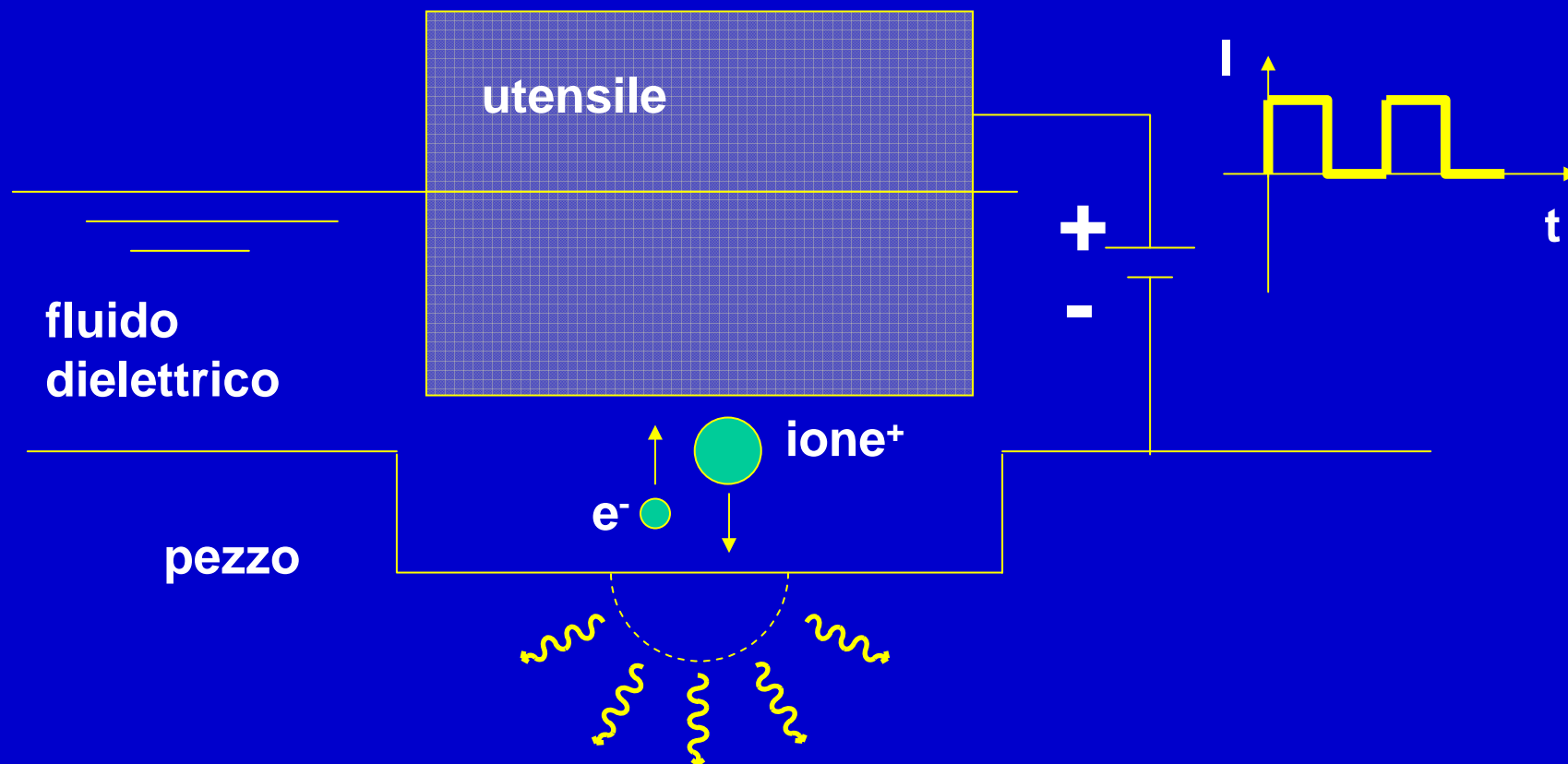


L'EDM

Il processo

Lavorazioni tramite energia termica

Electro Discharge Machining (EDM)



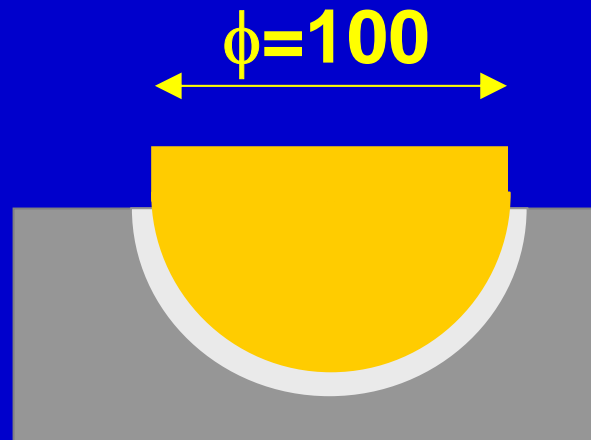
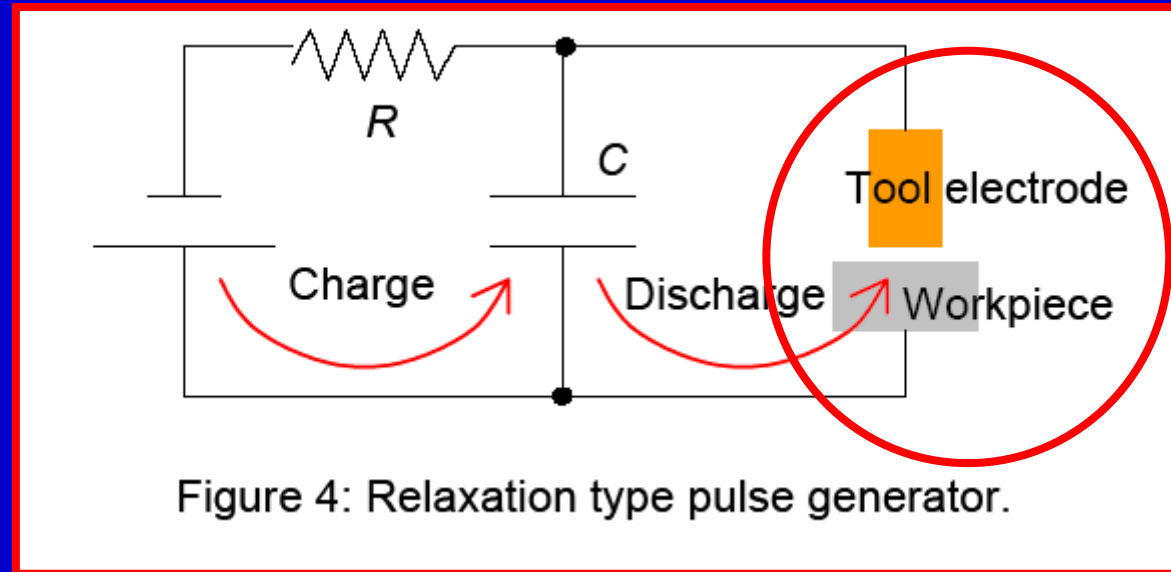
La fisica di riferimento

- Campo elettrico e potenziale
- Condensatori e dielettrici
- Circuiti R-C
- Correnti in un campo magnetico
- Termodinamica
- Fluidodinamica

Campo elettrico in un condensatore

- Campo elettrico in un condensatore per il calcolo del gap di rottura (statico) e dei tempi di rottura del dielettrico (dinamico)
- Condensatori in serie ed in parallelo per capire l'evoluzione del gap ed il ruolo
 - delle particelle di metallo in sospensione
 - delle bolle di gas in sospensione

Esercizio



Gap=25 μ m

$\epsilon_r=2$

$\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m $\sim 10^{-11}$ F/m

$\pi=3$

Le fasi del processo elettroerosivo

EDM a Tuffo

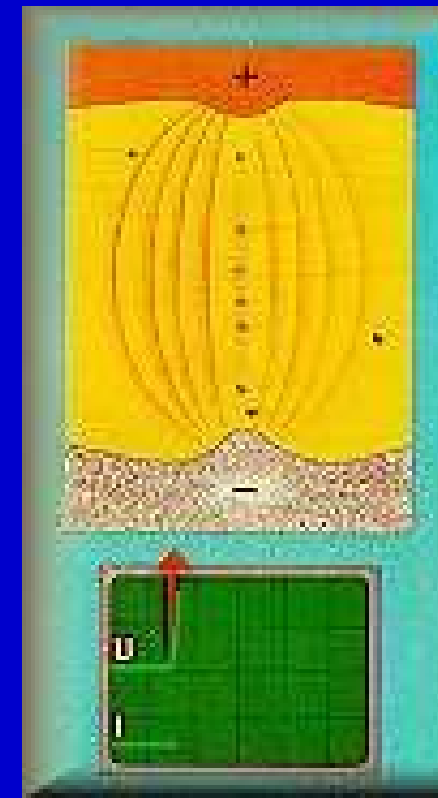
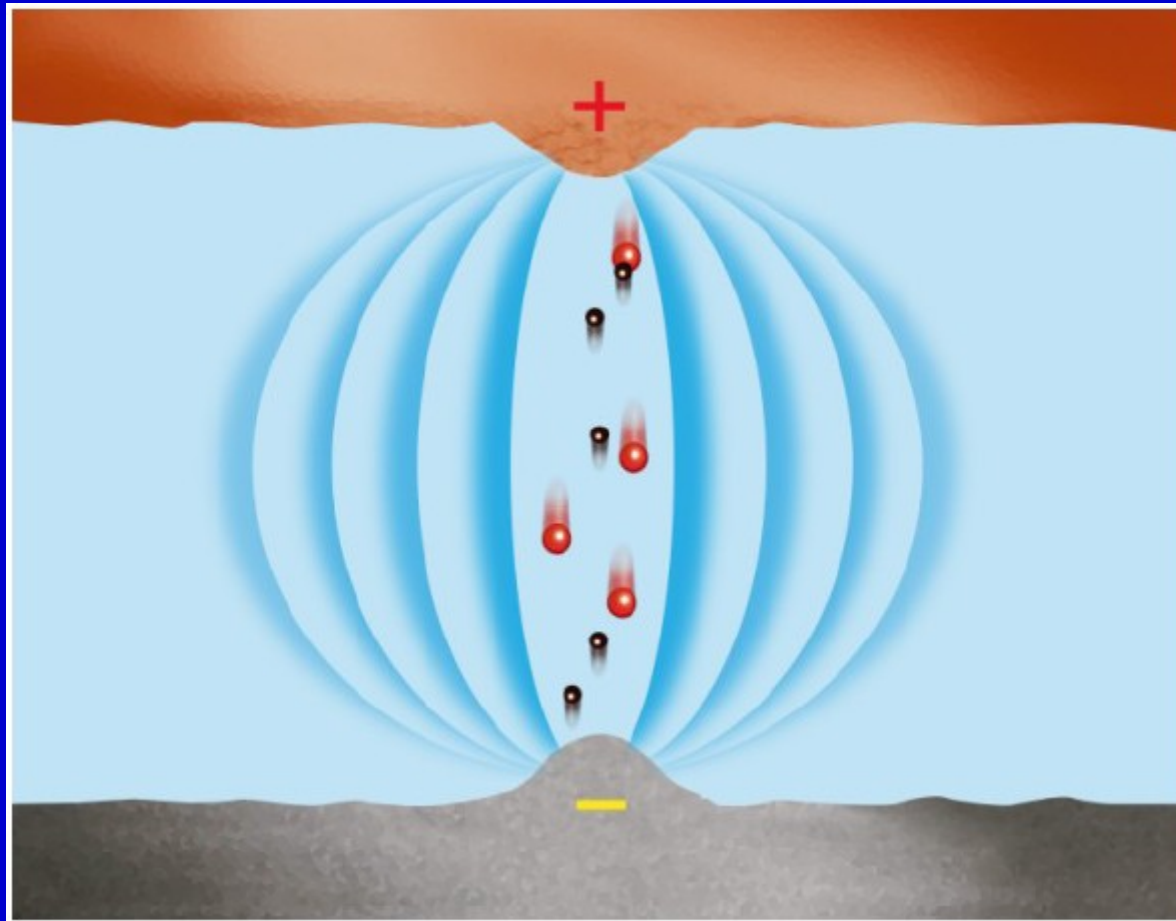
principio e stadi operativi

- Nel processo elettroerosivo sono coinvolte tre forme di energia: *elettrica, termica, meccanica*. Essenzialmente questo processo, non convenzionale di lavorazione dei metalli, è basato sul principio che un materiale *elettricamente conduttivo* può essere eroso da una serie di scariche elettriche.
- Nell'EDM la scarica elettrica rappresenta il fenomeno portante del processo. Tale fenomeno, che è apparentemente istantaneo, nella realtà è composto da *9 fasi* fondamentali, ciascuna della durata di alcuni millisecondi.

Fase 1

- La tensione aumenta formando un campo elettrico più intenso nella posizione di minore distanza, in genere, nel caso ideale, dove minore è la distanza fra le asperità superficiali di elettrodo e pezzo (gap minimo). **Si ricordi** che le asperità e in particolare le protuberanze agiscono come elementi di concentrazione della carica (potere delle punte).
- Altri punti di possibile innesco sono dovuti nel processo reale alla presenza di particelle carboniose o metalliche (conduttrici) dovute a precedenti scariche. In queste zone la conducibilità elettrica è maggiore ed è sufficiente una minore differenza di potenziale per perforare il dielettrico.

