

Institute of Condensed Matter Chemistry and Technologies for Energy



MATERIALS MATTER!



Institute of Condensed Matter Chemistry and Technologies for Energy,
National Research Council of Italy
Headquarter: Corso Stati Uniti 4 35127 Padova, Italy
Units: Via De Marini, 6 16149 Genova
Via Previati 1/E, 23900 Lecco
Via R. Cozzi 53, 20125, Milano



www.icmate.cnr.it



DOI [10.5281/zenodo.14811201](https://doi.org/10.5281/zenodo.14811201)

CNR-ICMATE has chosen to print the brochure respecting environment and people:
Selected print techniques have low environmental impact
The used energy is 100% from renewable sources
The inks are water-based
Washing systems and use of vegetable wax are greatly reduced, and avoid the use of solvents
Offset plates are thermally engraved, avoiding the use of isopropyl alcohol chemical and chemical vapour development
Paper is FSC® certified and has been bleached without chlorine
Font and text spacing were chosen to ensure high legibility



Stampato da
Tipografia Ecologica KC
con 100% Multiutility
energia elettrica
interamente prodotta
da fonti rinnovabili

Moreover, ICMATE proactively operates diversity and society engagement.

Therefore, this agenda was printed in a branch of the TipografiaKC inside the Genoa Pontedecimo Prison, by detained people.

LETTER FROM THE DIRECTOR

At ICMATE, our vision is clear: “Creative minds in a dynamic research environment are the recipe for innovation”. This philosophy has positioned us at the forefront of materials research, focusing on sustainable processing and the responsible use of resources.

Over the years, ICMATE has catalyzed groundbreaking solutions in energy, healthcare, and manufacturing. Our interdisciplinary approach integrates diverse scientific disciplines for holistic advancements in materials development.

ICMATE is committed to developing materials and technologies for clean energy, sustainable chemistry, and advanced data management. By promoting eco-friendly processes and the circular economy, we aim to reduce environmental impact and align with global sustainability goals. Our work spans various fields, from hydrogen technologies to cancer research and green foundry solutions. This brochure highlights some of these efforts, showcasing ICMATE’s role in cutting-edge research. We also focus on mentoring the next generation of researchers through collaborations with schools and the broader community.

ICMATE thrives thanks to the dedication of our team – PhD students, postdocs, researchers, and staff – who fuel our growth and innovation. We invite you to explore our work and leverage our facilities to accelerate your research or innovation.

Thank you to everyone contributing to ICMATE’s success. We hope this brochure inspires you to connect with us.

Enjoy the read!

La nostra visione a ICMATE è chiara: “Menti creative unite in un ambiente dinamico di ricerca sono la ricetta per l’innovazione”. Questa filosofia ci ha posizionato all’avanguardia nella ricerca sui materiali innovativi, dal design all’applicazione, con un focus sulla sostenibilità dei processi e sull’uso responsabile delle risorse naturali.

Nel corso degli anni, le sinergie all’interno di ICMATE hanno catalizzato soluzioni rivoluzionarie per affrontare sfide nei settori dell’energia, della sanità e della manifattura. Il nostro approccio interdisciplinare promuove ricerche ad alto impatto, integrando diverse discipline scientifiche per progressi completi nello sviluppo dei materiali.

ICMATE è impegnato nello sviluppo di materiali e tecnologie per l’energia pulita, la chimica sostenibile e la gestione avanzata dei dati. Promuovendo processi ecologici e l’economia circolare, puntiamo a ridurre l’impatto ambientale, allineandoci agli obiettivi globali di sostenibilità. Il nostro lavoro abbraccia molteplici discipline, dalla ricerca sull’idrogeno alla lotta contro il cancro, fino alle soluzioni verdi per le fonderie e la conservazione del patrimonio culturale. Questo opuscolo evidenzia alcuni di questi sforzi, mostrando il ruolo cruciale di ICMATE nella ricerca all’avanguardia.

Grazie all’impegno del nostro team – dottorandi, postdoc, ricercatori e staff amministrativo – ICMATE è un luogo dinamico e stimolante. Vi invitiamo a esplorare il nostro lavoro e a sfruttare le nostre strutture per accelerare la vostra ricerca o innovazione.

Grazie a tutti coloro che contribuiscono al nostro successo! Speriamo che questo opuscolo vi ispiri a entrare in contatto con noi.

Buona lettura!



ICMATE

The Institute of Condensed Matter Chemistry and Technologies for Energy (ICMATE) is part of the Department of Chemical Sciences and Materials Technologies (DSCTM) of the National Research Council of Italy (CNR).

ICMATE conducts research across 7 thematic areas:

L'Istituto di Chimica della materia condensata e di Tecnologie per l'energia (ICMATE) afferisce al DSCTM, il Dipartimento di chimica e tecnologie dei materiali del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR).

ICMATE svolge attività di ricerca nell'ambito di 7 aree tematiche:



ICMATE in Numbers

- 4 locations across Italy
- State-of-the-art laboratories with advanced instrumentation
- Active in national and international research projects
- 125+ People, including 70 researchers, 25 technical and administrative staff, and more than 30 early-stage researchers and trainees

I numeri di ICMATE

- L'istituto ha 4 sedi sul territorio nazionale
- Ha laboratori specialistici con strumentazione d'avanguardia
- È attivo nella progettualità nazionale e internazionale
- Il personale è costituito da 70 ricercatori, 25 tecnici e amministrativi e oltre 30 unità di personale in formazione

TABLE OF CONTENT

The Institute	4
MATERIALS AND ENERGY	
1 Hydrogen production and purification: sustainable materials and devices	6
2 Materials and technologies for hydrogen conversion and storage	8
3 Phase change Materials for heat storage and energy management	10
4 Surface engineering and coatings for nuclear fusion applications	12
5 Lanthanide-based materials for light driven application	14
6 Thermoelectricity: an opportunity to “recycle” energy and to improve working conditions	16
7 Additive Manufacturing of High-Performance Cooling Systems and Elastocaloric Technologies	18
8 Ceramics and composites for energy harvesting and storage	20
NANOMATERIALS AND CHEMICAL APPROACHES	
9 Multi-functional inorganic and hybrid nanoarchitectonics by liquid-, vapor-phase and plasma-assisted methodologies	22
10 Sustainable Carbon-based Nanomaterials from Biomasses	24
11 NIR-light activatable nanocrystals for biosensing and bioimaging	26
12 CO ₂ conversion and utilization	28
13 Electrochemistry: from CO ₂ valorisation to Corrosion Science	30
ECO-INNOVATIONS FOR A SUSTAINABLE FUTURE	
14 Green Foundry	32
15 Advanced testing for metallurgy: from research to industry	34
16 Laser Spectroscopies for Environmental Monitoring	36
17 Environmental radioprotection: from soil to water and food	38
18 Photocatalysis for water remediation: from lab to pilot plant	40
19 Geopolymer-based sustainable building materials	42
20 Physical-Chemistry of Liquid Interfaces for extraterrestrial and aerospace applications	44
21 Environmental Life Cycle Assessment in R&D laboratories	46
22 MARECO: The Polythematic Marine Laboratory of ICMATE	48
HEALTH AND WELL-BEING	
23 Additive Manufacturing for biomedical applications	50
24 Rehabilitation & Sports Engineering	52
25 New selective radiopharmaceuticals for imaging and therapeutic applications of highly aggressive tumors	54
26 Advanced materials and experimental techniques for biomedical applications	56
DIGITAL CHEMISTRY FOR THE DESIGN OF ADVANCED MATERIALS	
27 Digital Technologies for accurate prediction of advanced materials	58
28 Design of liquid metal-ceramic interfaces at high temperatures	60
29 SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CULTURAL HERITAGE	
30 TECHNOLOGY TRANSFER	
31 OUTREACH AND CITIZEN SCIENCE	

THE INSTITUTE



La sede principale si trova nell'Area della Ricerca di Padova, con una delle sedi distaccate situata presso il Dipartimento di Scienze Chimiche dell'Università di Padova. Le attività di ricerca a Padova si concentrano sulla modellazione, progettazione e sviluppo di materiali e dispositivi innovativi e sostenibili 2D e 3D per applicazioni nel settore dell'energia, delle tecnologie dell'idrogeno, della gestione dei dati e delle tecnologie ambientali e sanitarie.

PADOVA

ICMATE headquarters is located in the Research Area of Padova, with one of its branches situated at the Department of Chemical Sciences of the University of Padova. Research activities in Padova focus on the modeling, design, and development of innovative and sustainable 2D and 3D materials and devices for applications in energy, hydrogen technologies, data management, and environmental and health-related technologies.



LECCO

Advanced additive manufacturing processes, novel alloys for thermal energy storage and management, pilot plants and characterization of innovative alloys, design and prototyping of devices for biomedical, civil and industrial applications.

Processi avanzati di manifattura additiva, nuove leghe per l'accumulo e la gestione dell'energia termica, impianti pilota e caratterizzazione di leghe innovative, progettazione e prototipazione di dispositivi per applicazioni biomedicali, civili e industriali.

L'ISTITUTO

MILANO

Microstructural/mechanical characterization, integrity assessment and modelling of under stress-strain behavior of innovative metal alloys designed for high temperature and industrial applications, development of on-line laser diagnostics for environmental monitoring, synthesis of carbon-based nanoparticles and metal oxides for renewable energies.

Caratterizzazione microstrutturale e meccanica, valutazione dell'integrità e modellazione del comportamento sotto sforzo e deformazione di leghe metalliche innovative destinate ad applicazioni industriali e ad alta temperatura, spettroscopie laser per il monitoraggio ambientale, sintesi di nanoparticelle a base di carbonio e ossidi metallici per le energie rinnovabili.



PADOVA

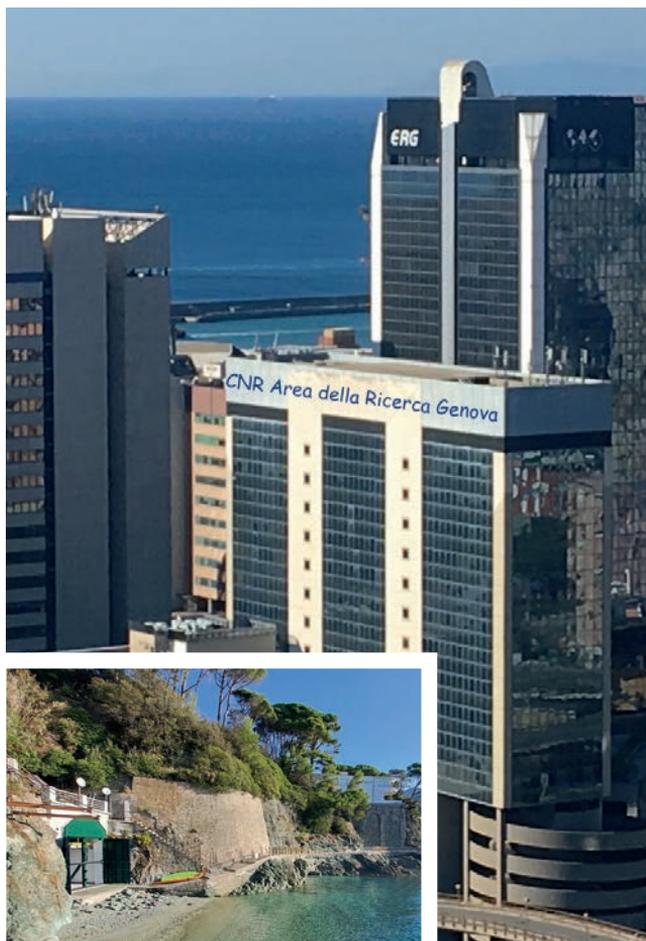
GENOVA

Design, synthesis, fabrication, modelling and characterization of ceramics, composites and soft matter. Fundamental properties of soft matter (e.g. emulsions) are also investigated under microgravity conditions in ESA space missions.

MARECO is a marine infrastructure designed for multidisciplinary research in marine sciences, including corrosion.

Progettazione, sintesi, fabbricazione, modellazione e caratterizzazione di ceramici, compositi e soft matter. Le proprietà fondamentali delle emulsioni vengono inoltre studiate in condizioni di microgravità durante le missioni spaziali dell'ESA.

MARECO è un'infrastruttura marina progettata per la ricerca multidisciplinare nelle scienze del mare, inclusa la corrosione.



HYDROGEN PRODUCTION AND PURIFICATION: SUSTAINABLE MATERIALS AND DEVICES

Over the years, hydrogen has acquired growing interest for its use in industrial processes and its high energy density makes it an ideal energy vector.

Among the various methods of hydrogen production, water electrolysis is a process that allows to obtain non-polluting products (hydrogen and oxygen) and to interface with intermittent renewables to store energy in the form of hydrogen. The devices used for this purpose are of different types, which depend on the type of electrodes used and the working conditions (temperature, pressure). In the case of high temperature applications (500°-700°C), ceramic materials are used. The ICMATE group works on proton and mixed electronic-proton conduction ceramics, to be used as electrolytes and electrodes. The optimization of sol-gel, microwave-assisted sol-gel, solid state syntheses of the forming processes and of the desired compositions are the main topics covered in the ICMATE laboratories in this field.

However, there are other processes in which hydrogen is produced in mixture with other gases, following industrial or reforming processes. In these cases, it is necessary to separate hydrogen in order to use it efficiently in the processes and cycles of interest. Membranes, in particular metallic ones, offer a solution that allows the separation of hydrogen with high degrees of purity without energy consumption. Their development has been at the center of ICMATE activities for years, which have allowed the production of thin (thicknesses below 10µm) and dense metallic films on porous and inert ceramic supports at low cost, using a PVD (Physical Vapor Deposition) deposition technique called Hi-PIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering).

Thanks to a specially designed and built test station, ceramic materials for electrolyzers and metallic membranes are characterized under operating conditions.

For both categories of materials, the commitment is aimed at reducing or eliminating the elements considered critical according to the European guidelines, together with the optimization of the entire synthesis and production process of the devices.



Test station for evaluation of hydrogen permeability, selectivity and catalytic properties.

Stazione di test di permeabilità a idrogeno, selettività, proprietà di catalisi.



PRODUZIONE E PURIFICAZIONE DELL'IDROGENO: MATERIALI E DISPOSITIVI SOSTENIBILI

Nel corso degli anni, l'idrogeno ha acquisito un crescente interesse sia per il suo impegno in processi industriali, sia perché la sua elevata densità energetica lo rende un vettore energetico ideale.

Tra le varie modalità di produzione dell'idrogeno, l'elettrolisi dell'acqua è un processo che consente di ottenere prodotti non inquinanti (idrogeno e ossigeno) e di interfacciarsi con rinnovabili intermittenti per stoccare energia sotto forma di idrogeno. I dispositivi utilizzati a tale scopo sono di diverse tipologie, che dipendono dal tipo di elettrodi utilizzati e dalle condizioni di lavoro (temperatura, pressione). Nel caso di applicazioni ad alte temperature (500°-700°C), si utilizzano particolari materiali ceramici. Il gruppo ICMATE lavora su ceramici a conduzione protonica e mista elettronica-protonica, da impiegare come elettroliti ed elettrodi. L'ottimizzazione delle sintesi sol-gel, sol-gel assistita da microonde, stato solido, dei processi di formatura e delle composizioni desiderate sono i principali argomenti trattati nei laboratori ICMATE in questo ambito.

Esistono però altre situazioni in cui l'idrogeno viene prodotto in miscela con altri gas, a seguito di processi industriali o di reforming. In questi casi è necessario separare l'idrogeno per poterlo utilizzare con efficienza nei processi e cicli di interessi. Le membrane, in particolare quelle metalliche, offrono una soluzione che permette di avere la separazione dell'idrogeno con alti gradi di purezza senza consumo di energia. Il loro sviluppo è da anni al centro di attività ICMATE che hanno consentito la produzione di film metallici sottili (spessori sotto i 10µm) e densi su supporti ceramici porosi e inerti a basso costo, utilizzando una tecnica di deposizione PVD (Physical Vapor Deposition) denominata Hi-PIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering).

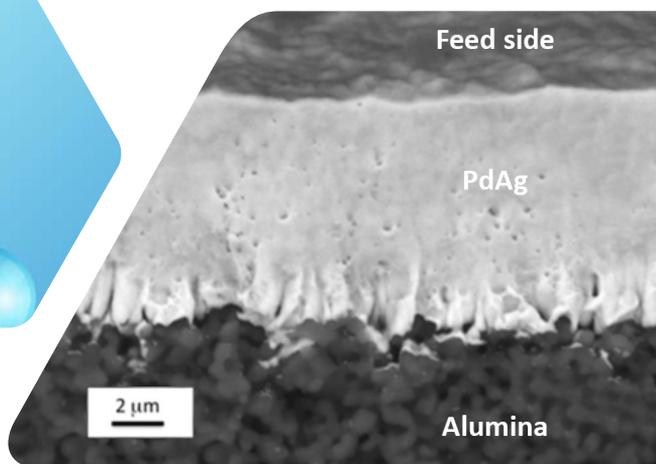
Grazie ad una stazione di test appositamente progettata e realizzata, materiali ceramici per elettrolizzatori e membrane metalliche vengono caratterizzati in condizioni operative.

Per entrambe le categorie di materiali, l'impegno è indirizzato a diminuire o eliminare gli elementi considerati critici secondo le linee guida europee, contestualmente all'ottimizzazione di tutto il procedimento di sintesi e produzione dei dispositivi.



Example of thin metallic membrane PdAg-based, deposited by means of Hi-PIMS onto porous alumina.

Esempio di membrana con film sottile di PdAg depositato mediante HiPIMS su allumina porosa.



MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR HYDROGEN CONVERSION AND STORAGE

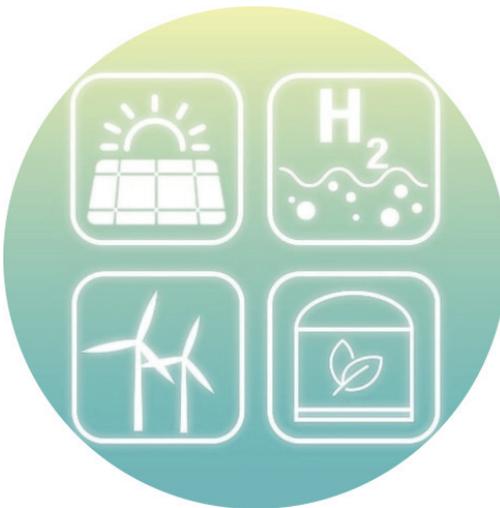
The energy system is moving towards the replacement of fossils-based sources with renewables like photovoltaic and wind power. However, integrating these intermittent sources requires energy storage and on-demand energy production technologies. Electrochemical cells are a priority as they enable both functions efficiently and with simple systems. These devices convert electrical energy into hydrogen (electrolyzer mode) or generate electricity by consuming hydrogen (fuel cell mode) without harmful emissions.

ICMATE is at the forefront of designing and developing durable and optimized ceramic and metallic materials for Solid Oxide Cells (SOC), for energy production (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC), and energy storage (Solid Oxide Electrolytic Cells, SOEC)

Computational and experimental research supports material development through chemical synthesis and laboratory-scale characterization.

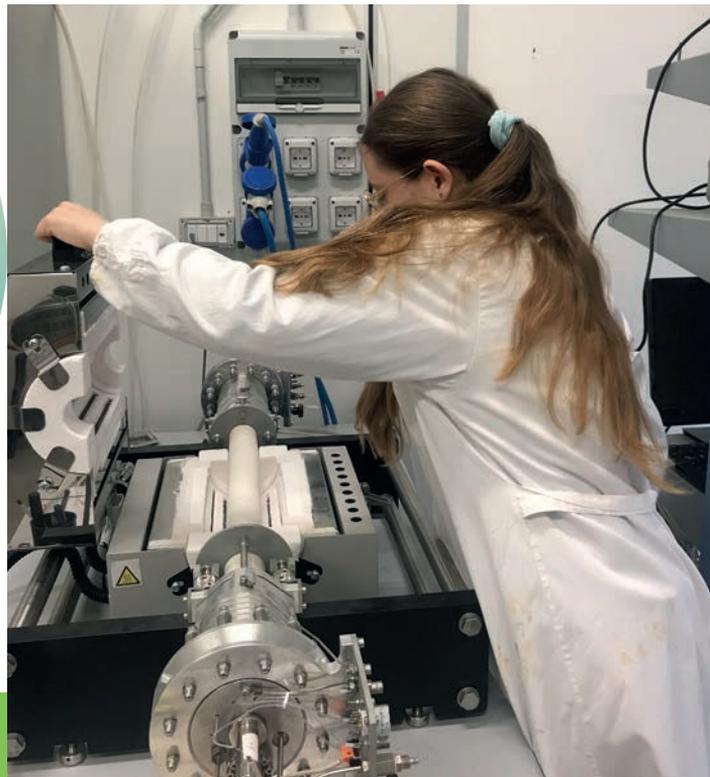
The goal is to enhance efficiency and sustainability by designing innovative materials, implementing green synthesis methods, and applying advanced characterization techniques. ICMATE focuses on developing controlled composition, structure, and morphology to improve functional properties and extend device lifetime, while reducing environmental impact by minimizing the use of critical raw materials.

To achieve this, colloidal techniques such as spraying, infiltration, and impregnation are used for fabricating electrodes and electrolytes with optimized porosity. Advanced characterization methods, including conductivity and impedance spectroscopy, help assess material performance and optimize electrochemical interfaces, supporting the transition towards clean energy solutions.



Testing samples at the electrochemical testing station for solid oxide cells.

