



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Università
degli Studi di
Messina

Missione 4 Istruzione e Ricerca

ATHENA

A novel approach Towards the management of building materials of particular Historical-artistic interest: assessment of the radon Exhalation and the radiological risk due to Natural radioActivity content

(PNRR - Missione 4, Componente 2, Investimento 1.1 - Bando Prin 2022 PNRR - Decreto Direttoriale n. 1409 del 14-09-2022)

CUP J53D23014560001 - codice identificativo
P2022CPA2K

Durata: **24 mesi**

Principal Investigator: **Francesco Caridi**
(Università degli Studi di Messina)

Main ERC field: **PE - Physical Sciences and Engineering**

Linea di intervento: **Linea Sud**



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Università
degli Studi di
Messina

Quale obiettivo?

Definire un protocollo innovativo per la caratterizzazione sistematica di materiali da costruzione utilizzati in edifici di particolare interesse storico-artistico, in particolare in termini di tasso di esalazione del gas radon.



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



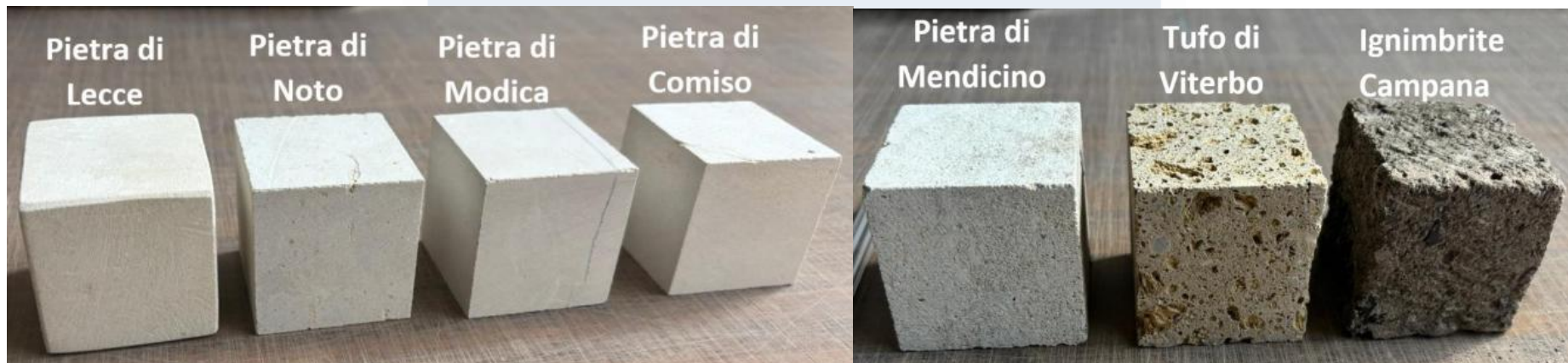
Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Università
degli Studi di
Messina



ATHENA



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Università
degli Studi di
Messina

Il gruppo di ricerca

Unità 1 – Università degli Studi di Messina (68.707 Euro)

Caridi Francesco (P.I.) <https://unime.unifind.cineca.it/get/person/026777>

Venuti Valentina <https://unime.unifind.cineca.it/get/person/010171>

Majolino Domenico <https://unime.unifind.cineca.it/get/person/009121>

Unità 2 – Università “Mediterranea” di Reggio Calabria (56.077 Euro)

Faggio Giuliana (responsabile di unità) https://www.unirc.it/scheda_persona.php?id=50430

Messina Giacomo Domenico Savio https://www.unirc.it/scheda_persona.php?id=101

Unità 3 – Università degli Studi di Salerno (31.663 Euro)

Guida Michele (responsabile di unità) <https://rubrica.unisa.it/persone?matricola=001295>

Unità 4 – Università della Calabria (21.336 Euro)

Ruffolo Silvestro Antonio (responsabile di unità) <https://www.unical.it/storage/teachers/silvestro.ruffolo/>

Ponte Maurizio <https://www.unical.it/storage/teachers/maurizio.ponte/>

Unità 5 – Università degli Studi di Cagliari (28.966 Euro)

Da Pelo Stefania (responsabile di unità) https://web.unica.it/unica/page/it/stefania_dapelo