Fase 1



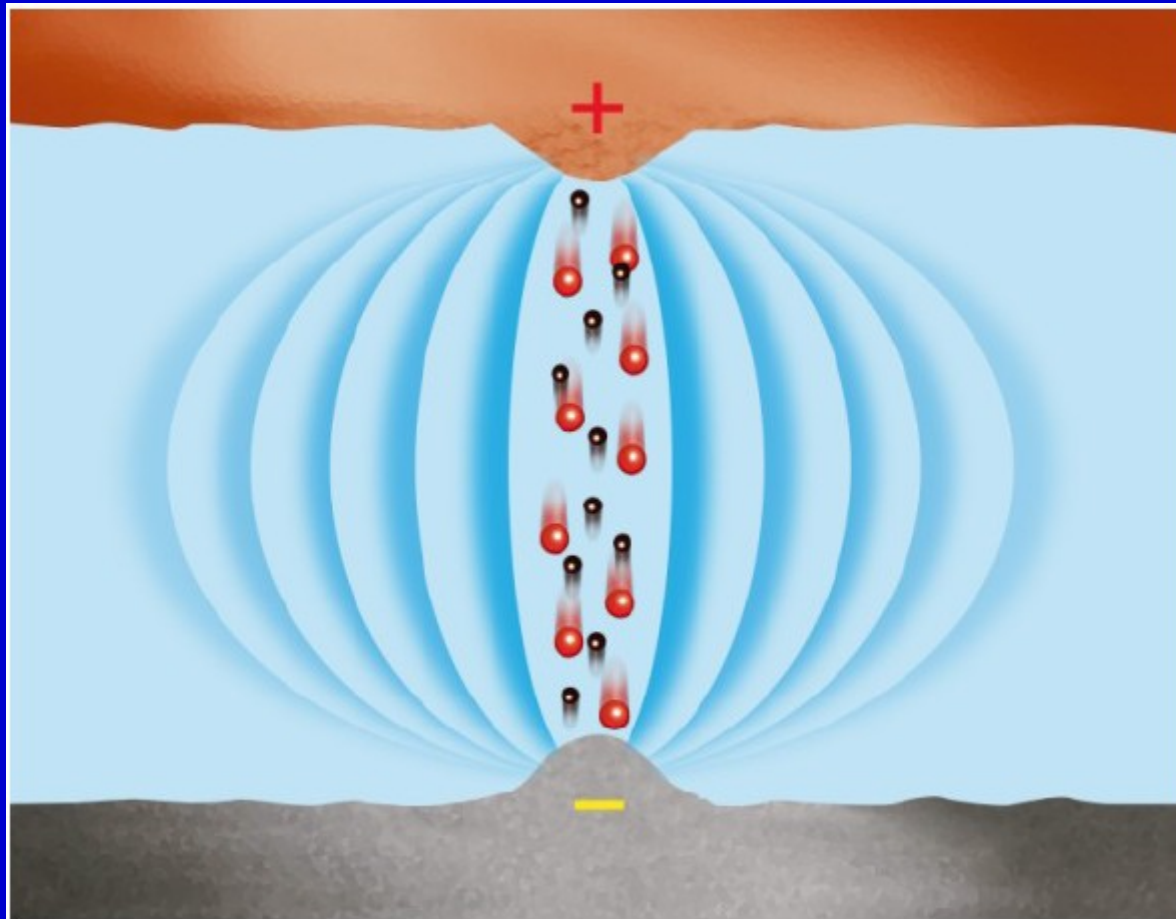
Fase 1

When the open voltage u_0 , is applied between the tool electrode and workpiece, but discharge does not occur immediately but occurs after the ignition delay time, t_d . This is because dielectric breakdown “physically” needs a statistical time lag in which initial electrons should be generated by the bombardments of cosmic, radioactive, ultraviolet, and X rays with the neutral species in the gap, and the formative time lag in which the initial electrons are accelerated to generate the electron avalanche.

Fase 2

- Si forma un “ponte” di particelle a carica negativa (elettroni) emessi dal pezzo che migrano verso l’elettrodo positivo (utensile). Parallelamente il fluido dopo la polarizzazione tende a ionizzarsi. Tali ioni migrano in direzione inversa rispetto agli elettroni. La tensione si stabilizza al valore massimo, non c’è passaggio di corrente ... fino all’inizio del canale di scarica o “*streamer*”.

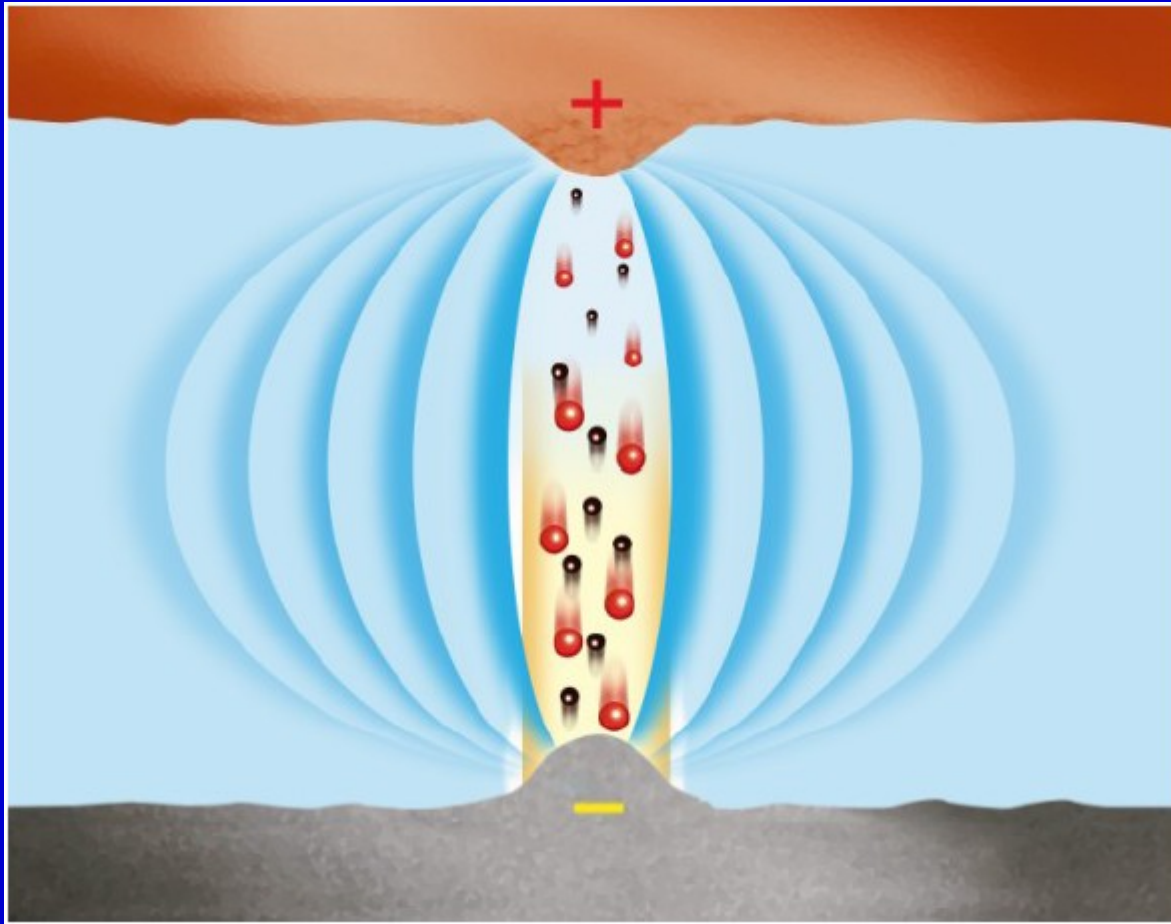
Fase 2



Fase 3

- Il dielettrico si rompe ovvero smette di comportarsi come isolante. La tensione diminuisce ed inizia il passaggio di corrente. Ha così inizio la scarica vera e propria. Il canale ionizzato diminuisce la sua resistività fino a quando raggiunge valori quasi nulli. La tensione diminuisce la corrente assume valori elevati.

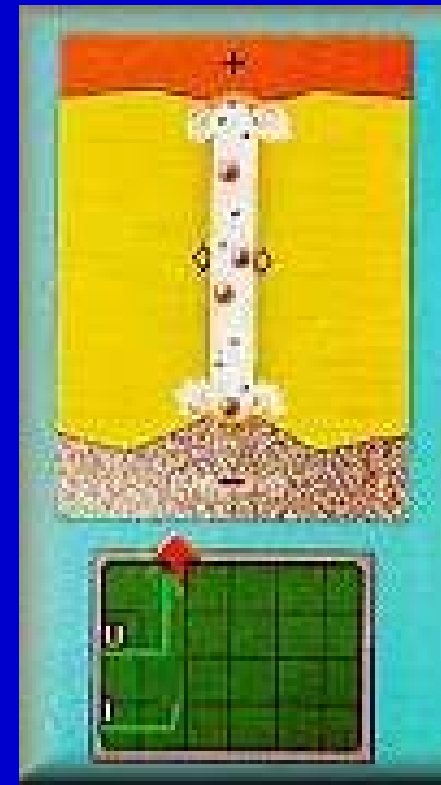
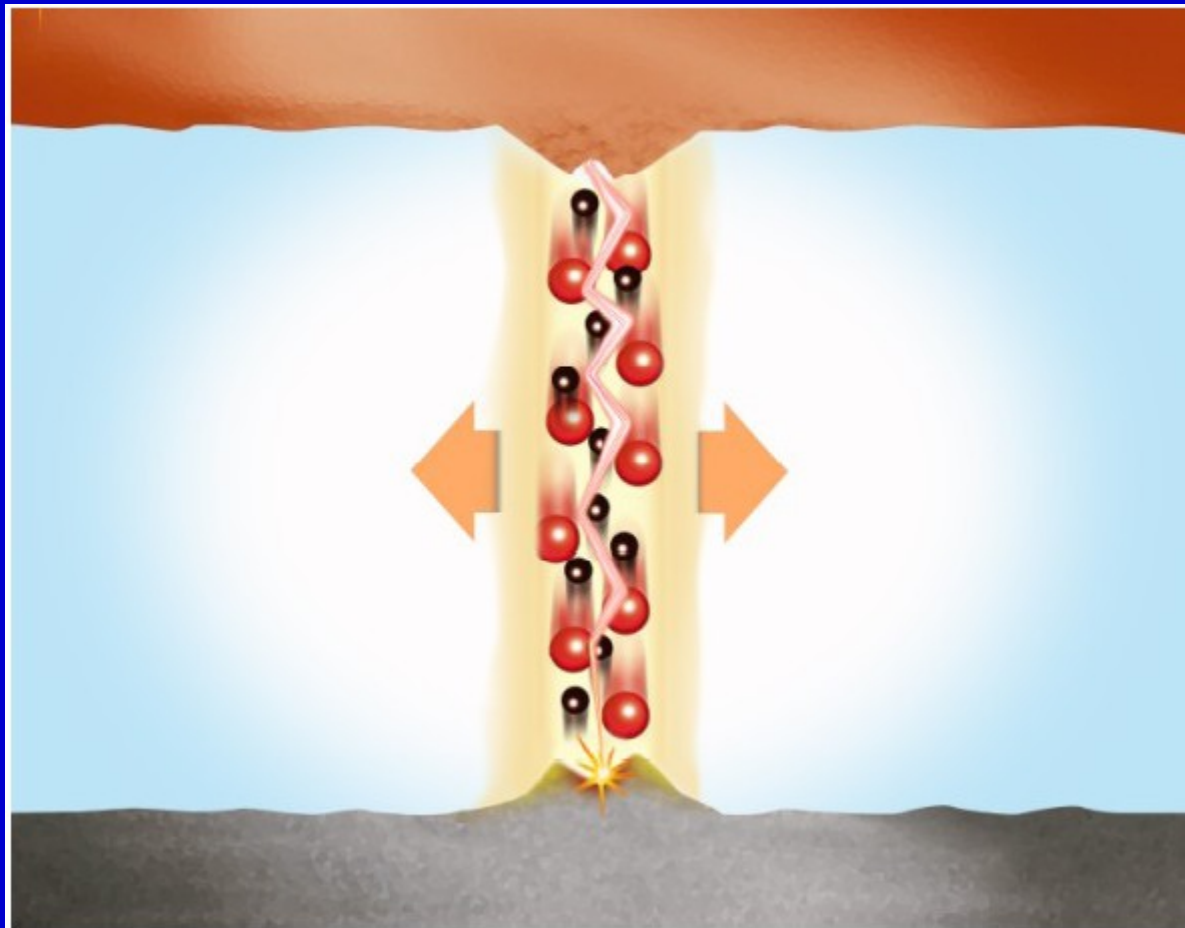
Fase 3



Fase 4

- Gli elettroni (-) e gli ioni (+) vengono accelerati dal campo elettrico rispettivamente verso l'elettrodo (+) e verso il pezzo (-). La corrente sale mentre la tensione continua a scendere. I gas che provengono dalla scomposizione del dielettrico e dai vapori metallici degli elettrodi iniziano a formare una bolla intorno alla scarica.

