



Università degli Studi di Padova
Dipartimento di Geoscienze
Corso di Laurea Triennale in Scienze Geologiche

Applicazioni di tecniche diagnostiche non distruttive per la caratterizzazione e il confronto delle proprietà fisico-meccaniche e termiche di materiali litici

Relatrice:
Prof.ssa Eloisa Di Sipio

Correlatore:
Prof. Antonio Galgaro

Laureanda:
Silvia De Marchi

22 settembre 2022
A.a. 2021/22



Sommario

- *Obiettivi*
- *Campioni*
- *Misure ultrasoniche*
- *Misure termiche*
- *Risultati*
- *Conclusioni*
- *Sviluppi futuri*



Obiettivi

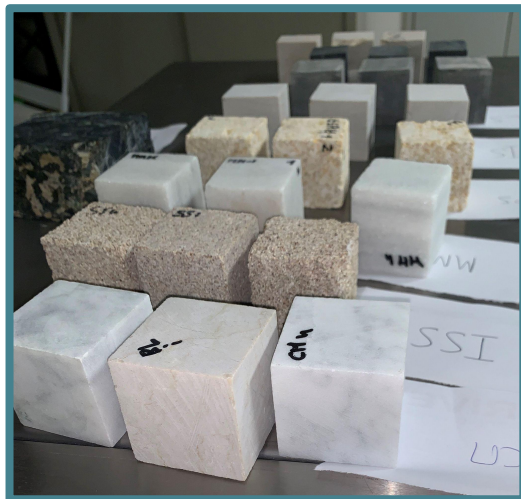
- confronto e caratterizzazione delle **proprietà fisico-meccaniche e termiche di materiali litici**
- definizione di un ***approccio metodologico*** nell'uso della ***strumentazione termica*** di nuova acquisizione

Obiettivi - motivazioni della ricerca

- Ricerca ambito geotermico: *database, verifica misure acquisite in situ, modellazione, possibile riuso pozzi abbandonati di idrocarburi a fini geotermici*
- Altri ambiti di ricerca in geologia (*beni culturali, geotecnica...*)

Campioni

- Campioni **cubici**, lato di 5 cm;
- **17 litologie** (5 magmatiche, 2 metamorfiche, 10 sedimentarie)
- **3 campioni** per litologia (tot. 51)



Genesi	Litologia	Campione
SED	<i>Pietra di Santa Pudia</i>	GSP
	<i>Calcarene (Capo Granitola, Sicilia)</i>	CAR-GT
	<i>Pietra di Costozza</i>	CS
	<i>Pietra di Sfouggaria</i>	SS
	<i>Rosso Ammonitico Veronese (VR)</i>	RV2
	<i>Calcere di Bari (BA3.1 Bari, Puglia)</i>	CALC-BA
	<i>Pietra di Lartios</i>	LS
	<i>Rosso di Verona</i>	RV
	<i>Pietra d'Istria</i>	IS
	<i>Pietra di Botticino</i>	BL
MAG	<i>Trachite euganea</i>	ETR
	<i>Riolite (Porfido di Ora, TN)</i>	RIO
	<i>Granito (Sardegna)</i>	GR
	<i>Sienite norvegese</i>	TSY
	<i>Basalto (VR)</i>	BAS
MET	<i>Marmo di Carrara</i>	CM
	<i>Marmo di Macael</i>	MM

* da bibliografia

Campioni - dati di partenza

Densità:

→ **minori** per rocce più **porose** (es. GSP, CAR-GT, CS)

→ **maggiori** per rocce più **compatte** (es. BAS, CM, IS...)

Campioni	ρ_b (kg/m ³)	porosità (%)
IS	2711	0,09
GSP	1725	19,65
RV	2693	0,08
CS	2448	28,95
SS	2450	18,7
LS	2670	1,06
CAR-GT	1841	≈40*
CALC-BA	2665*	0,5-2,0*
RV2	2646*	2,07*
BL	2740	0,29
TSY	2720	0,455
GR	2591*	1,354*
ETR	2380	0,82
RIO	2564*	2,769*
BAS	3021*	0,652*
MM	2718	0,1-0,6
CM	2707	0,46

*da bibliografia

Campioni - dati acquisiti

PROPRIETÀ FISICO-MECCANICHE

V_p

Velocità onde compressionali (primarie, longitudinali); (km/s)

V_s

Velocità onde di taglio (secondarie, trasversali); (km/s)

PROPRIETÀ TERMICHE

λ
conducibilità
termica

Quantità di calore che fluisce ($W/m \cdot K$)

α
diffusività
termica

Tasso di scambio termico (mm^2/s)

Metodologie

→ Metodi **non distruttivi**:

Epoch 600 (ultrasuoni):
proprietà elastiche e velocità

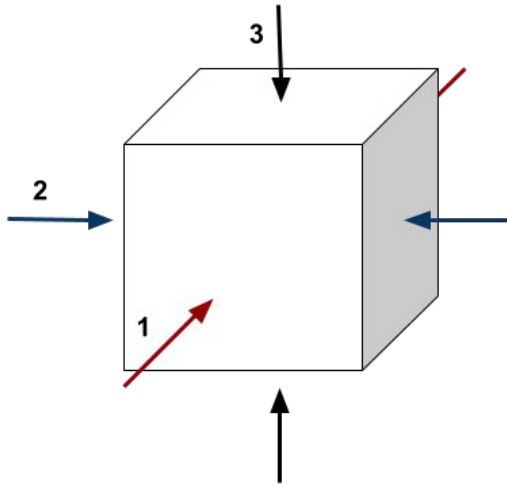


TCS (*Thermal Conductivity Scanner*):
conducibilità e diffusività termiche



strumentazione di nuova acquisizione

Misure ultrasoniche



- **Tre misure** per ciascun campione;
- Una misura per ogni coppia di lati perpendicolari (verifica anisotropia);
- Misure in condizioni:
 - ◆ **anidre (dry)** → 24h in forno a 70°C
 - ◆ **sature (wet)** → 48h in acqua