Chiriu Daniele https://web.unica.it/unica/page/it/daniele_chiriu



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Università
degli Studi di
Messina

Le nostre milestones

MILESTONE 1

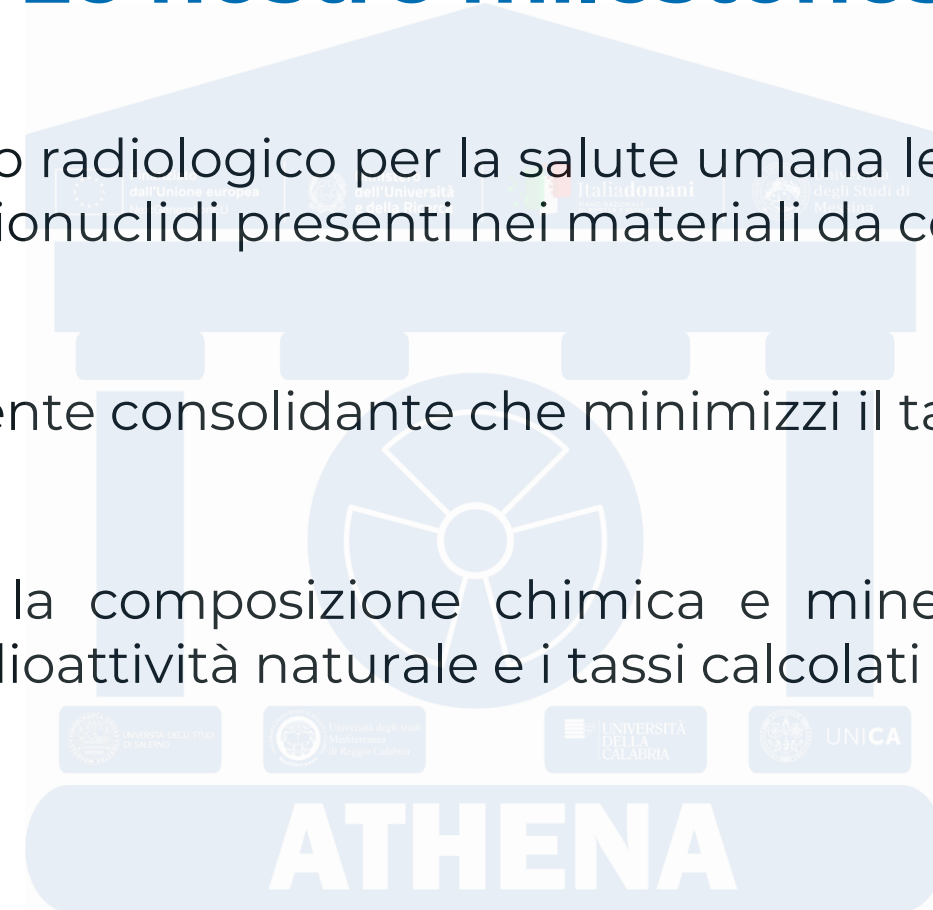
Valutare ogni possibile rischio radiologico per la salute umana legato all'esposizione esterna ai raggi gamma emessi dai radionuclidi presenti nei materiali da costruzione, in ambienti indoor.

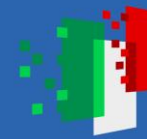
MILESTONE 2

Identificare il più efficace agente consolidante che minimizzi il tasso di esalazione del radon.

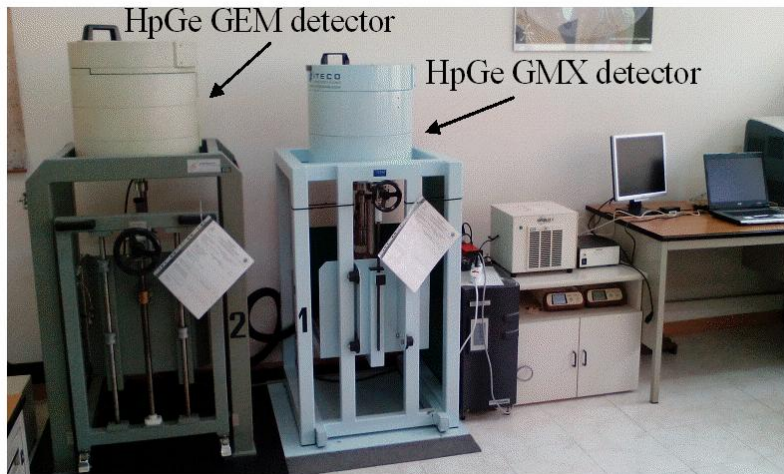
MILESTONE 3

Chiarire la correlazione tra la composizione chimica e mineralogica delle pietre naturali analizzate, il contenuto di radioattività naturale e i tassi calcolati di esalazione del radon.