Prove Sperimentali alla stazione di testing elettrochimico per celle a ossidi solidi.



MATERIALI E TECNOLOGIE PER LA CONVERSIONE E LO STOCCAGGIO DI IDROGENO

Il sistema energetico è avviato verso l'abbandono delle fonti fossili a favore di quelle rinnovabili come fotovoltaico ed eolico. L'integrazione di queste fonti intermittenti richiede tecnologie per l'accumulo e la produzione su richiesta di energia. Le celle elettrochimiche sono una priorità, poiché permettono entrambe le funzioni in modo efficiente e senza emissioni nocive, convertendo l'energia elettrica in idrogeno (elettrolizzatore) o generando elettricità consumando idrogeno (fuel cell).

ICMATE è all'avanguardia nello sviluppo di materiali ceramici e metallici stabili e ottimizzati per le Celle a Ossidi Solidi (SOC), per produzione di energia (celle a combustibile a ossidi solidi, SOFC) e accumulo (celle elettrolitiche a ossidi solidi SOEC).

La ricerca computazionale e sperimentale supporta lo sviluppo dei materiali attraverso la sintesi chimica e la caratterizzazione su scala di laboratorio.

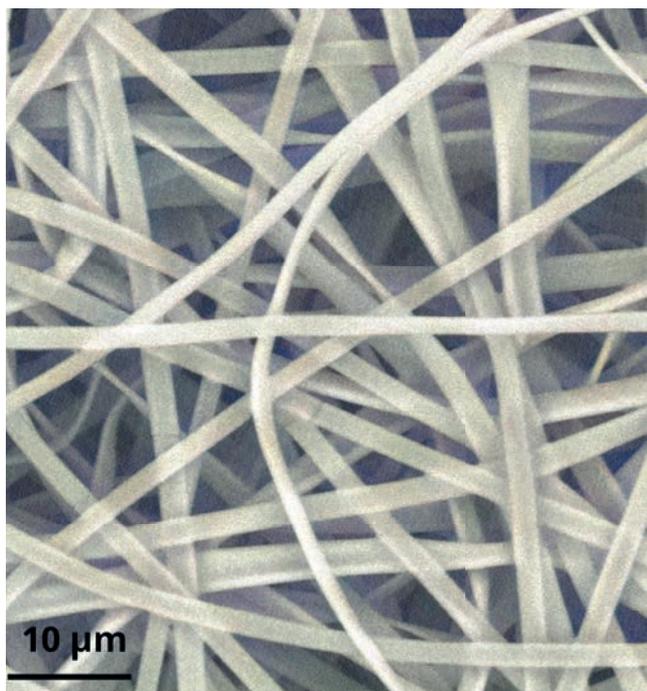
L'obiettivo è migliorare efficienza e sostenibilità con materiali innovativi, sintesi a basso impatto ambientale e tecniche avanzate di caratterizzazione. ICMATE sviluppa materiali con composizione, struttura e morfologia controllate, per ottimizzare le proprietà funzionali e prolungare la durata dei dispositivi, riducendo l'impatto ambientale e minimizzando l'uso di materie prime critiche.

A questo scopo, vengono impiegate tecniche colloidali come spray deposition, infiltrazione e impregnazione, per fabbricare elettrodi ed elettroliti con porosità ottimizzata. Metodi avanzati di caratterizzazione, tra cui misura di conducibilità e spettroscopia di impedenza, consentono di valutare le prestazioni dei materiali e ottimizzare le interfacce elettrochimiche, favorendo la transizione verso soluzioni energetiche pulite.



Electron microscope image of an electrode realized with a microstructure of microfibers optimized to maximize the reaction of the chemical involved species.

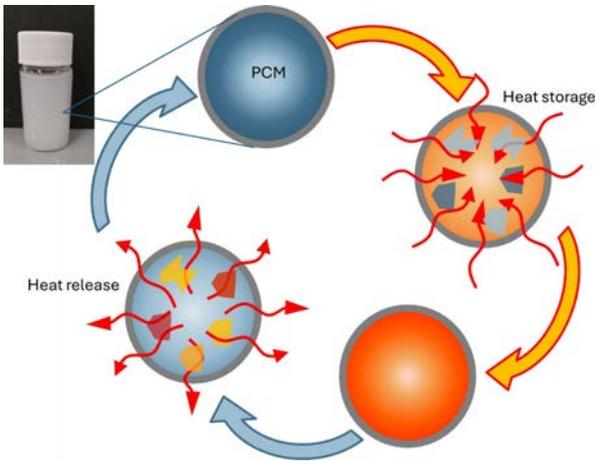
Immagine al microscopio elettronico di un elettrodo realizzato con una microstruttura di microfibre ottimizzate in modo da massimizzare la reazione delle specie chimiche coinvolte.



PHASE CHANGE MATERIALS FOR HEAT STORAGE AND ENERGY MANAGEMENT

ICMATE's research focuses on the development of Phase Change Materials (PCMs) for efficient thermal energy storage in both low- and high-temperature applications. For low-temperature PCMs (0°C to 100°C), we work on PCM emulsions (PCMEs), nano-encapsulated PCMs and PCM dispersed in building components, to enhance heat transfer and storage, particularly for building temperature control, refrigeration, and cold chain logistics.

ICMATE demonstrated the thermal performance of various heat transfer fluids based on water or water/glycol and using various kinds of Phase Change Materials (PCMs) melting in the typical ranges for cooling or heat exchange (10-30°C). Moreover, recent studies were dedicated to the dispersion of PCMs in insulating building components to reduce the gap between the peak and off-peak loads of energy demand, storing solar energy during the day, and releasing it at night, thus reducing the daytime temperature fluctuation and improving the degree of thermal comfort.



1

In the high-temperature range (200°C to 1000°C), ICMATE develops metallic PCMs, among which composite of immiscible alloys, known for their higher energy density and thermal conductivity compared to organic PCMs. These materials are being explored for use in concentrated solar power (CSP), industrial heat recovery, and aerospace applications. Research aims to enhance the heat storage capabilities and form stability of these materials, particularly in systems like Al-Sn and A356-Sn composites, which have demonstrated heat storage potential and stability in the 200°C-230°C range.

ICMATE combines advanced skills and techniques (nanofabrication, colloid chemistry, casting and microstructural analysis) to optimize both low- and high-temperature PCM systems for sustainable thermal management solutions.



2

1. Sample of a PCM emulsion and PCM operation scheme.
2. Scanning electron microscope investigation of metallic phase change materials.

1. Esempio di emulsione contenente PCM e schema del suo funzionamento.
2. Indagine al microscopio a scansione elettronica di materiali metallici a cambiamento di fase.

MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE PER LO STOCCAGGIO TERMICO E LA GESTIONE DELL'ENERGIA

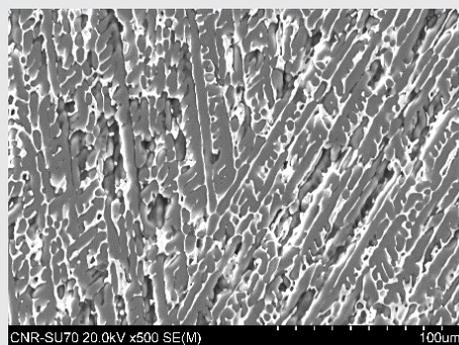
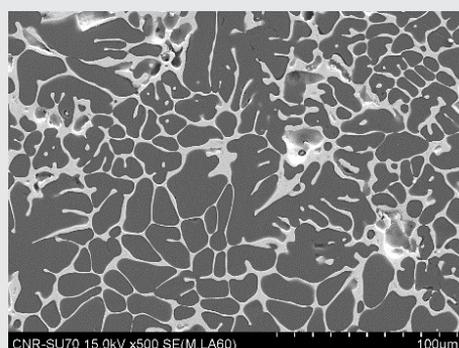
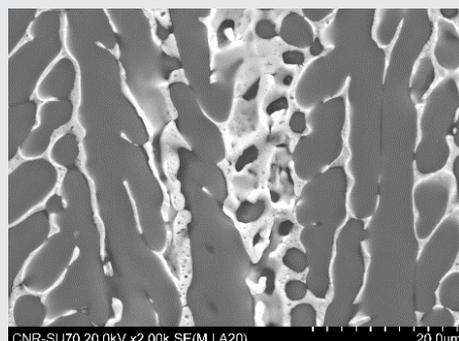
La ricerca di ICMATE si concentra sullo sviluppo di Materiali a Cambiamento di Fase (PCM) per uno stoccaggio efficiente dell'energia termica in applicazioni a basse e alte temperature. Per i PCM a bassa temperatura (da 0°C a 100°C), lavoriamo su emulsioni di PCM (PCMEs) e PCM nano-incapsulati per migliorare il trasferimento e lo stoccaggio del calore, in particolare per il controllo della temperatura degli edifici, la refrigerazione e la logistica della catena del freddo.

ICMATE ha dimostrato un aumento delle prestazioni termiche di vari fluidi per trasferimento di calore basati su acqua o acqua/glicole utilizzando vari tipi di materiali a cambiamento di fase (PCM) che fondono negli intervalli tipici per il raffreddamento o lo scambio di calore (10-30 °C). Inoltre, gli studi più recenti sono dedicati allo studio dell'effetto di PCM inseriti nei componenti isolanti degli edifici per immagazzinare energia solare durante il giorno, e rilasciandola di notte, riducendo così la fluttuazione della temperatura interna, riducendo i picchi di consumo energetico ed aumentando il grado di comfort.

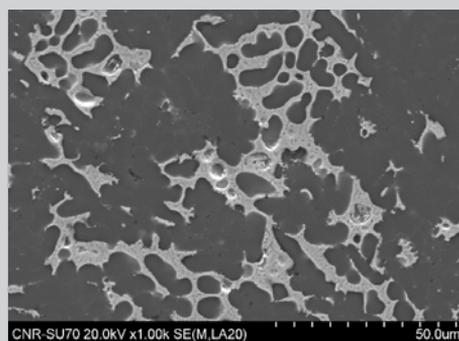
Per temperature più alte, (da 200°C a 1000°C), ICMATE sta sviluppando PCM metallici, in particolare materiali compositi formati da leghe non miscibili, noti per la loro maggiore densità energetica per unità di volume e conducibilità termica rispetto ai PCM organici. Questi materiali sono studiati per l'uso in impianti ad energia solare concentrata (CSP), per il recupero termico e la gestione del calore in ambito industriale e applicazioni aerospaziali. La ricerca mira a migliorare le capacità di stoccaggio del calore e la stabilità di forma di questi materiali, in particolare nei sistemi come Al-Sn e A356-Sn, che hanno dimostrato potenziale applicabilità nell'intervallo 200°C-230°C.

ICMATE combina competenze e tecniche avanzate (nanofabbricazione, chimica colloidale, tecnologie di fusione e analisi microstrutturale) per ottimizzare sia i sistemi PCM a bassa che ad alta temperatura per soluzioni sostenibili di gestione termica.

3. SEM microstructures of an Al-Sn alloy, produced by casting.
4. SEM microstructure of an A356-Sn alloys, produced by casting.
3. Micrografie SEM di una lega Al-Sn prodotta mediante fusione.
4. Micrografia SEM di una lega A356-Sn prodotta mediante fusione.



3



4

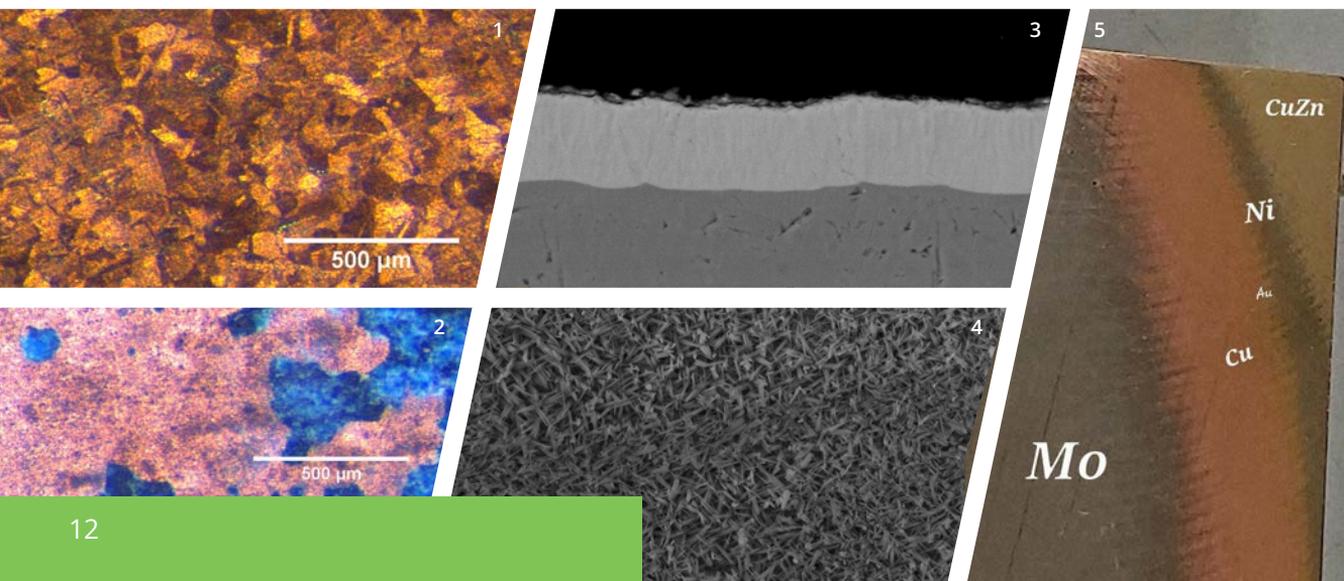
SURFACE ENGINEERING AND COATINGS FOR NUCLEAR FUSION APPLICATIONS

ICMATE's expertise in surface treatments, materials characterisation and thin film deposition technologies can be crucial for the thermonuclear fusion field. The plant environment exposes materials to extreme conditions, such as high temperatures, intense radiation and plasma interactions, which can lead to surface degradation, erosion and loss of functionality of the entire facility.

By optimising surface properties through advanced treatments or the application of coatings, ICMATE can significantly contribute to enhance the performance of plasma facing materials (PFMs). This includes improving thermal conductivity, corrosion resistance and mechanical stability, all of which are critical to maintain the efficiency and durability of plant components.

ICMATE researchers' contributions in this area could have a direct impact in the development of more efficient and durable thermonuclear fusion reactors, advancing the technology. The research focuses on the analysis of surfaces to obtain compositional, microstructural, morphological and mechanical information on the materials used. This field of activity is crucial as it involves several key aspects, such as the optimisation of RF sources. In addition, ICMATE's activities focus on understanding the mechanisms of high-voltage discharge, with the aim of optimising electrode surfaces and material conditioning in vacuums to reduce arcing and improve operational stability.

1. Optical microscope image of a Cu-based alloy microstructure of a component.
 2. Optical microscope image of the surface damage of a plasma exposed Cu-based specimen.
 3. SEM micrograph of a Mo-based coating (section view) grown for fusion applications.
 4. A damaged Cu-based surface exposed to plasma (SEM micrograph).
 5. Photograph of a protective multilayer coating for fusion applications.
1. Immagine al microscopio ottico della microstruttura di campione di lega a base Cu di un componente.
 2. Immagine al microscopio ottico di un campione danneggiato a base di Cu dopo esposizione al plasma.
 3. Micrografia SEM di un rivestimento a base di Mo (in sezione) per applicazioni fusion.
 4. Una superficie danneggiata a base di Cu esposta al plasma (micrografia SEM).
 5. Fotografia di un rivestimento protettivo multistrato per l'ambito fusion.



INGEGNERIA DELLE SUPERFICI E RIVESTIMENTI PER APPLICAZIONI NELLA FUSIONE NUCLEARE

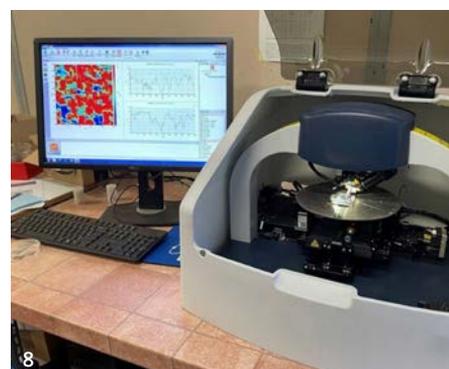
L'esperienza di ICMATE nei trattamenti superficiali, nella caratterizzazione dei materiali e nelle tecnologie di deposizione di film sottili può essere determinante per il settore della fusione termonucleare. L'ambiente negli impianti espone i materiali a condizioni estreme, come alte temperature, intensa radiazione e interazioni con il plasma, che possono portare al degrado superficiale, all'erosione e alla perdita di funzionalità dell'intero sistema.

Ottimizzando le proprietà superficiali attraverso trattamenti avanzati o l'applicazione di rivestimenti, ICMATE può contribuire in modo significativo a migliorare le prestazioni dei materiali esposti al plasma (PFMs). Questo include il miglioramento della conducibilità termica, della resistenza alla corrosione e della stabilità meccanica, tutti aspetti critici per mantenere l'efficienza e la durata dei componenti degli impianti.

I contributi di ICMATE in questo ambito potrebbero avere un impatto diretto nello sviluppo di reattori a fusione termonucleare più efficienti e durevoli, facendo progredire la tecnologia. La ricerca si concentra sull'analisi delle superfici per ottenere informazioni composizionali, microstrutturali, morfologiche e meccaniche dei materiali utilizzati negli impianti. Questo campo di attività è fondamentale poiché coinvolge diversi aspetti chiave, come l'ottimizzazione delle sorgenti RF. Inoltre, le attività di ICMATE si concentrano sulla comprensione dei meccanismi di scarica ad alta tensione, con l'obiettivo di ottimizzare le superfici di elettrodi e il condizionamento dei materiali in vuoto, per ridurre gli archi elettrici e migliorare la stabilità operativa.



6



8



9

6. Magnetron sputtering deposition process of a protective Mo-based film.
7. PVD-Magnetron Sputtering vacuum chamber.
8. Surface topological analysis via mechanical profilometry.
9. PVD-Magnetron Sputtering facility for deposition of protective thin films for fusion applications.
6. Processo di deposizione via magnetron sputtering di un film protettivo a base di Mo.
7. Camera da vuoto di un sistema PVD-Magnetron Sputtering.
8. Analisi topologica della superficie tramite profilometria meccanica.
9. Impianto PVD-Magnetron Sputtering per la deposizione di film sottili protettivi per applicazioni in ambito fusione termonucleare.

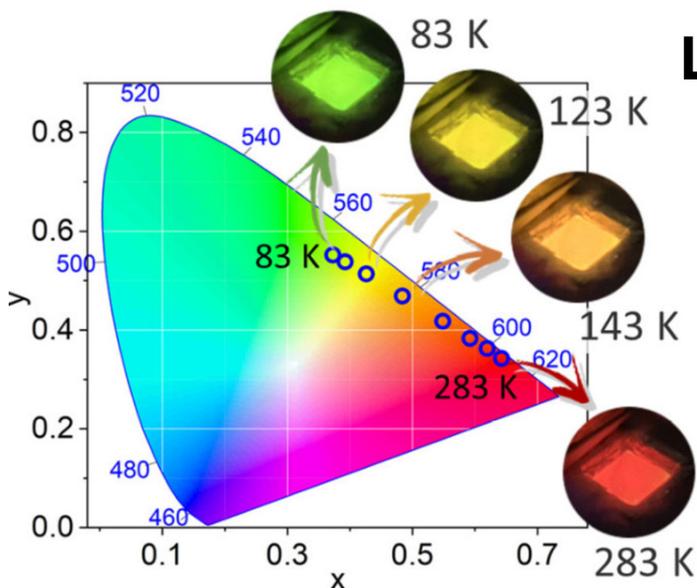
LANTHANIDE-BASED MATERIALS FOR LIGHT DRIVEN APPLICATION

Lanthanide (Ln) based materials are of paramount importance for modern society with applications ranging from lighting and displays to medicine, telecommunications, and catalysis. Light-driven applications are probably the trademark of these materials.

We are actively researching in two innovative fields of Ln light-driven properties: I) luminescent molecular thermometers (LMTs) and II) luminescent solar concentrators (LSCs).

I. LMTs are luminescent molecules that act as thermometers at the molecular scale. These smart molecules enable temperature measurement following their luminescence variation. This property is very appealing for many applications ranging from material science and engineering to nanomedicine since it allows a temperature mapping at micrometric scale.

II. Developing energy-efficient infrastructures towards decarbonisation of buildings requires innovative renewable energy technologies. Among these, building-integrated photovoltaics (BIPVs) aim to directly integrate PV systems into constructions as replacement for conventional building components (for instance: windows). LSCs are devices that pave the way to the realization of transparent or semi-transparent BIPVs. They consist in slabs of glassy or polymeric material doped or coated with luminescent species, whose emission can be stimulated by the sunlight. The emitted radiation is then waveguided towards the edges of the device, where thin strips of conventional PV material convert it into electrical power.



LMT



Examples of LMT and LSC exploiting Lanthanide-based materials.

Esempi di LMT e LSC che sfruttano materiali a base di lantanidi.