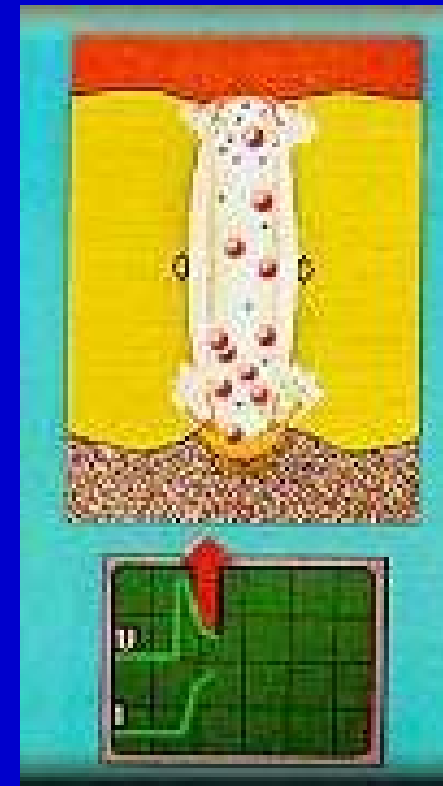
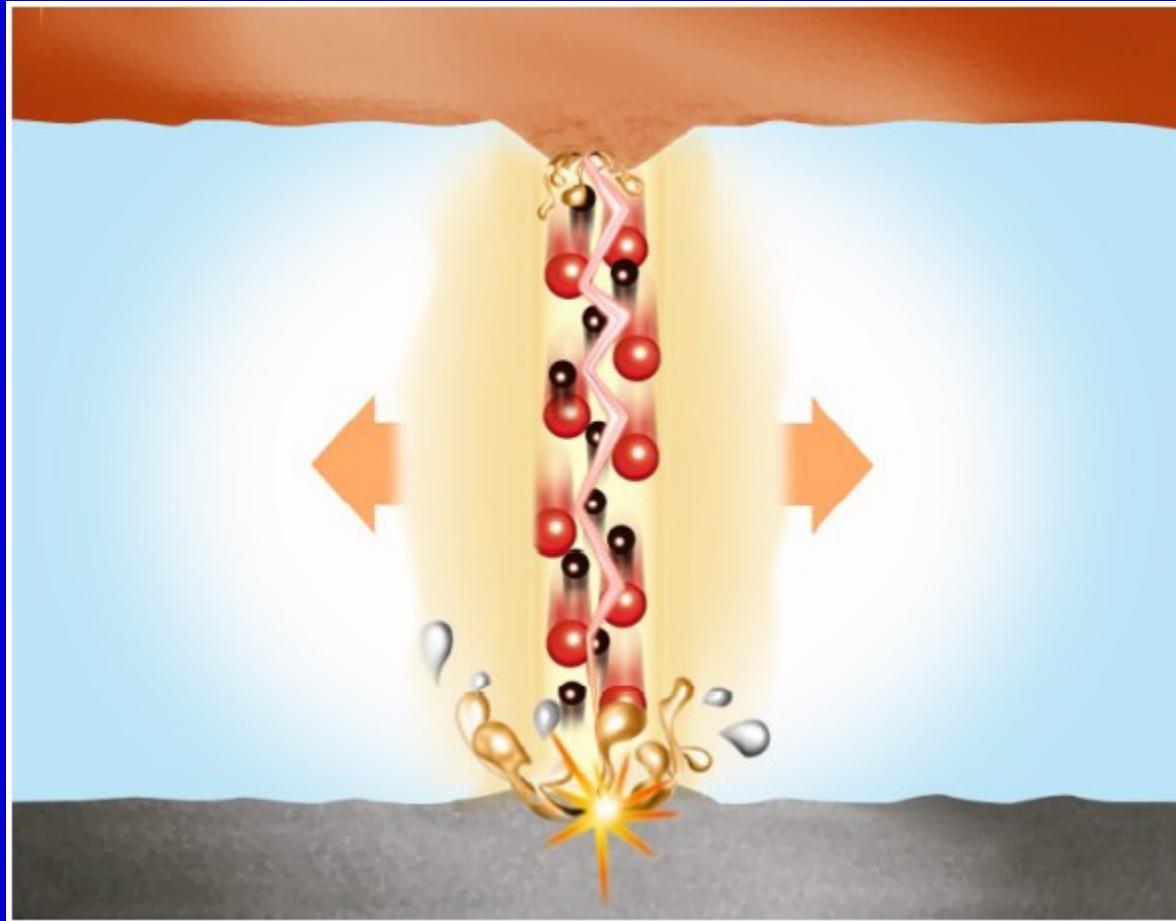
Fase 4



Fase 5

- Il canale di scarica si espande, la tensione e la corrente si stabilizzano. Il campo magnetico associato al passaggio di corrente esercita una azione di restrizione del canale comprimendolo radialmente e provocando un sensibile aumento della pressione e della temperatura della bolla di gas generatisi. I gas nella bolla raggiungono così lo stato di plasma.

Fase 5

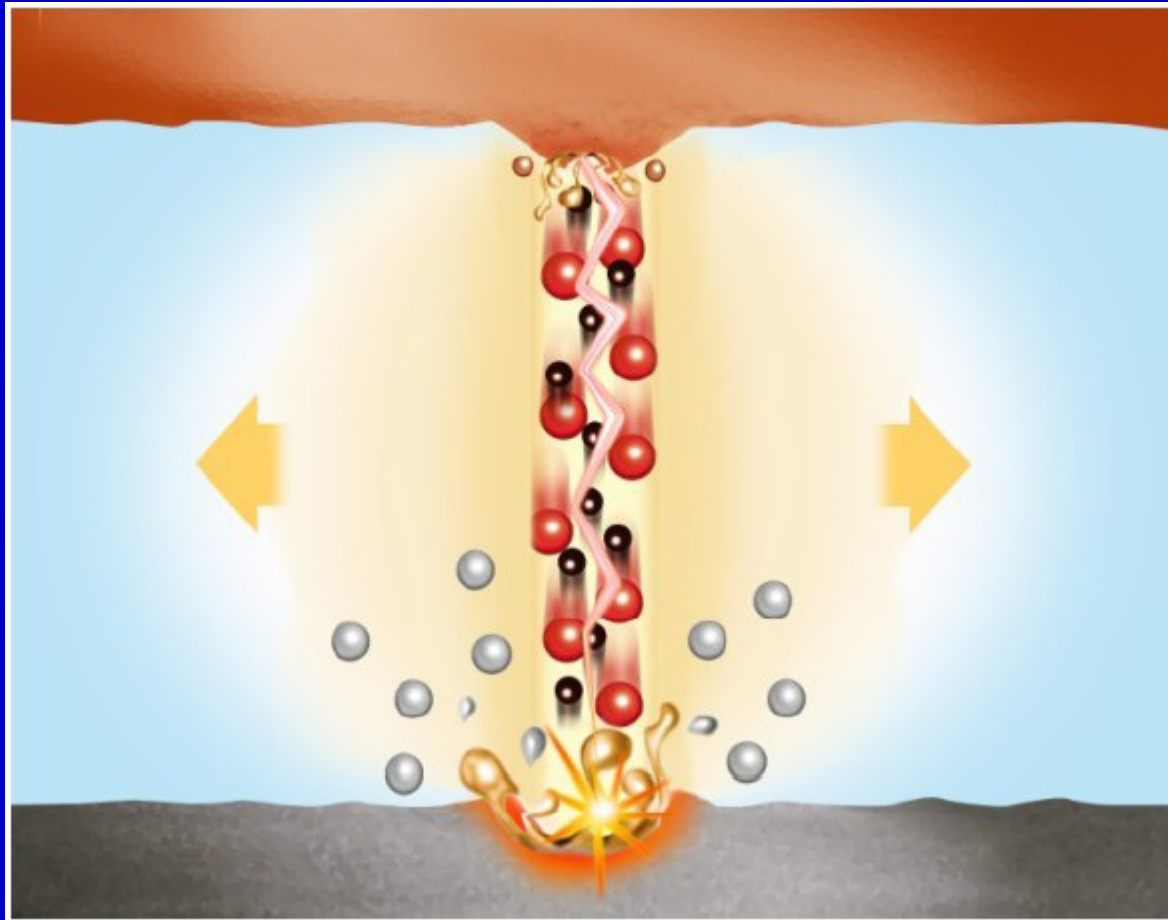


Fase 6

- La scarica elettrica raggiunge la massima intensità ed il calore il massimo valore. Infatti la elevata quantità di calore generatasi determina un aumento della temperatura sulle asperità degli elettrodi (fra 4.000 e 12.000°C) sufficiente a far fondere o addirittura sublimare zone di metallo. In condizioni normali dal 10% al 40% di metallo viene asportato sotto forma di vapore. Alla fine di questa fase il circuito viene aperto (il generatore non fornisce più cariche-lavoro).

- In EDM, since discharge duration is normally over several μs and current density is $10^8 - 10^9 \text{ A/m}^2$, the established discharge is an arc discharge. An arc discharge is sustained by electron emission from the cathode spot which is due not only to the secondary emission but also to the thermionic and field emissions. Since both temperature and electrical field are strong, the emission process is strongly dependent on both variables (*T-F* theory). Thus the plasma is highly ionized resulting in high current densities with the comparatively low discharge voltage of about 20 V.
- P in the bubble = 20 MPa \rightarrow prevent metal evaporation

Fase 6



Fase 7

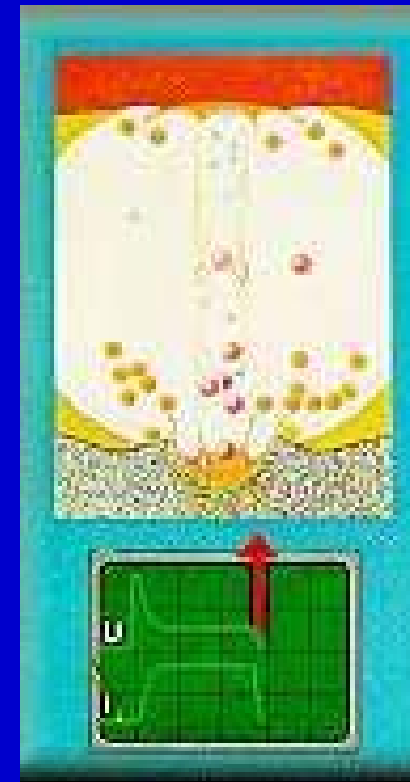
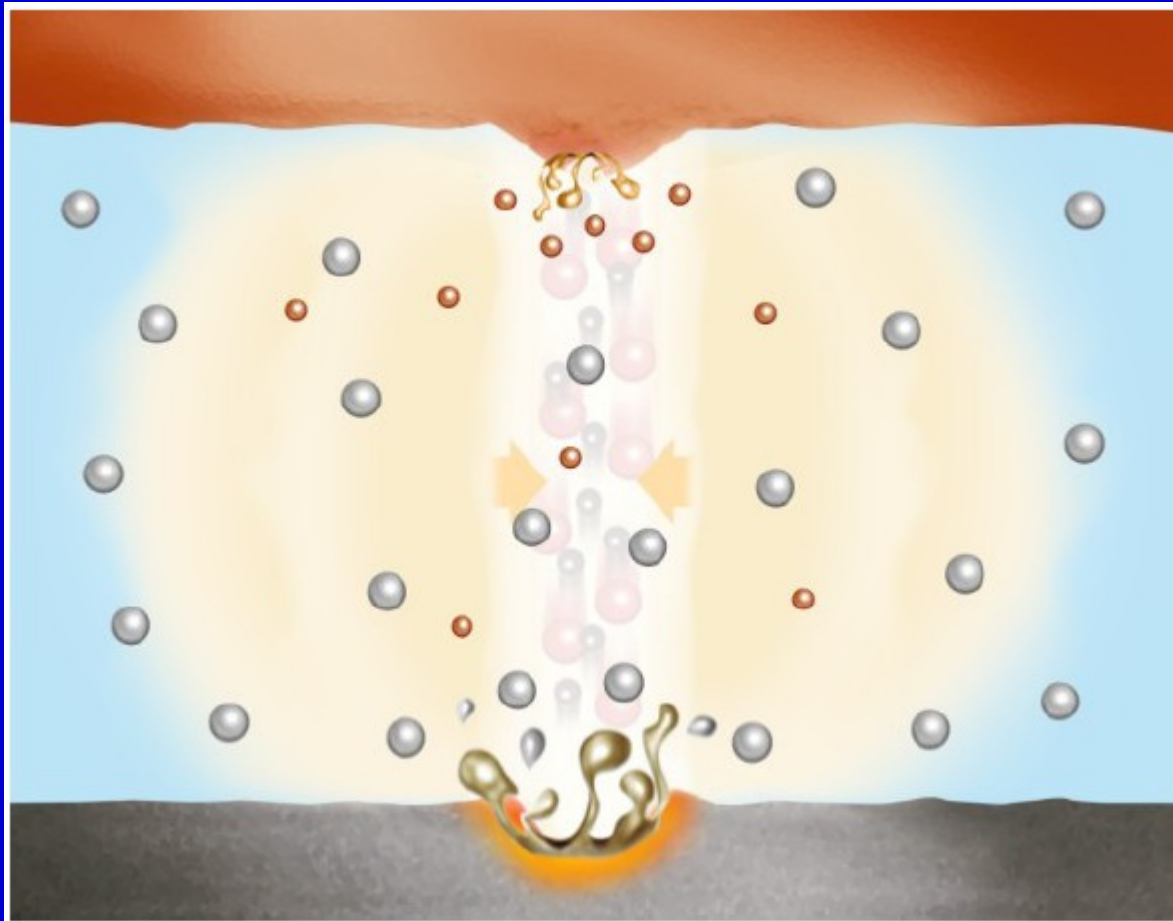
L'interruzione di corrente causa la perdita della sorgente di calore. Diminuisce il numero delle particelle conduttrici, cade la pressione che agiva sul canale di plasma, che rapidamente scompare (implosione) con un effetto di cavitazione che contribuisce al distacco del metallo. Il metallo fuso o in fase di vapore solidifica in forma di microsfere di diametro 5-30 micron. Il metallo vaporizzato solidifica velocemente assumendo la forma di microsfere cave (dette *Cenosfere*), mentre quello fuso solidifica in microsfere piene. La temperatura locale, elevatissima, può causare la scissione della molecola del fluido, con formazione di piccole quantità di carbonio elementare e di idrogeno. Il fluido dielettrico invade la zona ripristinando l'isolamento tra i due elettrodi.



Why do liquid particles explode?