Milestone 1



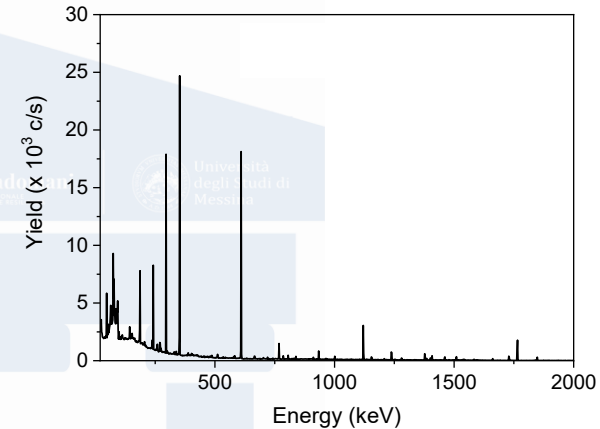
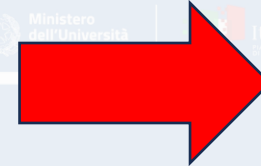
Ametek Ortec HPGe detector

GMX (n)

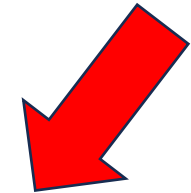
- FWHM a 1.33 MeV (^{60}Co): 1.94 keV
- Rapporto picco-Compton 65:1
- Efficienza relativa: 37.5 % at 1.33 MeV (^{60}Co)
- Tensione di alimentazione: - 4800 V
- Range in energia: 5 keV – 2 MeV

GEM (p)

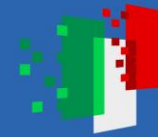
- FWHM a 1.33 MeV (^{60}Co): 1.85 keV
- Rapporto picco-Compton 64:1
- Efficienza relativa: 40 % at 1.33 MeV (^{60}Co)
- Tensione di alimentazione: 4000 V
- Range in energia: 50 keV – 2 MeV



$$C = \frac{N_E}{\varepsilon_E \cdot t \cdot \gamma_d \cdot M \text{ (or } V\text{)}}$$



Sample	Specific activity		
	C_{Ra} (Bq kg ⁻¹)	C_{Th} (Bq kg ⁻¹)	C_{K} (Bq kg ⁻¹)
Lecce stone	163 ± 27	0.9 ± 0.2	22.4 ± 4.6
Modica stone	36.1 ± 6.1	2.2 ± 0.5	20.2 ± 3.8
Noto stone	14.5 ± 1.6	0.99 ± 0.08	6.2 ± 0.8
Comiso stone	21.9 ± 2.5	1.8 ± 0.3	3.2 ± 0.5
Mendicino stone	8.6 ± 1.1	9.4 ± 1.2	169 ± 19
Ignimbrite campana	104 ± 16	121 ± 18	1879 ± 214
Viterbo tuff	125 ± 18	302 ± 33	2021 ± 265



Valutazione del rischio radiologico per la salute umana

$$D \text{ (nGy h}^{-1}\text{)} = 0.462C_{Ra} + 0.604C_{Th} + 0.0417C_K \longrightarrow \text{Rateo di dose gamma assorbita}$$

$$AEDE_{in} \text{ (mSv y}^{-1}\text{)} = D \text{ (nGy h}^{-1}\text{)} \times 8760 \text{ h} \times 0.7 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 0.8 \times 10^{-6} \longrightarrow \text{Dose efficace annual indoor}$$

$$I = (C_{Ra}/300 + C_{Th}/200 + C_K/3000) \longrightarrow \text{Indice di concentrazione di attività}$$