Misure ultrasoniche

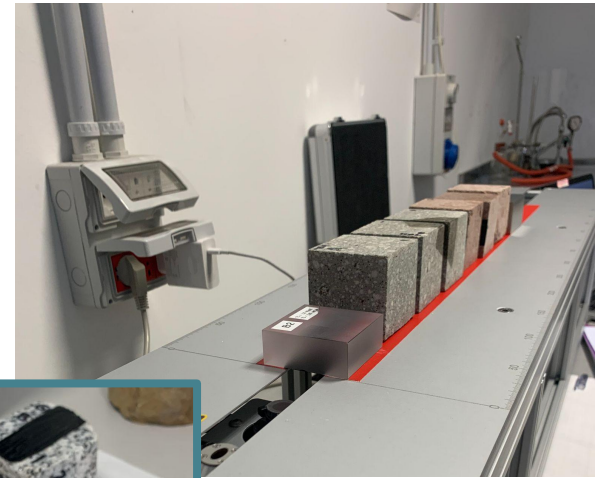
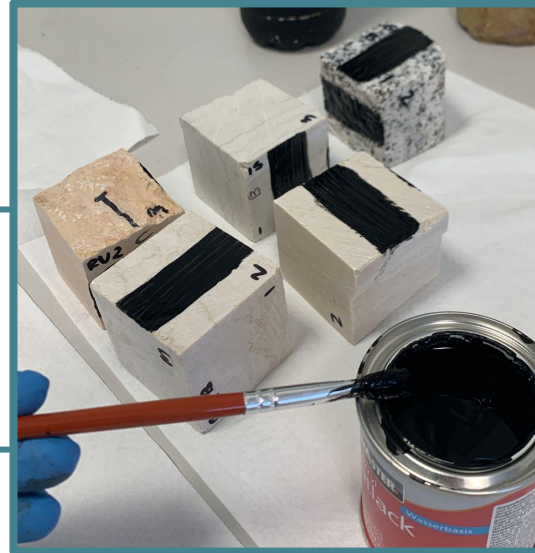
- strumentazione dotata di un **ricevitore** e un **trasmettitore**;
- misurati i tempi di viaggio del segnale tra i due sensori (in μs);
- utilizzo di trasduttori specifici per onde P e le S e gel per ottimizzare il contatto trasduttore-roccia;



Misure termiche

- Misura della **conducibilità** (λ) e **diffusività** (α) **termiche**;
- Adozione di due modalità di acquisizione: **TC** e **TC+TD**;

Preparazione dei campioni:
superficie trattata con una vernice
nera per minimizzare gli effetti di
diffusione ottica di ritorno sui sensori



Misure termiche

1. Verifica differenza acquisizione tra mod. **TC** e mod. **TC+TD**
2. Conferma della possibilità di usare entrambe le metodologie su tutte le litologie selezionate

Lo strumento, per confronto con degli standard (1, 2) determina i parametri termici dei campioni (3);

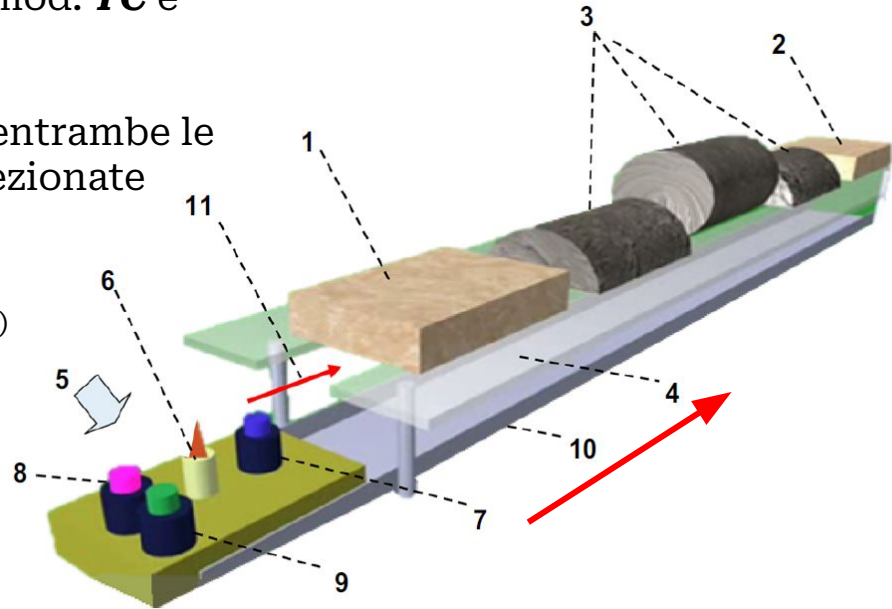
Altri componenti:

Sorgente di calore (6)

Sensore freddo (*cold*, 7)

Sensore caldo (*hot*, 8)

