

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica Formativo

***Relazione per la prova finale***  
***«Analisi di fattibilità di risanamento***  
***pavimentazioni stradali con tecnologie***  
***elettrotermiche»***

Tutor universitario: Prof. Michele Forzan

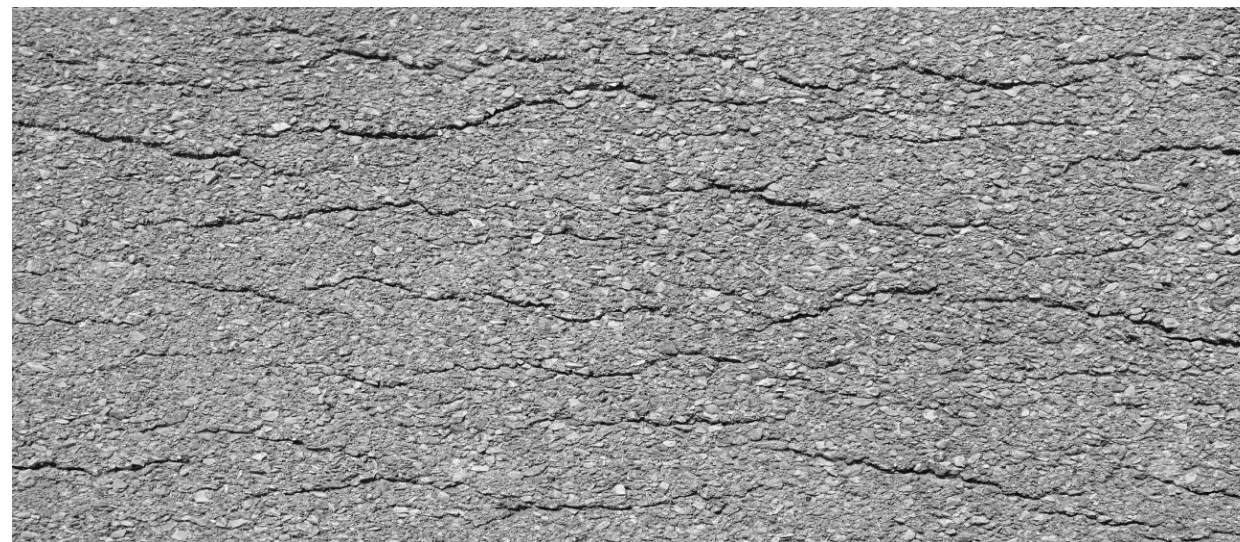
Laureando: *Alberto Didonè 1225199*

Padova, 12/09/2022

## Self-Healing

L'autoguarigione è una proprietà intrinseca del bitume:

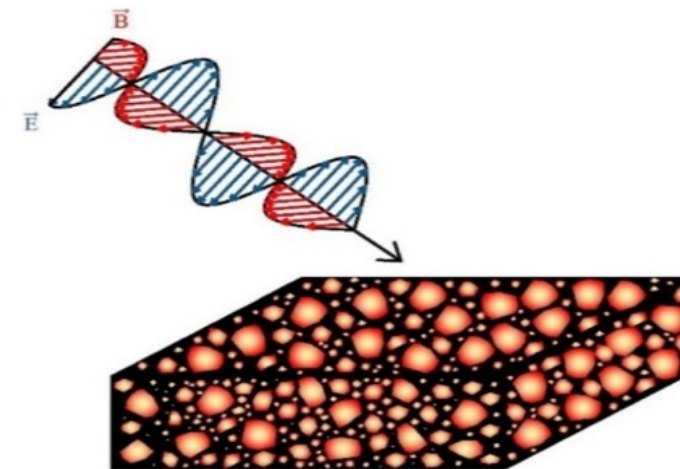
- composto termoplastico
- soglia critica 50°- 80°C (softening point)
- fluido Newtoniano
- autoriparazione per capillarità



*Macrofratture manto stradale*

Tecniche di riscaldamento localizzato basati su tecnologie elettrotermiche quali:

- **riscaldamento a microonde**
- **riscaldamento ad induzione**



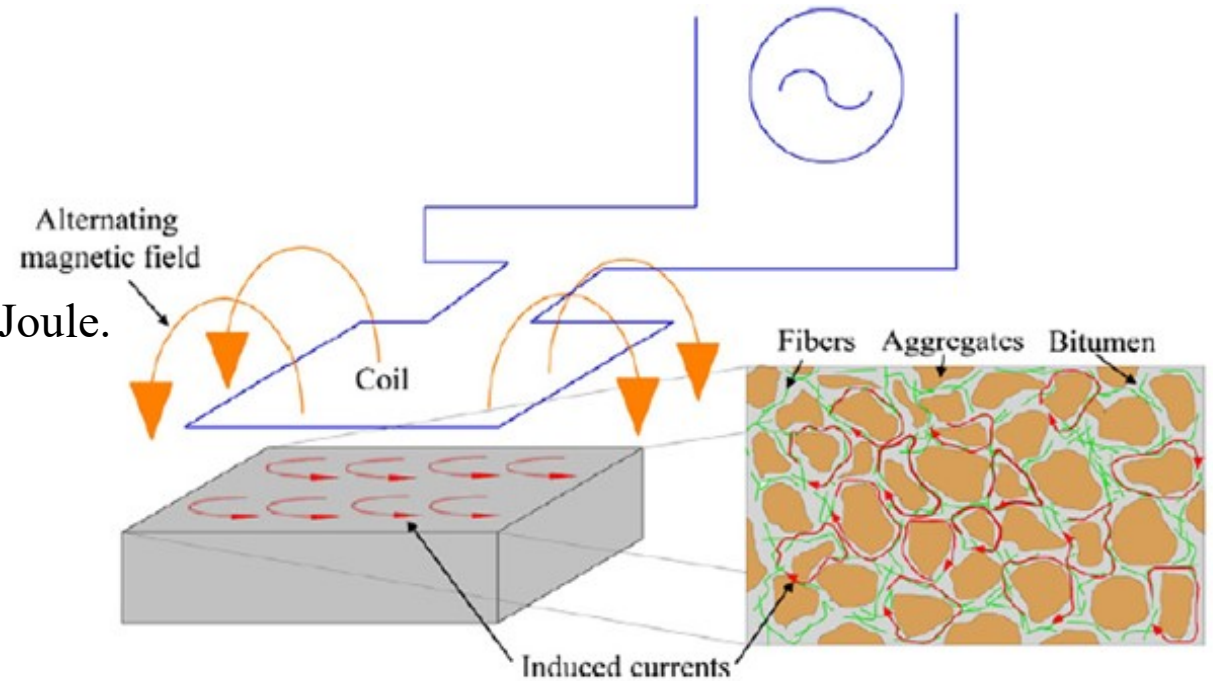
*Riscaldamento a microonde di pavimentazioni in asfalto*

## **Gli obiettivi della ricerca:**

- 1) Analisi e comprensione dei principi fisici alla base dei processi di riscaldamento a induzione e a microonde
  
- 2) Individuare i parametri operativi richiesti per l'utilizzo effettivo di tali tecnologie sul campo:
  - Proprietà di base richieste nel materiale
  - Tecniche per aumentare l'efficienza dei processi
  - Differenze tra riscaldamento ad induzione e riscaldamento a microonde
  - Limiti operativi dei processi
  - Possibili set-up su larga scala
  
- 3) Formulare una stima termodinamica dell'energia necessaria ad una porzione di manto stradale per raggiungere la temperatura di autoguarigione

## Riscaldamento ad induzione

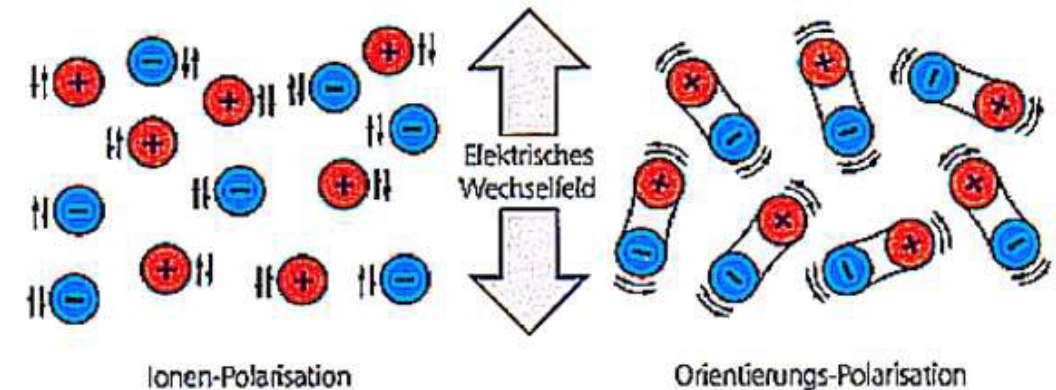
- materiale conduttore;
- la legge di Faraday;
- dissipazione energia sotto forma di calore per effetto Joule.



## Riscaldamento a microonde

- materiale dielettrico;
- polarizzazione delle molecole;
- il movimento delle molecole provoca una dissipazione di energia per attrito intermolecolare che scalda il materiale.

