lasciava stupefatta la vittima dello scherzo.

Balthasar de Monconys, consigliere del Re Sole, medico e magistrato francese, riferì nelle sue relazioni di viaggio di aver partecipato ad alcuni esperimenti con queste gocce prima a Parigi e in seguito a Londra dal 1661 al 1665.

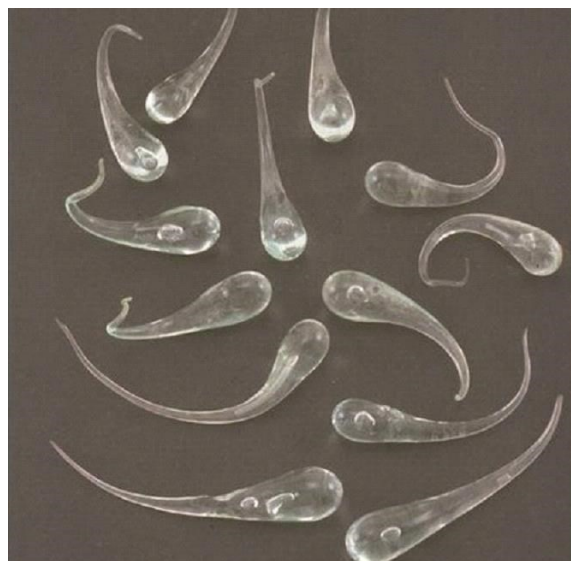


Per John Beckmann, economista, tali gocce provenivano da Stoccolma. Infatti, secondo i suoi resoconti, queste ultime furono portate dall'ambasciatore francese, Chanut, alla corte svedese; allo stesso tempo è però attestato che nel medesimo anno,* 1662, esse siano state viste anche a Leida e ad Amsterdam.

In Inghilterra furono conosciute come «Rupert's drops», dal già citato principe Rupert, nipote di Carlo I e appassionato delle arti chimiche.

In Italia queste lacrime erano conosciute a Roma fin dal 1655 ed erano provenienti dalle Fiandre. I nobili dell'epoca, tra i quali il Granduca di Toscana Ferdinando II, rimasero appassionati dallo spettacolare fenomeno e decisero di incaricare alcuni scienziati di condurre un'indagine scientifica che portasse alla comprensione dell'origine dell'affascinante fenomeno. Purtroppo, gli studi non riuscirono a far luce sulle proprietà delle lacrime di vetro che rimasero ancora per molti anni un mistero.

Tredici delle gocce donate al Granduca sono conservate presso il Gabinetto di Fisica del Museo Urbinato della Scienza e della Tecnica, all'interno di una vetrina situata nel reparto *Fisica atomica e molecolare*



Analogie in natura

Un minerale che deriva da un processo di raffreddamento molto veloce, analogo a quello che permette di ottenere le gocce di Rupert, è l'ossidiana.



Essa è un vetro vulcanico, composto principalmente da biossido di silicio, originato da un rapido processo di solidificazione della lava quando entra in contatto con l'aria o l'acqua.

L'ossidiana come le gocce del principe Rupert resiste a colpi o urti molto forti, ma è superata in una scala di durezza dal diamante, dal topazio e dal corindone.

Il vetro: struttura e caratteristiche

Il vetro, per molte caratteristiche come la durezza, la resistenza a urti e compressioni, la capacità di mantenere la forma ricevuta, deve essere annoverato tra i solidi; tuttavia per altre va considerato fra i liquidi, dei quali, per esempio, possiede la struttura disordinata e l'isotropia. Perciò esso è di solito definito come un liquido a elevata viscosità, cioè un materiale che possiede l'isotropia dei liquidi e la tenacità dei solidi. Il vetro fuso raffreddandosi acquista rigidità, ma non l'ordinamento regolare che caratterizza i cristalli; a differenza di questi, non presenta un punto netto di fusione: riscaldato, passa allo stato fuso, rammollendo gradatamente.

Si conoscono diversi composti che fusi possono dare origine per raffreddamento a sostanze vetrose; fra queste la silice (SiO_2), l'anidride borica (B_2O_3), l'anidride fosforica

(P_2O_5), l'anidride arseniosa (As_2O_3) e alcuni loro sali. Raramente si hanno vetri formati da una sola di tali sostanze (eccetto il caso dei vetri di silice o di quarzo), per lo più i vetri in commercio risultano da una miscela di diversi componenti.

Solidi amorfi e cristallini

Un solido amorfo è un solido che presenta una struttura disordinata in cui cioè non c'è ordine nelle posizioni degli atomi o delle molecole che lo costituiscono. Lo stato amorfo è analogo a quello dei liquidi ed è poco frequente in natura. Il vetro è il più comune materiale amorfo, tanto che tale stato della materia viene talvolta detto «vetroso».