Sensore laterale (*hot y*, 9) → usato in mod. TC+TD



Accuratezza e precisione: TC: 3 % ; TD: 5 %

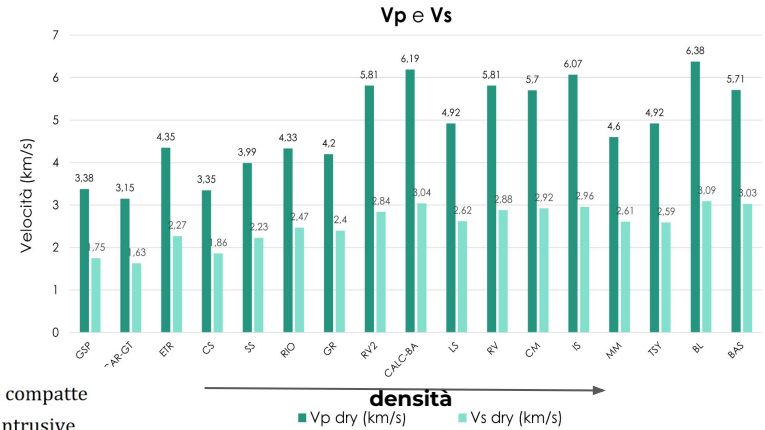
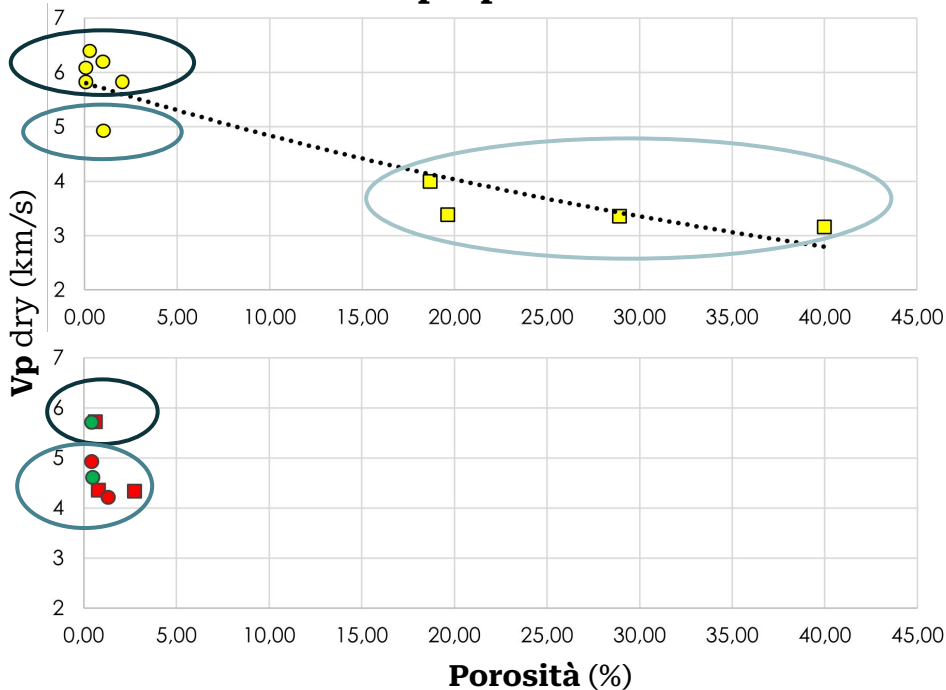
Velocità di scansione: 5 mm/s

Range: TC: da 0,2 a 25 W/m · K; TD: da 0.6 a 3,0 mm²/s

Risultati ultrasuoni - V_p e V_s dry

→ V_p e V_s **medie** per ciascuna delle 17 litologie

V_p e porosità



- Sedimentarie compatte
- Magmatiche intrusive
- Metamorfiche
- Magmatiche effusive
- Sedimentarie porose

→ **5,5-6,5 km/s**: sed. compatte (es. RV, IS, BL), una magmatica (BAS) e una metamorfica (CM);

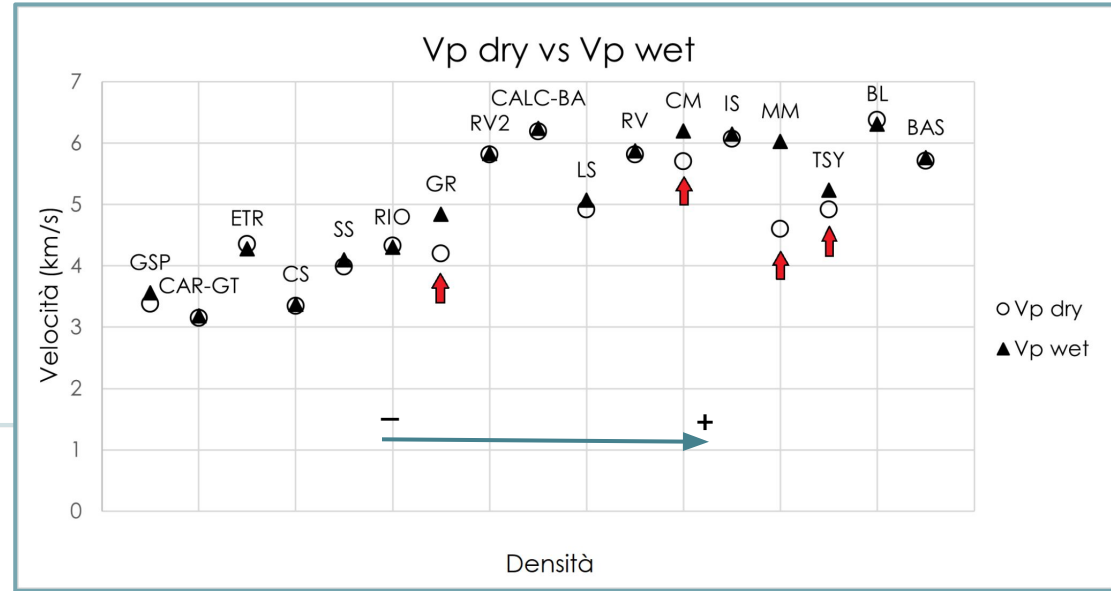
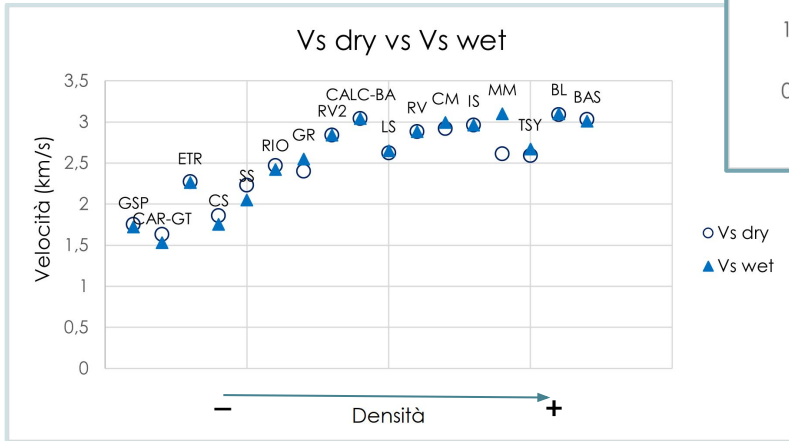
→ **4,0-5,0 km/s**: magmatiche intrusive (GR, TSY) ed effusive (RIO, ETR), una metamorfica (MM) e una sed. compatta (LS);