- Zolotykh and Snoeys and Van Dijck reported that most of the metal removal occurs due to boiling of the superheated molten mass in the crater at the end of discharge because **boiling** of that superheated metal is prevented by the bubble pressure during the discharge duration.
- Hockenberry et al. stated that after the discharge termination when the expanded gas bubble **starts to collapse** due to its pressure drop below atmospheric pressure, the **gas bubble becomes fragmented** and the liquid jets which penetrate the bubble and impinge upon the electrode crater from all **directions will strike the discharge crater and eject the molten metal.**

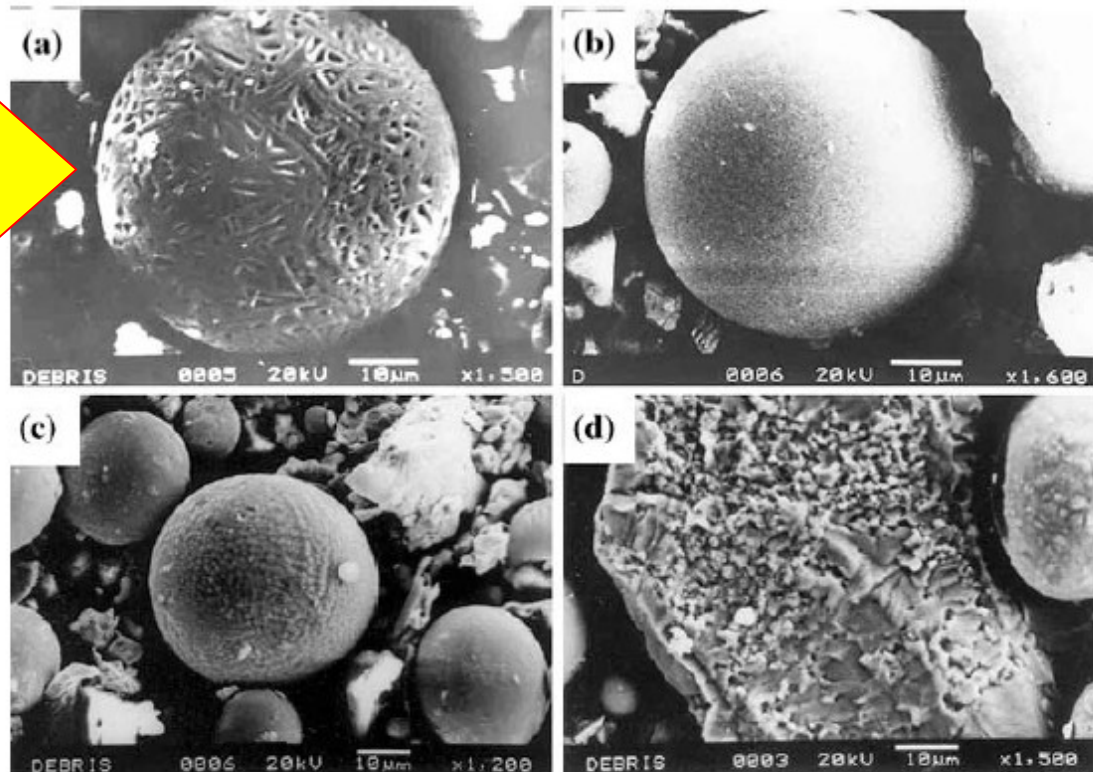
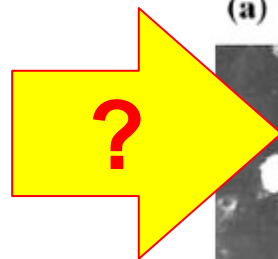
Fase 7



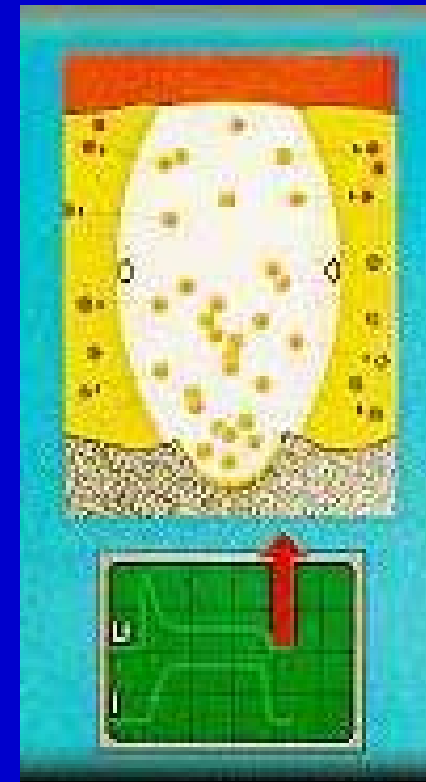
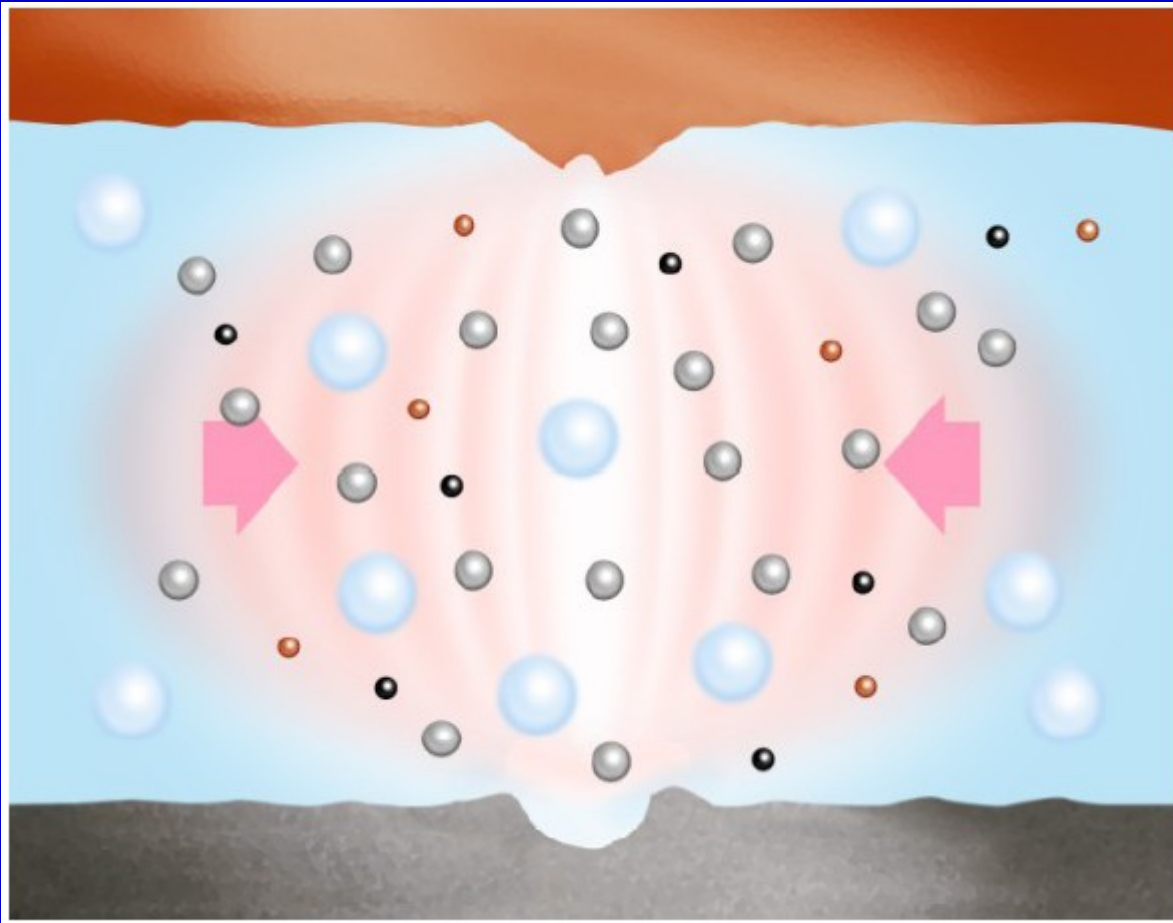
Fase 8

- La bolla di vapore *implode* generando un'azione dinamica che ha l'effetto di proiettare il materiale eroso all'esterno del cratere.

Fig. 5 SEM images of debris at low energy input (pulse on-time 5 μ s): (a) typical dendritic structure; (b) solid sphere; (c) satellite formation; and (d) non spherical particle



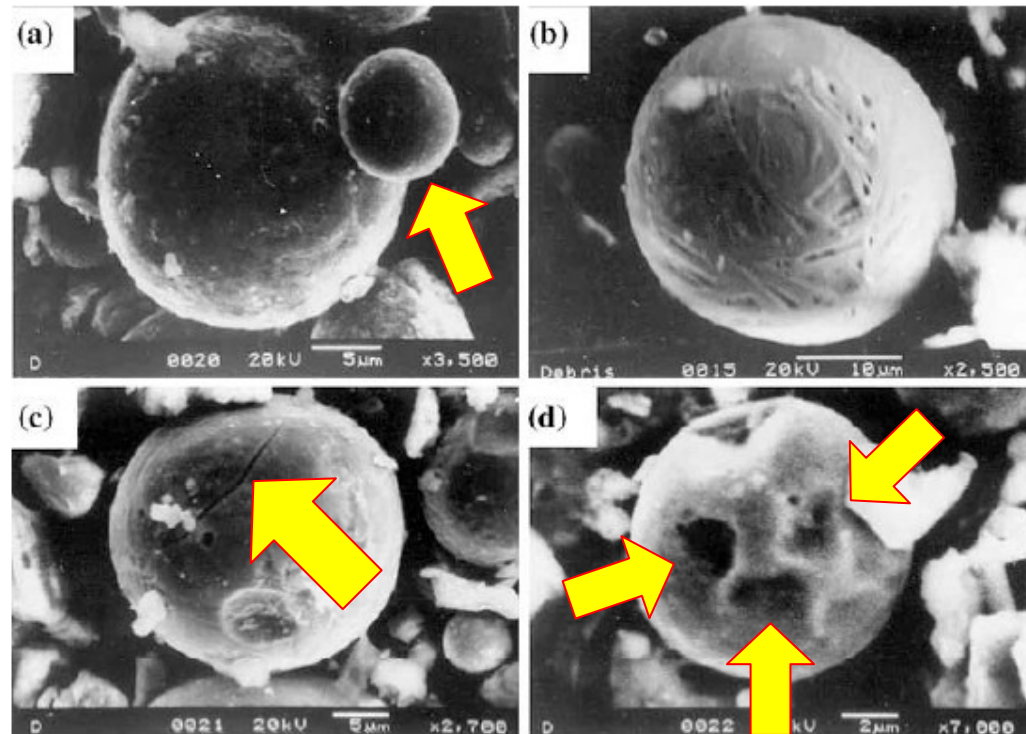
Fase 8



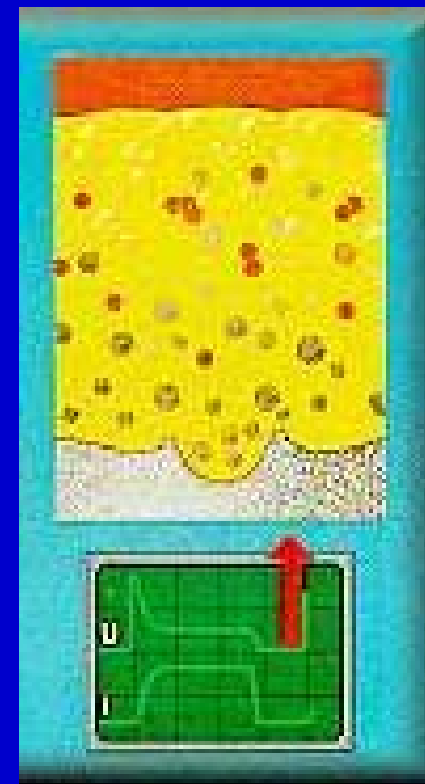
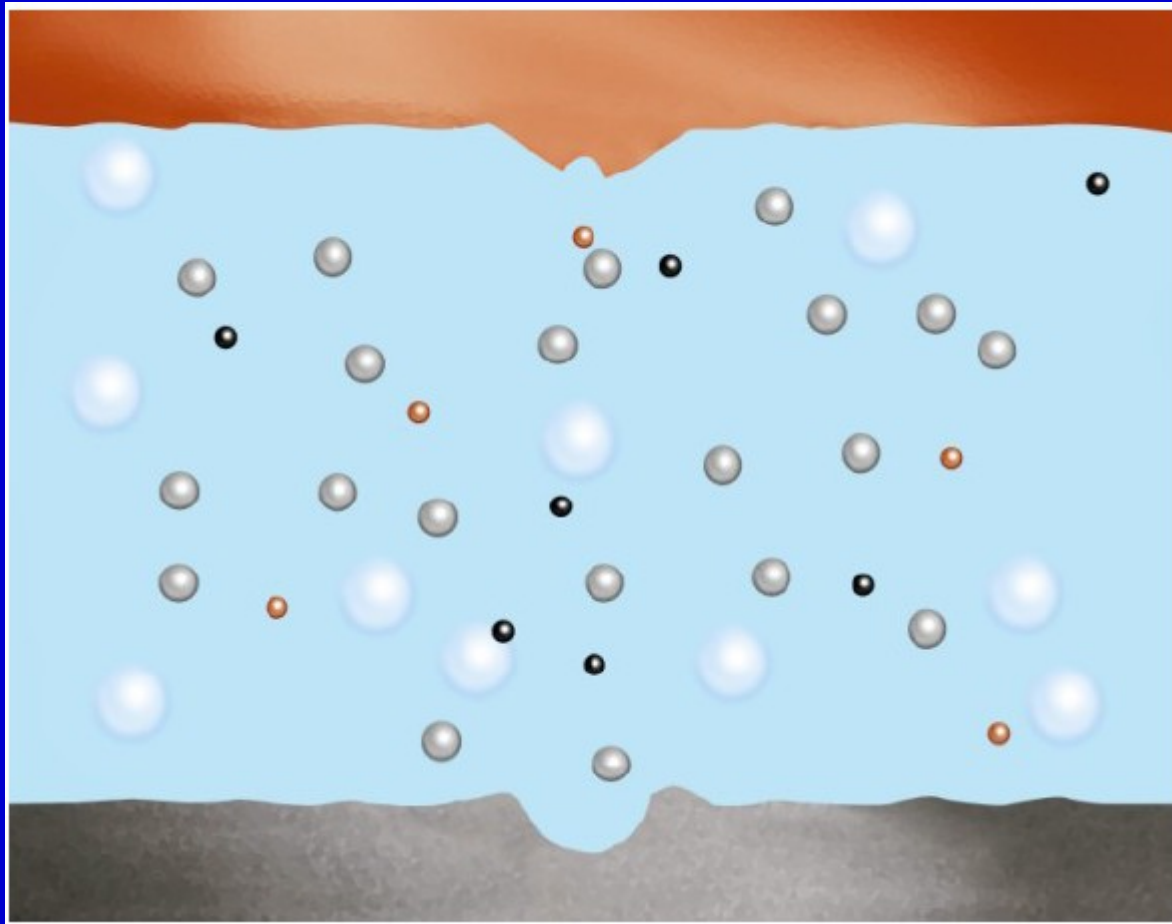
Fase 9

- I residui generati durante il processo, sono costituiti da *particelle di metallo*, derivante dall'erosione del metallo e da *carbonio e gas* provenienti dalla parziale degradazione del fluido EDM. Viene chiuso nuovamente il circuito per dare inizio all'impulso successivo.