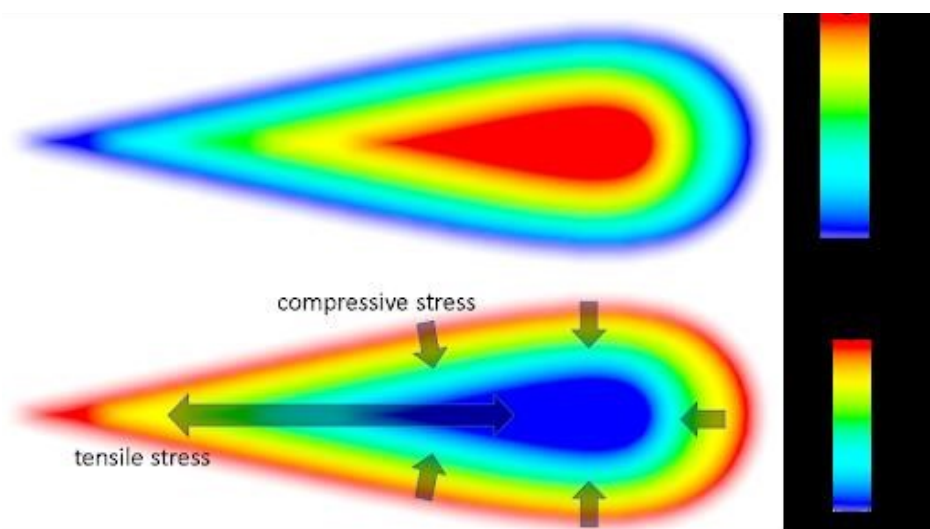
Un solido cristallino è un solido caratterizzato da una distribuzione regolare delle particelle nello spazio. Il modo in cui le particelle facenti parte del solido sono disposte nello spazio, determina la struttura del cristallo. Poiché la distribuzione delle particelle è ordinata, ne consegue che le particelle sono disposte in un reticolo tridimensionale.

L'origine delle caratteristiche delle gocce di Rupert

Le gocce di vetro fuso cadendo nell'acqua si solidificano. Il processo di solidificazione avviene dall'esterno verso l'interno. Lo strato esterno si solidifica per primo facendo comprimere la goccia; man mano che l'interno della goccia si va solidificando gli strati si contraggono verso il nucleo ancora parzialmente fuso, ma essendo attaccati alla parte esterna «tirano» quest'ultima verso l'interno. In tal modo, si viene a generare un'enorme tensione tra i vari strati di vetro. Proprio grazie a questa tensione elevata, le gocce sono in grado di sopportare colpi violenti o forze di compressione fino a 15000 newton.

Normalmente per rompere un oggetto di vetro è necessario provocare delle crepe all'interno della sua struttura, le quali vanno a determinare una reazione a catena che rompe l'intero oggetto. Analogamente, per rompere la goccia è necessario creare una fessura o una deformazione che rompa il sistema di tensione; la tensione interna è talmente elevata da non permettere la formazione delle crepe sulla superficie perché esse si formano parallelamente alla superficie e non entrano nella parte interna. Quando invece viene applicata una forza sulla coda della goccia, ovvero la parte in cui la tensione minore e dunque più fragile, nella goccia si producono delle vibrazioni che si propagano all'interno del vetro, fino a che la goccia si polverizza.

L'illustrazione a destra della figura mostra le distribuzioni della temperatura e della pressione nella goccia durante il raffreddamento: come descritto precedentemente, la parte più esterna a contatto con l'acqua gelata è più fredda rispetto alla parte interna che si sta ancora solidificando. Negli strati esterni prevalgono le sollecitazioni di compressione, mentre all'interno prevalgono le sollecitazioni di trazione lungo la direzione longitudinale.



L'esperimento

Strumenti e materiali

Per realizzare le gocce è necessario portare il vetro silicato a una temperatura tra i 650°C e i 1000°C. Questa temperatura non può essere raggiunta con una normale fiamma, perciò abbiamo usato una miscela di gas comunemente denominata *Mapp*, questo poiché i normali gas che sono usualmente presenti in commercio e di facile reperibilità non sono in grado di sciogliere il vetro. Come materia prima abbiamo usato delle barrette di vetro di forma cilindrica cava.