→ **3,0-4,0 km/s**: arenarie e calcareniti (SS, CS, GSP, CAR-GT);

Risultati ultrasuoni - dry vs wet

Per le onde di volume (P, S) il tipo di fluido nei pori (*acqua/aria*) ha poca influenza sulla trasmissione dell'onda acustica:

→ complessivamente **non** risultano **significative differenze tra dry e wet**



Anomalia: differenze notevoli per **CM, MM, GR, TSY**
→ da verificare condizioni di contatto tra granuli e fratturazione interna

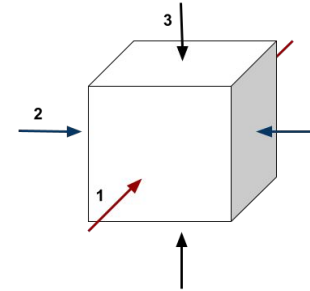
Risultati ultrasuoni - anisotropia

$$\Delta M = \left(1 - \frac{2Vp_1}{Vp_2 + Vp_3} \right) \cdot 100$$

Litologie risultate anisotrope:

- *Pietra d'Istria* (**IS**);
- *Calcere di Bari* (**CALC-BA**);
- *Basalto* (**BAS**);
- *Rosso di Verona* (**RV**);
- *Calcarenite di Capo Granitola* (**CAR-GT**);
- *Marmo di Macael* (**MM**);
- *Pietra di Lartios* (**LS**);

Campione	$ \Delta M $ (%)
IS	3,5
GSP	1,0
ETR	0,1
TSY	1,2
RV	3,8
CS	1,3
CM	0,1
SS	0,5
MM	11,5
LS	11,5
BL	1,0
RIO	2,6
GR	2,7
CAR-GT	4,9
CALC-BA	3,7
BAS	3,7
RV2	*



Risultati ultrasuoni - moduli elastici

→ **Rapporto di Poisson, ν**

Grado in cui il campione di materiale si restringe o si dilata trasversalmente (con sollecitazione uniassiale longitudinale);

$$\nu = \frac{(V_P/V_S)^2 - 2}{2[(V_P/V_S)^2 - 1]}$$

→ **Modulo di Young, E**

Modulo di elasticità lineare; rapporto sforzo-deformazione longitudinale (in condizioni di carico monoassiale);

$$E = 2\rho_b V_S^2 (1 + \nu)$$

→ **Modulo di taglio, G**

Modulo di elasticità tangenziale; rapporto sforzo-deformazione tangenziali;

$$G = \frac{E}{2(1 - 2\nu)}$$

→ **Modulo di Bulk, K**

Modulo di compressibilità; incremento di pressione necessario a causare un relativo incremento di densità;

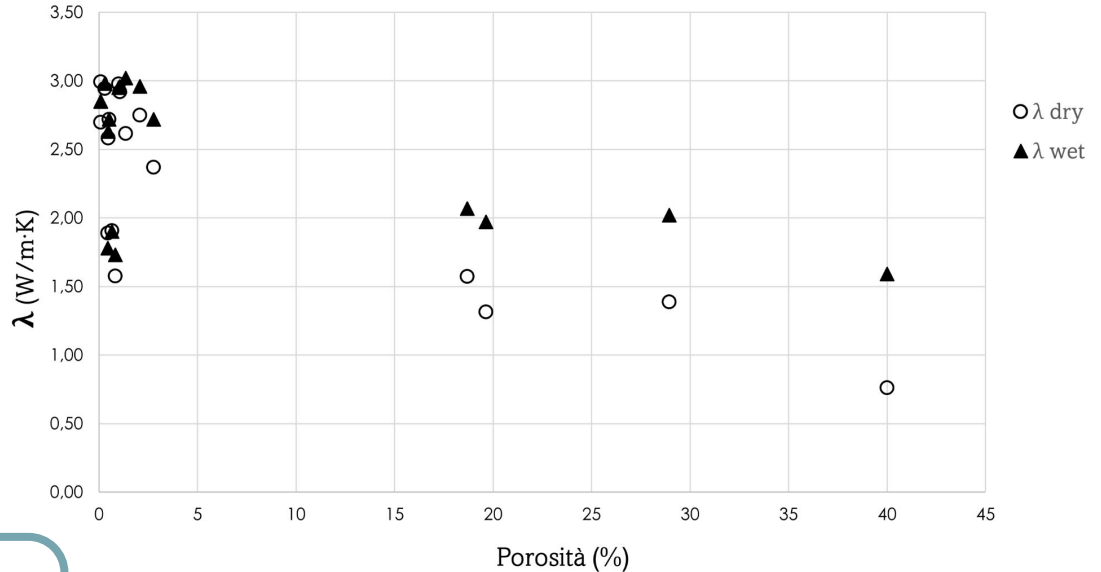
$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