Fig. 6 SEM images at medium energy input (pulse on-time 50 μ s): (a) satellite; (b) dendritic structure; (c) dent with crack; (d) typical dent formation)



Fase 9

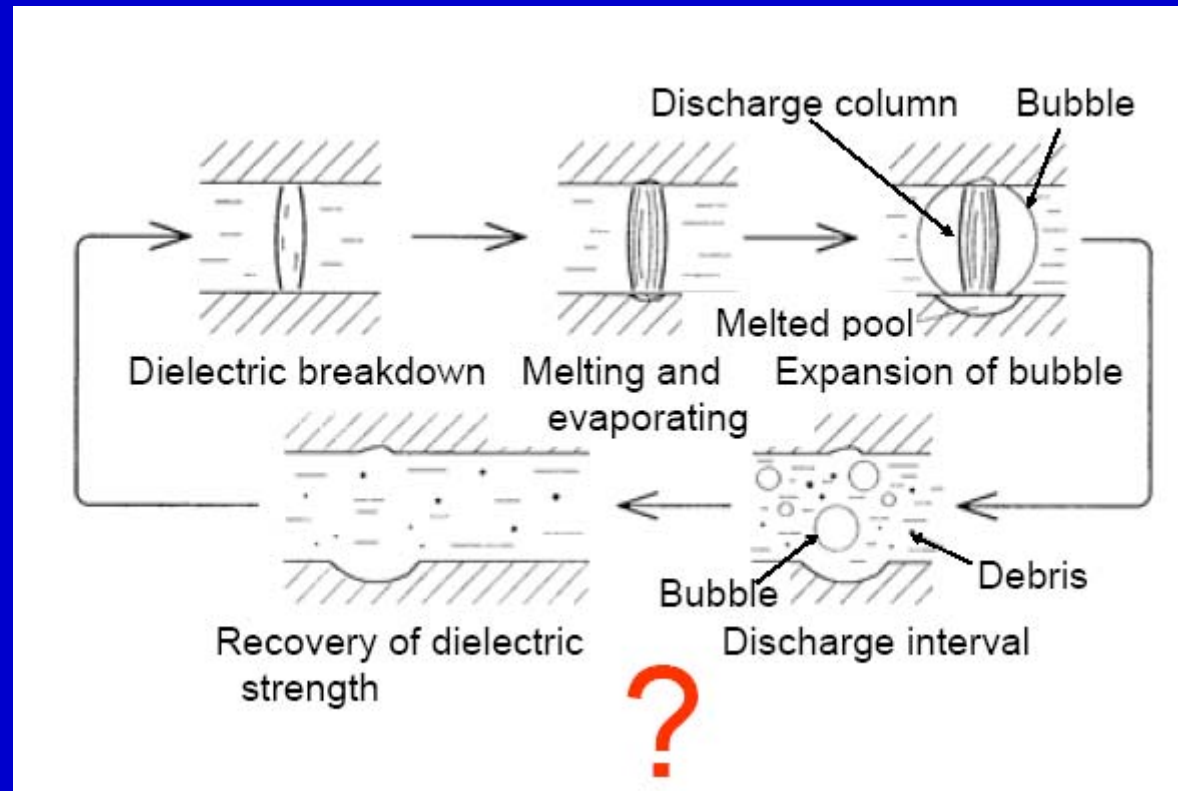


Fase 10, dopo la prima scarica

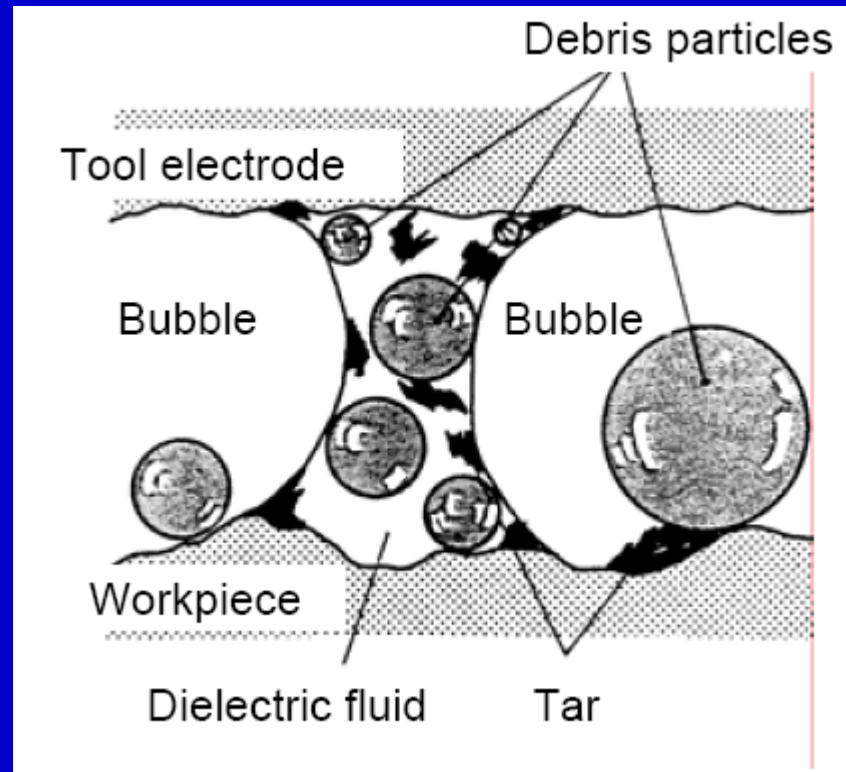
- Bommeli et al. [4] statistically investigated the distribution of ignition delay time to demonstrate that discharge occurs after an activation time which is “practically” needed in addition to the statistical and formative time lags for debris particles to form bridges between electrodes.
- Short circuits are caused by debris particles and humps of discharge craters.

Ma le cenosfere secondo voi che problema danno e dove si depositano?





EDM gap phenomena are usually depicted as shown in Figure. The arc column is depicted with a diameter smaller than the gap width. Debris particles are very fine like dust and minute bubbles are suspended in the gap. However, this sketch is not entirely correct.



As described later, the gap is mostly occupied with gas and the diameter of debris particles is in the same order as the gap width and surface roughness of the electrode surfaces as schematically shown in Figure. Dielectric breakdown in consecutive pulse discharges therefore occurs at the boundary between bubbles, where debris particles are condensed, or inside the bubble.

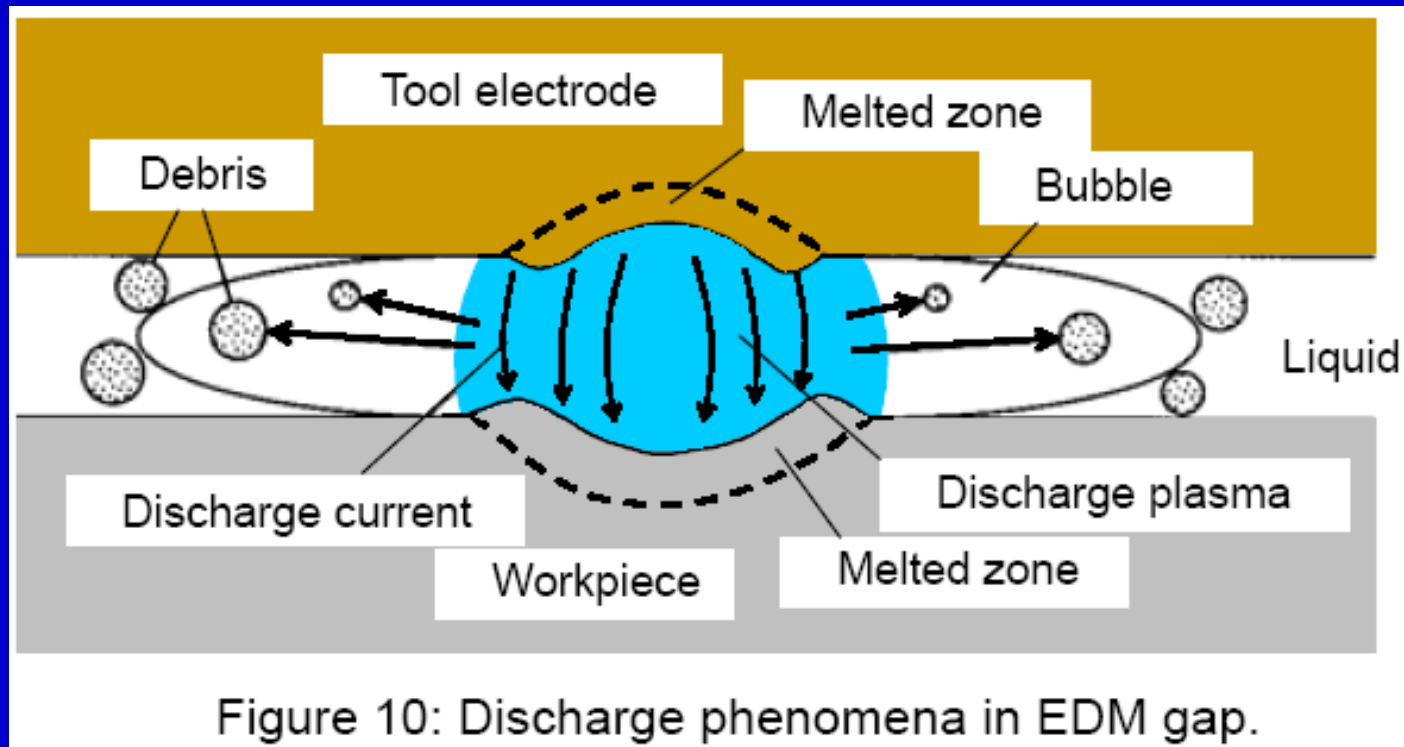
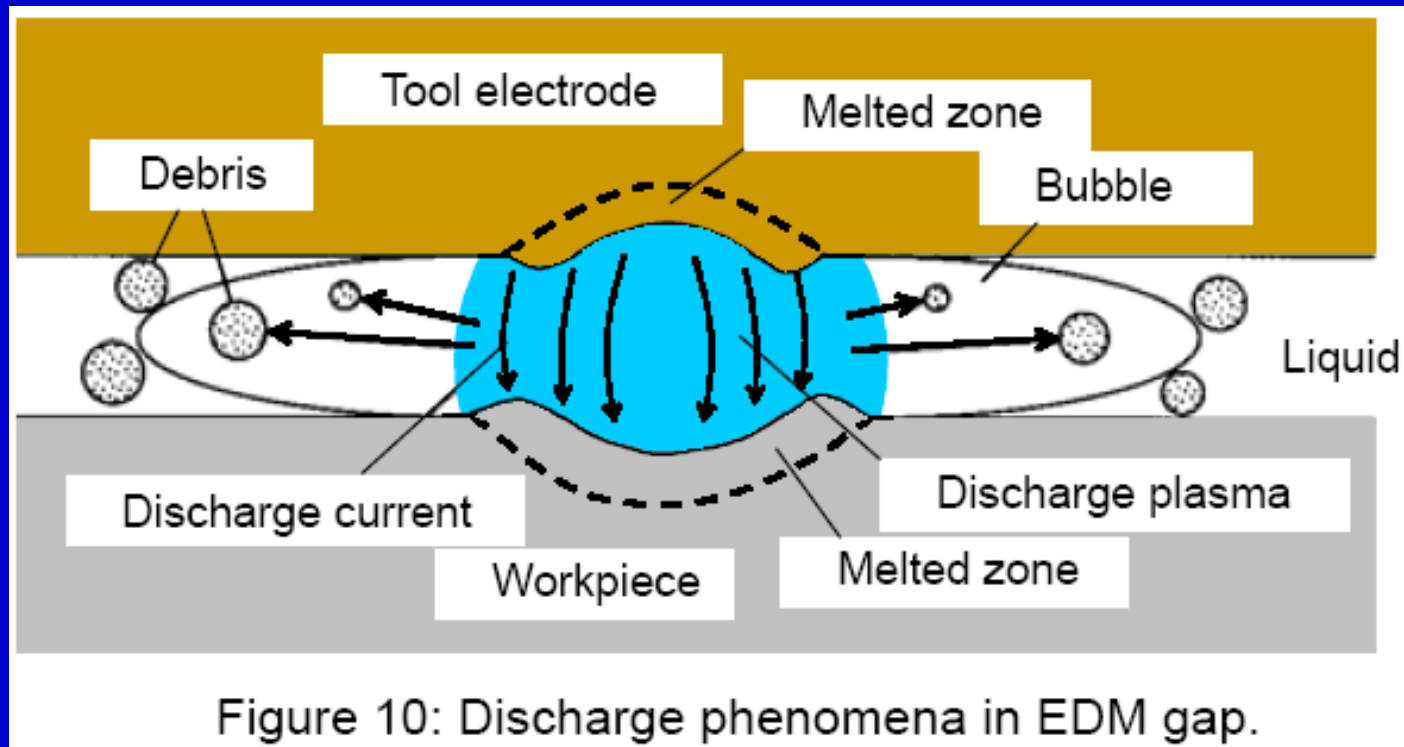
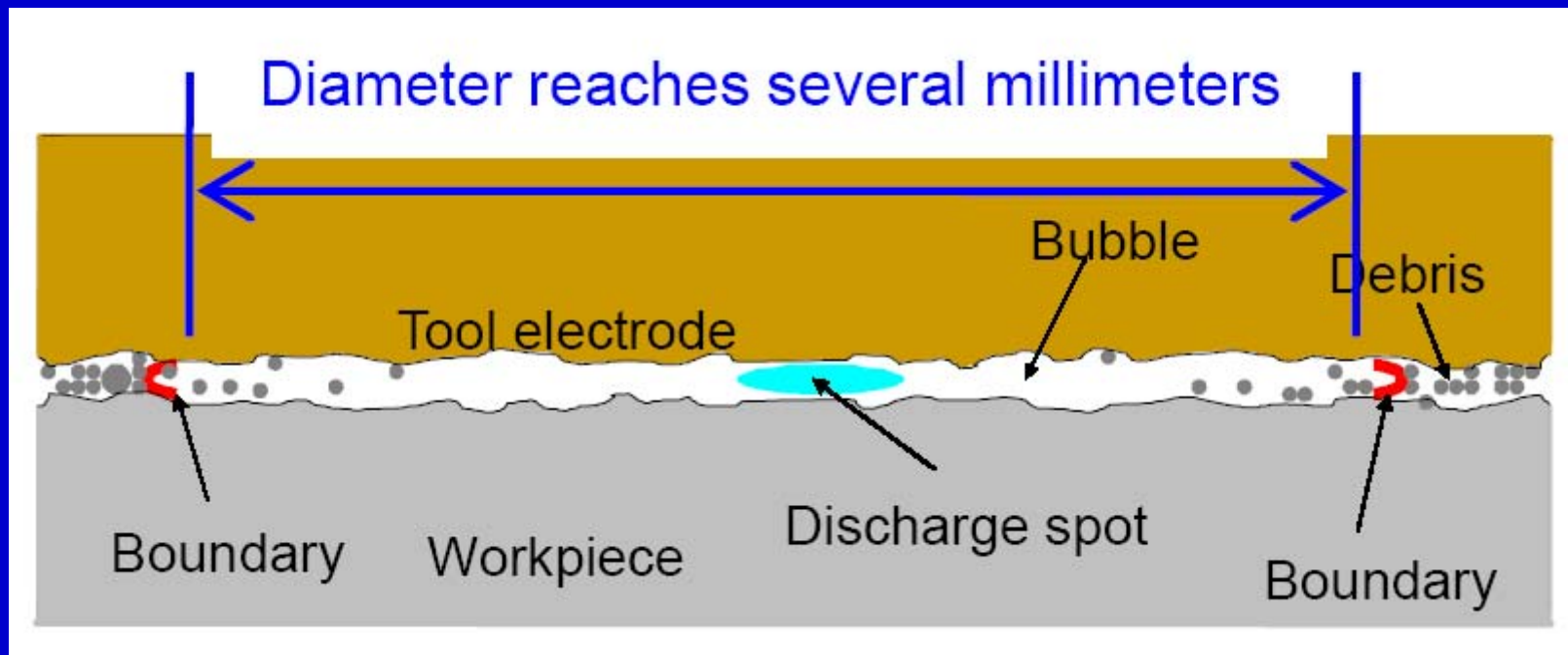