$$I_\alpha = C_{Ra}/200 \longrightarrow \text{Indice alfa}$$

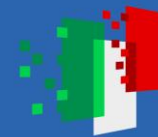
Sample	D (nGy h ⁻¹)	$AEDE_{in}$ (μSv y ⁻¹)	I	I_α
Lecce stone	76.8	377	0.56	0.82
Modica stone	18.8	92.5	0.14	0.18
Noto stone	7.6	37.1	0.06	0.07
Comiso stone	11.3	55.6	0.08	0.11
Mendicino stone	16.7	81.9	0.13	0.04
Ignimbrite campana	199	979	1.58	0.52
Viterbo tuff	324	1590	2.60	0.62



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

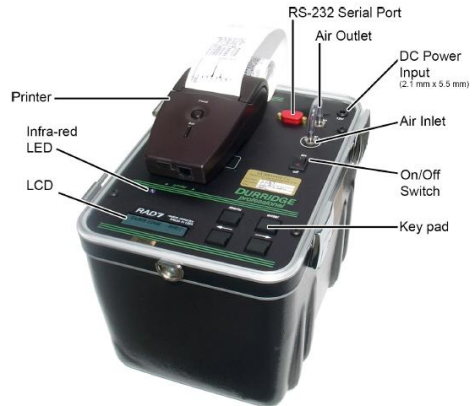


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Università
degli Studi di
Messina

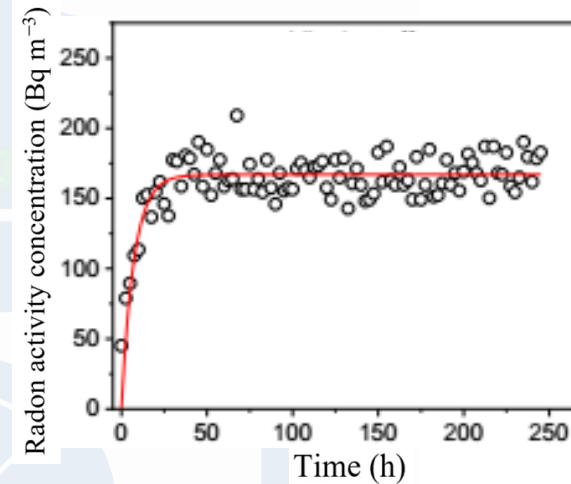
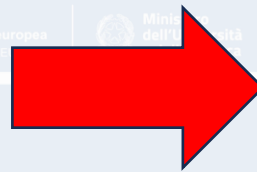
Milestone 2



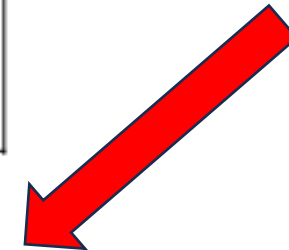
Durridge Rad7

- Rivelatore al Silicio
- Range in energia: 0 - 10 MeV
- Volume attivo: 0.7 L
- Tensione di alimentazione: 2.5 kV
- Sistema di pompaggio integrato

Closed Chamber Method (CCM)



$$C(t) = \frac{E}{\lambda V} (1 - e^{-\lambda t})$$



Sample	^{222}Rn exhalation rate ($\text{Bq h}^{-1} \text{kg}^{-1}$)
Lecce stone	0.156 ± 0.019
Noto stone	0.013 ± 0.003
Comiso stone	0.040 ± 0.006
Viterbo tuff	0.755 ± 0.263
Modica stone	0.040 ± 0.006
Mendicino stone	0.030 ± 0.010
Ignimbrite campana stone	0.080 ± 0.010

Tal quali

Sample	^{222}Rn exhalation rate ($\text{Bq h}^{-1} \text{kg}^{-1}$)
Lecce stone	0.135 ± 0.034
Noto stone	0.016 ± 0.005
Comiso stone	0.010 ± 0.003
Viterbo tuff	0.195 ± 0.014
Modica stone	0.010 ± 0.002
Mendicino stone	0.009 ± 0.002
Ignimbrite campana stone	0.230 ± 0.050