Procedimento

Abbiamo esposto una barretta di vetro alla fiamma del bruciatore in modo tale che la fiamma investisse la sua parte inferiore e atteso che il vetro si fondesse. Abbiamo lasciato che il vetro fuso gocciolasse all'interno di un recipiente contenente acqua fredda. In questo modo si provoca al vetro fuso uno stress termico che fa solidificare esternamente il vetro lasciando il nucleo all'interno ancora leggermente fuso.

Di seguito il link al video che mostra come abbiamo realizzato le gocce di Rupert:
<https://youtu.be/Gp09QB7Py5o>

Prove di compressione

La prova di compressione serve per misurare i valori di resistenza-deformazione di un materiale sottoposto a carichi crescenti fino a causarne la rottura allo scopo di stabilire i valori massimi di carico a cui può essere sottoposto.

Queste prove possono essere realizzate attraverso delle macchine specifiche utilizzate per determinare i valori di resistenza ai carichi.

Recenti studi hanno dimostrato che lo stress da compressione nella testa della goccia è di circa 50 tonnellate per pollice quadrato, ovvero la goccia può sopportare il peso di 5 elefanti, valore che caratterizza, per quanto riguarda la resistenza alla compressione, anche l'acciaio.

Studio della goccia mediante luce polarizzata

Studiando le gocce di Rupert, ci siamo imbattuti in un articolo di rassegna in cui compariva una foto delle gocce realizzata mediante polarizzatori incrociati, una tecnica che permette di visualizzare gli sforzi nei materiali trasparenti.

Abbiamo quindi anticipato di qualche settimana rispetto al corso di fisica svolto nella nostra classe lo studio delle onde elettromagnetiche in generale e della polarizzazione della luce in particolare.



Bruciatore utilizzato, composto da un cannello e un adattatore che consente il collegamento alla bombola di Mapp

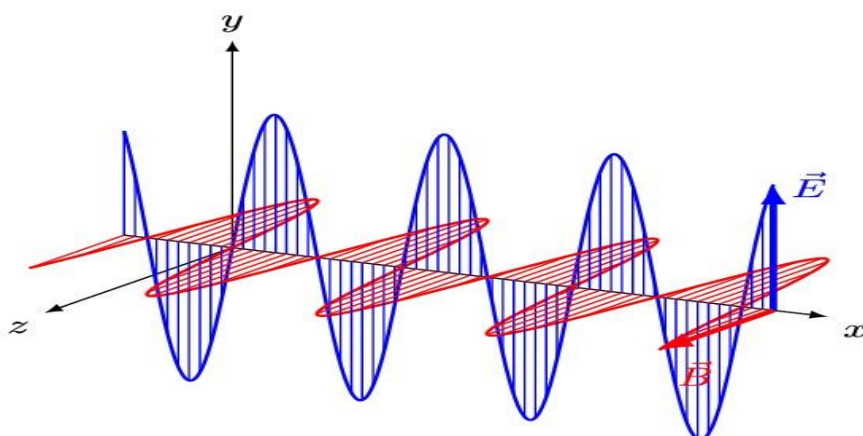


Cenni sulle onde elettromagnetiche e sulla polarizzazione

Le leggi di Maxwell prevedono che, per esempio, un campo elettrico variabile induce un campo magnetico variabile, che, a sua volta, induce un campo elettrico variabile e così via. Il continuo alternarsi nello spazio e nel tempo del campo elettrico e del campo magnetico determina la formazione delle cosiddette onde elettromagnetiche. Le onde elettromagnetiche sono onde trasversali e si propagano nello spazio vuoto con una velocità pari a:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cong 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

Il fatto che la loro velocità coincida con quella della luce ha rivelato la natura elettromagnetica di quest'ultima.



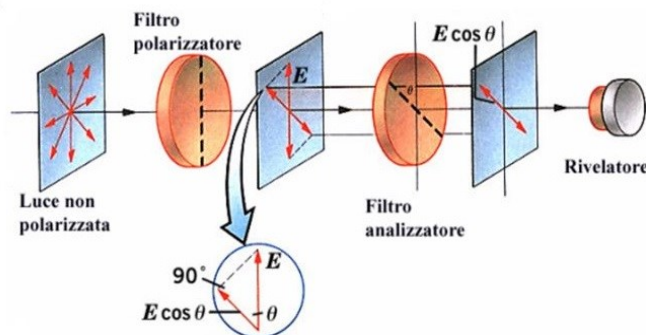
La luce polarizzata è per così dire una «luce ordinata», in cui il campo elettrico e il campo magnetico oscillano in determinati piani tra tutti gli infiniti piani passanti per la direzione di propagazione.