Campioni	ν	E (GPa)	G (GPa)	K (GPa)
IS	0,34	63,85	23,75	68,22
GSP	0,32	13,91	5,28	12,66
RV	0,34	59,73	22,34	61,12
CS	0,28	21,63	8,47	16,18
SS	0,27	31,02	12,18	22,76
LS	0,30	47,73	18,33	40,19
CAR-GT	0,32	12,89	4,89	11,75
CALC-BA	0,34	66,06	24,63	69,27
RV2	0,34	57,32	21,34	60,86
BL	0,35	70,47	26,16	76,65
TSY	0,31	47,74	18,25	41,51
GR	0,26	37,54	14,92	25,81
ETR	0,31	32,20	12,26	28,68
RIO	0,26	39,38	15,64	27,22
BAS	0,30	72,34	27,74	61,52
MM	0,26	46,76	18,52	32,83
CM	0,32	61,03	23,08	57,18

Risultati misure termiche - λ dry vs λ wet

Porosità **minori** \rightarrow λ **maggiori**
(influisce la mineralogia)

Porosità **maggiori** \rightarrow λ **minori**
(influiscono i pori);



Differenze maggiori tra dry e wet
per rocce più porose:

$$\lambda_{\text{acqua}} > \lambda_{\text{aria}}$$

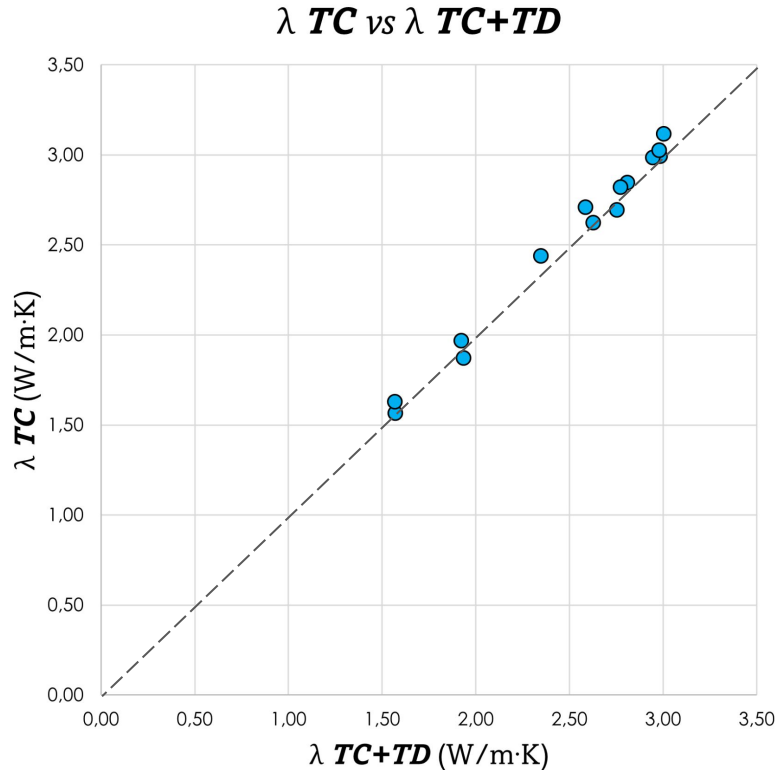
Risultati misure termiche - α

Litologia	α dry (10^{-6} m ² /s)	α wet (10^{-6} m ² /s)	porosità (%)
CAR-GT	-	0,75	≈40
CS	-	0,85	28,95
GSP	-	0,85	19,65
SS	0,96	0,90	18,7
LS	1,395	1,31	1,06
RV2	1,256	1,20	2,07
RV	1,196	1,23	0,08
IS	1,264	1,26	0,09
CALC-BA	1,274	1,31	0,5-2,0
BL	1,232	1,26	0,29
GR	1,332	1,37	1,35
RIO	1,221	1,11	2,77
ETR	1,332	0,73	0,82
TSY	0,956	0,88	0,46
BAS	0,756	0,78	0,652
MM	1,265	1,17	0,1-0,6
CM	1,145	1,25	0,46

Per rocce più porose (**CAR-GT, GSP e CS**)
 → errore strumentale nella misura della
diffusività in **TC+TD** in condizioni **anidre**:
 → *limiti capacità strumentale*

Approccio metodologico:
 → per rocce con porosità > ≈ **20%**,
 la modalità **TC+TD** dà risultati
validi solo in condizioni **sature**.

