

**Course code 140722**  
**Course title Metastrutture/Metastructures”**  
**[Triple degree in Mechanics of Sustainable Materials and Structures (MS<sup>2</sup>)]**  
**A.A. /A. Y. 2024-2025**

<b>TITOLO/TITLE</b>	
<i>ITA</i>	Metastrutture
<i>EN</i>	Metastructures

<b>OBIETTIVI FORMATIVI E RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI/EDUCATIONAL OBJECTIVES AND EXPECTED LEARNING OUTCOMES</b>	
<i>ITA</i>	<p>Oggi giorno, la domanda di una maggiore operabilità a banda larga e multibanda sta aumentando sia nelle applicazioni elettroniche che meccaniche, e le capacità di deformazione, assorbimento e/o mitigazione delle vibrazioni dei materiali e delle strutture devono andare di pari passo con questa richiesta. In questo contesto, i materiali e le strutture periodiche e con un numero di celle limitato, ovvero metamateriali e metastrutture, non solo promettono di mostrare straordinarie proprietà di controllo delle onde, ma si sono dimostrati in molti casi più sintonizzabili con le gamme di frequenza operative delle applicazioni, potenzialmente più adattabili ai requisiti delle applicazioni, e di possedere numerosi vantaggi funzionali e strutturali rispetto ai materiali e alle strutture convenzionali. In questo modulo, gli studenti possono acquisire le proprietà di base dei campi e delle onde elettromagnetiche (EM) e come i metamateriali EM e le strutture artificiali periodiche 2D e 3D interagiscono con la propagazione wireless. Inoltre, sono esaminati l'analisi e la progettazione meccanica delle metastrutture 2D e 3D, e il loro comportamento meccanico e i meccanismi di deformazione vengono studiati attraverso i principi di equilibrio delle forze e dei momenti, l'analisi dell'energia di deformazione e le teorie di omogeneizzazione. Successivamente, sono elaborate le proprietà multifunzionali dei metamateriali meccanici, come l'attenuazione delle vibrazioni, le caratteristiche delle bande di interdizione e l'assorbimento dell'energia d'impatto. Inoltre, sono trattate le metastrutture dotate di risonatori, che hanno dimostrato di ereditare proprietà preziose dalla propagazione delle onde in strutture periodiche fononiche nel regime delle basse frequenze. In questo contesto, sia l'impatto dei risonatori massivi con frequenze variabili sia i dispositivi con comportamento non lineare e isteretico migliorano le prestazioni complessive del sistema. Viene posta particolare attenzione alla modellizzazione sia della natura stocastica del carico in ingresso sia della variabilità intrinseca delle proprietà materiali e geometriche. Infine, sono presentati gli strumenti di valutazione del ciclo di vita capaci di valutare le metriche di carbonio incorporato e i potenziali di riscaldamento globale (GWP) della classe di metastrutture esaminate.</p>
<i>EN</i>	<p>Nowadays, the demand for more broadband and multiband operability is increasing both in electronic and mechanical applications, and deflecting, absorbing and/or mitigation vibration capabilities of materials and structures are required to go hand in hand with this demand. Along these lines, periodic and finite lattice materials and structures, i.e. metamaterials and metastructures, have not only promised to exhibit extraordinary wave control properties, but have proven in many cases to be more tunable to applications' operational frequency ranges, to be potentially more adaptable to applications' requirements, and to possess a number of functional and structural advantages with respect to conventional materials and structures. In this module, students can acquire the basic properties of electromagnetic (EM) fields and waves and how EM metamaterials and periodic 2D and 3D artificial structures interact with wireless propagation. Moreover, mechanical analysis and design of 2D and 3D mechanical metastructures are reviewed, and their mechanical behavior and deformation mechanisms are investigated through force and momentum equilibrium principles, strain energy analysis and homogenization theories. Afterwards, multifunctional properties of mechanical metamaterials are elaborated, such as vibration</p>

	attenuation, bandgap features and impact energy absorption. In addition, metastructures endowed with resonators are taught, that have proven to inherit valuable properties from wave propagating in phononic periodic structures in the very low-frequency regime. In this context, both the impact of massive resonators with varying frequencies and devices with nonlinear and hysteretic behavior enhance the whole system performance. Emphasis is placed on modeling both the stochastic nature of input loading and the inherent variability of material and geometric properties. Finally, life cycle assessment tools capable of evaluating embodied carbon metrics and global warming potentials (GWPs) of the examined class of metastructures are taught.
--	--

<b>PREREQUISITI/PREREQUISITES</b>	
<i>ITA</i>	Corsi di base di analisi matematica, fisica e ingegneria strutturale.
<i>EN</i>	Basic courses of mathematical analysis, physics and structural engineering.