Invecchiati



Markkanen room model

$$C_{Rn} = \frac{EA_r}{V_r \lambda_v}$$

Sample	C_{Rn} (Bqm ⁻³) <i>as they are</i>	C_{Rn} (Bqm ⁻³) <i>aged</i>
Lecce stone	27.0	25.3
Noto stone	2.1	2.3
Comiso stone	5.7	1.5
Viterbo tuff	39.8	15.6
Modica stone	7.0	1.4
Mendicino stone	7.7	2.3
Ignimbrite campana stone	11.5	32.8

≥ 5% di 200 Bq m⁻³ (D. Lgs. 101/2020)



Tal quali e invecchiati trattati con consolidanti (TEOS, Nanorestore, Nanosilica, PDMS, DAP)

Sample	^{222}Rn exhalation rate (Bq h ⁻¹ kg ⁻¹)
Lecce stone + PDMS	0.094 ± 0.004
Lecce stone + Nanorestore	0.230 ± 0.010
Lecce stone + TEOS	0.138 ± 0.005
Lecce stone + DAP	0.341 ± 0.011
Lecce stone + Nanoestel	0.129 ± 0.005
Lecce stone aged + Nanoestel	0.056 ± 0.005
Lecce stone aged + Nanorestore	0.187 ± 0.015
Lecce stone aged + TEOS	0.171 ± 0.042
Lecce stone aged + DAP	0.075 ± 0.005
Lecce stone aged + PDMS	0.119 ± 0.008

Sample	^{222}Rn exhalation rate (Bq h ⁻¹ kg ⁻¹)
Viterbo tuff + PDMS	0.687 ± 0.062
Viterbo tuff + Nanoestel	0.586 ± 0.031
Viterbo tuff + Nanorestore	0.370 ± 0.020
Viterbo tuff + TEOS	0.282 ± 0.009
Viterbo tuff + DAP	0.734 ± 0.028
Viterbo tuff aged + PDMS	0.259 ± 0.008
Viterbo tuff aged + Nanoestel	0.255 ± 0.008
Viterbo tuff aged + Nanorestore	0.224 ± 0.003
Viterbo tuff aged + TEOS	0.212 ± 0.007
Viterbo tuff aged + DAP	0.678 ± 0.049

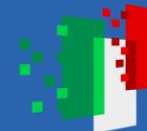
Sample	^{222}Rn exhalation rate (Bq h ⁻¹ kg ⁻¹)
Ignimbrite campana stone + Nanorestore	0.210 ± 0.017
Ignimbrite campana stone + TEOS	0.123 ± 0.007
Ignimbrite campana stone + DAP	0.320 ± 0.020
Ignimbrite campana stone + PDMS	0.097 ± 0.005
Ignimbrite campana stone + Nanoestel	0.111 ± 0.007
Ignimbrite campana stone aged + TEOS	0.110 ± 0.009
Ignimbrite campana stone aged + DAP	0.086 ± 0.005
Ignimbrite campana stone aged + PDMS	0.224 ± 0.019
Ignimbrite campana stone aged + Nanoestel	0.212 ± 0.018
Ignimbrite campana stone aged + Nanorestore	0.069 ± 0.005



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Università
degli Studi di
Messina

Milestone 3

(a)



(b)



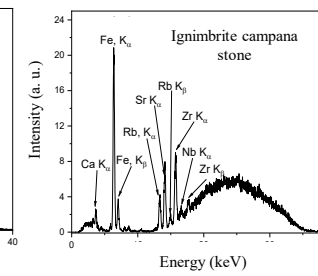
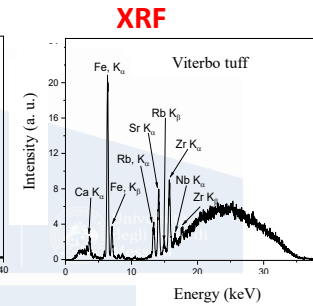
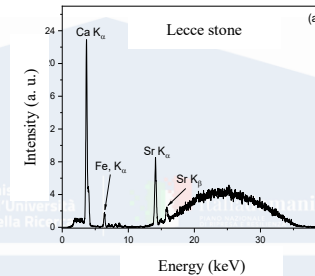
(c)



Spettroscopia a fluorescenza a raggi X → (a) Alpha 4000, Innov-X Systems, USA, con anodo Ta, tubo X-ray e detector Si-PIN (170 mm², < 220 eV a 5.95 keV).