Schema riscaldamento ad induzione



Polarizzazione molecole dielettrico

Sotto l'azione del campo elettrico alternativo:

- il vettore polarizzazione risulta sfasato in ritardo rispetto al vettore dell'intensità del campo;
- il vettore D risulta sfasato in ritardo rispetto ad E di un angolo  $\delta_p$ ;
- $\alpha$  suscettibilità dielettrica del materiale è un numero complesso
- dalla relazione  $\alpha = \epsilon_r - 1$ , anche la permittività elettrica relativa è un numero complesso:
  - $\epsilon_r'$  = parte reale o costante dielettrica del materiale
  - $\epsilon_r''$  = fattore di perdita

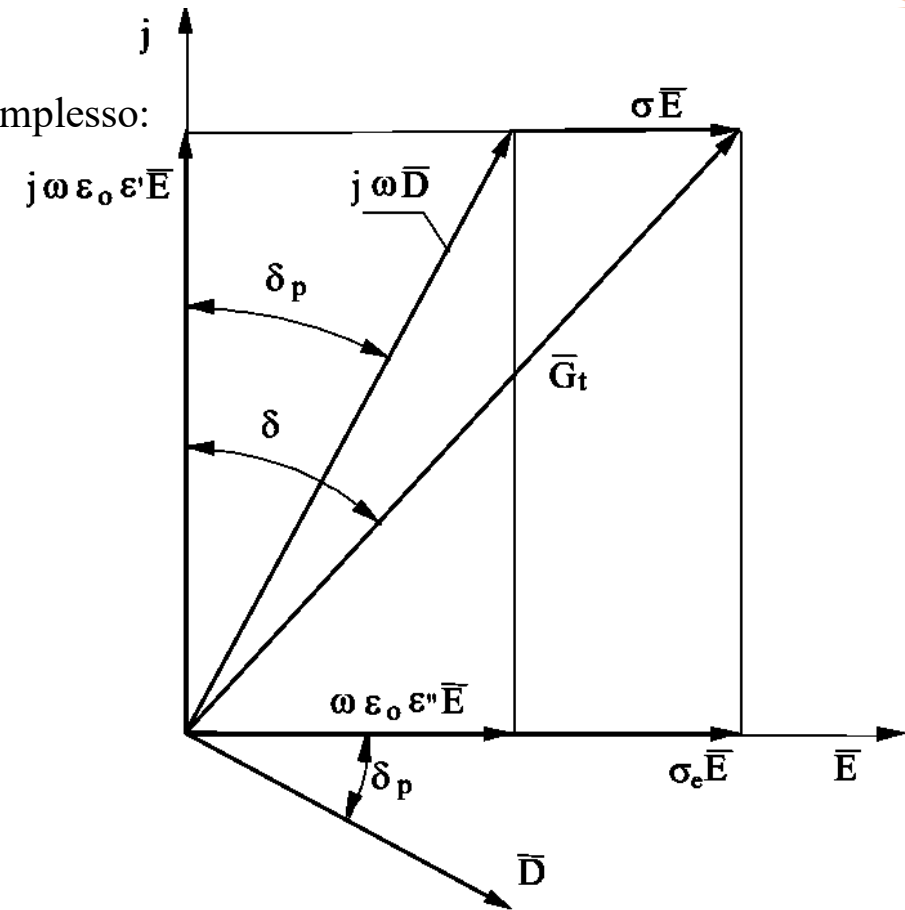
Dal diagramma fasoriale:

$$\sigma_t = j\omega\epsilon_0\epsilon'(1 - j\tg\delta)$$

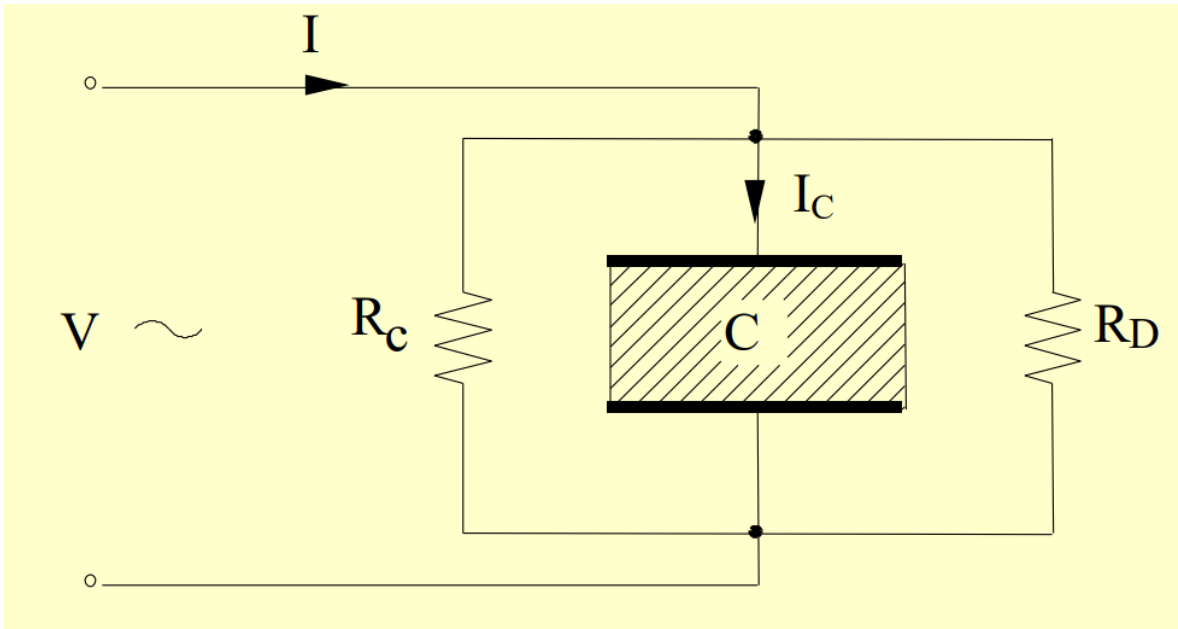
$$\tg\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} + \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0\epsilon'} = \tg\delta_p + \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0\epsilon'}$$

$\epsilon_r''$  e  $\tan\delta$  caratterizzano le proprietà di un dielettrico:

$$\mathbf{p} + j\mathbf{q} = \omega \mathbf{E}^2 \epsilon_0 \epsilon' (\tg\delta - j) \quad \text{Potenza complessa}$$



Rappresentazione fasoriale



$$I_C = j \omega C V = j \omega V \epsilon_0 \epsilon' \frac{S}{d}$$

$$I_R = I_C \operatorname{tg} \delta = \omega V \epsilon_0 \epsilon' \operatorname{tg} \delta \frac{S}{d}$$

$$I = I_C + j I_R = j \omega V \epsilon_0 \frac{S}{d} (\epsilon' - j \epsilon' \operatorname{tg} \delta) = j \omega \epsilon_0 \frac{S}{d} (\epsilon' - j \epsilon'')$$

$$P = V I_R = \omega V^2 \epsilon_0 \epsilon' \operatorname{tg} \delta \frac{S}{d} = \omega E^2 d^2 \epsilon_0 \epsilon_e'' \frac{S}{d}$$

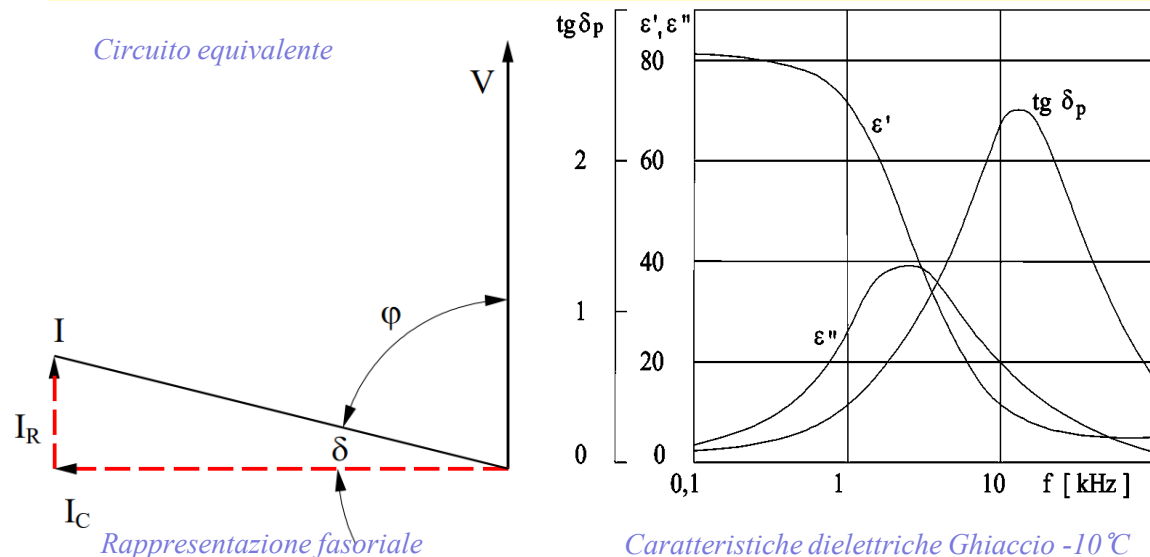
$$p = \frac{P}{S d} = \omega E^2 \epsilon_0 \epsilon' \operatorname{tg} \delta$$

Corrispondente alla potenza attiva dissipata in calore

**Quindi:**

- Fenomeni di polarizzazione causano uno sfasamento in ritardo di D rispetto ad E;
- Costante dielettrica e fattore di perdita variano in funzione delle frequenza;
- $\epsilon_r''$  e  $\operatorname{tan} \delta$  caratterizzano le proprietà di un dielettrico.