Risultati misure termiche - TC vs TC+TD (dry)



Campioni	λ_{TC} (W/m·K)	λ_{TC+TD} (W/m·K)	Variazione %
RV	2,846	2,809	1,317
IS	2,993	2,984	0,302
BL	2,986	2,945	1,392
TSY	1,870	1,936	3,529
CM	2,709	2,586	4,756
MM	2,695	2,755	2,226
BAS	1,967	1,923	2,288
CALC-BA	3,026	2,980	1,544
GR	2,624	2,627	0,114
LS	3,116	3,005	3,694
RV2	2,820	2,774	1,658
RIO	2,438	2,349	3,789
ETR	1,566	1,572	0,383
SS	1,627	1,570	3,631
CS	1,387	-	-
GSP	1,316	-	-
CAR-GT	0,760	-	-

Variazione % sotto il 5%
 → entrambe le modalità sono valide per determinare la conducibilità termica

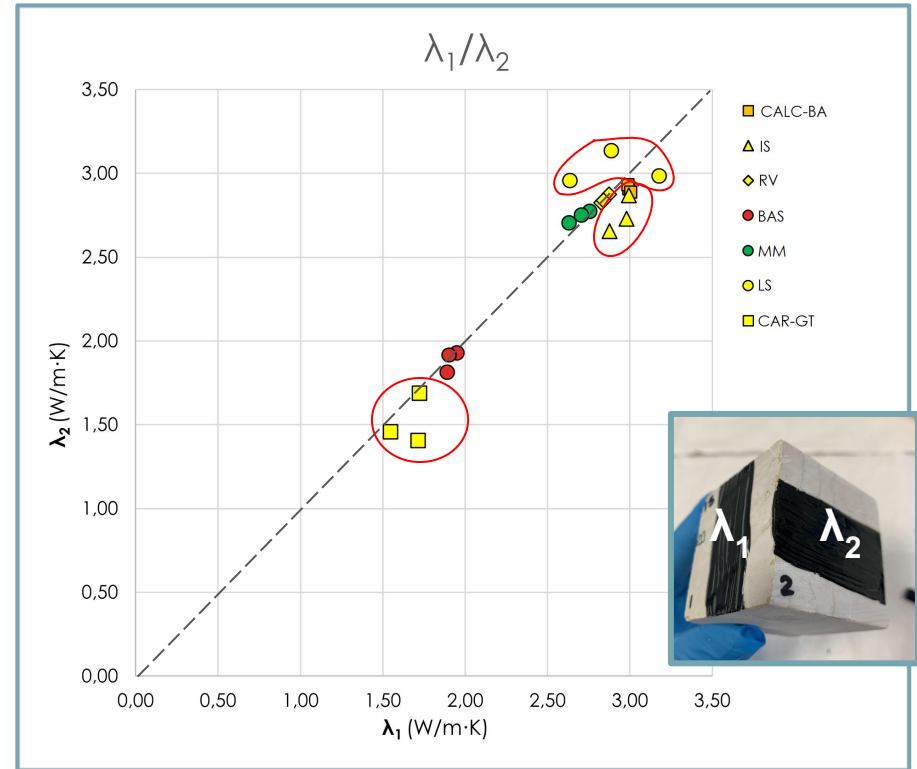
Risultati misure termiche - relazione tra anisotropie

Campioni che risultano possedere anisotropia dalle misure ultrasoniche:
CALC-BA, RV, BAS, MM, LS, CAR-GT)

RV, BAS, MM, CALC-BA:
termicamente isotrope;

CAR-GT, IS, LS:
leggermente anisotrope;

→ Alcune rocce risultate anisotrope dalle misure ultrasoniche, non dimostrano anisotropie significative dalle misure termiche.

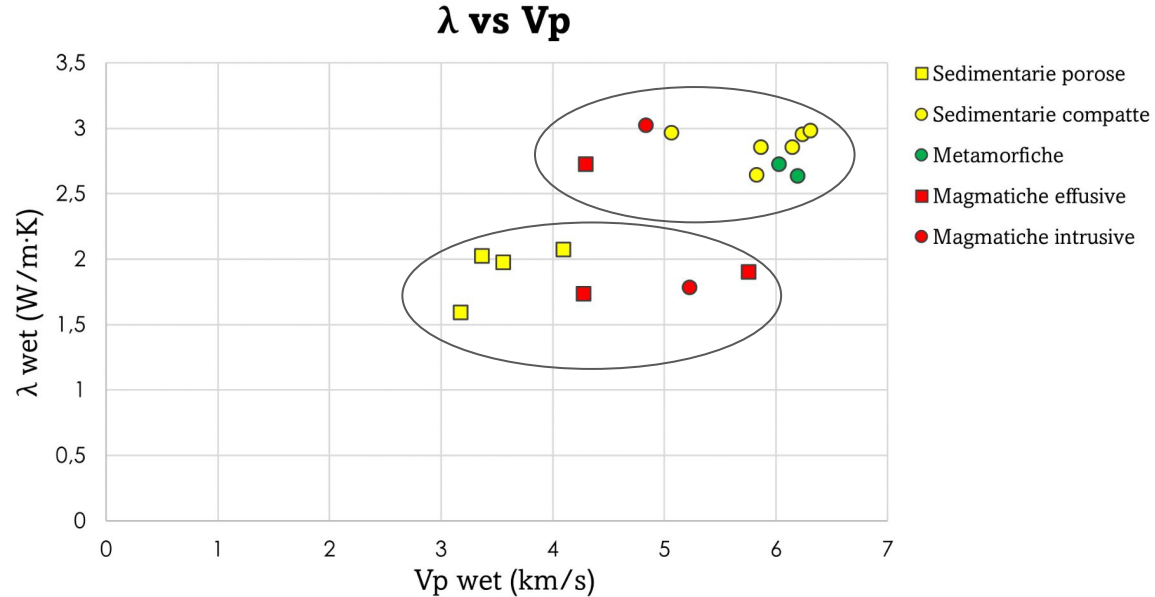
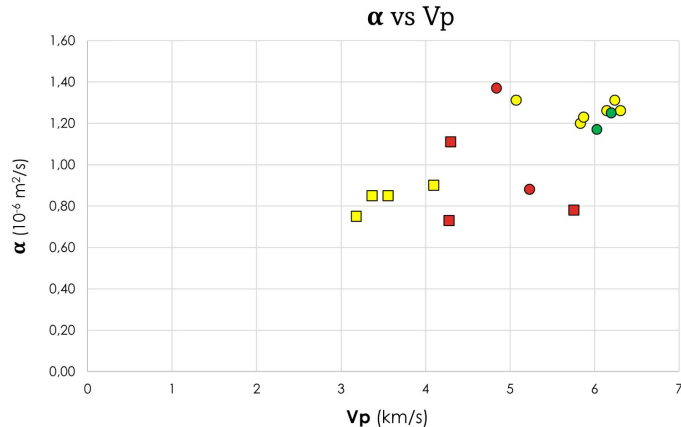