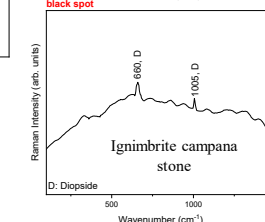
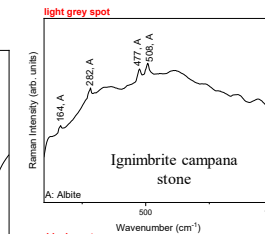
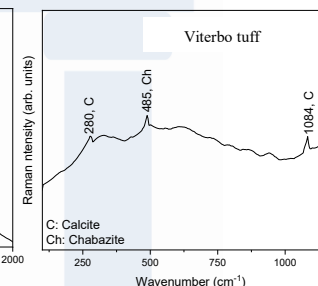
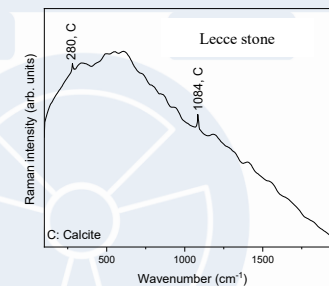
Spettroscopia Micro-Raman → (b) Spettroscopia BTR 111 Mini-Ram™ Raman con diodo laser a 785 nm e microscopio Raman BAC151B Raman (focalizzazione 40× e 80× con spot sizes di 50 μm e 25 μm, rispettivamente).

Diffratometro a raggi X → (c) PANalytical Empyrean radiazione Cu K_α in configurazione Bragg–Brentano θ-θ.



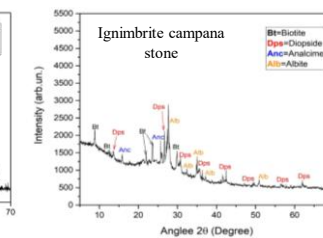
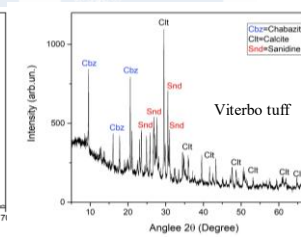
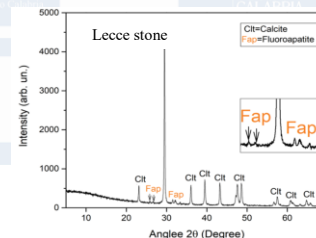
Main Results – XRF

- ☐ **Lecce stone:** Ca, Sr, Fe
- ☐ **Viterbo tuff:** Fe, Ca, Sr, Rb, Zr, Nb
- ☐ **Ignimbrite campana stone:** Fe, Ca, Sr, Rb, Zr, Nb



Main Results – Micro-Raman

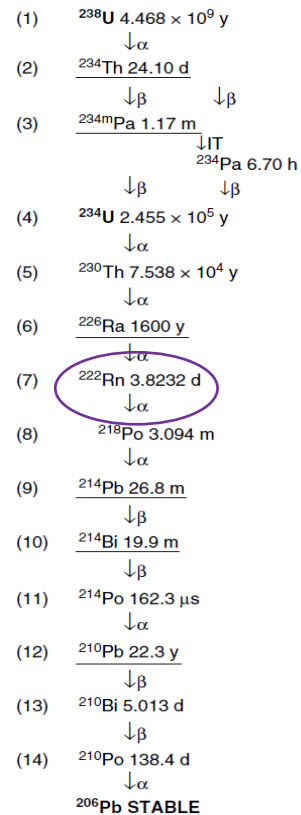
- ☐ **Lecce stone:** Calcite
- ☐ **Viterbo tuff:** Calcite, Chabazite
- ☐ **Ignimbrite campana stone:** Albite, Diopside



XRD

Main Results – XRD

- ☐ **Lecce stone:** Calcite, Fluorapatite
- ☐ **Viterbo tuff:** Calcite, Chabazite, Sanidine
- ☐ **Ignimbrite campana stone:** Biotite, Diopside, Analcime, Albite