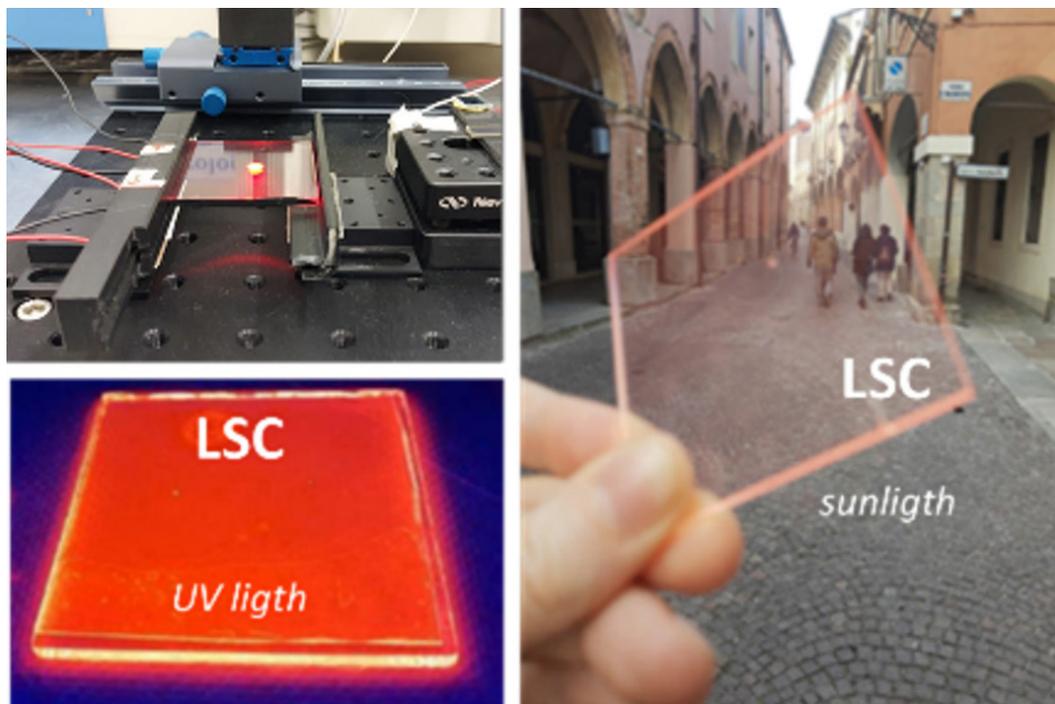
MATERIALI A BASE DI LANTANIDI PER APPLICAZIONI GUIDATE DALLA LUCE

I materiali a base di lantanidi sono di fondamentale importanza per la società moderna, con applicazioni che vanno dall'illuminazione e dai display alla medicina, alle telecomunicazioni e alla catalisi. Le applicazioni guidate dalla luce sono probabilmente il marchio di fabbrica di questi materiali.

Stiamo svolgendo attività di ricerca in due campi innovativi in questo ambito applicativo: I) termometri molecolari luminescenti (LMT) e II) concentratori solari luminescenti (LSC).

I. Gli LMT sono molecole luminescenti che agiscono come termometri su scala molecolare. Queste molecole intelligenti consentono di misurare la temperatura in base alla loro variazione di luminescenza. Questa proprietà è molto interessante per molte applicazioni che spaziano dalla scienza ed ingegneria dei materiali alla nanomedicina, in quanto consente una mappatura della temperatura su scala micrometrica.

II. Lo sviluppo di infrastrutture efficienti dal punto di vista energetico per la decarbonizzazione degli edifici richiede tecnologie innovative per le energie rinnovabili. Tra queste, il fotovoltaico integrato negli edifici (BIPV) mira ad accoppiare direttamente i sistemi fotovoltaici nelle costruzioni in sostituzione dei componenti edilizi convenzionali (ad esempio nelle finestre). Gli LSC sono dispositivi per la produzione di energia solare ed ideali per la realizzazione di BIPV trasparenti o semitrasparenti. Sono costituiti da lastre di materiale vetroso o polimerico arricchito con specie luminescenti, la cui emissione può essere stimolata dalla luce solare incidente sulla superficie della lastra. La radiazione emessa viene quindi guidata verso i bordi del dispositivo, dove sottili strisce di materiale fotovoltaico convenzionale la convertono in energia elettrica.

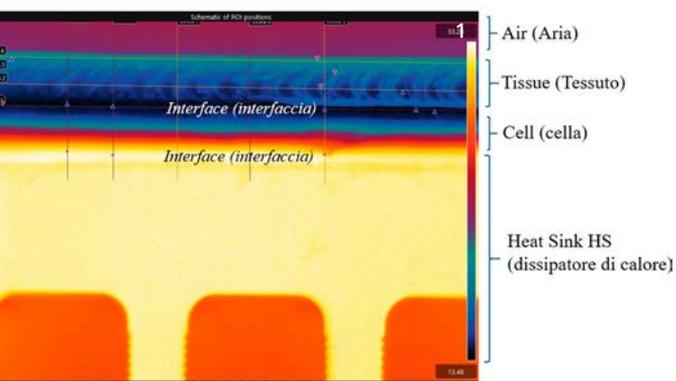


THERMOELECTRICITY: AN OPPORTUNITY TO “RECYCLE” ENERGY AND TO IMPROVE WORKING CONDITIONS

Thermoelectric technology represents one of the solution for energy harvesting allowing the direct conversion of a collected or wasted heat into electrical power. Thermoelectric (TE) materials are a class of functional materials employed in solid-state energy generators and coolers, without the use of fossil fuels and combustion processes, and with no moving parts, exploiting only the temperature gradients. The TE materials are capable of directly transforming the heat passing through them into electrical energy or, alternatively, using electrical current to pump heat from cold to hot sources. Additionally, in thermoelectric systems, the material itself is responsible for the conversion, with no need of supplementary devices.

Thus, very compact systems can be developed, opening unique opportunities of use. A strategic example can be represented by “individual” air conditioning. If a thermoelectric heat pump could be integrated into a garment, it may be possible to manage the temperature of the air close to the body, keeping a comfortable state for the person. Thermoelectric systems with this purpose are the object of investigation and development for several academic and industrial groups. A strategic aspect of the system based on thermoelectrics is its being effective both in hot, by cooling, and cold, by heating, situations.

ICMATE focuses on current research on TE materials seeking greater efficiency, as well as non-toxic and cost-effective solutions. Specifically, ICMATE works on the development of a system to be integrated also into a simple T-shirt, to improve the comfort of workers operating in thermally demanding contexts. The system, interfaced with a network of sensors distributed throughout the textile of the shirt, will reduce the thermal stress perceived by workers, promoting better working conditions. Some of the TE materials being investigated include the half Heusler $\text{TiNi}_{1+x}\text{Sn}$ alloys ($x = 0, 0.03, 0.06, 0.12$) that are a model system for understanding the relationship among structural, electronic, microstructural and thermoelectric properties. Cu-Sn-S-based systems (CTS) are also studied as both p-type and n-type semiconductors. CTS family has attracted the TE community for its remarkable crystallographic structures with different degrees of cation-disorder, which helps in the suppression of thermal conductivity to an ultra-low level, without much hindrance to the electronic transport, also known as the so-called “phonon-glass-electron-crystal (PGEC)” behavior.



1. Thermo-camera image for observations of heat distribution on tissue sample.
2. Longitudinal profile for temperature trends along the layers under investigation.
3. Experimental solution for the application of thermal conditioning on the tissue under study.

1. Immagine di termo-camera per osservazioni della distribuzione di calore sul campione di tessuto
2. Profilo longitudinale per l'andamento di temperature lungo gli strati in esame.
3. Accorgimento sperimentale per applicazione del condizionamento termico sul tessuto in studio (in evidenza).

LA TERMOELETTRICITÀ: UN'OPPORTUNITÀ PER IL "RICICLO" ENERGETICO E IL MIGLIORAMENTO DELLE CONDIZIONI DI LAVORO

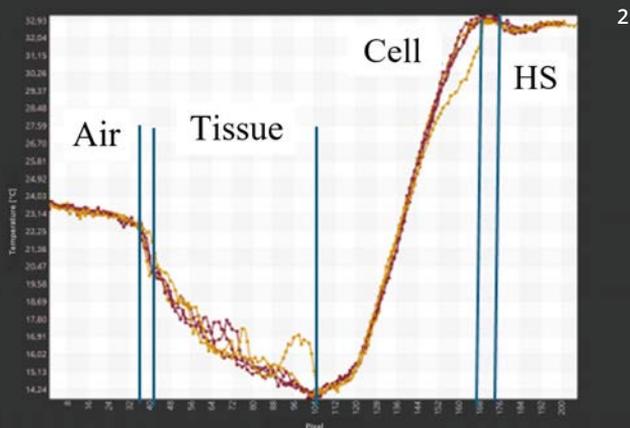
La tecnologia termoelettrica rappresenta una delle soluzioni per la raccolta di energia che consente la conversione diretta di un calore raccolto o sprecato in energia elettrica. I materiali termoelettrici (TE) sono una classe di materiali funzionali impiegati nei generatori e nei raffreddatori di energia allo stato solido, senza l'uso di combustibili fossili e processi di combustione, e senza parti in movimento, sfruttando solo i gradienti di temperatura. I materiali TE sono capaci di trasformare direttamente il calore che li attraversa in energia elettrica o, in alternativa, di usare la corrente elettrica per pompare il calore dal freddo al caldo. Nei sistemi termoelettrici è il materiale stesso a fare il lavoro di conversione e non richiede quindi macchinari a supporto per accedere a queste proprietà.

Così, diventa possibile sviluppare sistemi anche molto compatti che trovano contesti di utilizzo unici. Un esempio è quello della climatizzazione corporea: se si pensa di integrare una pompa di calore termoelettrica in un indumento, si può riuscire a controllare la temperatura dell'aria prossima al corpo, mantenendo localmente il comfort ottimale per la persona. Sistemi termoelettrici con questa finalità sono di interesse per diversi gruppi accademici e industriali. La cosa davvero rilevante del sistema basato sulla tecnologia termoelettrica è che sarà efficace tanto al caldo, raffrescando, quanto al freddo, riscaldando.

ICMATE si concentra sull'attuale ricerca sui materiali TE ricercando una maggiore efficienza, soluzioni non tossiche ed economiche. In particolare, ICMATE lavora allo sviluppo di sistemi da integrare anche in una maglietta, per migliorare le condizioni di lavoro di operatori attivi in contesti lavorativi termicamente gravosi. Il sistema, interfacciato a una rete di sensori distribuiti nella maglia, contribuirà a minimizzare lo stress termico percepito dai lavoratori, promuovendo migliori condizioni di lavoro.

Alcuni dei materiali TE oggetto di studio includono: le leghe half-Heusler $\text{TiNi}_{1+x}\text{Sn}$ ($x = 0, 0,03, 0,06, 0,12$) che costituiscono un sistema modello per comprendere la relazione tra proprietà strutturali, elettroniche, microstrutturali e termoelettriche.

I sistemi basati su Cu-Sn-S (CTS) sono anche studiati come semiconduttori sia di tipo p che di tipo n. La famiglia dei CTS ha attratto la comunità TE per le sue notevoli strutture cristallografiche con diversi gradi di disordine cationico, che aiuta nella soppressione della conducibilità termica a un livello ultra-basso, senza molto ostacolo al trasporto elettronico, noto anche come il cosiddetto comportamento "phonon-glass-electron-crystal (PGEC)".



ADDITIVE MANUFACTURING OF HIGH-PERFORMANCE COOLING SYSTEMS AND ELASTOCALORIC TECHNOLOGIES

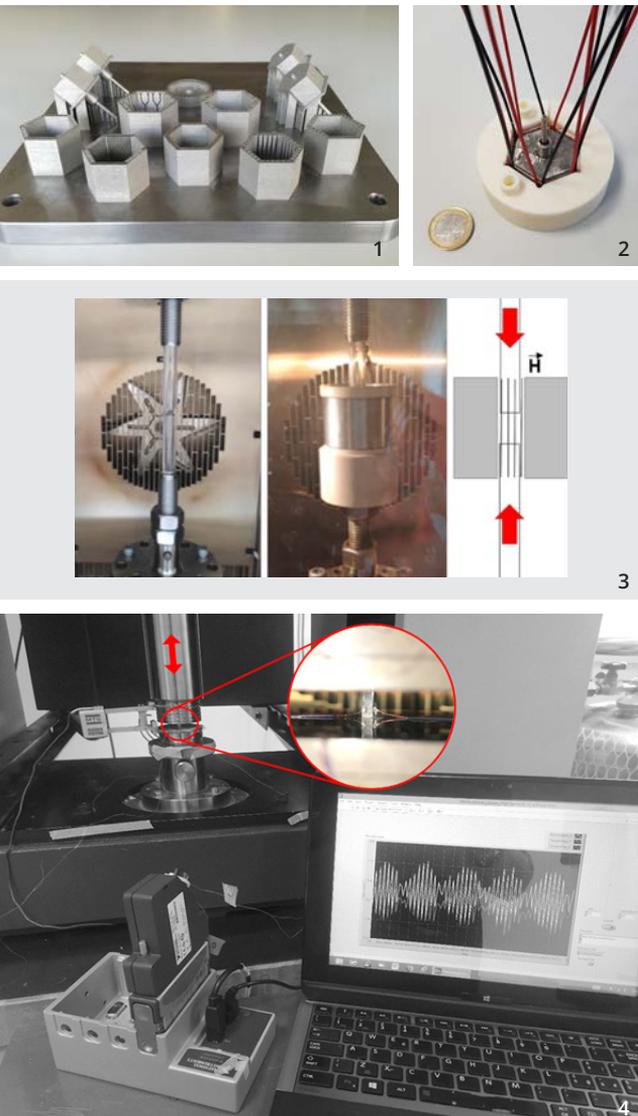
ICMATE is advancing innovative cooling systems using additive manufacturing. In collaboration with industry partners, this research explores metal-based additive manufacturing to create complex, high-efficiency thermal management structures.

Using laser powder bed fusion (LPBF), ICMATE fabricates prototypes with sub-millimetric mini-channels, enhancing heat transfer. These designs enable next-gen applications like mini thermoelectric generators (TEGs). For instance, hexagonal burners with custom-designed walls have been developed to optimize portable TEGs, offering high power density at lower costs.

ICMATE also explores shape memory alloys (SMAs) and magnetic SMAs for solid state cooling, a sustainable alternative to vapor-compression refrigeration, which currently consumes 15% of global electricity. With cooling demand expected to triple in 30 years, caloric systems offer an efficient, eco-friendly solution.

SMAs, such as NiTi and NiMn-based materials, exhibit caloric effects (elastocaloric, magnetocaloric, electrocaloric), absorbing or emitting heat under mechanical force, magnetic fields, or electric currents. NiTi, for example, undergoes adiabatic temperature changes up to 30 K when cyclically loaded and unloaded.

A promising frontier involves combining magnetic and elastocaloric effects in FeSMAs, which merge ferromagnetic and thermoelastic properties for multifunctional cooling. ICMATE's work combines additive manufacturing and caloric technologies, offering sustainable and innovative solutions for thermal applications.



1. 2. Building LPBF platform with customized SS316L combustion cells (left) and Miniature TEG with cap and combustion chamber fabricated through LPBF (right).
3. 4. Experimental set ups for magneto/mechanical coupling and direct measurement of ΔT .

Next page, examples of metal mini-channels prototypes (SS316L and Al alloy) fabricated through LPBF at Lecco unit of CNR-ICMATE.

1. 2. Piattaforma di costruzione del processo LPBF con celle a combustione personalizzate in acciaio SS316L (sinistra) e TEG miniaturizzato con coperchio e cella a combustione fabbricate mediante processo LPBF (destra).

3. 4. Set-up sperimentale per la caratterizzazione dell'accoppiamento magneto-meccanico e misura diretta ΔT adiabatico.

Pagina seguente, esempi di prototipi di mini-canali (SS316L e lega di Al) fabbricati mediante processo LPBF nei laboratori di Lecco dell'istituto ICMATE.

PRODUZIONE ADDITIVA DI SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO AD ALTE PRESTAZIONI E TECNOLOGIE ELASTOCALORICHE

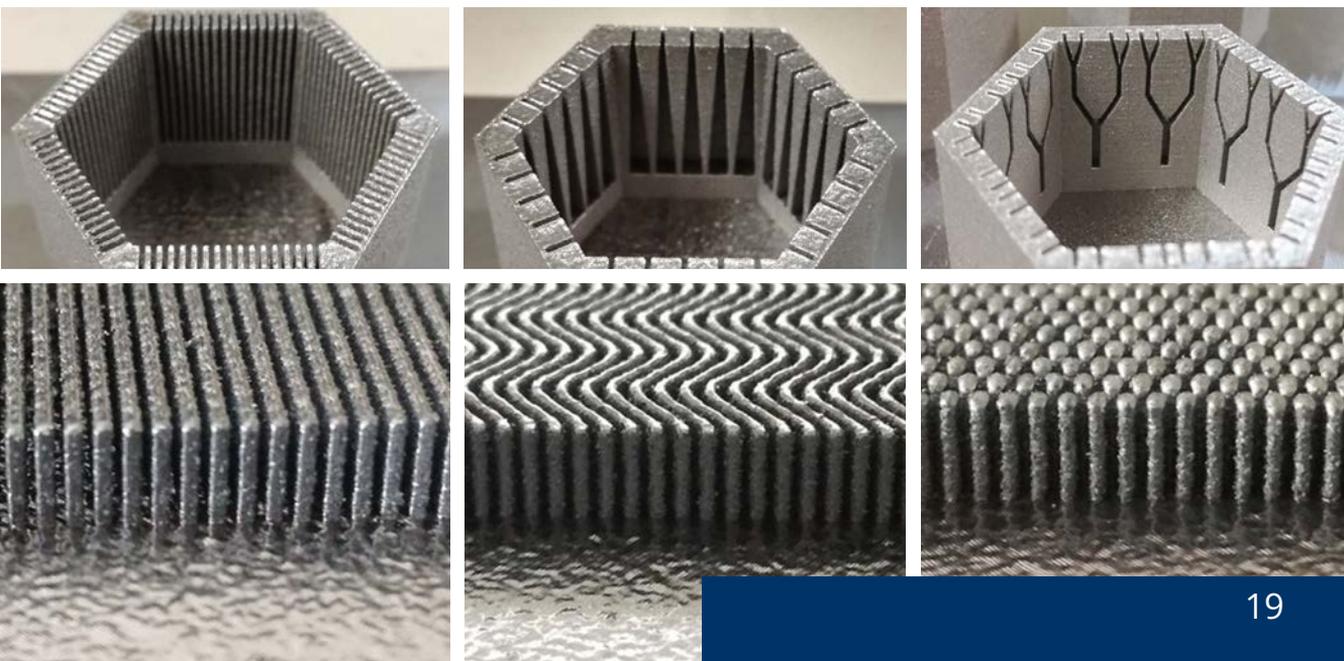
ICMATE sta sviluppando sistemi di raffreddamento innovativi ad alte prestazioni sfruttando la produzione additiva. In collaborazione con partner industriali, la ricerca esplora il potenziale dei metalli nella produzione additiva per creare strutture complesse ed efficienti per la gestione termica.

La fusione a letto di polvere laser (LPBF) consente la fabbricazione di geometrie intricate e miniaturizzate. Utilizzando polveri metalliche micrometriche, ICMATE ha sviluppato prototipi con mini-canali sub-millimetrici, migliorando l'efficienza del trasferimento termico. Questi prototipi aprono opportunità per applicazioni come mini generatori termoelettrici (TEG), con celle a combustione esagonali con pareti a mini canali progettate per ottimizzare la gestione termica nei TEG portatili. La flessibilità progettuale della produzione additiva ha permesso di ottenere TEG compatti e ad alta densità di potenza, riducendo i costi.

ICMATE esplora anche leghe a memoria di forma (SMA), incluse le magnetiche, per il raffreddamento a stato solido. Questi sistemi offrono un'alternativa ecologica ai tradizionali sistemi di refrigerazione a compressione di vapore, che rappresentano il 15% del consumo elettrico globale. Con la domanda di raffreddamento destinata a triplicare nei prossimi trent'anni, le tecnologie caloriche a stato solido offrono una soluzione sostenibile.

Le SMA, come il NiTi o NiMn-based, subiscono variazioni di temperatura per effetto elastocalorico, magnetocalorico o elettrocalorico, a seconda del campo di induzione dell'effetto. La variazione di temperature ottenuta per effetto elastocalorico nel NiTi può raggiungere fino a 30 K sotto carico ciclico. La combinazione di effetti magnetici ed elastocalorici, come nelle leghe FeSMA, promette dispositivi di raffreddamento più efficienti e multifunzionali.

Il lavoro di ICMATE unisce produzione additiva e tecnologie caloriche, offrendo soluzioni sostenibili e innovative per applicazioni termiche.



CERAMICS AND COMPOSITES FOR ENERGY HARVESTING AND STORAGE

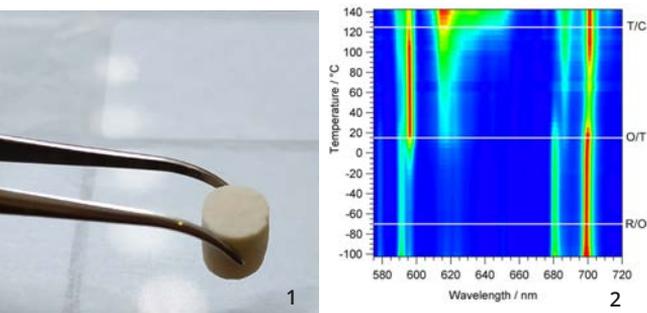
ICMATE is deeply engaged in advanced research on ceramics and composites, with a focus on materials exhibiting functional properties like ferroelectricity and piezoelectricity. The expertise extends to all phases of material preparation, including powder synthesis, forming, sintering, and advanced microstructural and dielectric characterization. In particular, liquid-phase synthesis techniques are combined to controlled doping and surface engineering processes to obtain materials with defined microstructures and improved or specific functional properties.