Un modo per ottenere luce polarizzata è quella di utilizzare un polarizzatore (*polaroid*), ovvero una lamina di materiale plastico che filtra la luce non polarizzata rendendola tale. In genere i *polaroid* vengono utilizzati in coppie polarizzatore-analizzatore.

Come mostra l'immagine, un fascio di luce non polarizzata attraversa un polarizzatore caratterizzato da uno specifico asse di trasmissione, il quale determina la direzione di oscillazione del campo elettrico della luce trasmessa. Ciò vuol dire che a seguito del passaggio nel polarizzatore si crea un raggio di luce polarizzata il cui campo elettrico oscillerà solo in direzione parallela all'asse del polarizzatore.

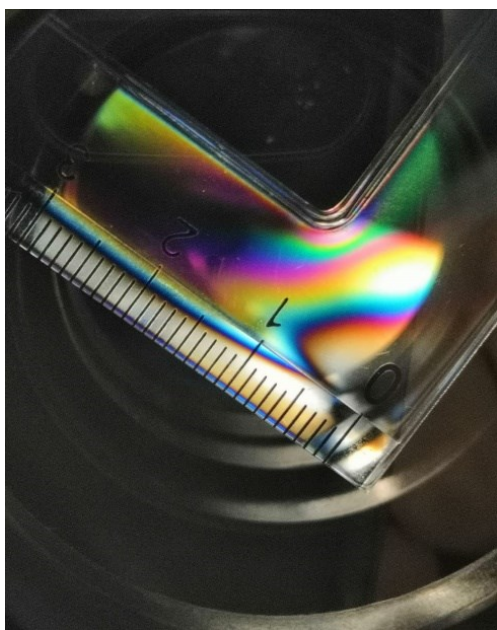
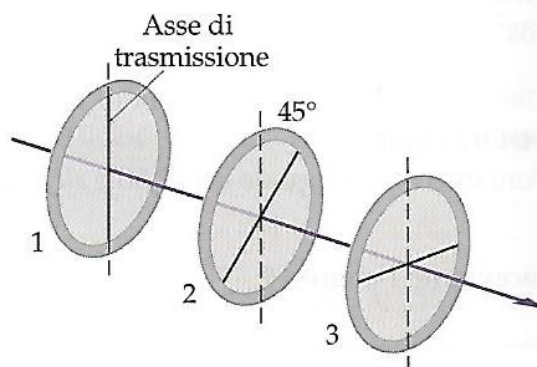
Il fascio di luce polarizzata incide su un secondo polarizzatore, detto analizzatore. Se l'asse dell'analizzatore è parallelo alla direzione di polarizzazione il fascio viene completamente trasmesso, mentre se è perpendicolare, l'intensità trasmessa è nulla. Se l'angolo tra i due assi chiamato θ è diverso da 0° e da 90° , il modulo del campo elettrico trasmesso attraverso l'analizzatore è $E \cos \theta$ (cioè la componente parallela dell'asse di trasmissione) e l'intensità luminosa è proporzionale a $\cos^2 \theta$. Dunque, ruotando l'asse dell'analizzatore rispetto a quello del polarizzatore, la direzione di polarizzazione e l'intensità della luce trasmessa possono essere variati.

Filtri polarizzatore ed analizzatore



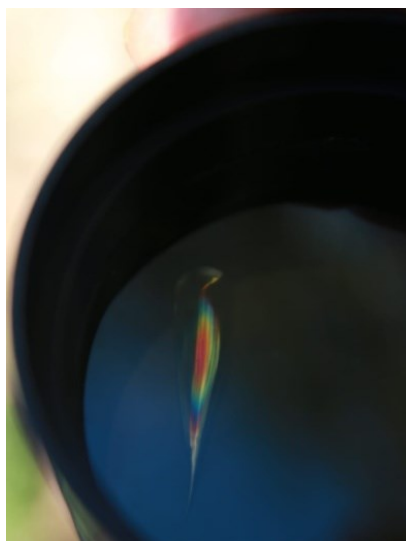
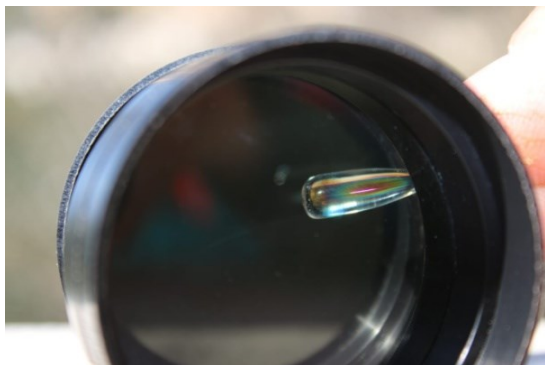
Polarizzatori incrociati