Figure shows a schematic view of the discharge spot. The arc column diameter is considered to increase with the passage of time and equal to the diameter of the generated discharge crater. If this is true, the diameter of the arc column measures several times larger than the gap width. Electrode materials and dielectric liquid are evaporated, molecules are dissociated, and atoms are ionized, resulting in a rapid expansion of the bubble.



Since the expansion is restricted by the inertia and viscosity of the dielectric liquid, the pressure inside the bubble becomes extremely high and the boundary between the bubble and liquid expands with the velocity of several tens m/s.

It is still believed that the dielectric liquid plays a significant role in material removal because the high pressure and velocity field in the bubble may serve as the dynamics of the material removal in EDM.

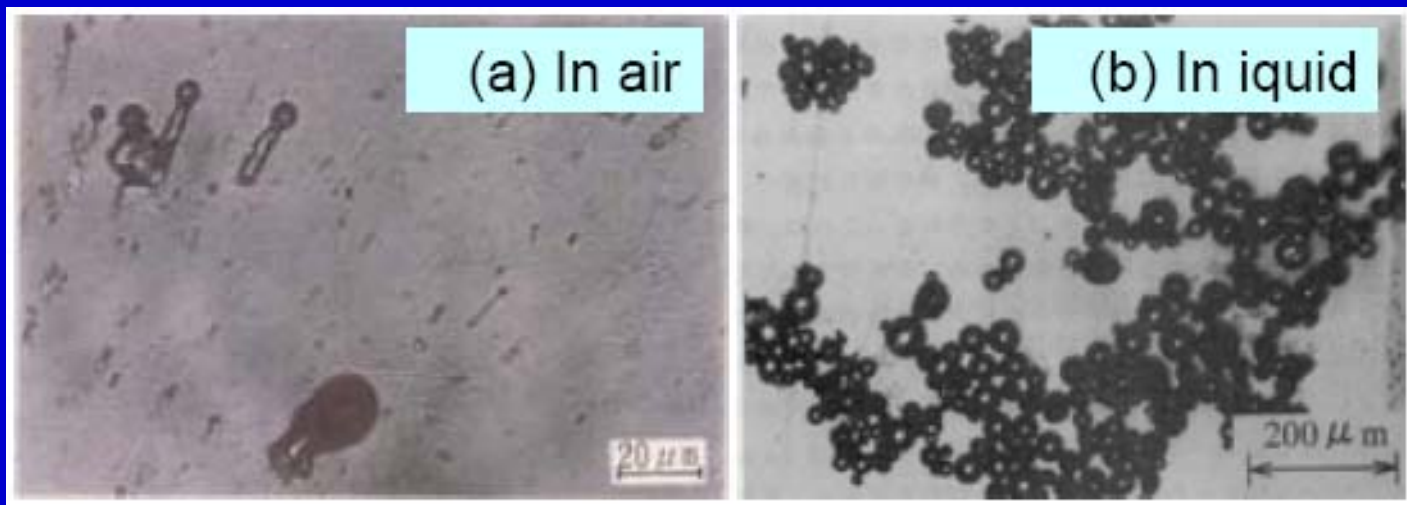


The evaporated atoms and molecules are solidified or condensed to form debris particles or dielectric liquid, but gases such as hydrogen and methane which are generated by the dissociation of the working oil are left to form a bubble. The diameter of the bubble reaches several millimeters, several tens of times larger than the gap width as shown in Figure. Since pulse discharge occurs several thousand times or more per second, obviously the gap becomes filled with gas in typical EDM processes. Hundreds of debris particles are generated per single pulse discharge, blown off through the bubble generated by the discharge and stopped at the boundary of the bubble due to the viscosity of the dielectric liquid.

Esercizio condensatore

Debris particles

- In the liquid the debris particles proceed straight through the gas bubble and penetrate the bubble wall, and as a result decelerate. They then solidify into a spherical shape under the influence of surface tension as shown in Figure (b), confirming that the dielectric liquid is important for the cooling and flushing of debris particles but not for material removal.



Shapes of debris generated in a) air and b) liquid.

Electric breakdown: why lower than in lab conditions?

- A simplest explanation for the decrease in the dielectric breakdown strength is that the electrically conductive debris particles reduce the apparent gap width by a distance equal to the diameter of the particles. However, the measured gap width is occasionally larger than $100\mu\text{m}$, whereas the measured average diameter of debris particles is only $25\mu\text{m}$ under a certain pulse condition. This result can be explained in terms of the movement of debris particles in the gap.
- Many researchers found that the debris particles move between the anode and cathode in a direction perpendicular to the electrode surfaces due to electrophoresis. They also observed that some particles are linked in series to form chains parallel to the electric fields.

Catene di particelle erose

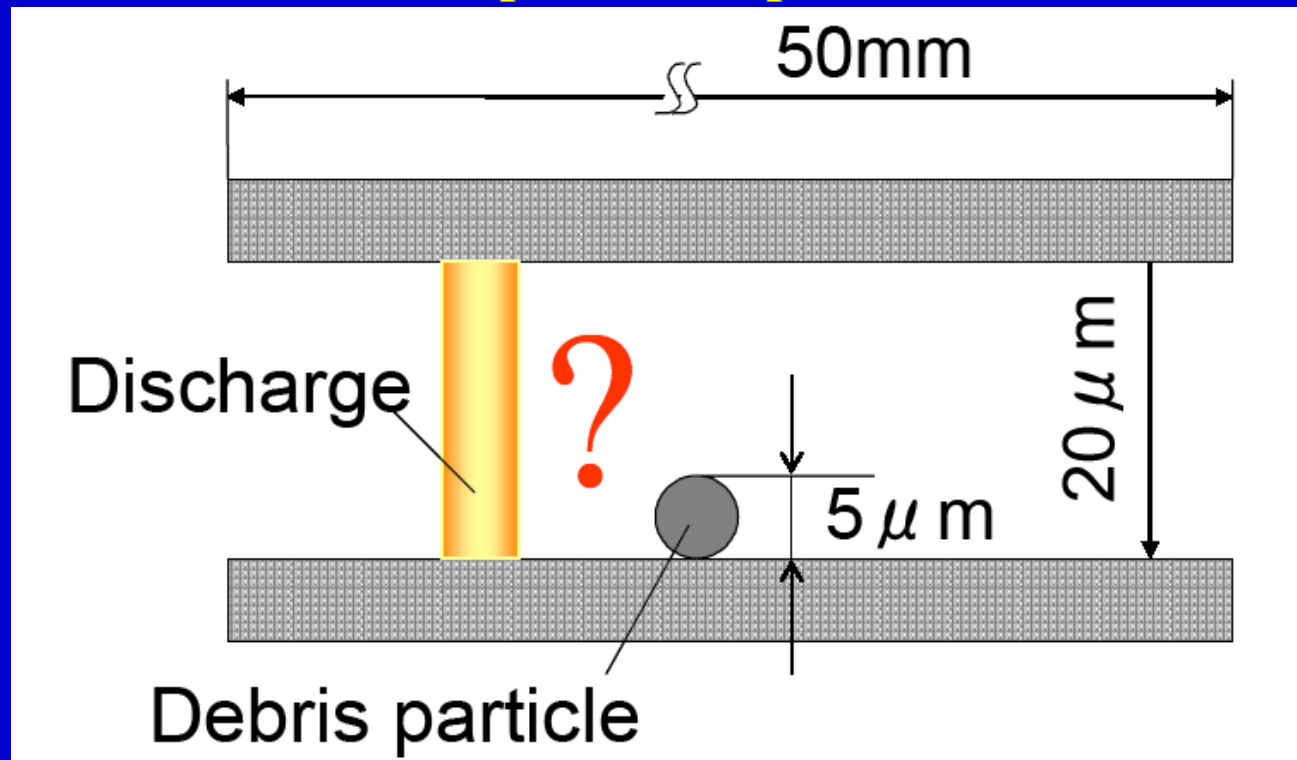
- From the observed results Bommeli et al. [4] and Kunieda et al. [80] hypothesized that in the gap there are numerous chains of particles which almost bridge the gap and that discharge occurs at the site at which the end of a chain is closest to the opposite electrode surface. Bommeli et al. [4] statistically investigated the distribution of ignition delay time to demonstrate that discharge occurs after an activation time which is necessary for debris particles to form bridges between the electrodes.

Particelle in movimento

- Kunieda et al. calculated the electrophoresis-induced motion of a particle and found that the time interval for 30 μ m diameter steel particle to reciprocate between the parallel plane electrodes and the average velocity were 1.32ms and 0.136m/s, respectively showing a good agreement with the results of observation using a high-speed video camera.
- The velocity is high enough for the last particle to enter small gaps between the end of the bridge already present and the opposite electrode surface and ignite the discharge during the ignition delay time.

EDM is a statistical process

In order to further study the influence of debris particles, a debris particle with a diameter of $5\mu\text{m}$ is placed in a gap of $20\mu\text{m}$ in width as shown in Figure 30. If it is true that discharge occurs at a point where the gap is shortest, the discharge will probably occur at the point where the debris particle is placed.

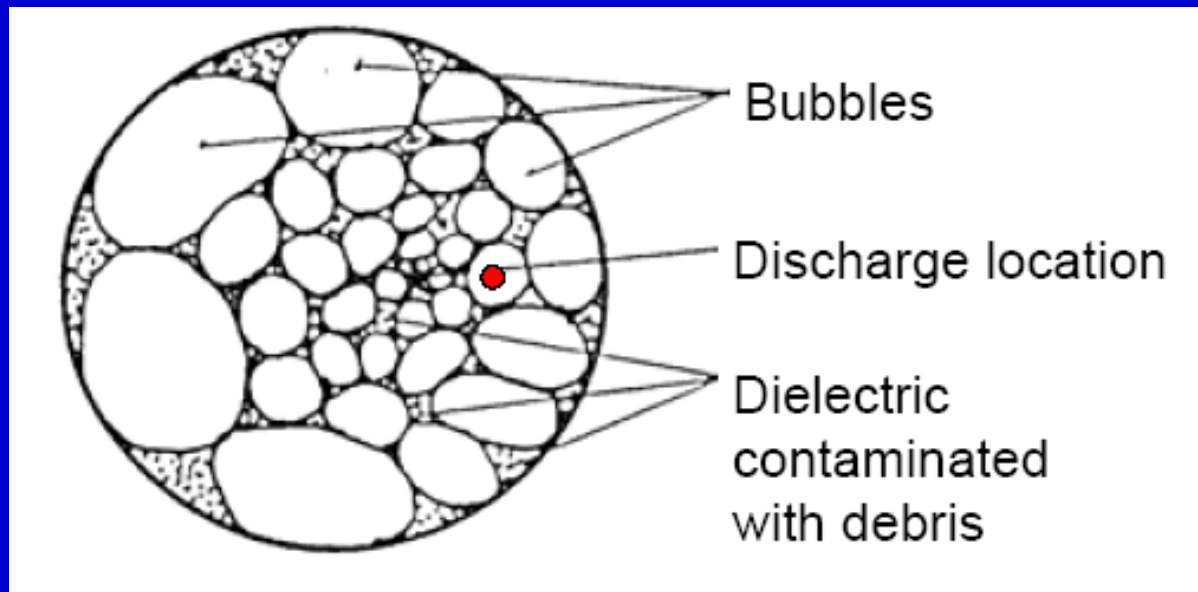


Reasons why...