Solid solutions such as $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{-}x\text{BaZrO}_3$ and $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{-}x\text{BaCeO}_3$, which have perovskite structures, are systematically studied to understand how composition and properties interrelate from the macro to the microscale. Additionally, the introduction of small amounts of rare earth ions like Eu^{3+} into perovskite hosts can create ceramics with luminescence properties that vary with composition and temperature.

In the realm of polymer-matrix composites, ICMATE is investigating materials that combine the flexibility and high dielectric strength of polymers with the functional properties of inorganic fillers.

These smart materials, particularly those with piezoelectric or dielectric behavior, are ideal for energy harvesting and storage applications and are gaining ever-growing importance in miniaturized wireless devices, wearable healthcare biosensors, implantable microsensors and other microsystems. A focal point is the use of non-toxic, eco-friendly materials

such as polyvinylidene fluoride (PVDF), polydimethylsiloxane (PDMS), and lead-free ceramic particles like BaTiO_3 , BNT-BT, and BCTZ. The selection of energy-efficient, environmentally friendly fabrication processes, including hydrothermal synthesis and solvent-free procedures, such as melt-blending and microwave heating, is also emphasized.



1. Lab-scale ferroelectric ceramic sample for energy storage application.
2. Evolution of the photoluminescence spectra with the temperature for the representative ferroelectric ceramic.
3. Functional ceramic materials and piezoelectric composites are prepared at the ICMATE laboratories starting from powders, synthesised by both solid-state reaction and innovative wet chemistry methods.

1. Campione ceramico ferroelettrico per applicazione in accumulo di energia.
2. Evoluzione della fotoluminescenza con la temperatura per il ceramico rappresentativo.
3. I materiali ceramici funzionali e i compositi piezoelettrici vengono preparati nei laboratori ICMATE a partire da polveri sintetizzate sia per reazione allo stato solido, sia attraverso metodi innovativi di sintesi in fase liquida.

MATERIALI CERAMICI E COMPOSITI PER LA RACCOLTA E L'ACCUMULO DI ENERGIA

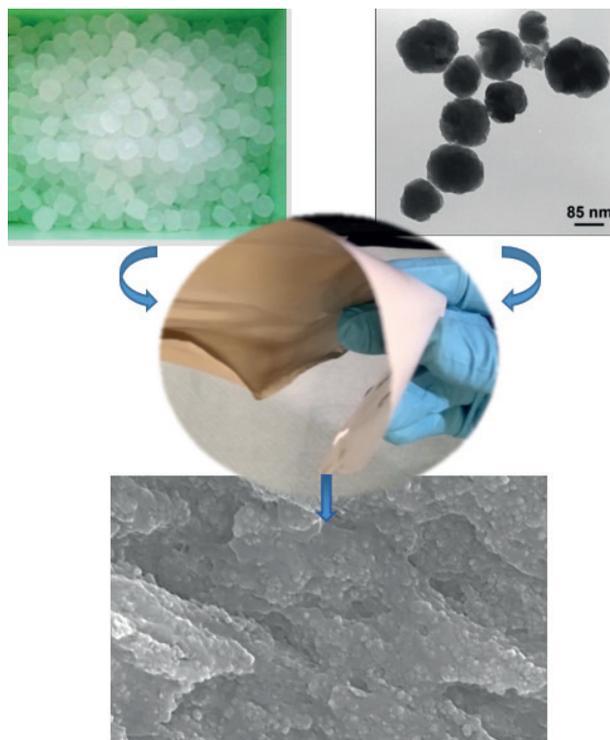
ICMATE è fortemente impegnato nella ricerca avanzata su ceramiche e compositi, con particolare attenzione a materiali con proprietà funzionali come ferroelettricità e piezoelettricità. L'esperienza si estende a tutte le fasi di preparazione dei materiali, compresa la sintesi delle polveri, formatura, sinterizzazione e la caratterizzazione microstrutturale e dielettrica avanzata. In particolare, le tecniche di sintesi in fase liquida vengono abbinate a processi di drogaggio controllato e ingegnerizzazione superficiale per ottenere materiali con microstrutture definite e proprietà funzionali migliorate o specifiche.

Soluzioni solide come $(1-x)\text{BaTiO}_3-x\text{BaZrO}_3$ e $(1-x)\text{BaTiO}_3-x\text{BaCeO}_3$, caratterizzate da strutture perovskitiche, vengono studiate sistematicamente per comprendere come composizione, struttura e proprietà sono correlate dalla macro alla microscala.

Inoltre, l'introduzione di piccole quantità di ioni di terre rare, come Eu^{3+} , in matrici perovskitiche può creare materiali ceramici con proprietà di luminescenza variabili in base alla composizione e alla temperatura.

Nel campo dei compositi a matrice polimerica, ICMATE sta investigando materiali che combinano la flessibilità e l'elevata resistenza dielettrica dei polimeri con le proprietà funzionali della fase ceramica. Questi materiali intelligenti, in particolare quelli con comportamento piezoelettrico o dielettrico, sono ideali per applicazioni di raccolta e accumulo di energia e stanno diventando sempre più importanti nei dispositivi wireless miniaturizzati, biosensori indossabili per la salute, microsensori impiantabili e altri microsistemi.

Un punto focale è l'uso di materiali non tossici ed eco-compatibili come polivinilidenefluoruro (PVDF), polidimetilsilossano (PDMS), e particelle ceramiche prive di piombo come BaTiO_3 , BNT-BT e BCTZ. Viene inoltre data importanza alla selezione di processi di fabbricazione energeticamente efficienti ed ecologici, tra cui la sintesi idrotermale e metodiche che non implicano l'uso di solventi, come il melt-blending e il riscaldamento a microonde.



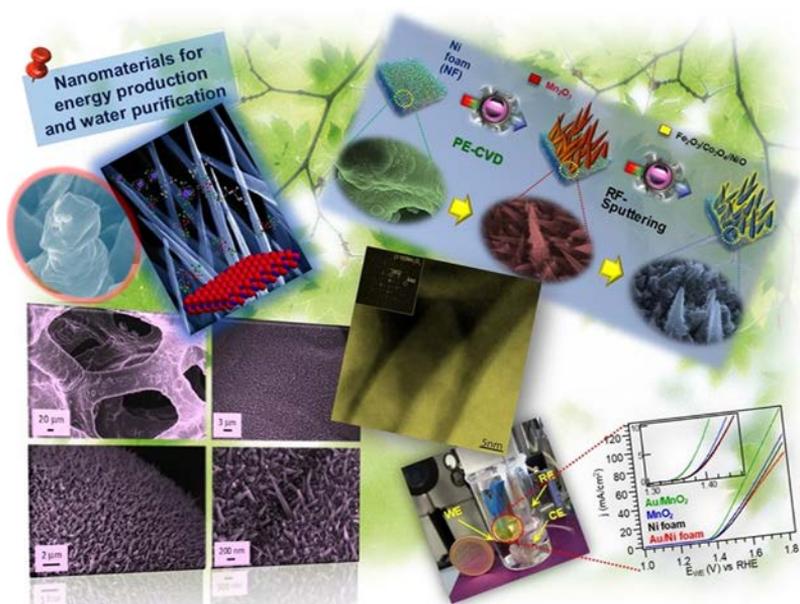
Preparation of a ferro/piezoelectric composite for application in energy storage or harvesting starting from the polymer and the ceramic phase.

Preparazione di un composito ferro/piezoelettrico flessibile a partire dal polimero e la fase ceramica.

MULTI-FUNCTIONAL INORGANIC AND HYBRID NANOARCHITECTONICS BY LIQUID-, VAPOR-PHASE AND PLASMA-ASSISTED METHODOLOGIES

Sustainable development in compliance with environmental and human health protection requires eco-friendly solutions towards improved economic and social wellbeing. In this regard, Agenda 2030 underscores the urgent need to decarbonize the current energy portfolio to a cleaner one, as promised by the transition to a hydrogen-based economy. The successful achievement of these goals relies on the controlled fabrication of low-cost and green multi-functional nanomaterials for clean energy production, air/water purification, and self-cleaning/anti-fogging applications. The *trait d'union* boosting further advancements in these fields is the possibility of harnessing sunlight, an abundant and renewable resource, to activate catalytic platforms with controllable properties and diversified reactivity.

In this context, an internationally recognized know-how has been matured in the fabrication of inorganic and hybrid nanomaterials with variable dimensionality [based on first-row transition metal (Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn) oxides, eventually functionalized with highly dispersed noble metal nanoparticles, or in combination with graphitic carbon nitride]. The modulation of material features offers a broad perspective for property tailoring in the framework of *nanoarchitectonics*, an emerging paradigm based on the synergistic combination of nanotechnologies with other specific disciplines to yield systems with unique characteristics and tailored information. To this aim, innovative synthetic protocols combining vapor-phase and plasma-assisted techniques even with liquid-phase processes can afford inorganic and hybrid nanomaterials with diversified nano-organization. In particular, non-equilibrium, weakly ionized plasmas provide unique reaction environments, leading to peculiar material features hardly attainable by conventional preparation routes, even at low growth temperatures. The underlying activities cover the whole chain from molecular precursor preparation to controlled nanomaterial growth, encompassing their thorough characterization, and open the door to additional progresses aimed at protecting and valorising the natural capital towards a more sustainable society.



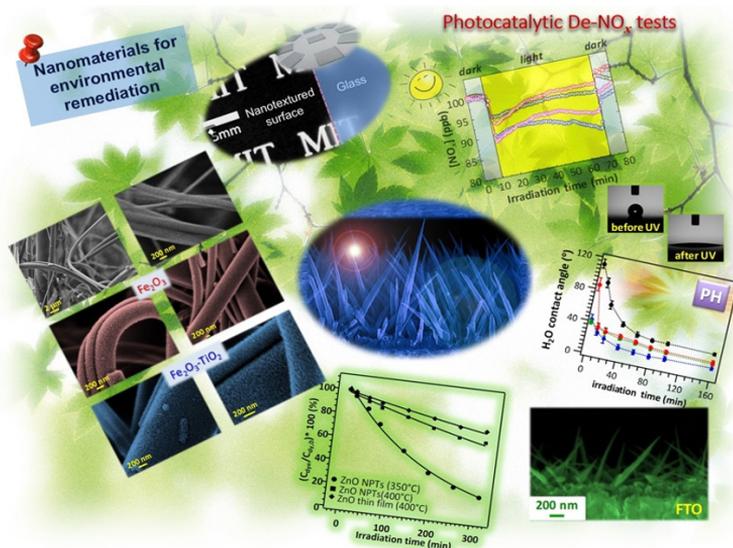
Oxide nanoarchitectures on metallic foams: photoelectrocatalysts for energy generation/water purification.

Nanoarchitetture di ossidi su schiume metalliche: fotoelettrocatalizzatori per generazione di energia/purificazione dell'acqua.

NANOARCHITETTURE MULTI-FUNZIONALI INORGANICHE ED IBRIDE MEDIANTE METODOLOGIE DA FASE LIQUIDA, DA FASE VAPORE E PLASMA-ASSISTITE

Lo sviluppo sostenibile nel rispetto dell'ambiente e della salute umana richiede soluzioni ecocompatibili per un migliorato benessere economico e sociale. A tal proposito, Agenda 2030 evidenzia l'urgenza di decarbonizzare il portafoglio energetico a favore di uno più pulito, in linea con la transizione verso un'economia basata sull'idrogeno. Il pieno conseguimento di questi obiettivi si basa sulla fabbricazione controllata di nanomateriali multifunzionali a basso costo ed ecologici per la produzione di energia pulita, la purificazione di aria/acqua e per sistemi autopulenti/anti-appannanti. Il *trait d'union* che promuove ulteriori progressi in tali campi risiede nella possibilità di trarre vantaggio dalla luce solare, una risorsa naturale abbondante e rinnovabile, per l'attivazione di piattaforme catalitiche multifunzionali con proprietà controllabili e reattività diversificate.

In questo contesto, è stato maturato un *know-how* internazionalmente riconosciuto nella fabbricazione di nanomateriali inorganici e ibridi a dimensionalità variabile [basati su ossidi di metalli della prima serie di transizione (Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn), eventualmente funzionalizzati con nanoparticelle di metalli nobili altamente disperse, o combinati con nitrato di carbonio grafatico]. La modulazione delle caratteristiche dei materiali offre un'ampia prospettiva per il *tailoring* delle loro proprietà nell'ambito della *nanoarchitettura*, un paradigma emergente basato sulla combinazione sinergica delle nanotecnologie con altre discipline specifiche per ottenere sistemi dotati di caratteristiche uniche e informazioni "personalizzate". A tal fine, innovativi protocolli sintetici che prevedono l'accoppiamento di tecniche da fase vapore e plasma-assistite anche con processi da fase liquida consentono di ottenere nanomateriali inorganici e ibridi con diversi tipi di nano-organizzazione. In particolare, i plasmi di non-equilibrio debolmente ionizzati forniscono un ambiente di reazione e percorsi di attivazione unici, portando a peculiari caratteristiche dei materiali risultanti, difficilmente ottenibili con metodi convenzionali, anche a basse temperature di crescita. Le attività correlate coprono l'intera catena, dalla preparazione dei precursori molecolari fino alla crescita controllata dei nanomateriali, includono la loro approfondita caratterizzazione, ed aprono il campo ad ulteriori progressi volti a proteggere e valorizzare il capitale naturale verso una società più sostenibile.



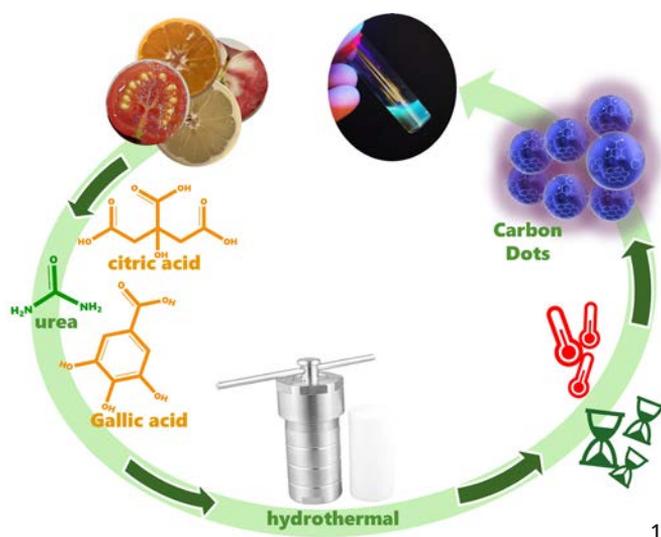
Nanoarchitectures for environmental remediation and self-cleaning systems.

Nanoarchitetture per il risanamento ambientale e sistemi autopulenti.

SUSTAINABLE CARBON-BASED NANOMATERIALS FROM BIOMASSES

The development of photoluminescent nontoxic functional nanomaterials, which can be easily synthesized and tailored for specific applications, is paramount for many sectors, going from electronics to the environment, agriculture, biology, and medicine. In this context, carbon quantum dots (CDs) are growing in interest because of their peculiar properties, like, among all, photoluminescence. They consist of a carbon core covered by surface functionalities, which regulate material processability in terms of post-formation modification. CD's surface can be finely tailored by covalent and non-covalent derivatizations with desired species to develop new functional materials. Starting from this scenario, ICMATE develops reliable and sustainable synthesis processes for the preparation of CDs with reproducible properties and surface functionalities. We employ the hydrothermal/solvothermal strategy, which is suitable for future large-scale industrial applications, and we adopt a simplified approach (Scheme 1) based on the employment of small molecules that could be extracted from biomass, biowaste, or lignin.

The activity is in close and synergic collaboration with the Department of Earth and Environmental Sciences of the University of Milano-Bicocca for the biomasses' treatment and extraction of the potential precursors for CD's preparation, the synthesis and design of sugar-based molecular systems for CD's post-formation modification and biological/bioimaging tests.



The obtained nanomaterials are characterized through spectroscopic, electrochemical, and morphological techniques (Fig. 2, 3) and are employed as such or post-functionalized for advanced applications in Nanomedicine, such as bioimaging.

Figs. 3, 4 shows the green fluorescence images of CDs prepared in ICMATE laboratories and injected into zebrafish larvae's bodies.

Other interesting applications could be in precision agriculture as components of bio-stimulant formulations for foliar treatments or in intelligent bio-based food packaging as sensors or components of sensors for monitoring food's shelf life.

1. Scheme of CDs synthesis process.

2. 3. TEM (a) and HRTEM (b) micrographs of CDs.

4. 5. Green fluorescence images of entire zebrafish larvae bodies after injection of CD's solution (diluted 100 times) for 24h (obtained in collaboration with the Department of Earth and Environmental Sciences of the University of Milano-Bicocca).

1. Schema del processo di sintesi per i CDs.

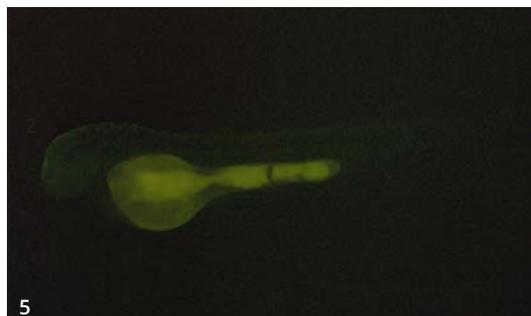
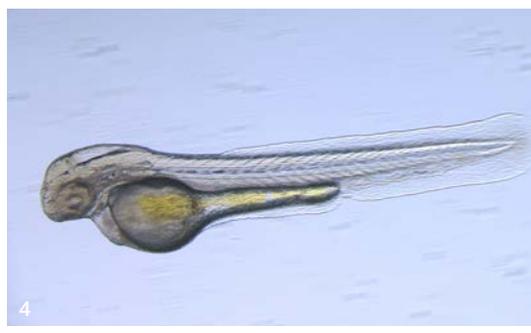
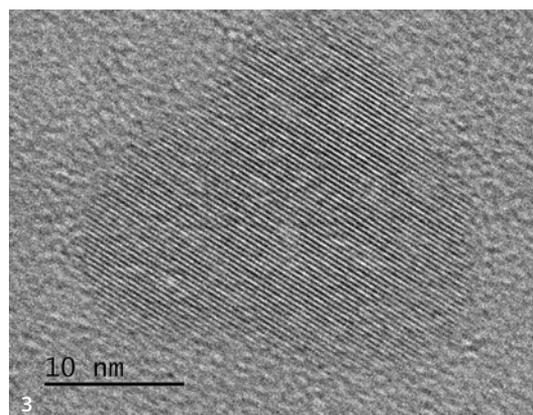
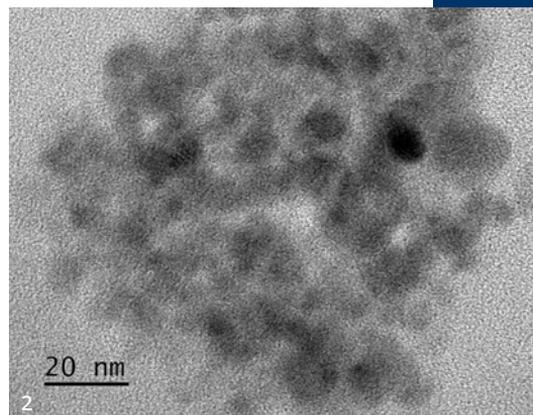
2. 3. Micrografie di CDs mediante osservazioni TEM e HRTEM.

4. 5. Immagini di emissione in fluorescenza verde di interi corpi di larve di pesce zebra dopo l'iniezione di soluzione di CDs (diluata 100 volte) per 24 ore (ottenute in collaborazione con il Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente dell'Università di Milano-Bicocca).

MATERIALI SOSTENIBILI A BASE DI CARBONIO DA BIOMASSE

Lo sviluppo di nanomateriali funzionali fotoluminescenti non tossici, che possono essere facilmente sintetizzati e adattati per applicazioni specifiche, è fondamentale per molti settori, che vanno dall'elettronica all'ambiente, all'agricoltura, alla biologia e alla medicina. In questo contesto, i punti quantici di carbonio (CDs) stanno acquisendo crescente interesse per le loro proprietà peculiari, come, tra tutte, la fotoluminescenza. Sono costituiti da un nucleo di carbonio ricoperto da funzionalità superficiali, che regolano la possibilità di funzionalizzare il materiale in termini di modifica post-formazione. La superficie dei CDs può essere finemente modificata tramite interazioni covalenti e non con specie desiderate per sviluppare nuovi materiali funzionali. Partendo da questo scenario, ICMATE sviluppa processi di sintesi affidabili e sostenibili per la preparazione di CDs con proprietà e funzionalità superficiali riproducibili.