Sample	Specific activity		
	C_{Ra} (Bq kg ⁻¹)	C_{Th} (Bq kg ⁻¹)	C_{K} (Bq kg ⁻¹)
Lecce stone	163 ± 27	0.9 ± 0.2	22.4 ± 4.6
Modica stone	36.1 ± 6.1	2.2 ± 0.5	20.2 ± 3.8
Noto stone	14.5 ± 1.6	0.99 ± 0.08	6.2 ± 0.8
Comiso stone	21.9 ± 2.5	1.8 ± 0.3	3.2 ± 0.5
Mendicino stone	8.6 ± 1.1	9.4 ± 1.2	169 ± 19
Ignimbrite campana	104 ± 16	121 ± 18	1879 ± 214
Viterbo tuff	125 ± 18	302 ± 33	2021 ± 265

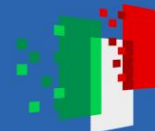
— Fluoroapatite
— Albite
— Biotite
— Chabazite
— Sanidina



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Università
degli Studi di
Messina

Publicazioni

1. F. Caridi, D. Chiriu, S. Da Pelo, G. Faggio, M. Guida, G. Messina, M. Ponte, S.A. Ruffolo, D. Majolino, V. Venuti
«Natural radioactivity content, radon exhalation and mineralogical composition assessment of the Ignimbrite Campana stone: a case study»
AAPP | Atti della Accademia Peloritana dei Pericolanti, Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali, 103(2) A3 (2025) doi: 10.1478/AAPP.1032A3
2. F. Caridi, D. Majolino, V. Venuti, D. Chiriu, S. Da Pelo, G. Faggio, G. Messina, M. Guida, M. Ponte, S.A. Ruffolo
«Assessment of the radon exhalation and the radiological risk due to natural radioactivity content in the “Pietra di Lecce” building material: a case study»
AIP Conference Proceedings, 3308 020002 (2025) doi: 10.1063/5.0271664
3. G. Faggio, F. Caridi, D. Chiriu, S. Da Pelo, M. Guida, G. Messina, M. Ponte, S.A. Ruffolo, D. Majolino, V. Venuti
«Mineralogical Analysis of Viterbo Tuff Using X-Ray Diffraction and Raman Spectroscopy»
2025 IMEKO TC26 International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (METROARCHAEO 2025), pp. 166-170 (2025)
4. F. Caridi, D. Chiriu, S. Da Pelo, G. Faggio, M. Guida, G. Messina, M. Ponte, S.A. Ruffolo, D. Majolino, V. Venuti
«Role of consolidants for limiting the radon exhalation rate in building materials of historical and artistic interest»
2025 IMEKO TC26 International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (METROARCHAEO 2025), pp. 171-175 (2025)



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Università
degli Studi di
Messina

5. F. Caridi, D. Chiriu, S. Da Pelo, G. Faggio, M. Guida, G. Messina, M. Ponte, S.A. Ruffolo, D. Majolino, V. Venuti

«Radon exhalation, natural radioactivity content and radiological hazard assessment for the Viterbo tuff stone: a case study»

2025 IMEKO TC26 International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (METROARCHAEO 2025), pp. 187-192 (2025)

6. F. Caridi, D. Chiriu, S. Da Pelo, G. Faggio, M. Guida, G. Messina, M. Ponte, S.A. Ruffolo, D. Majolino, V. Venuti

«Radon exhalation rate, radioactivity content and mineralogy assessment of building materials of particular historical-artistic interest»

Applied Sciences, 14 11359 (2024) doi: 10.3390/app142311359

7. F. Caridi, D. Chiriu, S. Da Pelo, G. Faggio, M. Guida, D. Majolino, G. Messina, M. Ponte, S.A. Ruffolo, V. Venuti

«Natural radioactivity content in the “Pietra di Modica” stone and radiological health risk assessment: a case study»

2024 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (METROARCHAEO 2024), *in press*

8. G. Faggio, G. Messina, D. Chiriu, S. Da Pelo, M. Guida, D. Majolino, M. Ponte, S.A. Ruffolo, V. Venuti, F. Caridi

«Comprehensive Analysis of Lecce and Modica Stones Using X-Ray Diffraction and Raman Spectroscopy»

2024 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (METROARCHAEO 2024), *in press*