- This is because occurrence of discharge is a probabilistic phenomenon and the probability of occurrence of discharge per unit area is not zero even if the gap width at the place is longer than other places.
- Since the projected area of the debris particle in the direction normal to the electrode surface is negligible compared with the area of the electrodes (50mm×50mm), the probability of occurrence of discharge at a point where the debris is not placed is greater than that at the point where the debris is placed.

Bubbles

Miyajima et al. found that the working gap is mostly occupied by bubbles although the working gap is submerged in dielectric liquid.



Localised discharges

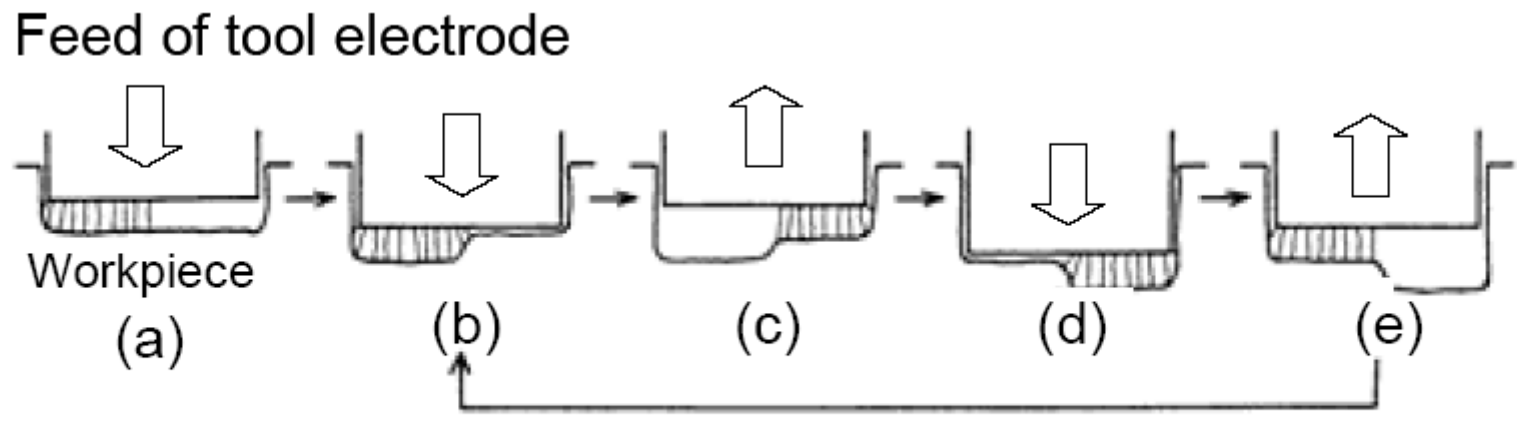
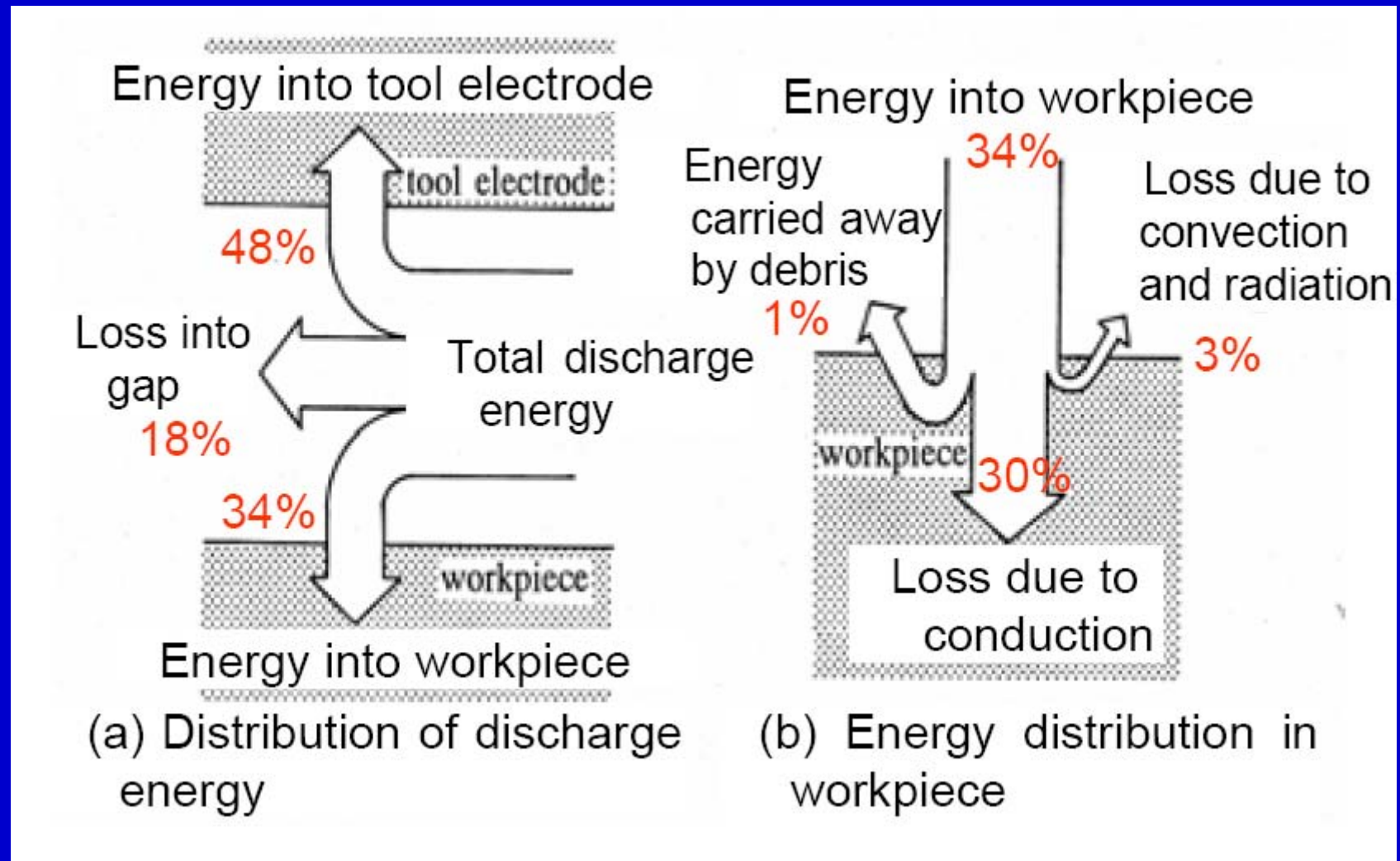


Figure 33: Mechanism of movement of localized discharge.

If the flushing of sludge is difficult, local distribution cannot be eliminated once it is created at some area, even if the gap width of the other regions is narrower, since the dielectric strength is considerably decreased due to contamination in the localized area. Meanwhile, the localized area moves to other regions, where the gap width is sufficiently short. At this moment, the position of the tool electrode is retracted resulting in the fluctuation of the feed speed.

Distribuzione dell'energia nel pezzo nell'utensile e nel dielettrico

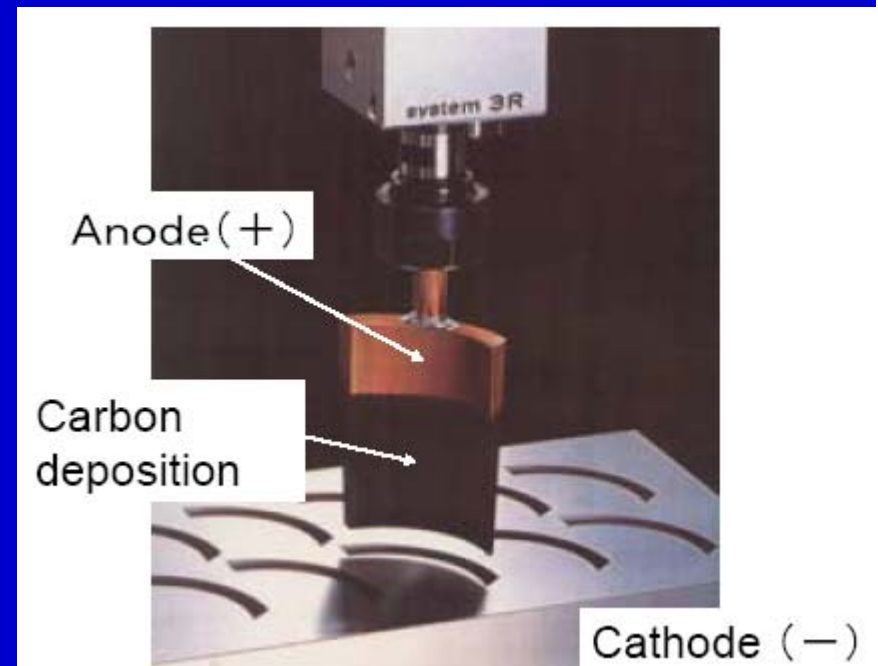


Energy distribution in EDM process ($I_e:16A$, $t_e:100\mu s$, $Cu(+)-Cu(-)$).

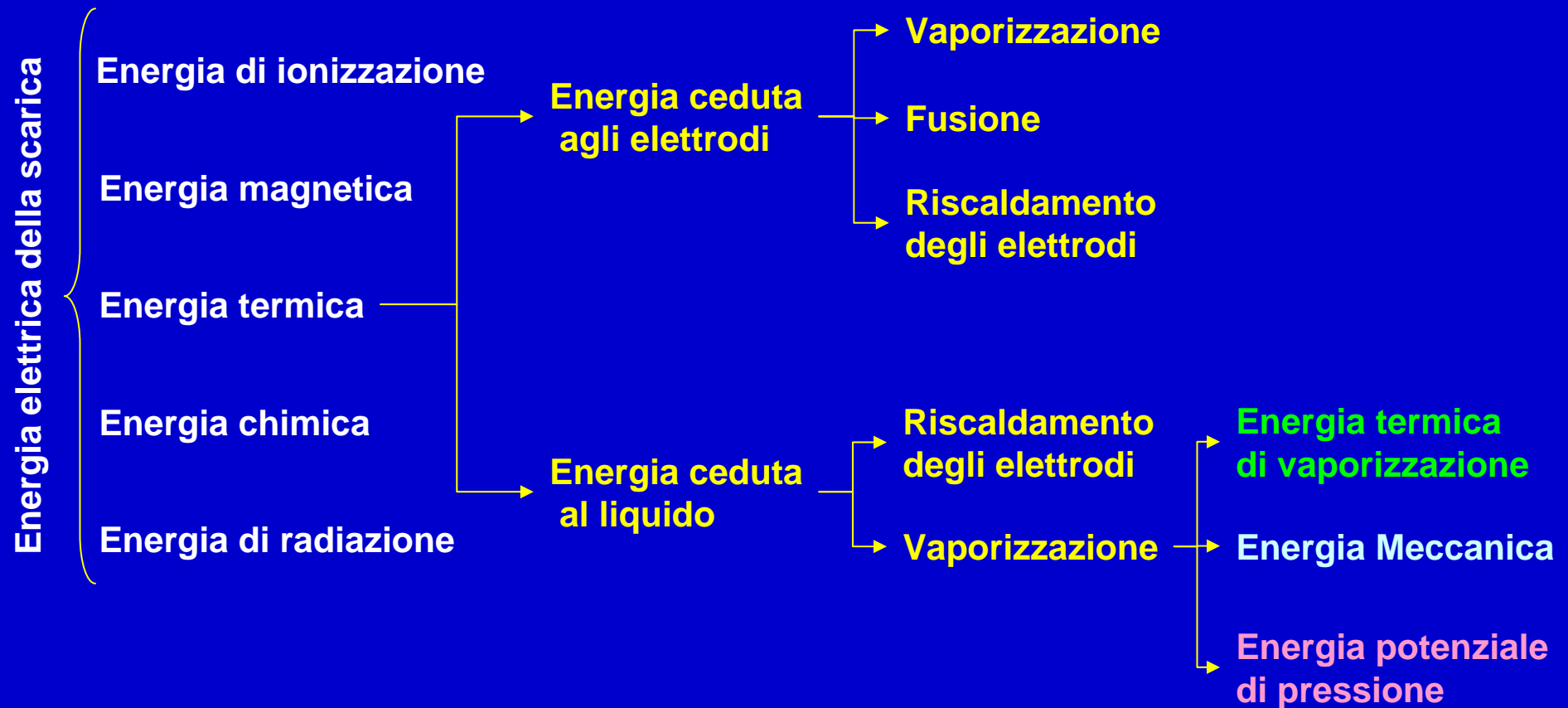
Deposition of pyrolytic carbon on anode in hydrocarbon dielectric

The energy distribution to anode and cathode is about 40% and 25%, respectively. They reported that the energy distributed to anode is always greater than that to cathode, and is rarely affected by the discharge duration, in both single discharge and continuous pulse discharges.

It was concluded that the difference in removal amount between anode and cathode is mainly caused by the phenomenon of carbon adhesion onto the anode surface, not by energy distribution, when hydrocarbon dielectrics are used and both anode and cathode are made of copper.