Circuito equivalente



Caratteristiche dielettriche Ghiaccio -10 °C

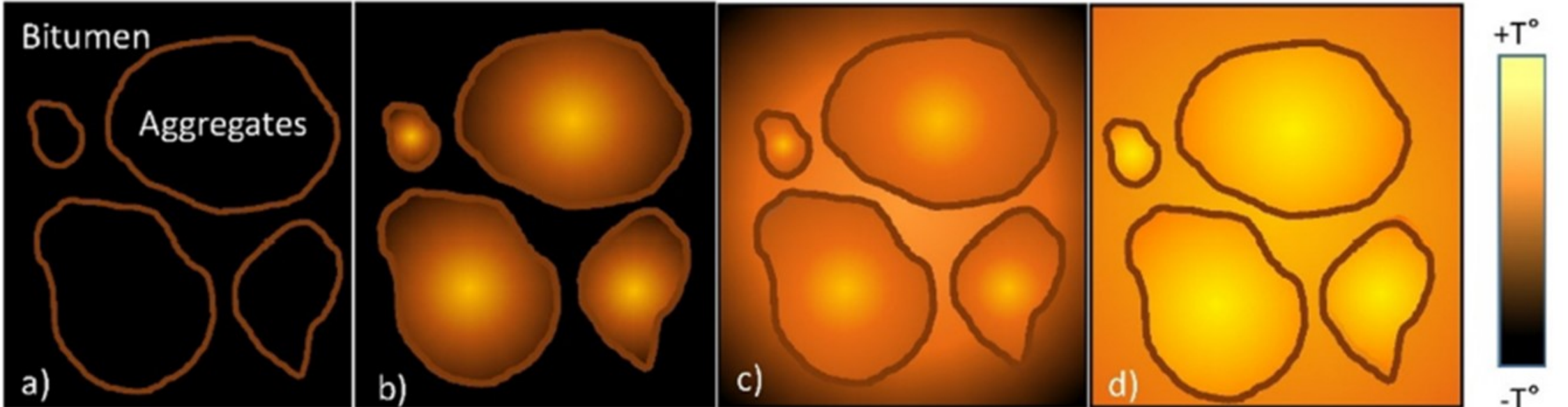
Rappresentazione fasoriale

**Asfalti convenzionali:**

- assenza proprietà conduttive;
- non presenta proprietà magnetiche;
- il bitume è dotato di basse proprietà dielettriche;
- il campo elettrico interagisce principalmente scaldando gli aggregati;
- aggregati di diorite, andesite, ofite e basalti presentano migliore affinità ai processi a microonde;
- aggregati di silicio, quarzo e calcari risultano svantaggiosi per questo tipo di applicazioni.



Scala qualitativa della suscettibilità degli aggregati al riscaldamento a microonde



Diffusione calore, riscaldamento a microonde Fonte: Microwave heating of asphalt paving materials: Principles, current status and next steps Federico Gulisano, Juan Gallego

## Asfalti per riscaldamento ad induzione

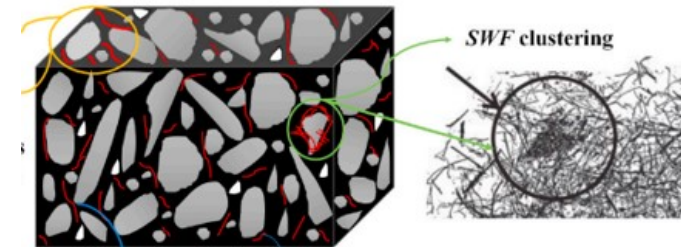
Necessitano della presenza di additivi conduttori:

- fibre di materiali conduttivi ovvero fibre di lana d'acciaio (SWF), fibre di carbonio e fibre di alluminio;
  - tendono ad accumularsi in maniera disomogenea nel materiale, provocando fragilità strutturale e un riscaldamento disomogeneo;
- a base polvere: graffite, carbone attivo e nero fumo;
  - utilizzo di grafene può comportare un degrado delle proprietà meccaniche del materiale;
- a base particelle come scorie d'acciaio (steel slags), particelle di acciaio, particelle di ferro e magnetite.