Risultati: **confronto dati** ultrasonici e termici

Due settori:

- in **alto**: rocce con V_p maggiori e λ (e α) maggiori
- in **basso**: rocce con V_p minori e λ (e α) minori

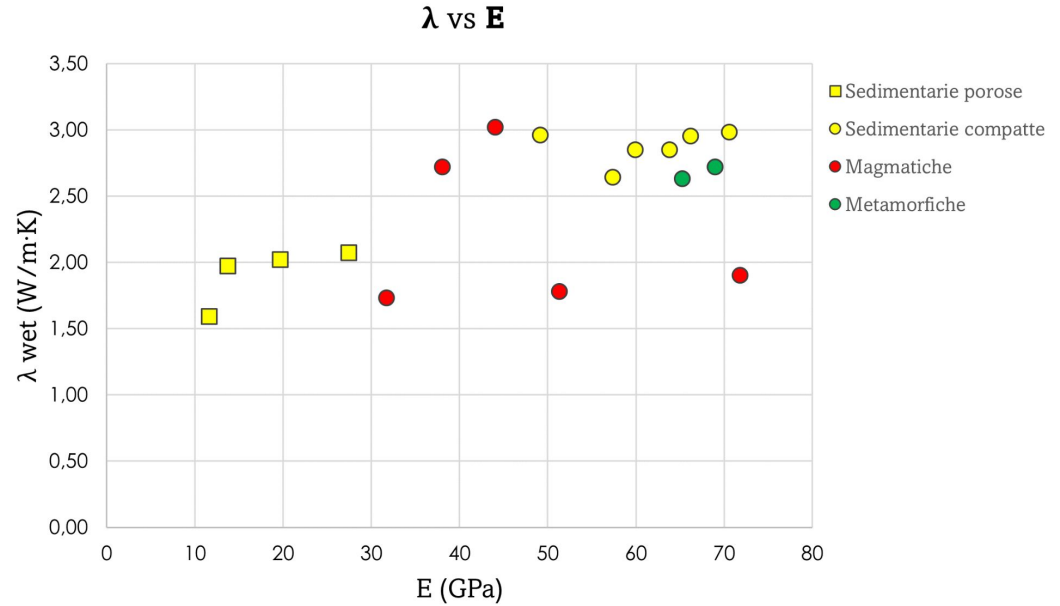
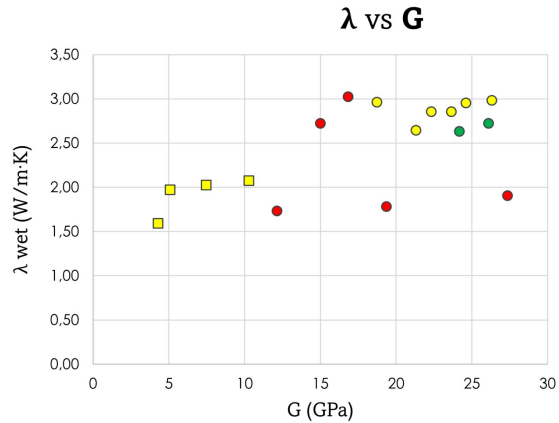
Ma ci sono **sovrapposizioni**:
alcune rocce hanno V_p simili
ma parametri termici diversi



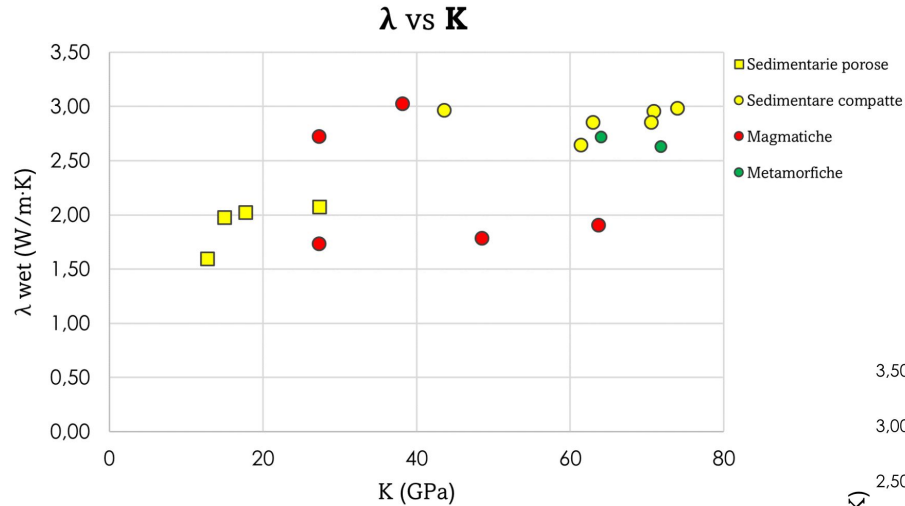
C'è una correlazione tra λ (e α) e V_p ,
ma non è lineare:
discriminante → **porosità**