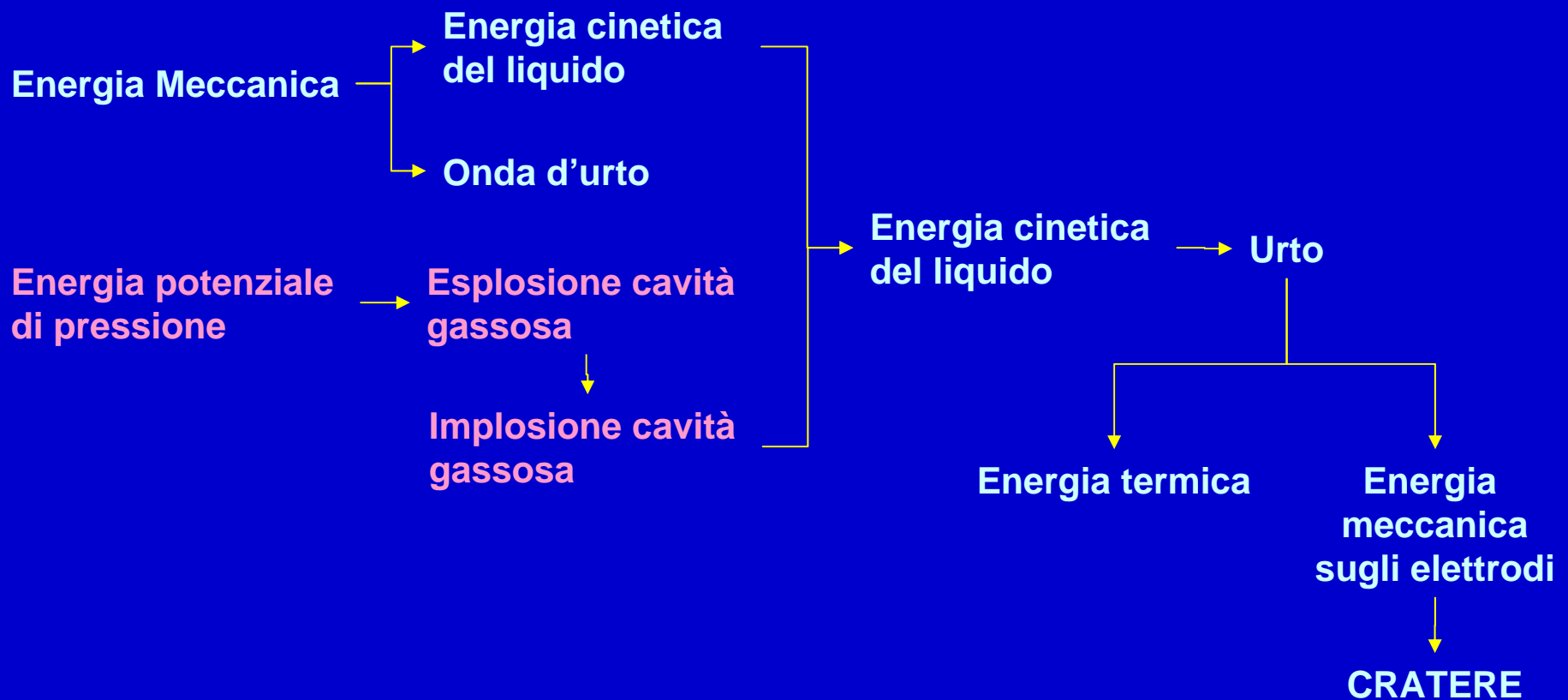


La fisica dell'elettroerosione (1 di 2)

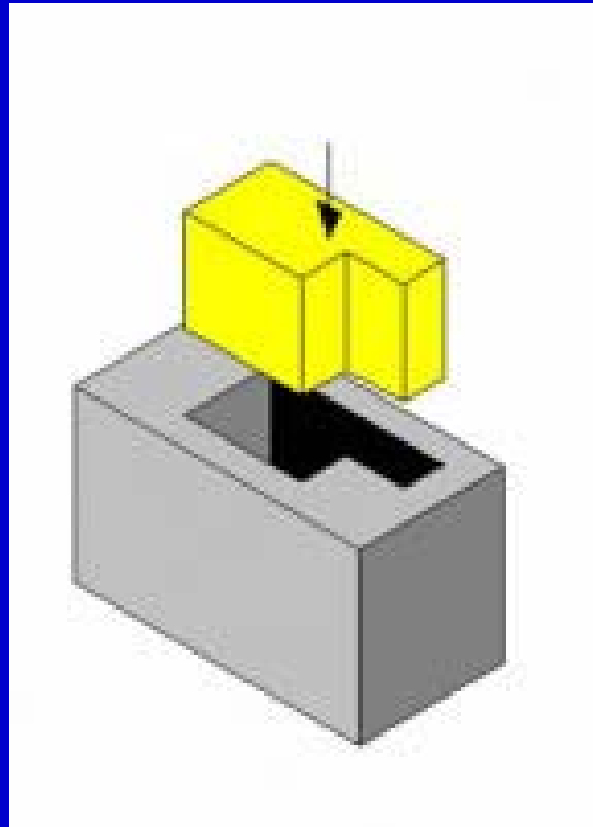


La fisica dell'elettroerosione (2 di 2)

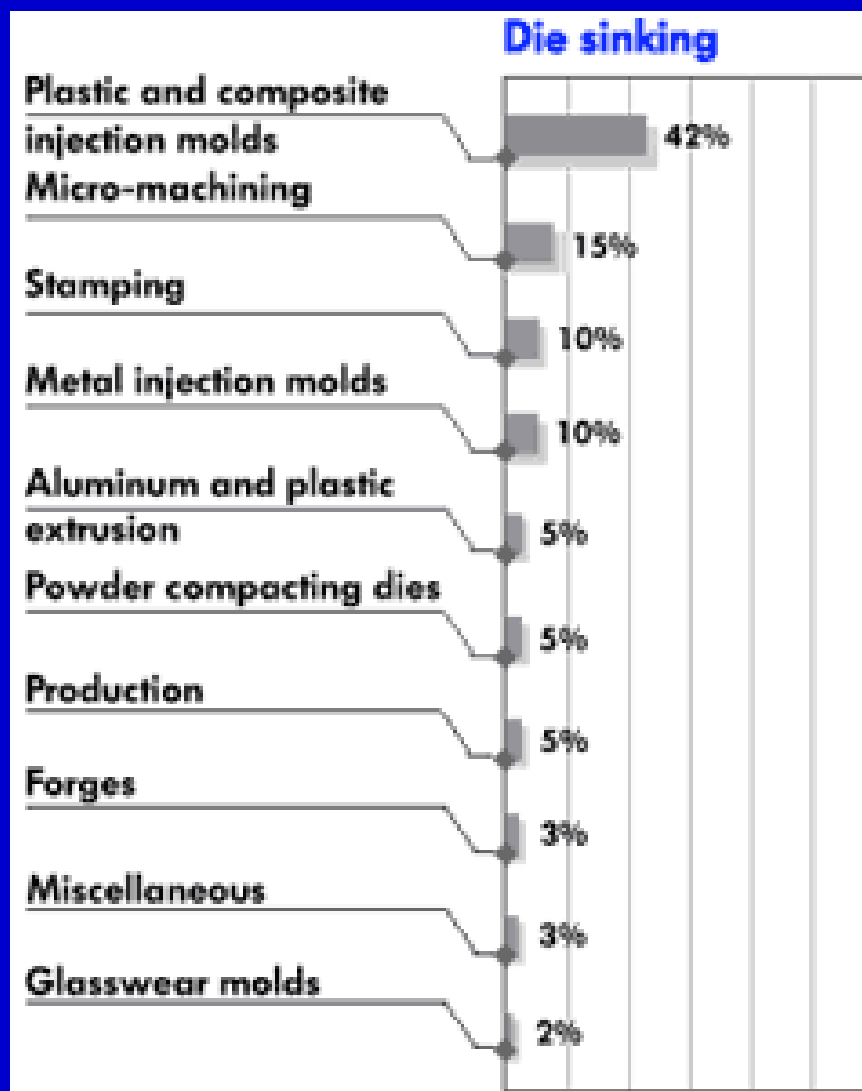
Energia termica
di vaporizzazione



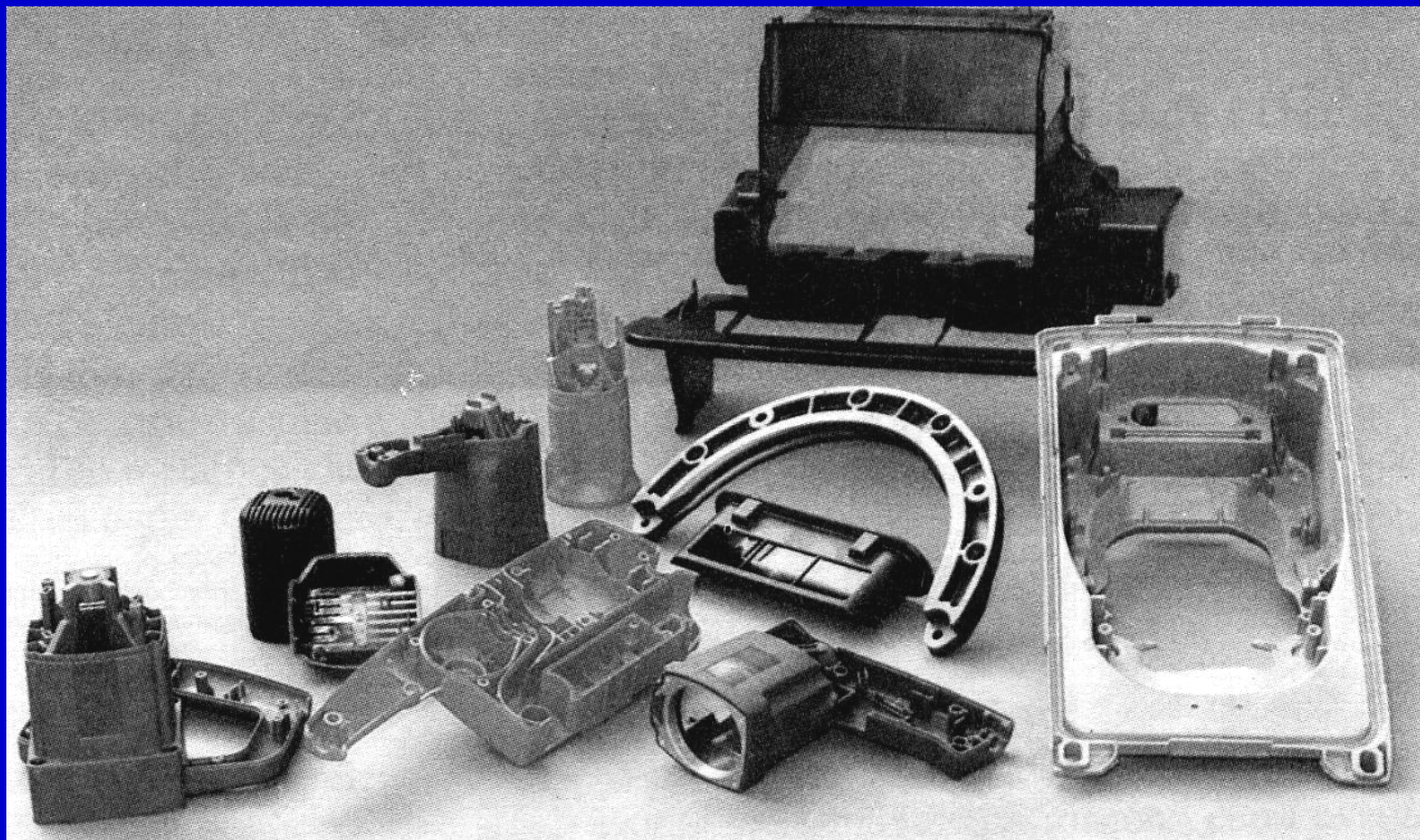
EDM a tuffo



EDM a tuffo: campi di impiego



Esempi di prodotti realizzabili



stampi per oggetti pressofusi

Opzioni per una nuova dimensione della lavorazione

Il comando ad interpolazione AGIE è concepito in modo ottimale per svolgere funzioni del processo e dell'impianto. Grazie all'asse C, si possono erodere economicamente geometrie sottoquadri, dentature oblique o slittoni. Il comando ad interpolazione può essere molto utile in caso di riparazioni oppure se si è dimenticato qualcosa: è possibile rinunciare a elettrodi specialmente prodotti, il che fa risparmiare tempo e denaro.

I percorsi piani e tridimensionali vengono eseguiti con gli assi x, y e z. Inoltre l'asse C può effettuare una rotazione sincrona o libera.

Copiatura parziale e totale con 4 assi (x, y, z e C).

Interpolazione lineare con 4 assi. Con gli assi x, y e z eseguite un percorso tridimensionale dal punto di partenza a quello di arrivo. Con l'asse C effettuate una rotazione sincrona in senso positivo o negativo rispetto al percorso.

Interpolazione circolare con 3 assi. Con l'asse x o y eseguite il percorso di elettroerosione lungo o corto. Inoltre, con l'asse C potete ruotare sincronamente in senso positivo o negativo rispetto al percorso.

Interpolazione circolare con 4 assi. Con gli assi x, y e z eseguite un'ellisse tridimensionale. Con l'asse C potete effettuare una rotazione sincrona positiva o negativa, oppure una rotazione libera.

I coni obliqui possono essere eseguiti vettorialmente con tre assi (x, y e z).

Sottoquadri con interpolazione circolare o rotazione dell'asse C.

Si può eseguire l'elettroerosione di forature curve girando l'asse C. Il raggio di curvatura resta limitato, i raggi più ampi vengono interpolati con x, y.

Elettroerosione con interpolazione assi x e C.

Forme a vite. L'asse C ruota sincronamente rispetto all'asse z.

Percorsi 2-D.

Grande varietà di forme grazie al comando di percorso
Tutti e quattro gli assi sono comandati simultaneamente (X, Y, Z e C). Con l'asse C completamente integrato nel sistema di comando si eseguono l'elettroerosione, il posizionamento e la rotazione. Pertanto, la fabbricazione di elettrodi può essere ridotta a pochi modelli standard. Ciononostante, la lavorazione di forme tridimensionali è praticamente illimitata poiché il percorso previsto viene effettuato mediante CNC.

Elettroerosione a tuffo con 4 assi per una grande libertà di forme tridimensionali
Con il comando ad interpolazione, la possibilità di eseguire l'elettroerosione in modo riproduttivo e a più stadi consente di creare tutte le forme immaginabili nello spazio tridimensionale. A tale scopo si hanno a disposizione 5 programmi di base.