Si utilizza la strategia idrotermale/solvotermale, in quanto più adatta per future applicazioni industriali su larga scala, e si adotta un approccio semplificato (Schema 1) basato sull'impiego di piccole molecole che potrebbero essere estratte da biomasse, rifiuti biologici o lignina. L'attività è in stretta e sinergica collaborazione con il Dipartimento di Scienze Ambientali e della Terra dell'Università di Milano-Bicocca per il trattamento delle biomasse e l'estrazione dei potenziali precursori per la preparazione dei CDs, la sintesi e la progettazione di sistemi molecolari a base di zuccheri per la modifica post-formazione dei CDs e per i test biologici/di bio-immagine. I nanomateriali ottenuti vengono caratterizzati con tecniche spettroscopiche, elettrochimiche e morfologiche (Fig. 2, 3) e sono impiegati come tali o post-funzionalizzati per applicazioni avanzate in Nanomedicina e bio-imaging. Le Fig. 4, 5 mostrano le immagini di emissione in fluorescenza verde dei CDs preparati nei laboratori ICMATE e iniettati nei corpi delle larve di pesce zebra. Altre applicazioni interessanti potrebbero essere nell'agricoltura di precisione come componenti di formulazioni biostimolanti per il trattamento fogliare o nel confezionamento intelligente per alimenti, basato su materiali biologici, dove i CDs sarebbero sensori o componenti di sensori per il monitoraggio dello stato di conservazione degli alimenti.



NIR-LIGHT ACTIVATABLE NANOCRYSTALS FOR BIOSENSING AND BIOIMAGING

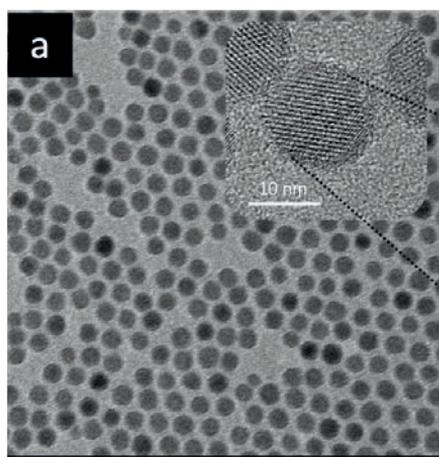
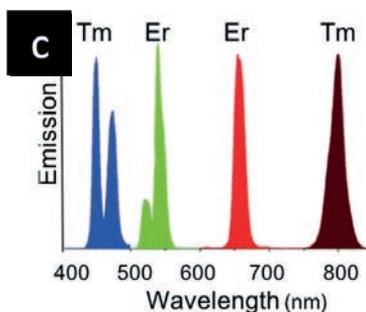
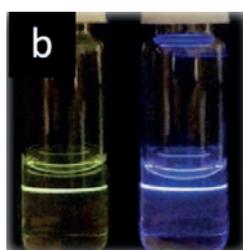
Light plays a vital role in our daily lives. By virtue of its easy manipulation and superb spatiotemporal control, light is also revolutionizing many technological fields such as communication, energy, chemistry and medicine. Near-infrared (NIR) light exhibits higher penetration depth through soft tissues than ultraviolet-visible light due to its weak absorption and scattering by biological materials, opening new possibilities in medicine.

We focus in developing upconverting nanocrystals (UCNCs). The ability of these rare earth-doped nanomaterials to generate NIR, visible, or ultraviolet emission upon near-infrared excitation (upconversion process) has made them promising candidates for next-generation imaging probes, sensors, and localized light sources. The research activity in this field consists of three main areas:

I. Synthesis of UCNCs consisting of an inert inorganic matrix (e.g., NaYF_4) doped with rare earth ions (Yb^{3+} , Er^{3+} , Tm^{3+}). We use air-free colloid procedures to synthesize monodispersed UCNCs of different compositions, sizes, and architectures (core-shell). By carefully optimizing reaction parameters, rare earth doping and architecture we are able to obtain UCNCs with unique chemical and optical properties.

II. Study of UCNC photophysics including the energy transfer kinetics between lanthanide ions within UCNCs and UCNCs and other materials. This enables modeling and design of UCNCs optimized for a specific application.

III. Development of UCNC based biosensor and bioimaging probes. By engineering UCNC surface coatings (e.g., with hydrophilic and biocompatible polymers), we can tailor the dispersibility of UCNCs in biological media and introduce specific functional groups to bind to target biomolecules (e.g., nucleic acids).



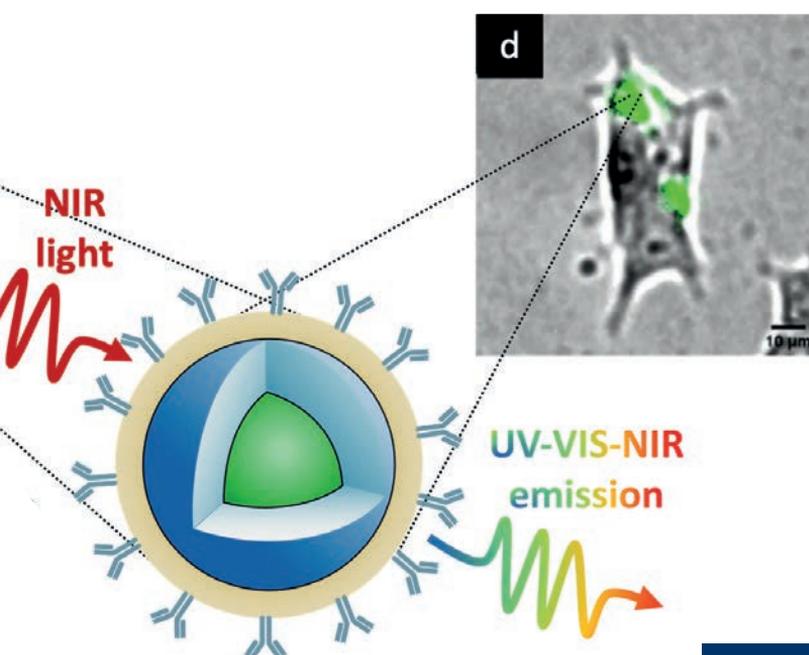
NANOCRISTALLI ATTIVABILI CON LUCE NIR PER BIOSENSORI E BIOIMAGING

La luce riveste un ruolo fondamentale nella nostra vita quotidiana. Essa, in virtù della sua facile manipolazione e del suo superbo controllo spazio-temporale, sta rivoluzionando molti settori tecnologici, tra cui quello delle comunicazioni, dell'energia, della chimica e della medicina. In particolare, grazie al suo basso assorbimento e scattering da parte dei tessuti biologici, la luce nel vicino infrarosso (NIR) penetra più in profondità nei tessuti molli rispetto a quella nell'ultravioletto o visibile aprendo nuove opportunità in campo medico. In questo contesto, ci occupiamo dello sviluppo di nanocristalli a conversione ascendente (UCNCs). La capacità di questi nanomateriali drogati con terre rare di generare emissione nel vicino infrarosso, nel visibile o nell'ultravioletto quando eccitati da radiazione nel vicino infrarosso (processo di upconversion) li rende candidati promettenti per sonde di imaging, sensori e sorgenti luminose localizzate di prossima generazione. L'attività di ricerca in questo ambito si articola in tre aree principali:

I. Sintesi di UCNCs costituiti da una matrice inorganica inerte (es. NaYF_4) drogata con ioni di terre rare (Yb^{3+} , Er^{3+} , Tm^{3+}). Utilizziamo procedure colloidali in atmosfera inerte per ottenere UCNCs monodispersi con diverse composizioni, dimensioni e architetture (core-shell). Ottimizzando accuratamente i parametri di reazione, il drogaggio con terre rare e l'architettura siamo in grado di ottenere UCNCs con proprietà chimiche e ottiche uniche.

II. Studio dei processi di trasferimento di energia tra ioni lantanidi all'interno di UCNCs e tra UCNCs e altri materiali. La conoscenza di questi processi consente di modellare e progettare UCNCs ottimizzati per una specifica applicazione.

III. Sviluppo di biosensori e sonde per bioimaging basati su UCNCs. Attraverso una precisa ingegnerizzazione della superficie (per esempio, con polimeri idrofili e biocompatibili) rendiamo gli UCNCs disperdibili in ambienti biologici e introduciamo opportuni gruppi funzionali per legare specifiche biomolecole (per esempio, acidi nucleici).



Scheme of core-shell UCNCs functionalized with biomolecules:

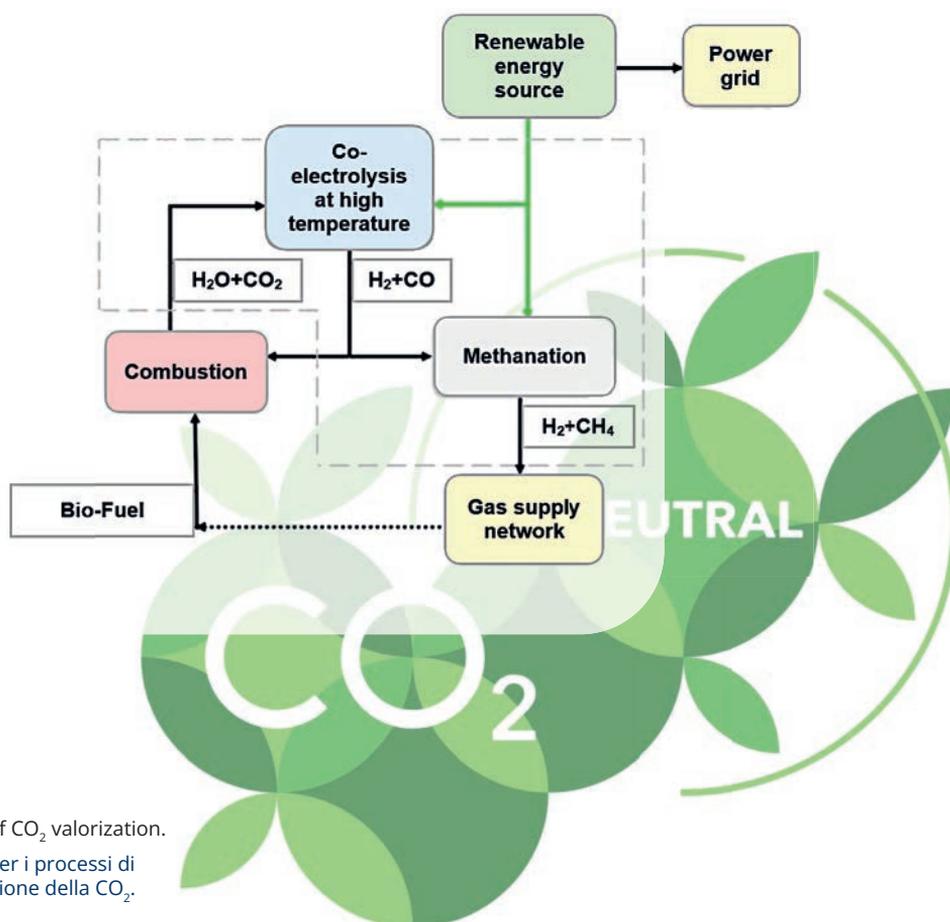
- a) TEM and HRTEM images of UCNCs;
- b) upconversion luminescence emission of a dispersion of UCNCs under 980 nm excitation;
- c) typical upconversion emission bands of Er^{3+} and Tm^{3+} doped UCNCs;
- d) fluorescence imaging of UCNCs in HEK cells under 980 nm excitation.

Schema di un UCNC di tipo core-shell funzionalizzato con biomolecole:

- a) immagini TEM e HRTEM di UCNCs;
- b) emissione luminescente di upconversion di una dispersione di UCNCs eccitata a 980 nm;
- c) tipiche bande di emissione luminescente di UCNCs drogati con ioni Er^{3+} e Tm^{3+} ;
- d) immagine di fluorescenza di UCNCs in cellule HEK eccitate a 980 nm.

CO₂ CONVERSION AND UTILIZATION

Carbon dioxide (CO₂) valorization is a promising pathway for mitigating greenhouse gas emissions and reducing the reliance of industry and chemical manufacturing on fossil fuel feedstocks. The reduction of CO₂ emissions and other greenhouse gases imply the reuse of such emissions. CO₂ can be converted into a wide variety of products by reactions with reductants (such as H₂, protons and alkanes) in conjunction with external energy inputs, including thermo-, electro-, photo- or plasma-assisted processes, both of which are necessary to overcome the thermodynamic stability of CO₂. Among those approaches, solid oxide electrolysis cells (SOECs) are devices which, using the electrical energy made available from a renewable source, simultaneously transform water vapor and CO₂ into chemical compounds suited for the production of various hydrocarbons (methane, methanol, dimethyl ether, olefins, ...). In this way, traditional but non-fossil fuels can be obtained, which therefore have a neutral impact on the atmospheric concentration of CO₂. Currently, the trend of ICMATE research in the field is moving towards intermediate-temperature SOCs (500–700 °C) in order to suppress material degradation of the cell components due to phase instability and high mechanical stresses. The aim is to obtain new materials tolerant toward hydrocarbons without loss in efficiency.



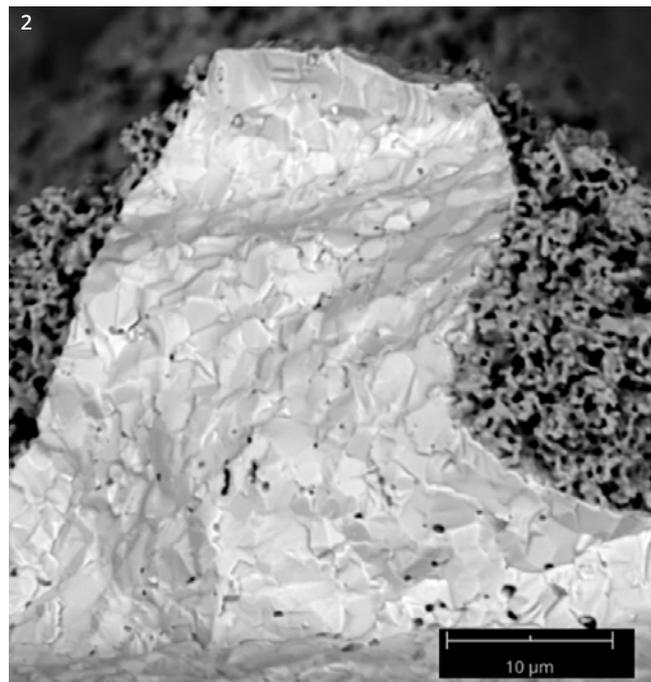
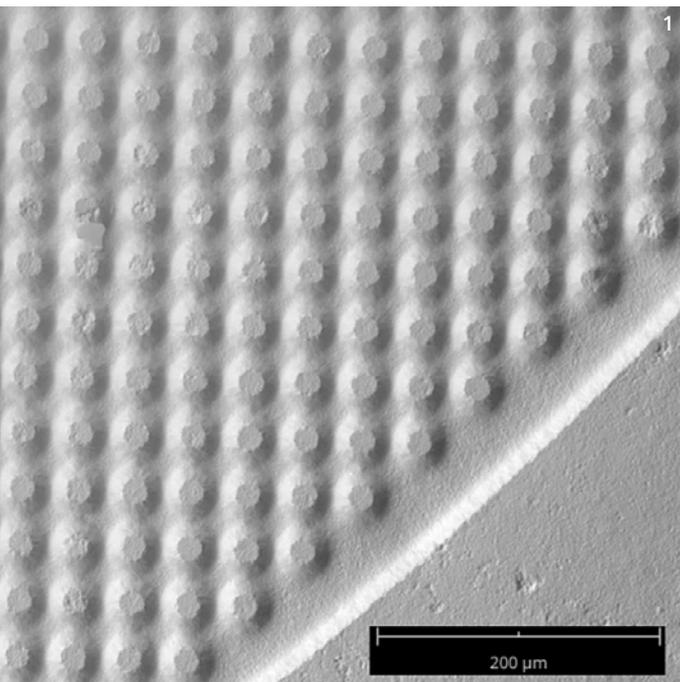
Scheme of CO₂ valorization.

Schema per i processi di valorizzazione della CO₂.

CONVERSIONE E RI-USO DELLA CO₂

La valorizzazione dell'anidride carbonica (CO₂) è un percorso promettente per mitigare le emissioni di gas serra e ridurre la dipendenza dell'industria e della produzione chimica dalle materie prime dei combustibili fossili. La riduzione delle emissioni di CO₂ e degli altri gas clima-alteranti non può prescindere dal riutilizzo di questa risorsa. La CO₂ può essere convertita in un'ampia varietà di prodotti mediante reazioni con riducenti (come H₂, protoni e alcani) in combinazione con input energetici esterni, inclusi processi termo-, elettro-, foto- o assistiti da plasma, entrambi necessari per superare la stabilità termodinamica della CO₂. Tra questi approcci, Le celle di elettrolisi ad ossidi solidi (SOEC) sono dispositivi che, utilizzando l'energia elettrica resa disponibile da una fonte rinnovabile, trasformano simultaneamente il vapore acqueo e la CO₂ in composti chimici utili ad ottenere vari idrocarburi (metano, metanolo, dimetil-etero, olefine, ...). In tal modo, si possono produrre combustibili tradizionali ma di origine non fossile, che quindi hanno un impatto neutro sulla concentrazione atmosferica di CO₂. Attualmente, la tendenza della ricerca ICMATE nel campo si sta spostando verso SOC a temperatura intermedia (500-700 °C) al fine di sopprimere la degradazione del materiale dei componenti della cella a causa dell'instabilità di fase e delle elevate sollecitazioni meccaniche. Lo scopo è di ottenere nuovi materiali in grado di funzionare in presenza di idrocarburi senza perdere efficienza.

1. Patterned Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{2-δ} electrolyte surface.
2. Composite electrode made of La_{0.5}Sr_{0.5}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-δ} and Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{2-δ}
1. Superficie di elettrolita di Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{2-δ} con struttura a pattern.
2. Elettrodo composito in La_{0.5}Sr_{0.5}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-δ} - Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{2-δ}



ELECTROCHEMISTRY: FROM CO₂ VALORISATION TO CORROSION SCIENCE

Electrochemistry is a powerful tool to face issues generated by climate change. In the name of policies of progressive decarbonization, including the reducing dependence on fossil fuels, these aims would be achieved also by pushing the production and distribution of Green H₂ and the valorisation of CO₂.

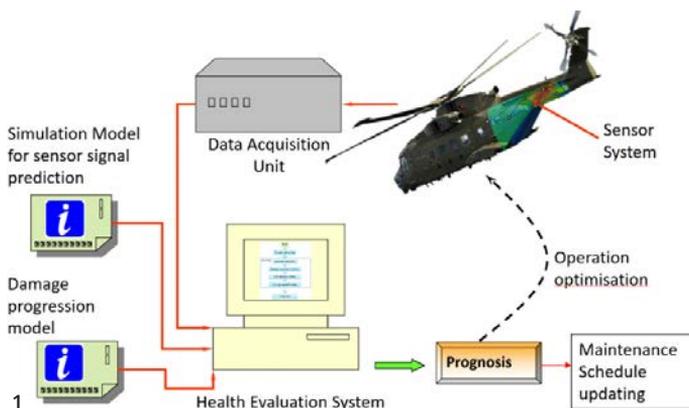
In this context, ICMATE develops research activities focusing on the study of several materials that are active towards electrochemical and photo-electrochemical transformation of CO₂ and materials to obtain H₂ from alcohols by electro-reforming. Several methods are investigated for the preparation of electrode materials for the reduction of nitrate ions, pollutants of surface waters. Compact and porous alloys with better properties than their metal constituents are obtained by electrodeposition. 3D composite electrocatalysts are produced by spontaneous deposition of noble metals onto non-noble metal foams. Systematic experiments are aimed at assessing the effect of electrodeposition on the properties of electro-precipitated oxide-based layers also including co-catalysts. As an example, the electro-precipitation of ceria onto Ni electrodes from Ce(NO₃)₃ solutions has been studied by comparing deposits obtained with potentiostatic electrolysis of variable durations. The dependence on the deposition charge of (I) ceria layer thickness, (II) apparent layer density, (III) coverage of the Ni surface by CeO₂ and (IV) layer resistance was determined.

Electrochemistry is also widely used in corrosion science underlying the damages and their influence on mechanical properties of helicopter parts.

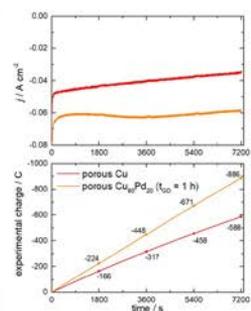
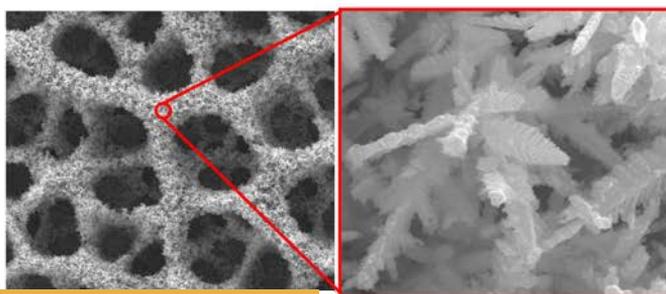
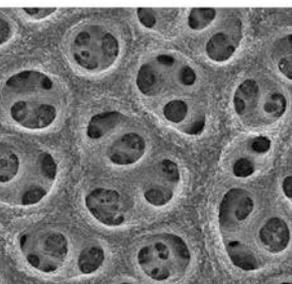
1. Block diagram of a Structural Health Monitoring system of a helicopter.

2. Porous Cu-Pd alloy with high catalytic activity for electrochemical nitrate reduction. Next page, ceria nanoparticles as an electro-catalyst for CO₂ reduction.

1. Diagramma a blocchi del Sistema di monitoraggio di salute strutturale di un elicottero.
 2. Lega Cu-Pd porosa con elevata attività nella riduzione elettrochimica di nitrati.
 Pagina seguente, nanoparticelle di ceria come catalizzatore nella riduzione elettrochimica di CO₂.