<b>PROGRAMMA DEL CORSO/LIST OF TOPICS COVERED</b>	
<i>ITA</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le metastrutture monoatomiche, biatomiche e monoatomiche risonanti monodimensionali (bande passanti e band gap acustici e ottici, analogia tra sistemi continui e discreti)</li> <li>• Dinamica fuori piano di sistemi discreti bidimensionali (vettore d'onda, superficie di dispersione, e beaming)</li> <li>• Cenni a metastrutture tridimensionali</li> <li>• L'equazione d'onda e le sue declinazioni in ambito acustico, meccanico, elettromagnetico</li> <li>• La natura delle onde elettromagnetiche: equazioni di Maxwell ed equazione delle onde EM</li> <li>• Soluzioni canoniche alle equazioni di Maxwell: onde piane in mezzi omogenei</li> <li>• Diagrammi di dispersione e i materiali "band-gap"</li> <li>• Onde e interfacce planari? Le leggi di Snell</li> <li>• Metamateriali periodici e quasi periodici: concetto, progettazione, implementazione</li> <li>• Onde e metamateriali: le leggi di Snell generalizzate</li> <li>• Applicazioni delle leggi di Snell generalizzate al controllo delle onde nei sistemi EM</li> <li>• Meccanica geometrica di metamateriali ad origami periodici</li> <li>• Modelli "barra e cerniera" per metamateriali origami</li> <li>• Onde di Bloch nei metamateriali origami</li> <li>• Invisibilità flessionale di difetti multipli in piastre elastiche</li> <li>• Trasformazione di elastodinamiche per occultamento di onde in piastre elastiche</li> <li>• Tecniche per la riduzione della diffusione della propagazione delle onde flessionali</li> <li>• Tecniche di ottimizzazione di metamateriali e metastrutture in ambito deterministico</li> <li>• Approcci per la caratterizzazione di metamateriali e metastrutture in presenza di incertezze</li> <li>• Approcci spettrali stocastici per input casuali</li> <li>• Fondamenti del controllo strutturale</li> <li>• Controllo passivo per metastrutture lineari e non lineari</li> <li>• Tecniche di identificazione di metastrutture lineari e non lineari</li> <li>• Harvesting di energia tramite metamateriali auxetici e ottimizzazione</li> <li>• Valutazione del ciclo di vita e metastrutture sostenibili</li> </ul>
<i>EN</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The monoatomic, the diatomic, and the monoatomic resonant one-dimensional metastructures (Acoustic and optical pass bands and band gaps, analogy between continuous and discrete systems)</li> <li>• Out-of-plane dynamics of two-dimensional discrete systems (wavevector, dispersion surface, and beaming)</li> <li>• Remarks on three-dimensional metastructures</li> <li>• The wave equation in acoustics, mechanics, and electromagnetics</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The nature of Electromagnetic Waves – Maxwell’s Equations and the EM Wave Equation</li> <li>• Canonical Solutions to Maxwell’s Equations: Plane Waves in Homogeneous Media</li> <li>• Dispersion diagrams and bandgap materials</li> <li>• Waves and planar interfaces? The Snell’s Laws</li> <li>• Periodic and Quasi-Periodic Metamaterials: concept, design, implementation</li> <li>• Waves and Metamaterials - the Generalized Snell’s Laws</li> <li>• Applications of Generalized Snell’s Laws to Wave Control in EM Systems</li> <li>• Geometric mechanics of periodic origami metamaterials</li> <li>• Bar and hinge models for origami metamaterials</li> <li>• Bloch waves in origami metamaterials</li> <li>• Cloaking transformation in elastic plates</li> <li>• Flexural invisibility of multiple defects in elastic plates</li> <li>• Techniques for scattering reduction of flexural waves propagation</li> <li>• Optimisation techniques of deterministic metamaterials and metastructures</li> <li>• Approaches for metamaterials and metastructures characterization in presence of uncertainties</li> <li>• Stochastic spectral approaches for random inputs</li> <li>• Basics of structural control</li> <li>• Passive control, linear and nonlinear metastructures</li> <li>• System identification of linear and nonlinear metastructures</li> <li>• Energy Harvesting with Auxetic Metamaterials and optimization</li> <li>• Life cycle assessment and sustainable metastructures</li> </ul>
--	---