Risultati: *confronto dati* ultrasonici e termici

E e **G** tendenzialmente proporzionali a λ :



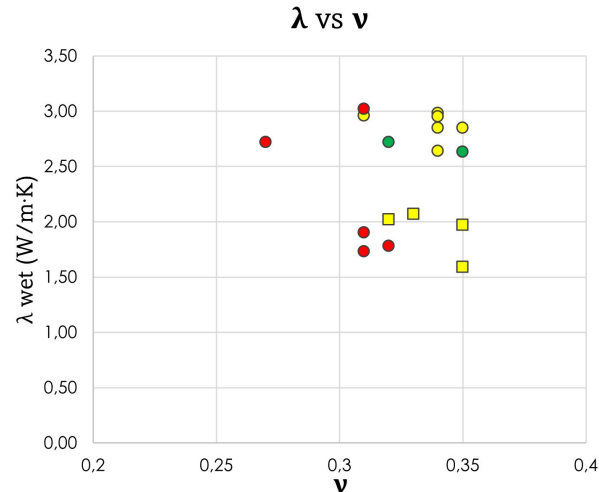
Risultati: *confronto dati ultrasonici e termici*



ν non sembra avere una correlazione specifica con λ :

→ più rocce con proprietà termiche molto diverse hanno ν simili;

K tendenzialmente proporzionale a λ , ma ci sono sovrapposizioni:
→ campioni con λ diversa hanno K simili;



Conclusioni

- Valori di **Vp** e **Vs** non differiscono molto tra condizioni sature e anidre (basso livello di porosità);
- Modalità **TC** e **TC+TD** sono **entrambe valide** (unica eccezione: TC+TD per rocce porose in condizioni anidre);
- λ **dry** e λ **wet** → porosità e tipo di fluido intergranulare controllano principalmente i processi di conduzione del calore;
- Non sempre alle anisotropie elastiche corrispondono anisotropie termiche;
- λ ed α sembrano direttamente proporzionali alle **Vp**, ma la porosità influisce in maniera più rilevante sulle proprietà termiche;
- E e G mostrano proporzionalità con λ maggiore rispetto agli altri moduli elastici;

Sviluppi futuri...

- Studio più esteso e dettagliato delle proprietà termofisiche (λ ed α), in funzione della porosità e del grado di saturazione dei materiali litici;
- Approfondimento delle relazioni tra anisotropie elastiche e termiche;
- Definizione di una relazione empirica tra proprietà termiche ed elastiche in funzione delle tipologie litologiche



Bibliografia

Clauser, C. (2011). *Thermal storage and transport properties of rocks*, II: thermal conductivity and diffusivity. *Encyclopedia of solid earth geophysics*, 2, 1431-1448, doi: 10.1007/978-90-481-8702-7_67

Boulanouar, Abderrahim, et al. *Determination of thermal conductivity and porosity of building stone from ultrasonic velocity measurements*. *Geomaterials* 2013 (2013), doi:10.4236/gm.2013.34018

Molina, E., et al. *Evaluation of stone durability using a combination of ultrasound, mechanical and accelerated aging tests*, *Journal of Geophysics and Engineering* 10.3 (2013): 035003, doi.org/10.1088/1742-2132/10/3/035003

De Mori, P. (2017). *Misure sperimentali delle proprietà termiche ed analisi numerica dei processi di trasporto di calore nei materiali litici*.

Prof. Yuri Popov, Erich Lippmann and Dr. Armin Rauen, *TCS Manual* - version 9.3.2020, Lippmann and Rauen GbR

Germinario et al. 2017 (*quarry of Mt. Merlo, NE Italy*), Navarro et al. 2013, Luque et al. 2011, Molina et al. 2013, Avdelidis et al. 2003, Salvini PhD Thesis 2017;

www.hyperion-project.eu

Genova, E., & Kilian, R. (2017). *Thermal and hygrometric properties of traditional calcarenite stones in the area of Palermo*. *Energy Procedia*, 122, 1081-1086, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.431>

Dalla Santa G., Galgaro A., Sassi R., Cultrera M., Scotton P., Mueller J., Bertermann D., Mendrinós D., Pasquali R., Perego R., Pera S., Di Sipio E., Cassiani G., De Carli M., Bernardi A. (2020). *An updated ground thermal properties database for GSHP applications*. *Geothermics*, 85, 101758, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101758>

Di Sipio E., Bertermann, B. (2018). *Thermal properties variations in soil bodies for very shallow geothermal application: overview of ITER Project*. *International Agrophysics*, 32, 149-164, doi: 10.1515/intag-2017-0002

Di Sipio E., Bertermann, B. (2018). *Soil thermal behavior in different moisture conditions: an overview of ITER Project from laboratory to field test monitoring*. *Environmental Earth Sciences*, 77: 283. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7454-y>



GRAZIE PER L'ATTENZIONE