EL.DEP. POROUS CU AND POROUS CU₈₀PD₂₀ BY DYNAMIC HYDROGEN BUBBLE TEMPLATE METHOD AS CATALYSTS FOR NITRATE ELECTROCHEMICAL ABATEMENT



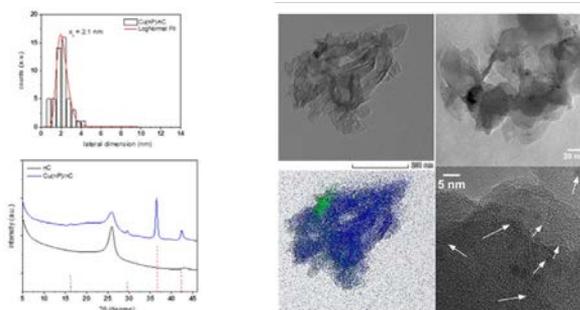
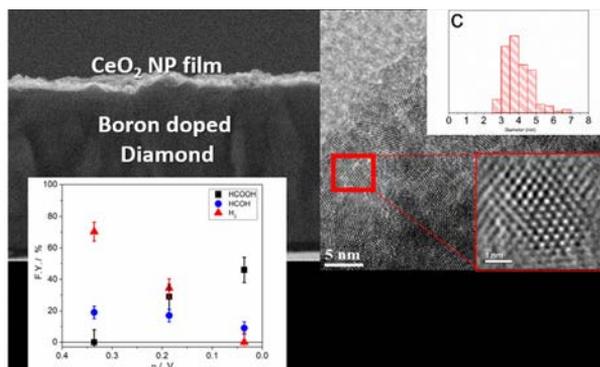
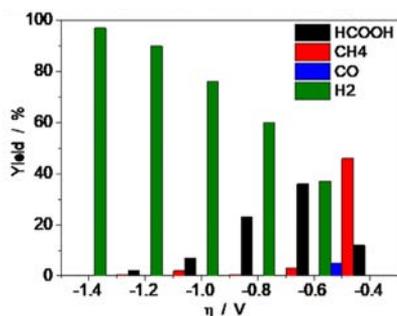
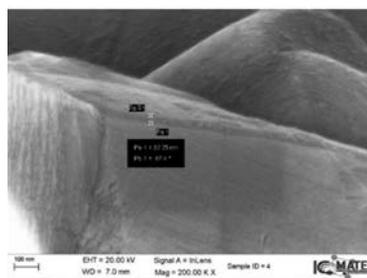
L'ELETTROCHIMICA: DALLA VALORIZZAZIONE DELLA CO₂ ALLA SCIENZA DELLA CORROSIONE

L'elettrochimica è uno strumento importante che, grazie alla sua intrinseca interdisciplinarietà, sarà fondamentale per affrontare le problematiche generate dai cambiamenti climatici. In nome delle politiche di progressiva decarbonizzazione anche mediante la riduzione della dipendenza dai combustibili fossili, questi obiettivi possono essere raggiunti investendo nella produzione e nella distribuzione di H₂ verde e nella ricerca sulla valorizzazione della CO₂.

In questo contesto, in ICMATE le attività di ricerca e sviluppo sono focalizzate sullo studio di diversi materiali attivi per la trasformazione elettrochimica e fotoelettrochimica della CO₂ e come ottenere H₂ dall'elettro-reforming degli alcoli. Si investigano vari metodi di preparazione di materiali elettrodi per la riduzione degli ioni nitrato, inquinanti delle acque di superficie. Mediante elettrodeposizione si ottengono leghe compatte o porose con proprietà superiori a quelle dei metalli componenti. Tramite deposizione spontanea di metalli nobili su schiume metalliche si producono elettrocatalizzatori composti tridimensionali. Esperimenti sistematici hanno lo scopo di valutare l'effetto dell'elettrodeposizione sulle proprietà degli strati a base di ossidi elettroprecipitati, includendo anche i co-catalizzatori. A titolo di esempio, l'elettrodeposizione del ceria su elettrodi di Ni da soluzioni di Ce(NO₃)₃ è stata studiata confrontando i depositi ottenuti con elettrolisi potenziostatica di durata variabile. È stata determinata la dipendenza dalla carica di deposizione di (I) spessore dello strato di cerio, (II) densità apparente dello strato, (III) copertura della superficie di Ni da parte di CeO₂ e (IV) resistenza dello strato.

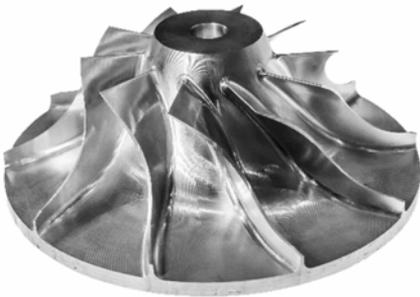
Nell'ambito dell'elettrochimica intesa come analisi e ricerca dei fenomeni di corrosione, ci si focalizza sui danni localizzati e di come questi danni influenzino le proprietà meccaniche delle parti che costituiscono gli elicotteri.

CO₂ reduction over nanostructured catalysts



GREEN FOUNDRY

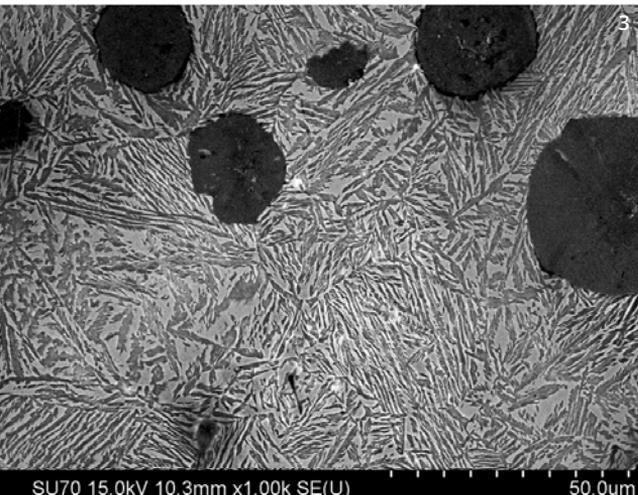
A field such as foundry, notoriously energy intensive and highly CO₂ emitting, is fundamental by industrial, social and economic point of views: sustainability and zero CO₂ emissions manufacturing are therefore principal aims achieving by development of enabling technologies for the advanced digitalized production systems, advanced materials and lightweight component design. About that, the Italian foundry sector is protagonist on the international context, operating fully within the “Smart Manufacturing” field.



1



2



3

ICMATE is active, by collaboration with important Italian foundries, on the assessment of foundry products integrity based on innovative mathematical procedures for the correlation between mechanical behavior and product defectiveness. This scientific activity is carried out by European or National research programs and it is mainly focused on mechanical tensile tests and the related analysis of strains and damage mechanisms at room and high temperatures, and development of constitutive equations able to describe the alloys behaviors.

The investigated materials are conventional ferritic-pearlitic spheroidal cast irons, advanced cast irons such as Austempered Ductile Irons, and also Al alloys by High Pressure Die Casting. ICMATE also has significant experience with high-temperature alloys, performing creep and low cycle fatigue/thermomechanical fatigue investigations: this allows also to characterize innovative Si-Mo cast irons for using in the transport sector under severe work conditions, also at high temperatures.

1. Typical example of thin-section foundry product (turbine) made of Al-Cu alloy.

2. 3. Light-weight design product: suspension arm for heavy tracks made of Austempered Ductile Iron (ADI) and typical ADI microstructure.

1. Tipo esempio di prodotto di fonderia in sezioni sottili: turbina in lega Al-Cu.

2. 3. Prodotto in una prospettiva di riduzione del peso: sospensione per mezzi pesanti in ghisa sferoidale austemperata (ADI), e microstruttura tipica di una ghisa ADI.

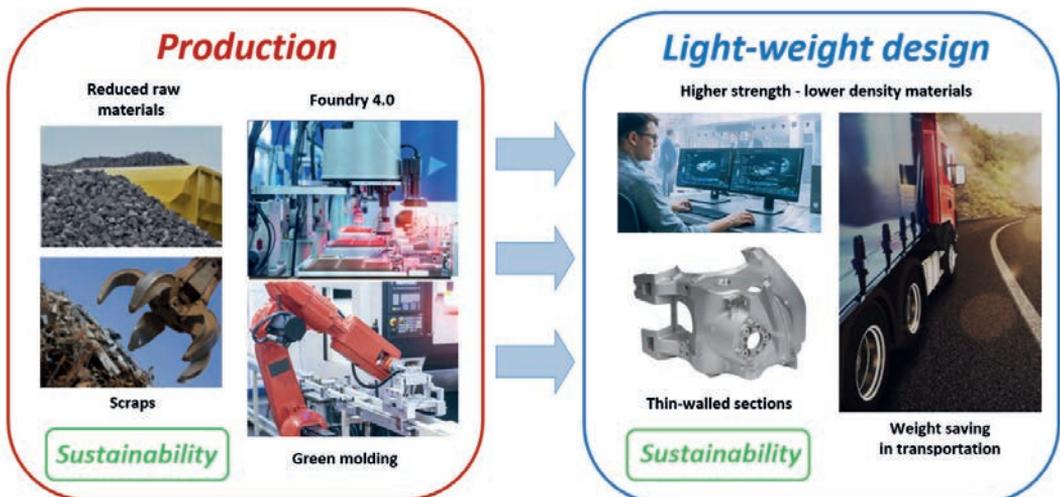
FONDERIA SOSTENIBILE

Un settore come la fonderia, fondamentale nella società moderna dal punto di vista industriale, sociale ed economico, è notoriamente energivoro e ad alta emissione di CO₂: la sostenibilità ed il perseguimento del target di zero emissioni di CO₂ rappresentano quindi un grande obiettivo, che viene realizzato mediante sviluppo di tecnologie abilitanti per sistemi di produzione avanzati e digitalizzati, materiali avanzati e progettazione di componenti leggeri. In questo la fonderia italiana è protagonista nel contesto internazionale, operando a pieno titolo nell'ambito della specializzazione dello "Smart Manufacturing".

ICMATE è significativamente attivo, in collaborazione con importanti fonderie italiane, nella valutazione dell'integrità dei prodotti di fonderia sulla base di una procedura matematica innovativa per la correlazione tra comportamento meccanico e difettosità del prodotto. Questa attività scientifica, svolta nell'ambito di programmi di ricerca europei o nazionali, è principalmente orientata a prove meccaniche e relative analisi delle deformazioni e dei meccanismi di danneggiamento di leghe metalliche a temperatura ambiente e ad alta temperatura, e allo sviluppo delle relative equazioni costitutive.

Vengono studiati materiali come le ghise sferoidali ferritiche-pearlitiche di tipo convenzionale, ma anche le ghise di tipo avanzato come le ghise austemperate, nonché le leghe di Al prodotte mediante pressofusione ad alta pressione. Inoltre, ICMATE ha una significativa esperienza anche sulle leghe metalliche ad alta temperatura, svolgendo indagini sul creep e sulla fatica oligociclica/termomeccanica: questo permette anche di caratterizzare le innovative ghise Si-Mo, utilizzate nel settore trasporti, anche in alta temperatura.

SUSTAINABILITY²



ADVANCED TESTING FOR METALLURGY: FROM RESEARCH TO INDUSTRY

Metal alloys for high-temperature in-service applications require high resistance to time-dependent stresses to ensure energy efficiency and maintain performance. Materials subjected to constant mechanical loads at high temperatures exhibit time-dependent deformations, known as creep. When mechanical and thermal loads vary over time, either individually or together, materials face mechanical and thermomechanical fatigue. ICMATE addresses these issues through extensive research and technology transfer activities. We perform tests to characterize the behaviour of materials under these conditions and interpret the results, particularly for alloys used in power generation and metallurgy.

Testing (up to 1150°C) includes creep and stress relaxation test, low cycle fatigue (LCF) and thermomechanical fatigue (TMF) test, tensile test, all of them performed also with the standard test condition.

One key focus is on low activation ferritic/martensitic steels (RAFM) used in structural components for the ITER and DEMO pilot plants for nuclear fusion power generation on the EUROfusion consortium. Creep and fatigue analyses of these materials verify their resistance properties under specific conditions. The research also investigates different chemical compositions to minimize irradiation damage and reduce the time required for future disposal.



TEST AVANZATI PER LA METALLURGIA: DALLA RICERCA ALL'INDUSTRIA

Le leghe metalliche per applicazioni ad alte temperature di esercizio devono possedere caratteristiche di elevate resistenza a sollecitazioni fortemente dipendenti dal tempo, in modo da garantire il mantenimento delle prestazioni e l'efficienza energetica. In particolare, quando sono applicati carichi meccanici costanti e ad alta temperatura, i materiali possono subire deformazioni dipendenti dal tempo (creep), mentre quando i carichi sono di tipo meccanico e termico e variano nel tempo, singolarmente o in contemporanea, si è in presenza di sollecitazioni di fatica (meccanica e termomeccanica).

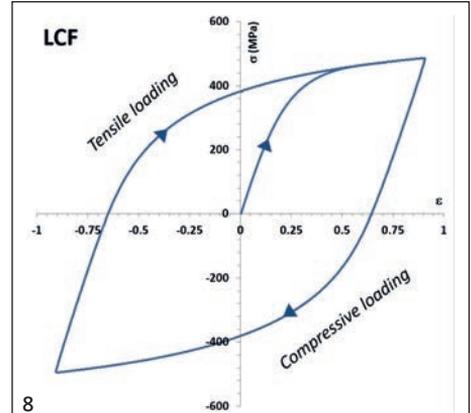
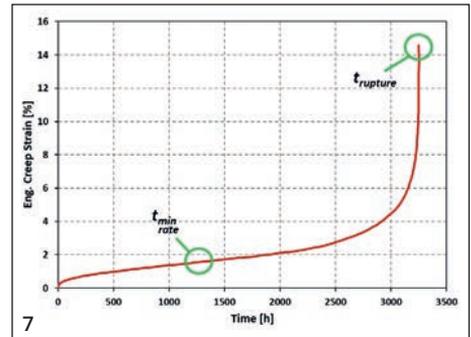
ICMATE svolge in questo campo attività di ricerca e di trasferimento tecnologico nell'esecuzione di test per caratterizzare il comportamento dei materiali e nell'interpretazione dei risultati, soprattutto su leghe metalliche adibite ai settori della produzione di energia e dell'industria metallurgica.

I test in questione includono test di creep e rilassamento, fatica oligociclica (LCF) e termomeccanica (TMF) e prove di trazione, tutte eseguibili anche in base alle corrispondenti normative di riferimento.

Una delle attività di maggiore rilevanza riguarda gli acciai ferritico/martensitici a bassa attivazione (RAFM) usati per componenti strutturali negli impianti pilota per la produzione di energia da fusione nucleare ITER e DEMO, in ambito EUROfusion: le analisi di creep e fatica del materiale permettono infatti di verificarne le necessarie proprietà di resistenza in quelle particolari condizioni; inoltre lo studio delle differenti composizioni chimiche, permette di sviluppare soluzioni per minimizzare il danno da irraggiamento e di favorire una futura riduzione dei tempi di smaltimento.

1. 2. Creep and thermo-mechanical fatigue laboratories for high temperature applications in ICMATE.
3. 4. 5. 6. High temperature applications in metallurgy.
7. 8. Typical trend strain vs. time for a creep test and single fatigue cycle at high temperature.

1. 2. Laboratori di creep e fatica meccanica / termomeccanica per applicazioni ad alta temperatura in ICMATE.
3. 4. 5. 6. Possibili applicazioni ad alta temperatura per il settore metallurgico.
7. 8. Tipico andamento di una curva di deformazione a "creep" in funzione del tempo e singolo ciclo di fatica oligociclica.



LASER SPECTROSCOPIES FOR ENVIRONMENTAL MONITORING

Particulate carbon, or 'black carbon', produced by combustion processes, is one of the main pollutants in the environment, with a significant impact on climate change and human health.

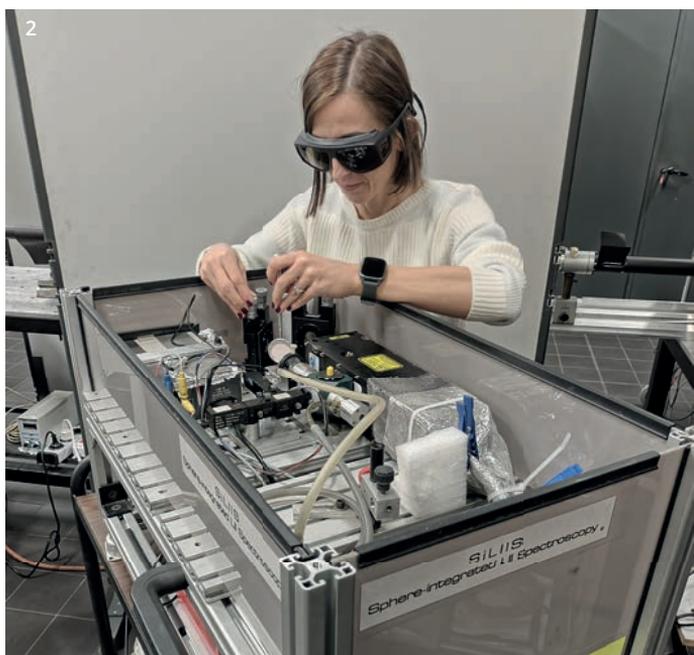
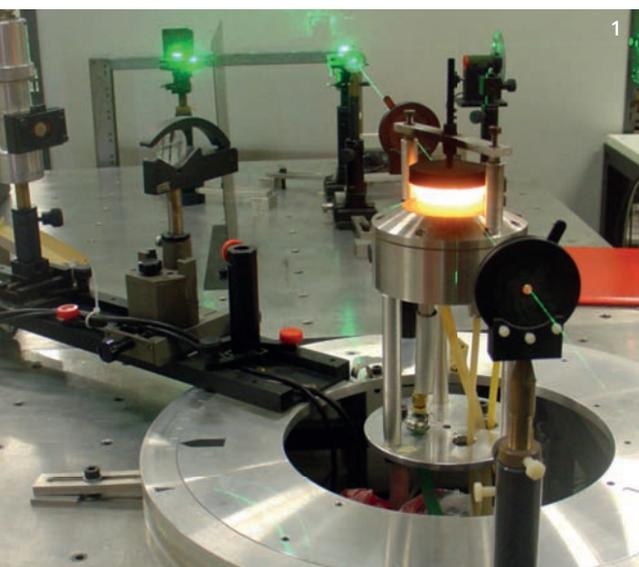
The development of diagnostic tools to measure and monitor the emission of these particles is crucial. The ICMATE Laboratory of Laser Diagnostics addresses this issue by using the Laser Induced Incandescence (LII) technique. The basis of the technique is the heating of black carbon at approximately 4000 K with a high power pulsed laser. Detection and analysis of the LII thermal radiation intensities emitted by the particles provides information on particle concentration and size.

A portable, highly sensitive instrument based on the two-colour LII technique (SILIS: Sphere-integrated LII Spectroscopy) has been developed for the detection of carbonaceous particles in different environmental conditions, both indoor and outdoor, with a detection limit of 200 ng/m³. As an example, LII experiments are also carried out on metal nanooxide produced by flame spray pyrolysis. To achieve this goal, the peculiarities of the heat exchange mechanisms between the particles and their environment must be considered.

ICMATE is also developing laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) to determine the elemental composition of pollutant emissions from combustion systems. The accuracy of the results relies on calibration methods based on on-line aerosol and off-line multi-element filter measurements (including comparison with complementary techniques).

1. Experimental set-up for optical measurements of carbonaceous nanoparticles concentration.
2. Portable instrument (SILIS: Sphere-Integrated LII Spectroscopy) for on-line black carbon monitoring, developed at ICMATE lab and its application for black carbon detection at the exhaust of combustion systems and for indoor and outdoor air quality monitoring.

1. Set-up sperimentale per misure ottiche della concentrazione di particolato carbonioso.
2. Strumento portatile (SILIS: Sphere-Integrated LII Spectroscopy) sviluppato presso i laboratori ICMATE per la misura del black carbon e suo utilizzo per il monitoraggio del black carbon allo scarico di sistemi di combustione e di ambienti interni ed esterni.



SPETTROSCOPIE LASER PER IL MONITORAGGIO AMBIENTALE

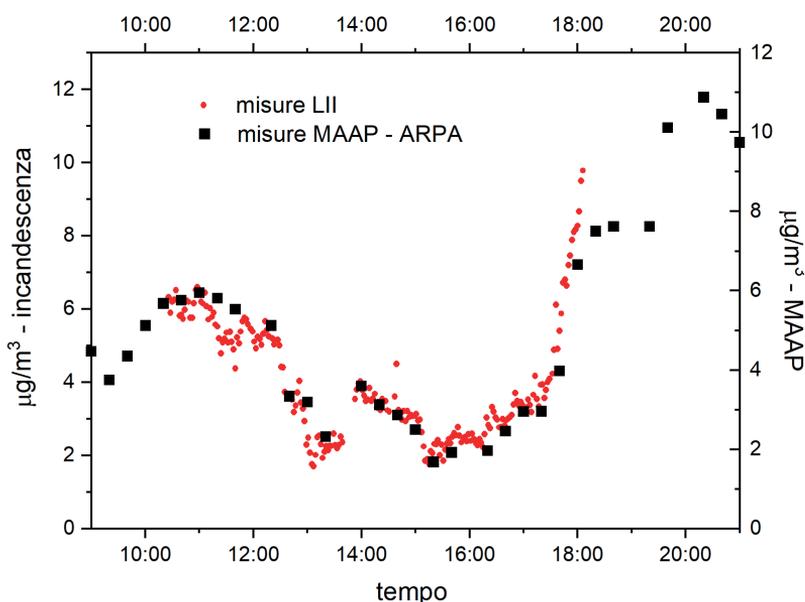
Il particolato carbonioso, detto "black carbon", prodotto da processi di combustione, rappresenta uno dei principali inquinanti presenti in ambiente, con un significativo impatto sul cambiamento climatico e sulla salute dell'uomo.