## Asfalti per riscaldamento a microonde

Non sono essenziali, ma migliorano l'efficienza energetica del processo:

- scorie d'acciaio (steel slags) max 9% del volume degli aggregati;
- lana d'acciaio (steel wool);
  - formazione di grappoli che causano peggioramento proprietà meccaniche e riscaldamento disomogeneo del materiale;
- nanomateriali in carbonio: nanopiastrine in grafene (GPN) e nanotubi in carbonio (CNT);
  - costi elevati di produzione.

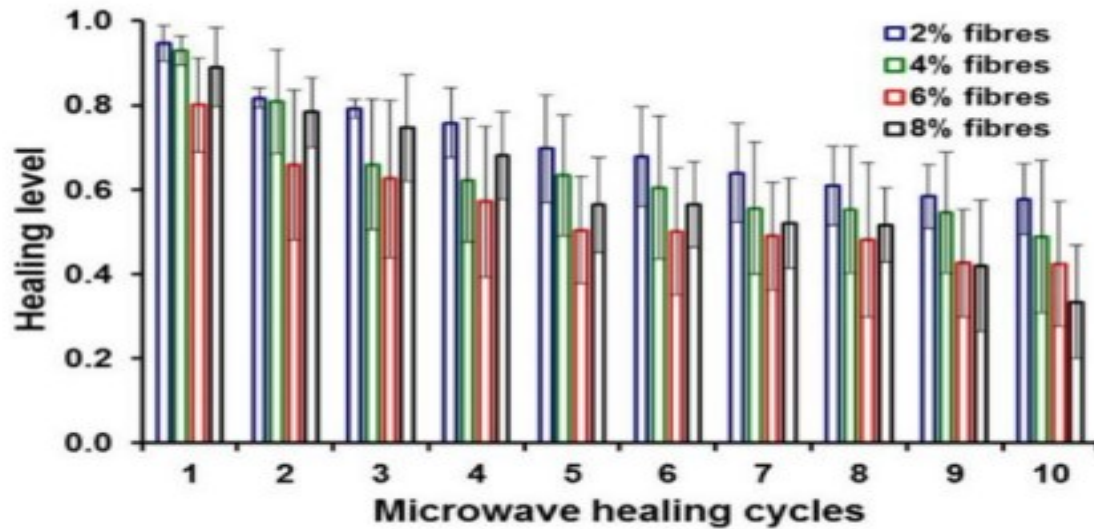


*Fibre di lana d'acciaio*



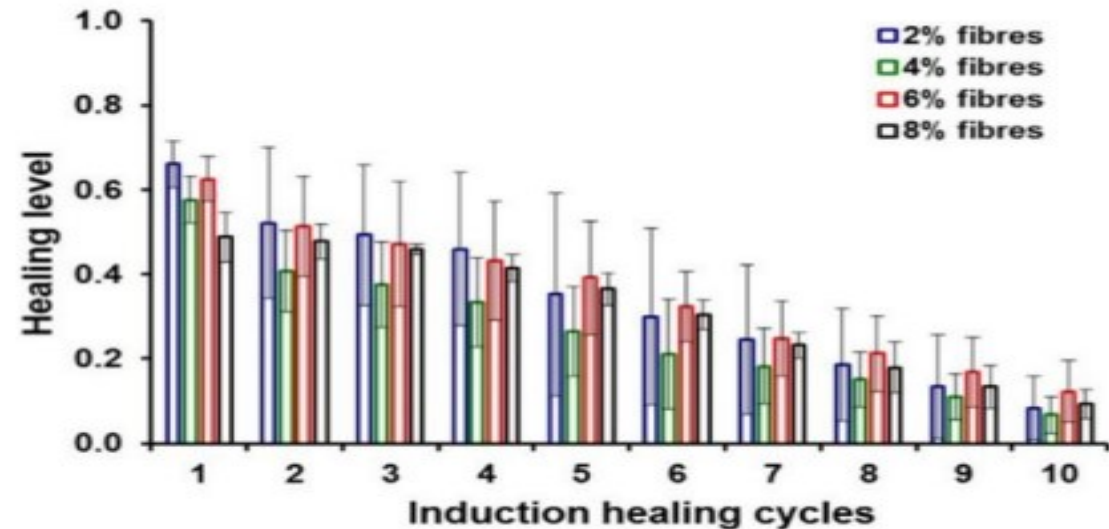
*Steel Slags*





(a)

*Livello di guarigione: a) riscaldamento a microonde, b) riscaldamento ad induzione*  
*Fonte J. Norambuena-Contreras, A. Garcia, Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating, Mater. Des. 106 (2016) 404–414,*