Un particolare metodo di indagine sfrutta la situazione in cui polarizzatore e analizzatore hanno assi perpendicolari tra loro. Se tra i due si interpone un terzo polarizzatore il cui asse forma con quello del polarizzatore un angolo θ , con $0^\circ < \theta < 90^\circ$ (nella figura seguente è $\theta = 45^\circ$), allora, come si può intuire, ci sarà un fascio di luce di intensità non nulla che attraversa i tre polarizzatori (infatti la componente del campo elettrico trasmesso non sarà mai nulla perché l'angolo tra un asse di trasmissione e quello del polarizzatore successivo non è mai retto) e che sarà polarizzato nella direzione dell'asse dell'ultimo di essi.



Se tra due polarizzatori incrociati collochiamo un oggetto, per esempio una squadretta da disegno, che nella sua lavorazione ha subito tensioni e compressioni, le molecole della plastica saranno orientate in modo particolare per effetto di tali sforzi e modificheranno la direzione della luce polarizzata che potrà quindi attraversare la coppia di polarizzatori.

Dopo aver sperimentato i polarizzatori incrociati sulla squadretta, abbiamo ripetuto l'analisi su una delle gocce da noi prodotte. Il risultato è rappresentato dalle due foto seguenti in cui è possibile vedere la goccia, ciò accade a causa degli sforzi a cui è stata sottoposta durante il raffreddamento che sono rimasti «fissati» nella disposizione degli atomi e delle molecole. È possibile notare che le macchie luminose sono parallele alla superficie della goccia.



Conclusioni

L'esperimento nel complesso è ben riuscito e abbiamo ottenuto i risultati sperati. Infatti, sin dalla prima fase, cioè quella di realizzazione, siamo riusciti a ottenere delle belle goccioline, non grandi come quelle riportate in letteratura, ma dalla struttura caratteristica.

Nella successiva fase di sperimentazione, abbiamo sottoposto le gocce a martellate sulla testa, verificando che questa non si rompeva, mentre comprimendo la coda si è verificata la frantumazione di tutta la goccia.

La sola riuscita di queste prime fasi del lavoro è stata da noi accolta con grande stupore, proprio a causa del fascino di tale fenomeno.

Ma lo stupore maggiore è sorto con l'osservazione delle gocce attraverso i polarizzatori incrociati; anche in questa analisi sono stati ottenuti risultati concordi con quelli attesi; infatti abbiamo potuto verificare che le gocce vengono attraversate dalla luce polarizzata, proprio a causa della grande tensione interna e dello stress a cui sono sottoposte, e che la configurazione degli sforzi interni alle gocce è analoga a quella modellizzata.

In conclusione, possiamo affermare che tale esperimento è risultato essere molto interessante, ma allo stesso tempo difficoltoso soprattutto nella comprensione delle ambivalenti caratteristiche delle gocce.

È stata la curiosità che ci ha spinto ad approfondire la loro struttura; in particolare la ricerca di fenomeni analoghi in natura (come l'ossidiana) e l'analisi con luce polarizzata ci hanno permesso di comprendere meglio il comportamento di queste gocce.

Federico Granata, Gianni Di Paolo, Lisa Pelaccia, Virginia Joseffa D'Alanno, Tommi Cinquepalmi

(studenti della Classe 5[^] C del Liceo Scientifico "Galileo Galilei" di Pescara)

Indicazioni bibliografiche e sitografiche

C. Romeni, *Fisica e realtà*, Blu, vol.3, Zanichelli, 2017.

<https://phys.org/news/2017-05-scientists-year-old-mystery-prince-rupert.html>,

"Scientists solve 400-year-old mystery of Prince Rupert's drops" scritto da Lisa Zygapera
la rivista Phys.org

https://it.wikipedia.org/wiki/Gocce_del_principe_Rupert

<https://sites.google.com/site/liceodinirock/microscopio/microscopio>

<http://www.treccani.it/enciclopedia/vetro/>

http://www.treccani.it/enciclopedia/resistenza-dei-materiali_res-3b77fc6c-8bb6-11dc-8e9d-0016357eee51_%28Enciclopedia-Italiana%29/

<https://it.m.wikipedia.org/wiki/Ossidiana>

<https://www.juwelo.it/parametri-gemme/>

https://physlab.uniurb.it/Lacrime_Bataviche.pdf

https://it.wikipedia.org/wiki/Solido_amorfo

https://it.wikipedia.org/wiki/Solido#Solidi_cristallini

<https://www.astralab.eu/macchina-di-prova-universale-principi/>

<https://www.amse.it/2017/07/05/prova-di-compressione/>