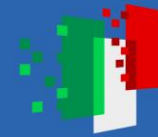
ATHENA



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Università
degli Studi di
Messina

Partecipazione a congressi internazionali

1. “2025 IMEKO TC-26 INTERNATIONAL CONFERENCE ON Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (MetroArchaeo)”
Talk “Radon exhalation, natural radioactivity content and radiological hazard assessment for the Viterbo tuff stone: a case study”
Talk «Role of consolidants for limiting the radon exhalation rate in building materials of historical and artistic interest»
Talk «Mineralogical Analysis of Viterbo Tuff Using X-Ray Diffraction and Raman Spectroscopy»
Bergamo, 15 – 17 Ottobre 2025
2. International Conference “NanoInnovation 2025”
Invited talk “Evaluation of the radon exhalation rate and the radiological risk due to natural radioactivity content in the “Comiso stone” building material: a case study”.
Roma, 15 – 19 Settembre 2025

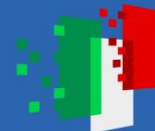
ATHENA



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Università
degli Studi di
Messina

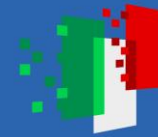
3. TECHNART 2025 - International Conference on Analytical Techniques for Heritage Studies and Conservation
Poster "Comparison of the Radon Exhalation Rate in building materials of particular historical and artistic interest"
Perugia, 06-09 Maggio 2025
4. 2024 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (MetroArchaeo)
Talk "Natural radioactivity content in the "Pietra di Modica" stone and radiological health risk assessment: a case study"
Talk "Comprehensive Analysis of Lecce and Modica Stones Using X-Ray Diffraction and Raman Spectroscopy"
Poster "Comparison of the Radon Exhalation Rate of building materials of particular historical and artistic interest: preliminary results on Ignimbrite Campana, Modica stone and Mendicino stone"
Valletta Campus, Malta, 07-09 Ottobre 2024
5. 4th International Workshop on "MOdelling, SImulation and Data Analysis in Engineering and Physics Applications" (MOSIDA 2024) within The International Conference on Applied Physics, Simulation and Computing (APSAC 2024)
Invited talk "Assessment of the radon exhalation and the radiological risk due to natural radioactivity content in the "Pietra di Lecce" building material: a case study"
Roma, 20 – 22 Giugno 2024



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Università
degli Studi di
Messina

<https://athena.unime.it/>

HOME IL GRUPPO RICERCA PUBBLICAZIONI LINK +

Finanziato dall'Unione europea
Ministero dell'Università e della Ricerca
Italiadomani
Università degli Studi di Messina

STVDIORVM UNIVERSITAS MESSANAE
A.D. 1548

ATHENA

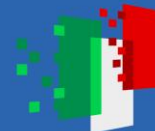
A novel approach Towards the management of building materials of particular
Historical-artistic interest: assessment of the radon Exhalation and the
radiological risk due to Natural radioActivity content (PNRR - Missione 4,
Componente 2, Investimento 1.1 - Bando Prin 2022 PNRR - Decreto Direttoriale n.
1409 del 14-09-2022)



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Università
degli Studi di
Messina

Quali benefici?

1. Una sistematica caratterizzazione radiologica e mineralogica di pietre naturali largamente utilizzate nell'edilizia storica del Sud Italia e mai indagate prima da questo punto di vista, al fine di valutare eventuali rischi radiologici per la salute umana;
2. l'identificazione del più efficace agente consolidante a lunga stabilità che minimizzi il tasso di esalazione del gas radon, estremamente utile per la definizione di una procedura di restauro ottimizzata;
3. la comprensione della correlazione tra le proprietà fondamentali delle pietre investigate e i tassi di esalazione del gas radon, al fine di migliorare la qualità dell'aria in ambienti indoor.

I risultati del progetto ATHENA non solo hanno fornito un avanzamento delle conoscenze scientifiche, nonché nuove linee guida, standard e best practises, ma hanno offerto anche nuovi spunti di riflessione, da un punto di vista radiologico, sugli effetti dell'uso di consolidanti industriali in vista di possibili interventi di restauro di edifici storici.



ATHENA



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Università
degli Studi di
Messina