<b>METODI DIDATTICI UTILIZZATI E ATTIVITÀ DI APPRENDIMENTO RICHIESTE ALLO STUDENTE/TEACHING FORMAT</b>	
<i>ITA</i>	<p>L'attività didattica è organizzata nel modo seguente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 60% di lezioni teoriche relative alla teoria di base e gli approcci metodologici per l’analisi e soluzione dei problemi che saranno presentati come casi di studio;</li> <li>- 20% di lezioni dedicate allo svolgimento di esercizi e soluzione dei casi di studio, altresì legati ad esempi applicativi di pratico interesse;</li> <li>- 20% di esercitazioni software o progettuali integreranno le lezioni teoriche e gli esercizi.</li> </ul> <p>Eventuale materiale didattico (es., esercizi svolti, materiale di approfondimento) sarà reso disponibile nel sito del corso indicato dal docente all’inizio delle lezioni.</p>
<i>EN</i>	<p>The teaching activity is organized as follows:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 60% of theoretical frontal lessons related to the basic theory and methodological approaches for the analysis and solution of the problems that will be presented as case studies during the course;</li> <li>- 20% of lessons dedicated to the development of exercises and the solution of case studies, also linked to examples of practical application;</li> <li>- 20% of software or design exercises will complete the theoretical lessons and the exercises.</li> </ul> <p>The educational material (e.g., exercises, in-depth material) will be made available on the course website indicated by the teacher at the beginning of the course.</p>

<b>METODI DI ACCERTAMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE/ASSESSMENT AND EVALUATION CRITERIA</b>	
<i>ITA</i>	<p>Il voto finale del corso può essere ottenuto tramite una delle tre modalità alternative di valutazione, a scelta dello studente:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) UN PROGETTO seguito da una presentazione orale (che coinvolge gruppi di 3 o più)</li> <li>(2) UNA PROVA SCRITTA seguita da una presentazione orale da concordare con uno dei docenti;</li> <li>(3) Un esame orale completo.</li> </ol> <p>Il voto finale è costituito dalla somma dei voti ottenuti nel caso di due prove.</p>

	<p><b>PROVA SCRITTA</b> La prova scritta è costituita da domande a risposta multipla sull'intero programma del corso. Il voto massimo della prova scritta è 15.</p> <p><b>IL PROGETTO</b> Il PROGETTO consiste nello sviluppo di un'attività software o nella progettazione di metamateriali/metastrutture sugli argomenti del corso più innovativi e all'avanguardia. La scelta dell'argomento è effettuata dallo studente tra le proposte del docente provenienti da recenti progressi all'avanguardia e concetti innovativi nel campo. Lo studente può chiedere di iniziare l'attività di progetto in qualsiasi momento inviando una richiesta via email al docente del corso. Durante lo sviluppo del progetto, lo studente sarà assistito da uno o più tutor identificati all'inizio del progetto. Il punteggio massimo del test di progetto è 15.</p>
<i>EN</i>	<p>The final grade for the course can be obtained through one of three alternative modes of assessment, at the student's choice: (1) A PROJECT TEST followed by an oral presentation (involving groups of 3 or more) (2) A WRITTEN TEST followed by an oral presentation to be agreed with one of the teachers; (3) A complete oral examination. The final mark consists of the sum of the marks obtained in the case of two tests.</p> <p><b>WRITTEN TEST</b> The Written Test consists of multiple-choice questions on the whole program of the course. The maximum mark of the written test is 15.</p> <p><b>PROJECT TEST</b> The Project Test consists of the development of a software activity or metamaterial/metastructure design on most innovative and leading-edge course topics. The choice of the topic is performed by the student among the teacher's proposals coming from recent state-of-the-art advancements and innovative concepts in the field. The student can ask to start the project activity at any time by sending an email request to the course teacher. During the development of the project, the student will be assisted by one or more tutors identified at the beginning of the project. The maximum mark of the project test is 15.</p>

<b>TESTI DI RIFERIMENTO/REQUIRED AND SUPPLEMENTARY READINGS</b>	
<i>ITA</i>	<p>[1] F. Yang, Y. Rahmat-Samii, Surface Electromagnetics with Applications in Antenna, Microwave, and Optical Engineering, Cambridge University Press, 2019.</p> <p>[2] N. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J.-P. Tetienne, F. Capasso, and Z. Gaburro, "Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction," Science, vol. 334, no. 6054, pp. 333-337, 2011.</p> <p>[3] G. Oliveri, F. Zardi, P. Rocca, M. Salucci and A. Massa, "Building a Smart EM Environment - AI-Enhanced Aperiodic Micro-Scale Design of Passive EM Skins," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 70, no. 10, pp. 8757-8770, Oct. 2022.</p> <p>[4] G. Oliveri, P. Rocca, M. Salucci and A. Massa, "Holographic Smart EM Skins for Advanced Beam Power Shaping in Next Generation Wireless Environments," in IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques, vol. 6, pp. 171-182, 2021.</p> <p>[5] A. S. Phani, M. I. Hussein (ed.) "Dynamics of Lattice Materials", Wiley, 2017</p> <p>[6] R. L. Harne, K-W. Wang, Harnessing Bistable Structural Dynamics for Vibration Control, Energy Harvesting and Sensing, Wiley, 2017.</p> <p>[7] Guner, T., BURSI, O.S. &amp; Broccardo M., "Seismic vibration mitigation of steel storage tanks by metafoundations endowed with linear and bistable columns ", Bulletin of Earthquake Engineering, 24 April 2023</p>