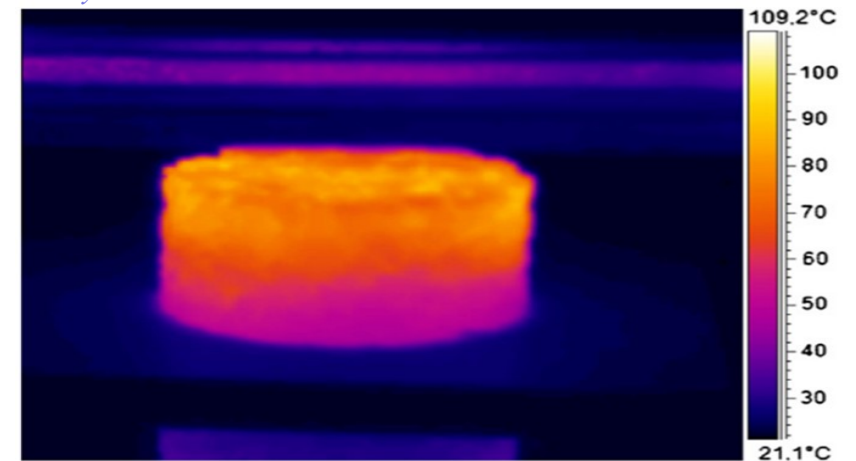


(b)

- Il riscaldamento a microonde è più efficace del riscaldamento a induzione;  
 -in percentuale di recupero delle proprietà meccaniche originali dopo il trattamento;

### Per entrambi:

- Il raggiungimento di una temperatura troppo elevata causa danni irreversibili all'integrità strutturale dell'asfalto
- L'efficienza energetica è proporzionale alla concentrazione di additivi fino al raggiungimento del livello di saturazione;
- Riscaldamento volumetrico, ma con una profondità limite di penetrazione nel materiale;



*Vista infrarossi campione asfalto con 6% fibre di acciaio, induzione*  
*Fonte: A simple model to define induction heating in asphalt mastic by Álvaro García, Erik Schlangen, Martin van de Ven, Quantao Liu.*

## Riscaldamenti ad induzione:

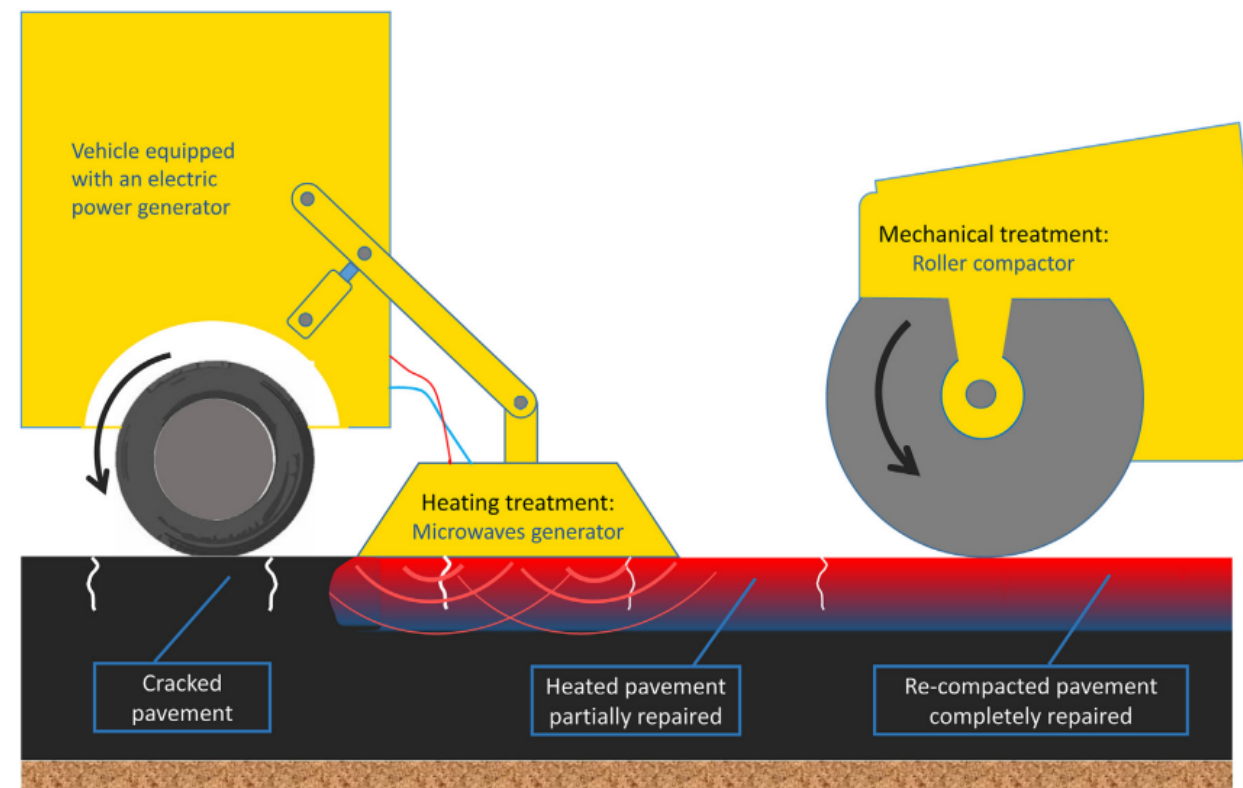
Predisporre uno strato di asfalto ingegnerizzato al di sotto del manto stradale convenzionale:

- costi contenuti di produzione e messa in opera di asfalti arricchiti da additivi;
- ottimizzazione del riscaldamento nell'area di effettiva comparsa delle cricche.

## Riscaldamento a Microonde

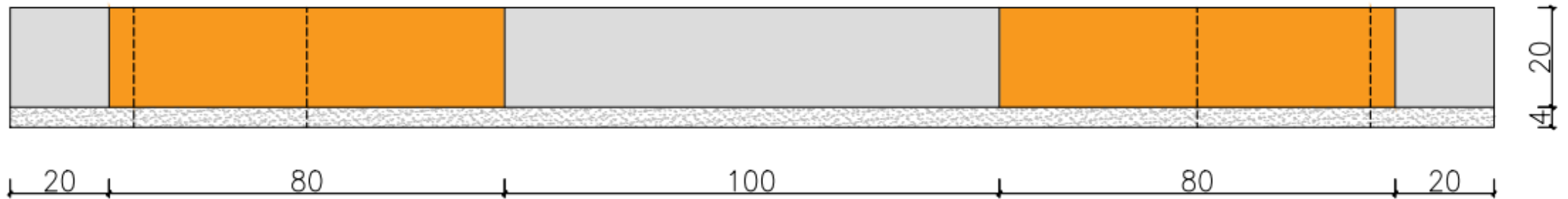
Procedura termomeccanica:

- 1) un generatore a microonde (5,8 GHz) con diverse antenne a tromba piramidali scalda uniformemente la pavimentazione;
- 2) un rullo compattatore favorisce la ricompattazione e la diffusione delle molecole dell'asfalto.



Schema trattamento di guarigione termomeccanico

Fonte: Optimising heat and re-compaction energy in the thermomechanical treatment for the assisted healing of asphalt mixtures by Juan Gallego, Federico Gulisano, Verónica Contreras, Antonio Páez



### Ipotesi:

- strada di categoria E (Strade urbane di quartiere) larghezza totale di 3m;
- considero due strisce parallele di larghezza  $w=80\text{cm}$  per carreggiata;
- profondità garantita del riscaldamento  $h=20\text{cm}$ ;
- variazione di temperatura necessaria  $\Delta T=60^\circ\text{C}$ ;
- dati del materiale: asfalto comune avente densità  $\rho=2600\text{ Kg/m}^3$  e calore specifico  $C=900\text{ J/Kgk}$ .

## Energia necessaria per scaldare 1km di manto stradale

- $M_t$  massa totale di asfalto considerato in 1km:  
 $\rightarrow M_t = 2 * L * w * h * \rho = 2 * 1000 * 0.8 * 0.2 * 2600 = 832000\text{ kg}$
- L'energia  $E$  necessaria per scaldare di  $\Delta T$  la massa  $M_t$  sarà pari a:

$$\rightarrow E(\text{J}) = M_t * C * \Delta T = 832000 * 900 * 60 = 4.493 \times 10^{10}\text{ J}$$

$$\text{In KWh: } E(\text{KWh}) = \frac{E(\text{J})}{3600000} = \frac{4.493 \times 10^{10}}{3600000} = \mathbf{12480\text{ KWh}}$$

Da questa breve relazione si deduce che la tecnologia del riscaldamento a microonde ed a induzione in un prossimo futuro potrebbero contribuire a migliorare la sostenibilità dell'industria dedicata alla costruzione e manutenzione delle pavimentazioni stradali.

Tuttavia ad oggi alcuni ostacoli limitano la diffusione di questa tecnologia:

- la mancanza di normalizzazione, soprattutto nelle procedure di laboratorio per valutare la velocità di riscaldamento delle miscele di asfalto;
- l'assenza di una soluzione tecnica per l'implementazione di apparecchiature sul campo a fronte di un processo estremamente energivoro (stima termodinamica dell'energia necessaria per scaldare 1 Km di strada: 12480 KWh).