Le tecniche di diagnostica ottica costituiscono uno strumento potente per la misura e monitoraggio delle emissioni di "black carbon". Il laboratorio di Diagnostica Laser di ICMATE utilizza una tecnica molto sensibile, quale l'Incandescenza Indotta da Laser (LII), che si basa sull'irraggiamento delle particelle con un fascio laser impulsato con alta densità di energia, che porta le particelle fino a 4000 K di temperatura. Dalla radiazione emessa è possibile ottenere misure di concentrazione e dimensione del particolato.

È stato anche sviluppato e messo a punto uno strumento portatile (SILIS: Sphere-integrated LII Spectroscopy) che si basa sulla tecnica LII, con il quale misurare concentrazioni di black carbon in diverse condizioni sperimentali, in ambienti indoor e outdoor, con un limite di rilevamento di 200 ng/m³.

Quale esempio applicativo, sono state condotte misure LII in una fiamma spray che genera nanoparticelle di nanoossidi allo scopo di seguire l'evoluzione di concentrazione e temperatura durante la sintesi in fiamma. Per questo studio, è necessario tenere conto delle peculiarità dei meccanismi di scambio termico tra le particelle e il relativo ambiente circostante

Infine ICMATE è impegnato nello studio della tecnica di Spettroscopia di Breakdown indotta da laser (LIBS) per la misura della composizione elementare dell'emissione di inquinanti allo scarico di sistemi di combustione. Metodi di calibrazione on-line in aerosol e off-line su filtro multielemento (anche con il confronto con tecniche convenzionali) permettono di migliorare l'accuratezza della misura.



Air quality monitoring in Milano: comparison between LII and MAAP (Multi Angle Absorption Photometer, by ARPA) measurements of black carbon concentration.

Misure della qualità dell'aria a Milano: confronto tra misure di LII e misure dell'ARPA eseguite con lo strumento MAAP (Multi Angle Absorption Photometer) della concentrazione di black carbon.

ENVIRONMENTAL RADIOPROTECTION: FROM SOIL TO WATER AND FOOD

Radioactive contamination remains a significant global concern, particularly after nuclear accidents and military actions involving radioactive materials. Many countries are still exposed to both natural and man-made radioactivity from sources such as radiopharmaceuticals, imports from affected regions, and various industrial applications. Naturally occurring radionuclides in rocks, soil, air, water, and seas can concentrate under certain conditions, posing risks to human health.

At ICMATE, the Environmental Radiation Protection group has led research and monitoring efforts on environmental radionuclides for decades to understand and mitigate these risks. Their studies have revealed alarming levels of radioactive cesium (^{137}Cs) in some food products, with high-resolution analyses of black blueberry items showing up to 450 Bq/kg, and migratory wild bird meat reaching 139 Bq/kg. In contrast, seaweed products consistently exhibit low ^{137}Cs levels (<2 Bq/kg), underscoring the need for ongoing monitoring and strict regulations.

ICMATE also pioneers sustainable radionuclide research in drinking water and wastewater, developing eco-friendly protocols to help operators meet EU and National standards. Studies on radon-222 concentration in groundwater further ensure water safety. Moreover, innovative projects in Venice convert phosphogypsum waste into valuable raw materials, demonstrating ICMATE's commitment to transforming radioactive waste into resources for a greener future. Through continuous innovation and rigorous scientific investigation, ICMATE's groundbreaking work not only mitigates radiological risks but also contributes to a safer, healthier environment for future generations.

1. Study of radon-222 concentration in potable water sources in the Veneto region introduced into distribution networks.
 2. Field measurements of radon exhalation.
 3. Inserting a sample in a shielding well for the high resolution gamma spectrometry.
1. Studio della concentrazione di radon-222 nelle fonti di prelievo di acqua potabile nella regione Veneto immessa nelle reti di distribuzione.
 2. Misure in campo dell'esalazione del radon.
 3. Inserimento di un campione ambientale in un pozzetto schermante per la misura di spettrometria gamma ad alta risoluzione.



RADIOPROTEZIONE AMBIENTALE: DAL SUOLO ALL'ACQUA E AL CIBO

La contaminazione radioattiva rimane una preoccupazione globale significativa, soprattutto a seguito di eventi che coinvolgono materiali radioattivi. Molti paesi sono ancora esposti a radioattività sia naturale che antropogenica, derivante da fonti quali radiofarmaci, importazioni da regioni contaminate e applicazioni industriali. I radionuclidi naturalmente presenti in rocce, suolo, aria, acqua e mari possono concentrarsi in determinate condizioni, rappresentando un rischio per la salute umana.

ICMATE ha guidato per decenni attività di ricerca e monitoraggio dei radionuclidi ambientali per comprendere e mitigare tali rischi. Analisi ad alta risoluzione hanno rilevato livelli allarmanti di cesio radioattivo (^{137}Cs) in alcuni alimenti, come prodotti a base di mirtilli neri che hanno mostrato fino a 450 Bq/kg e carni di uccelli migratori selvatici che hanno raggiunto 139 Bq/kg. Al contrario, i prodotti a base di alghe mostrano costantemente bassi livelli di ^{137}Cs (<2 Bq/kg), evidenziando la necessità di monitoraggi continui e normative rigorose.

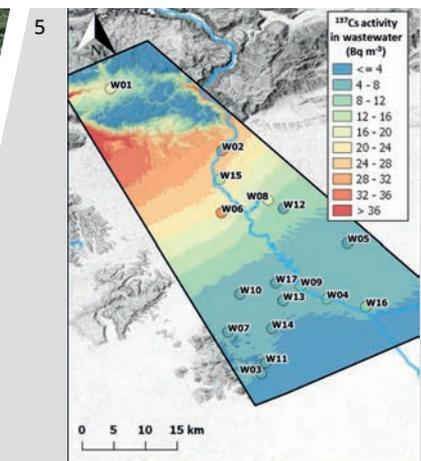
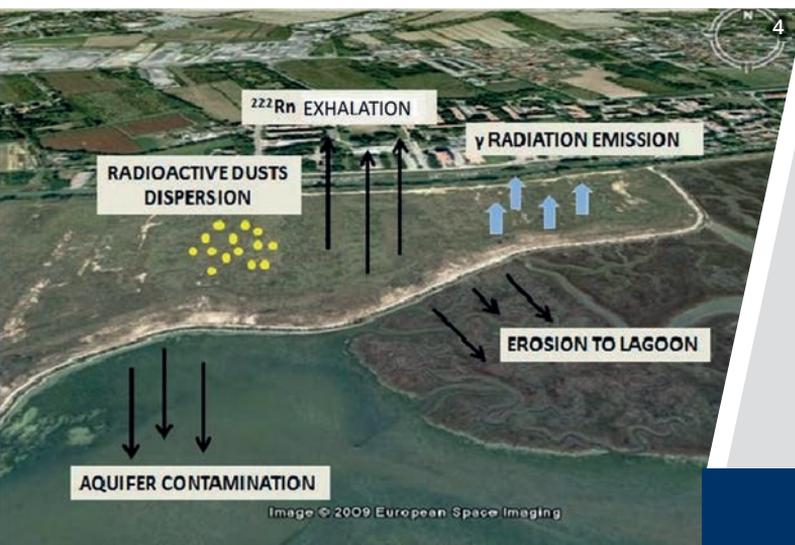
ICMATE è inoltre pioniere nella ricerca sostenibile sui radionuclidi in acqua potabile e reflui, sviluppando protocolli ecologici per aiutare gli operatori a rispettare le normative UE e nazionali. Studi di concentrazione di radon-222 (^{222}Rn) nelle acque sotterranee garantiscono ulteriormente la sicurezza idrica. Inoltre, studi recenti sono finalizzati a trasformare rifiuti di fosfogesso in materie prime preziose, dimostrando l'impegno dell'ICMATE a convertire i rifiuti radioattivi in risorse per un futuro più verde. Grazie all'innovazione continua e a una rigorosa ricerca scientifica, il lavoro pionieristico dell'ICMATE non solo mitiga i rischi radiologici, ma contribuisce anche a creare un ambiente più sicuro e salutare per le generazioni future.

4. Environmental risks arising from a phosphogypsum landfill located on the Veneto lagoon edge.

5. Geographical pattern of ^{137}Cs activity in waste waters (detail of the Brenta river basin). Water sampling points are marked as W01-16.

4. Rischi ambientali derivanti da una discarica di fosfogessi sita sulla gronda lagunare veneta

5. Distribuzione geografica dell'attività di ^{137}Cs nelle acque reflue (dettaglio del bacino del fiume Brenta). I campionamenti delle acque sono contrassegnati dai punti W01-16.



PHOTOCATALYSIS FOR WATER REMEDIATION: FROM LAB TO PILOT PLANT

Scientific research is called to assess the effects of emerging new kinds of pollutants (EPs) on human health and on environment and to investigate new remediation strategies.

EPs are present in agriculture, in industry, in pharmaceuticals and in personal care products. EPs end up in water bodies if not properly disposed. Heterogeneous photocatalysis appears to be one of the most appealing options for the treatment of organic pollutants. However, its definitive translation into industrial practice is still limited because of several technological issues.

ICMATE is committed to developing innovative approaches for water treatment, both on laboratory scale and in pilot plants.

The photocatalytic processes are particularly interesting because no chemical reagents are required, and all reactive species are generated in situ. Through a “mineralization” reaction, the pollutant is neutralized, producing only carbon dioxide and water as final products.

The process is initiated by a photocatalyst, which produces reactive species when activated by visible-light or sunlight. ICMATE develops and characterizes photocatalytic species for optimizing their operation. As an example, ICMATE exploits MOCVD (Metal Organic Chemical Vapour Deposition) approach to prepare large-scale photocatalysts for dyes degradation. The photocatalyst consists of nanostructured TiO_2 thin films deposited on stainless-steel meshes. The photocatalytic activity is evaluated according to international standards.

1. Photocatalytic remediation process of methylene blue: before (left) and after (right) the test.
 2. ISO10678:2010 test experimental setup for methylene blue degradation.
1. Trattamento di rimozione fotocatalitica del blu di metilene prima (sinistra) e dopo (destra) il processo.
 2. Setup sperimentale secondo norma ISO 10678:2010 per il degrado del blu di metilene.



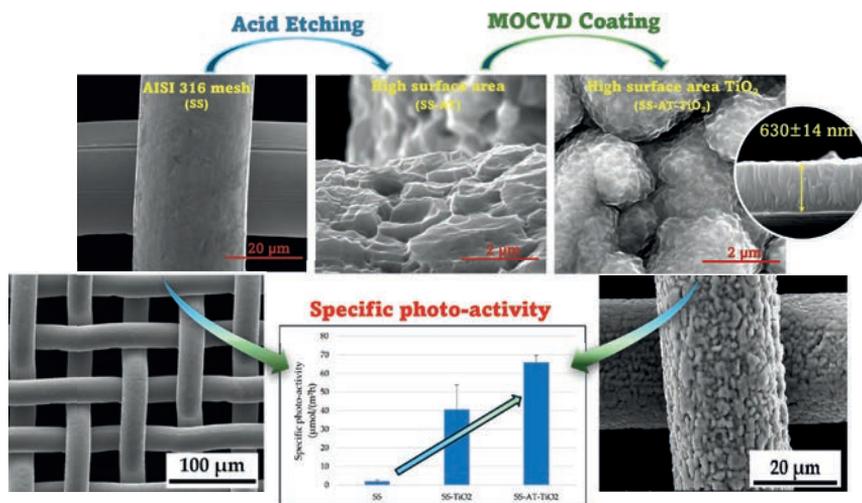
LA FOTOCATALISI PER IL TRATTAMENTO DELLE ACQUE: DAL LABORATORIO ALL'APPLICAZIONE SUL CAMPO

La ricerca scientifica è chiamata a valutare gli effetti di nuovi tipi di inquinanti, detti emergenti (EP), sulla salute umana e sull'ambiente e a indagare nuove strategie di bonifica. Gli EP sono presenti in prodotti per l'agricoltura, nelle produzioni industriali, nella produzione e nell'utilizzo di prodotti farmaceutici e per la cura personale. Tali inquinanti finiscono nei corpi idrici se non adeguatamente smaltiti. Tra le tecnologie di trattamento più promettenti, la fotocatalisi eterogenea si distingue per la sua efficacia nella degradazione degli inquinanti organici. Tuttavia, la sua applicazione nella pratica industriale è ancora limitata a causa della complessità nella produzione di catalizzatori su ampia superficie e delle difficoltà nella gestione dei fotocatalizzatori stessi.

In questo contesto ICMATE sviluppa approcci innovativi per il trattamento delle acque, realizzati sia su scala di laboratorio sia in impianti pilota. I processi fotocatalitici risultano particolarmente interessanti poiché non richiedono reagenti chimici e tutte le specie reattive vengono generate in situ. L'inquinante viene reso innocuo attraverso un processo di "mineralizzazione", che porta alla sua completa degradazione in anidride carbonica e acqua.

Il processo è attivato da un fotocatalizzatore che produce specie reattive quando esposto alla luce UV, visibile o solare. ICMATE si occupa dello sviluppo e della caratterizzazione di materiali fotocatalitici per ottimizzarne l'efficienza e l'applicabilità.

Un esempio significativo è l'impiego della tecnica MOCVD (Metal Organic Chemical Vapour Deposition) per la preparazione di catalizzatori su ampia scala, destinati alla degradazione di coloranti. Il fotocatalizzatore è costituito da un film sottile di TiO_2 nanostrutturato, depositato su un supporto di rete in acciaio inossidabile. L'attività fotocatalitica viene valutata secondo standard internazionali, garantendo l'affidabilità e l'efficacia del sistema.



SEM images of high-area stainless steel mesh support coated with TiO_2 film by MOCVD and photocatalytic degradation of probe pollutant.

Immagini SEM di rete in acciaio inox ad alta area ricoperta con film di TiO_2 via MOCVD e degradazione fotocatalitica di un inquinante.

GEOPOLYMER-BASED SUSTAINABLE BUILDING MATERIALS

Geopolymer binders offer promising prospects for sustainable constructions, thanks to their versatility and generally reduced environmental impact compared to Portland cement, which is due to their lower carbon footprint, the possible use of secondary raw materials as reagents and various types of inorganic waste as either inert aggregates or reactive components.

ICMATE is working on the formulation, characterization, and application of geopolymer binders for building materials, also embedding aggregates recycled from demolition waste. Geopolymers can be tailored to very diverse applications, such as: mortars; compatible repair and reinforcement materials for built heritage structures; modular architectural components for new and existing buildings.

ICMATE contributes to the design and prototyping of prefabricated architectural panels for improved energy efficiency of buildings, made of geopolymers embedding more than 50% of recycled aggregates. Research focuses on inorganic materials, and also covers the development of strain-hardening engineered geopolymer composites and inorganic-organic composites like wood-based particleboard.

Geopolymer matrices can also fulfil restoration criteria for historical buildings, with heat resistance performances generally better than polymer reinforcements.

By promoting the use of alternative sustainable materials, ICMATE contributes to the advancement of environmentally friendly building practices.

Example of a selective demolition waste site (1) with stockpiles of materials such as concrete and fired clay. These materials are collected from the site and then subjected to coarse (2,3) and fine (4,5) grinding processes. The resulting aggregates are incorporated into geopolymer mortars, with specimens prepared for testing (6).

Esempio di un sito di demolizione selettiva (1) con accumuli di materiali come calcestruzzo e laterizio. Questi materiali vengono raccolti dal sito e successivamente sottoposti a processi di macinazione grossolana (2,3) e fine (4,5). Gli aggregati ottenuti vengono poi incorporati in malte geopolimeriche, e preparati per i test (6).



MATERIALI DA COSTRUZIONE SOSTENIBILI A BASE DI GEOPOLIMERI

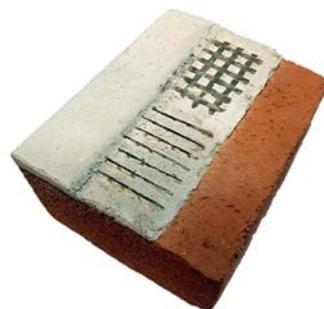
I leganti geopolimerici offrono prospettive promettenti per le costruzioni sostenibili, grazie alla loro versatilità e all'impatto ambientale generalmente ridotto rispetto al cemento Portland, per via della loro minore impronta di carbonio, della possibilità di utilizzare materie prime secondarie come reagenti e vari tipi di rifiuti inorganici come aggregati inerti o componenti reattivi.

ICMATE lavora alla formulazione, alla caratterizzazione e all'applicazione di leganti geopolimerici per materiali da costruzione, incorporando anche aggregati riciclati da rifiuti di demolizione. I geopolimeri possono adattarsi ad applicazioni molto diverse, ad esempio: malte; materiali compatibili per la riparazione e il rinforzo di strutture del patrimonio edilizio; componenti architettonici modulari per edifici nuovi ed esistenti.

ICMATE contribuisce alla progettazione e alla prototipazione di pannelli architettonici prefabbricati per migliorare l'efficienza energetica degli edifici, realizzati con geopolimeri che incorporano oltre il 50% di aggregati riciclati. La ricerca si concentra sui materiali inorganici, e inoltre comprende anche lo sviluppo di compositi geopolimerici ingegnerizzati ad alta deformabilità, e compositi inorganici-organici come pannelli a base di particelle legno.

Le matrici geopolimeriche possono anche soddisfare i criteri di restauro degli edifici storici, con prestazioni di resistenza al calore generalmente migliori rispetto ai polimeri rinforzati con fibre.

Promuovendo l'uso di materiali alternativi sostenibili, ICMATE contribuisce al progresso di pratiche edilizie rispettose dell'ambiente.



7



8



9



10

7. Mock-up of a fibre-reinforced geopolymer composite reinforcement for masonry structures.

8. 9. 10. Installation of developed panels at the CNR demonstrator facility in Padova: prototypes (8); final ventilated façade (9) and ET-ICS-like panels (10).

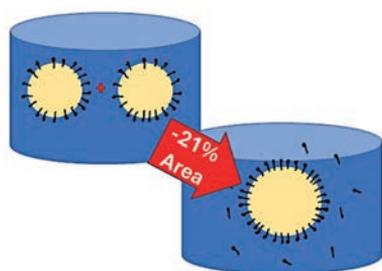
7. Modello di un rinforzo in materiale composito fibrorinforzato geopolimerico per strutture in muratura.

8. 9. 10. Installazione dei pannelli presso il dimostratore CNR di Padova: prototipi (8); facciata ventilata (9) e sistema prefabbricato a cappotto (10) finali.

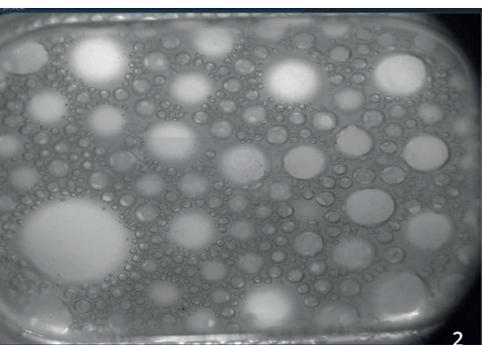
PHYSICAL-CHEMISTRY OF LIQUID INTERFACES FOR EXTRATERRESTRIAL AND AEROSPACE APPLICATIONS

Building on extensive expertise in the physical and chemical properties of liquid interfaces and materials, ICMATE is actively engaged in various areas of space-related research. Experiments conducted in space laboratories, such as the International Space Station (ISS), under weightlessness (microgravity) conditions, allow for a deeper understanding of the basic mechanisms governing the evolution of emulsions and foams, which are otherwise affected by gravity. Emulsions are widely used in technologies and products, and the results of these studies will contribute to more sustainable emulsion formulations with reduced impact on resources, the environment, and health.

In-Situ Resources Utilization (ISRU) is another topic of growing interest, giving the possibility of establishing autonomous lunar or planetary settlements. ICMATE is at work developing functionalized porous materials as building elements from ISRU regolith simulants, and multiscale porous materials for gas adsorption, photocatalytic filtering, air/water purification, water-oil separation in extraterrestrial and aerospace habitat.



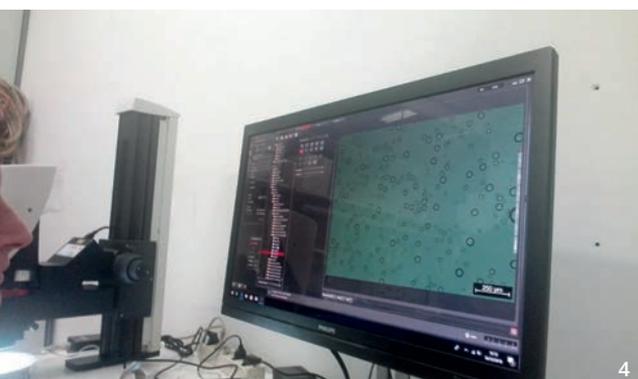
1



2



3



4

We fabricate solid foams with open-cell structure at high specific area for gas adsorption, efficient photocatalytic filters for air/water purification, water-oil separation devices; they are currently made from “moon dust” (regolith) dispersions, which are 3D printed and consolidated through a process called geopolymerization.