	<p>[8] Guner, T., Nardin, C., BURSI, O.S., Erlicher, S., Monteil, A. "Design standardisation and seismic protection of SMRs through modular metafoundations", Nuclear Engineering and Design, 2024.</p> <p>[9] Brillouin L "Wave Propagation in Periodic Structures", Dover, 1953.</p> <p>[10] Movchan A.B., Movchan N.V., Jones I.S., Colquitt D.J. "Mathematical Modelling of Waves in Multi-Scale Structured Media" CRC Press 2018</p> <p>[11] Kim YY "Elastic Waves and Metamaterials: The Fundamentals", Springer 2023</p> <p>[12] Hernandez, EA Peraza, Darren J. Hartl, and Dimitris C. Lagoudas. "Active origami." Active Origami (2019).</p> <p>[13] Lang, Robert J. Twists, tilings, and tessellations: Mathematical methods for geometric origami. AK Peters/CRC Press, 2017.</p> <p>[14]Pratapa, Phanisri P., Phanish Suryanarayana, and Glaucio H. Paulino. "Bloch wave framework for structures with nonlocal interactions: Application to the design of origami acoustic metamaterials." Journal of the Mechanics and Physics of Solids118 (2018): 115-132.</p>
EN	<p>[1] F. Yang, Y. Rahmat-Samii, Surface Electromagnetics with Applications in Antenna, Microwave, and Optical Engineering, Cambridge University Press, 2019.</p> <p>[2] N. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J.-P. Tetienne, F. Capasso, and Z. Gaburro, "Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction," Science, vol. 334, no. 6054, pp. 333-337, 2011.</p> <p>[3] G. Oliveri, F. Zardi, P. Rocca, M. Salucci and A. Massa, "Building a Smart EM Environment - AI-Enhanced Aperiodic Micro-Scale Design of Passive EM Skins," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 70, no. 10, pp. 8757-8770, Oct. 2022.</p> <p>[4] G. Oliveri, P. Rocca, M. Salucci and A. Massa, "Holographic Smart EM Skins for Advanced Beam Power Shaping in Next Generation Wireless Environments," in IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques, vol. 6, pp. 171-182, 2021.</p> <p>[5] A. S. Phani, M. I. Hussein (ed.) "Dynamics of Lattice Materials", Wiley, 2017</p> <p>[6] R. L. Harne, K-W. Wang, Harnessing Bistable Structural Dynamics for Vibration Control, Energy Harvesting and Sensing, Wiley, 2017.</p> <p>[7] Guner, T., BURSI, O.S. &amp; Broccardo M., "Seismic vibration mitigation of steel storage tanks by metafoundations endowed with linear and bistable columns ", Bulletin of Earthquake Engineering, 24 April 2023</p> <p>[8] Guner, T., Nardin, C., BURSI, O.S., Erlicher, S., Monteil, A. "Design standardisation and seismic protection of SMRs through modular metafoundations", Nuclear Engineering and Design, 2024.</p> <p>[9] Brillouin L "Wave Propagation in Periodic Structures", Dover, 1953.</p> <p>[10] Movchan A.B., Movchan N.V., Jones I.S., Colquitt D.J. "Mathematical Modelling of Waves in Multi-Scale Structured Media" CRC Press 2018</p> <p>[11]Kim YY "Elastic Waves and Metamaterials: The Fundamentals", Springer 2023</p> <p>[12]Hernandez, EA Peraza, Darren J. Hartl, and Dimitris C. Lagoudas. "Active origami." Active Origami (2019).</p> <p>[13] Lang, Robert J. Twists, tilings, and tessellations: Mathematical methods for geometric origami. AK Peters/CRC Press, 2017.</p> <p>[14]Pratapa, Phanisri P., Phanish Suryanarayana, and Glaucio H. Paulino. "Bloch wave framework for structures with nonlocal interactions: Application to the design of origami acoustic metamaterials." Journal of the Mechanics and Physics of Solids118 (2018): 115-132.</p>

<b>ALTRE INFORMAZIONI/ADDITIONAL INFORMATION</b>	
ITA	Lingua di insegnamento: inglese. Orario di ricevimento: appuntamento via email.
EN	Teaching language: English. Office hours: appointment by email