Unlike conventional concrete, this process minimizes water consumption, making it well-suited for use in harsh planetary conditions, and ICMATE efforts are spent also to the optimization of the process to control the pores formation and size/morphology, based on the utilization of appropriate surfactants and on surface science concepts, as well as on the functionalization of the materials with tailored photocatalytic antimicrobial, and wettability properties.

1. Drop coalescence phenomenon in surfactant stabilized emulsions.
2. 3. Image of an oil-in-water emulsion acquired by optical microscope during flight experiment onboard the ISS.
4. Computer-assisted dimensional analysis of emulsions
5. Schematic description of the main mechanisms governing the emulsion evolution.

1. Coalescenza di due gocce nelle emulsioni stabilizzate da tensioattivi.
2. 3. Immagine di un'emulsione olio-in-acqua acquisita dal microscopio ottico durante gli esperimenti di volo a bordo della ISS.
4. Analisi dimensionale computerizzata delle emulsioni
5. Descrizione schematica dei principali meccanismi governanti l'evoluzione delle emulsioni.

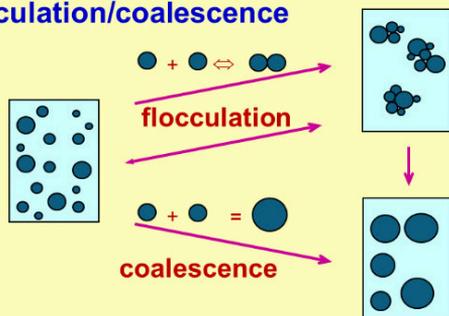
CHIMICA-FISICA DELLE INTERFACCE LIQUIDE PER LA RICERCA SPAZIALE E HABITAT ORBITALI/ EXTRATERRESTRI

Basandosi sull'ampia esperienza nelle proprietà chimico-fisiche delle interfacce liquide e dei materiali, ICMATE è attivamente impegnato in diverse aree di ricerca spaziale. Gli esperimenti condotti nei laboratori spaziali, come la Stazione Spaziale Internazionale (ISS), in condizioni di microgravità, permettono una comprensione più profonda dei meccanismi fondamentali che governano l'evoluzione delle emulsioni e delle schiume, altrimenti influenzati dalla gravità. Le emulsioni sono ampiamente utilizzate in tecnologie e prodotti, e i risultati di questi studi contribuiranno a formulazioni di emulsioni più sostenibili, con un minore impatto sulle risorse, sull'ambiente e sulla salute.

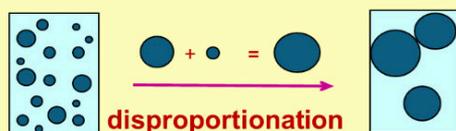
L'Utilizzo delle Risorse In-Situ (ISRU) è un altro argomento di crescente interesse, che offre la possibilità di stabilire insediamenti autonomi extraterrestri. ICMATE sta lavorando allo sviluppo di materiali porosi funzionalizzati come elementi costruttivi a partire da simulanti di regolite ISRU, e materiali porosi multiscala per l'adsorbimento di gas, il filtraggio fotocatalitico, la purificazione dell'aria e dell'acqua, e la separazione acqua-olio per habitat extraterrestri e aerospaziali.

Fabbrichiamo anche schiume solide con struttura a celle aperte ad alta area specifica per l'adsorbimento di gas, filtri fotocatalitici efficienti per la purificazione di aria/acqua, dispositivi di separazione acqua-olio; sono attualmente realizzati da dispersioni di "polvere lunare" (regolite), che vengono stampate in 3D e consolidate attraverso un processo chiamato geopolimerizzazione. A differenza del cemento tradizionale, questo processo minimizza il consumo di acqua, rendendolo adatto all'uso in condizioni planetarie avverse, e gli sforzi di ICMATE sono orientati all'ottimizzazione del processo per controllare la formazione e la dimensione/morfologia dei pori - basandoci sull'utilizzo di tensioattivi appropriati e su concetti di scienza delle superfici - oltre che alla funzionalizzazione dei materiali con proprietà fotocatalitiche antimicrobiche e di bagnabilità delle superfici.

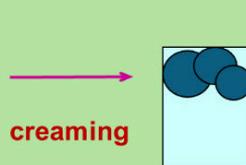
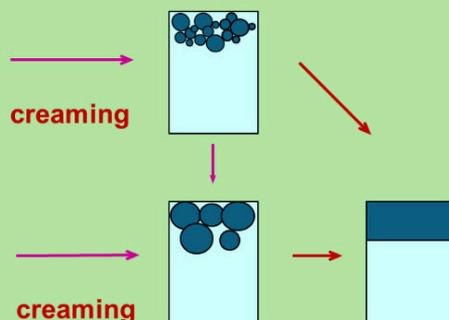
flocculation/coalescence



Ostwald ripening



average drop size increase



gravity-driven separation

ENVIRONMENTAL LIFE CYCLE ASSESSMENT IN R&D LABORATORIES

Life Cycle Assessment (LCA) is a standardized methodology (ISO 14040:2006) for evaluating the environmental and human health impacts arising from the emissions and resource consumption of any human activity. This analysis can cover the entire supply chain, from raw material extraction to production, transport, end-of-life and recycling phases (cradle-to-grave), or just a portion of it (cradle-to-gate or gate-to-gate). Although well-established for industrial-scale analyses, LCA has recently gained importance also in the context of laboratory activities with low Technology Readiness Level (≤ 4), allowing the identification of hot spots that influence potential environmental impacts, and providing useful data for future scaling-up processes.

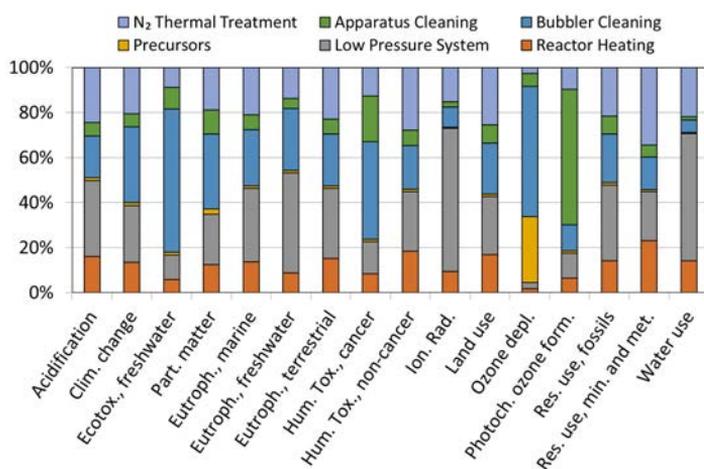
In this context, ICMATE applies the LCA method to chemical processes by analyzing the different phases of:

Production of Reagents and Materials: analysis of the environmental impacts associated with the production of chemical reagents, solvents, and other materials used in laboratories.

Chemical Synthesis and Handling: environmental impacts evaluation of chemical reactions and manipulations carried out in the laboratory, considering energy consumption, gas emissions, and the use of hazardous chemicals.

- **Use and Waste Management:** Examination of how chemical materials are used during laboratory experiments and assessment of their waste classes.

ICMATE's modeling focuses on several topics such as, for instance, LCA of thin-films as membranes for hydrogen separation or as barrier for the protection against hydrogen embrittlement, considering chemical compositions, experimental synthesis processes, performances and also carrying out critical raw materials assessment. ICMATE extends the application of LCA methodologies also to the biomedical sector, examining new systems for the deposition of hydroxyapatite for bone integration, with eco-profiles to identify the hot environmental spots of the innovative processes, and the use of the critical materials.



Contributions analysis of LCA characterized results of a Metal Organic Chemical Vapor Deposition process of titania/alumina multilayer thin film, calculated by EF 3.1 method. Functional unit: 16 cm² of a 200 nm TiO₂ / 400 nm Al₂O₃ double-layer.

Analisi dei contributi dei risultati caratterizzati di un'analisi di ciclo di vita, ottenuta tramite metodo EF3.1, di un processo di deposizione via Metal Organic Chemical Vapor Deposition di un film sottile multistrato di titania ed allumina. L'unità funzionale impiegata per il calcolo è il processo di deposizione di 16 cm² di un film multistrato composto da 200 nm di TiO₂ 400 nm di Al₂O₃.

L'ANALISI DI CICLO DI VITA DEI PROCESSI CHIMICI NEI LABORATORI DI RICERCA

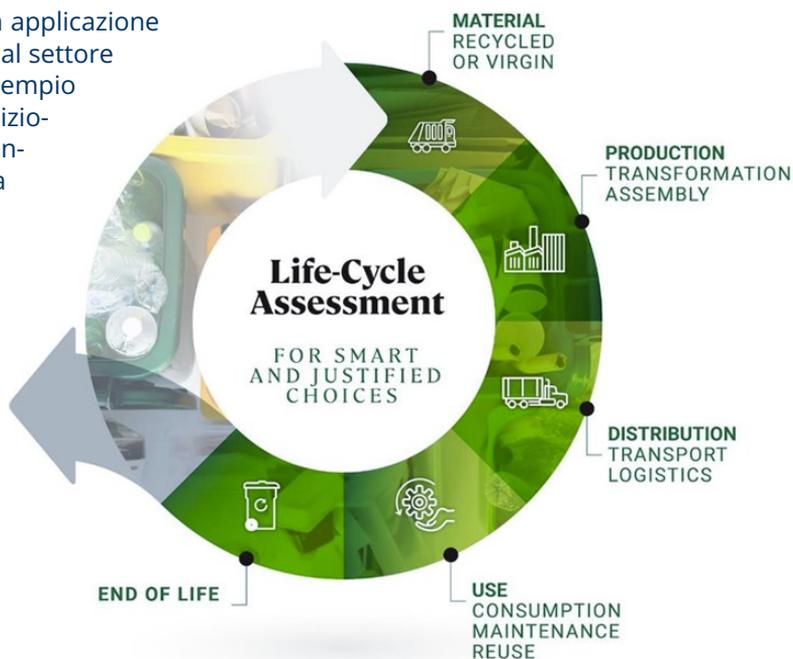
L'analisi di ciclo di vita ambientale (Life Cycle Assessment, LCA) è un metodo standardizzato (ISO 14040:2006) per valutare gli impatti ambientali e sulla salute umana derivanti dalle emissioni e dal consumo di risorse di qualsiasi attività umana. Questa analisi può coprire l'intera catena di approvvigionamento delle materie prime, la produzione, il trasporto, fino alle fasi di fine vita e riciclo (cradle-to-grave), oppure solo una parte di essa (cradle-to-gate o gate-to-gate). Sebbene consolidata per le analisi su scala industriale, il LCA ha recentemente assunto importanza anche nel contesto delle attività di laboratorio a basso TRL (≤ 4), consentendo di identificare i punti critici che influenzano gli impatti ambientali potenziali e fornendo dati utili per eventuali futuri processi di scalabilità.

In tale contesto, ICMATE applica il metodo LCA ai processi chimici analizzando le diverse fasi di:

- **Produzione di Reagenti e Materiali:** include l'analisi degli impatti ambientali associati alla produzione dei reagenti chimici, dei solventi, e di altri materiali utilizzati nei laboratori.
- **Sintesi e Manipolazione Chimica:** valuta gli impatti ambientali delle reazioni chimiche e delle manipolazioni chimiche svolte nel laboratorio, considerando consumi energetici, emissioni di gas, e l'uso di sostanze chimiche pericolose.
- **Utilizzo e Gestione dei Rifiuti:** esamina come i materiali chimici sono utilizzati durante gli esperimenti di laboratorio e valuta in che classi di rifiuti andranno collocati nella modellazione.

ICMATE in questo settore ha esperienza in diversi ambiti quali, ad esempio, nella modellazione LCA di film sottili come membrane per la separazione dell'idrogeno o come barriera per la protezione contro l'infragilimento da idrogeno, considerandone composizione chimica, processi di sintesi sperimentali, prestazioni, e anche effettuando una valutazione delle materie prime critiche.

ICMATE, inoltre, estende la applicazione di metodologie LCA anche al settore biomedicale, come ad esempio nuovi sistemi per la deposizione di idrossiapatite per l'integrazione ossea, con la modellazione di eco-profilo per identificare le criticità ambientali dei processi innovativi coinvolti, e anche una valutazione della criticità delle materie prime impiegate.



MARECO: THE POLYTHEMATIC MARINE LABORATORY OF ICMATE

MARECO is an advanced marine research infrastructure located in Bonassola, on the Ligurian Sea in Italy. Housed in a seaside cave, it leverages its natural setting with a system that intakes and recirculates seawater to supply mesocosms exposed or unexposed to natural photoperiods. This unique setup enables diverse research in marine sciences, focusing on both material science and environmental studies through collaborations with multiple academic and scientific institutions. The working areas regard marine sciences described as follows.

Materials science and technology: behavior and protection of metal alloys and non-metallic materials in marine environments, atmospheric corrosion, underwater corrosion in various conditions, biocorrosion, evaluation of active (cathodic) and passive (coating-based) protection systems, innovative coatings including those from recyclable materials.

Marine environmental sciences: climatology of extratropical cyclones in the west Mediterranean sea, monitoring of meteorological and marine parameters, pollutants affecting seawater surface tension, chloride deposition in coastal zones, integration in the marine environment of manufacts for the coastal erosion control.

MARECO supports extensive outreach through educational programs that disseminate marine science knowledge. As a platform for innovation, the facility fosters interdisciplinary research to develop sustainable solutions for preserving marine ecosystems and advancing the blue economy. Its unique capabilities make it a valuable resource for scientists, educators, and industry professionals committed to building a greener future for our oceans.

A view of the MARECO laboratory.

Il laboratorio MARECO.



MARECO: IL LABORATORIO MARINO POLITEMATICO DI ICMATE

MARECO è un'infrastruttura avanzata di ricerca per le scienze marine situata a Bonassola (SP), sul Mar Ligure (Italia). Questo laboratorio, collocato in una grotta fronte mare, sfrutta appieno il contesto naturale grazie a un sistema di prelievo e ricircolo di acqua di mare che alimenta mesocosmi, esposti o meno al fotoperiodo naturale. Tale configurazione consente di realizzare ricerche e sperimentazioni in ambito marino in collaborazione con numerose istituzioni scientifiche e accademiche. Le aree di indagine riguardano le scienze del mare descritte come segue.

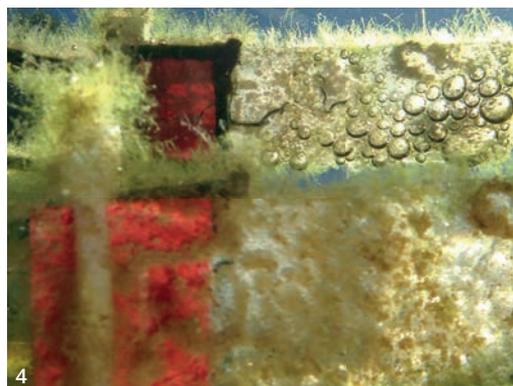
Scienza e tecnologie dei materiali: comportamento e protezione di leghe metalliche e materiali non metallici in ambienti marini, corrosione atmosferica, corrosione subacquea e biocorrosione, sistemi di protezione attiva e passiva, test di disbonding catodico, rivestimenti innovativi, anche derivati da materiali riciclabili.

Scienze ambientali marine: fenomeni atmosferici e oceanici, climatologia dei cicloni extratropicali nel Mediterraneo occidentale, monitoraggio dei parametri meteomarinari, impatto degli inquinanti sulla tensione superficiale dell'acqua, deposizione di cloruri nelle zone costiere, integrazione in ambiente marino di manufatti per il controllo dell'erosione costiera.

MARECO sviluppa collaborazioni con istituzioni scientifiche e programmi educativi, rappresentando una piattaforma per l'innovazione che facilita la ricerca interdisciplinare per preservare gli ecosistemi marini e sostenere la blue economy. Scienziati, educatori e professionisti attivi in area mare sono invitati a collaborare per costruire un futuro sostenibile per i nostri oceani.

1. Atmospheric corrosion of Fe and Al based alloys for aeronautical applications.
2. Chloride deposition rate from marine spray in the surf zone.
3. Behavior of biocide-free foul control paints near ICCP anodes.
4. Superhydrophobic coatings in actual seawater environments.

1. Corrosione atmosferica di leghe base Fe ed Al per applicazioni aeronautiche.
2. Tasso di deposizione di Cl⁻ nella zona dei frangenti.
3. Comportamento di pitture biocide-free in prossimità di anodi ICCP.
4. Rivestimenti superidrofobici in ambienti marini reali.



ADDITIVE MANUFACTURING FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS

ICMATE exploits the full potential of Additive Manufacturing (AM) for advanced biomedical applications. AM is an advanced manufacturing technology, based on the deposition of material layer by layer, and typically dedicated to the creation of complex-shaped components, with a high degree of product customization.

ICMATE is involved in research projects focused on design, construction using the Laser Powder Bed Fusion (LPBF) technique, qualification, and patient testing of Ti6Al4V alloy fixtures for finger amputees (Figure 1). These activities involve an extended partnership, which covers activities from the biological evaluation of the material to tests on cadavers and finally implantation on patients through clinical partners.

ICMATE has also experience in the design and production of prototypes of cranial expanders made using LPBF in superelastic Nitinol alloy (Figure 2). This solution can offer a constant force in the case of pediatric cranial malformations.

A further line of research activity concerns the development of personalized prostheses using LPBF (Figure 3). In this context, a customized talus prosthesis in Ti6Al4V was developed.

Finally, metal alloys have been developed, with antibacterial properties through the modification of the chemical composition of the powder again for the LPBF process.

These efforts demonstrate ICMATE's role in the research and development of advanced materials produced by AM to be proposed for the biomedical sector.



1

1. First patient-matched Ti6Al4V ELI fixture for the treatment of thumb amputees.

1. Primo apparecchio Ti6Al4V ELI personalizzato per il trattamento degli amputati del pollice.

MANIFATTURA ADDITIVA PER APPLICAZIONI BIOMEDICHE

L'Additive Manufacturing (AM) è una tecnologia di fabbricazione avanzata, basata sulla deposizione di materiale strato su strato, e tipicamente dedicata alla realizzazione di componenti di forma complessa. Inoltre, la sua versatilità offre un elevato grado di personalizzazione del prodotto: questo aspetto è la forza trainante verso la sua applicazione in settori con elevato contenuto tecnologico, come quello biomedicale.

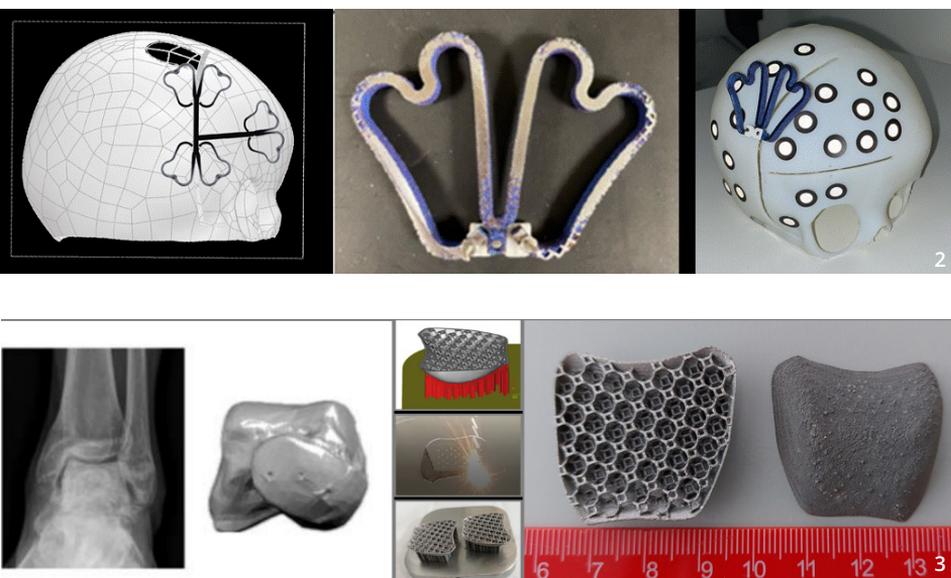
ICMATE è coinvolto in progetti di ricerca focalizzati alla progettazione, realizzazione mediante tecnica Laser Powder Bed Fusion (LPBF), qualifica e sperimentazione su paziente di fixtures in lega Ti6Al4V per amputati delle dita della mano (Figura 1). Tali attività prevedono un partenariato esteso, che copre attività dalla valutazione biologica del materiale fino ai test su cadavere ed infine l'impianto su paziente tramite partners clinici.

ICMATE ha anche sviluppato esperienza nella progettazione e realizzazione di prototipi di espansori cranici realizzati tramite LPBF in lega Nitinol superelastica (Figura 2). Il vantaggio di tale soluzione è la possibilità di applicare una forza costante nel caso di malformazioni craniche pediatriche.

Una ulteriore linea di attività di ricerca riguarda lo sviluppo mediante LPBF di protesi personalizzate. In quest'ambito è stata sviluppata una protesi di astragalo personalizzata in Ti6Al4V (Figura 3).

Sono state infine sviluppate leghe metalliche, partendo sia dal Ti6Al4V che dal Nitinol, con proprietà antibatteriche attraverso la modifica della composizione chimica della polvere sempre per il processo LPBF.

Questi sforzi dimostrano il ruolo di ICMATE nella ricerca e sviluppo di materiali avanzati prodotti mediante AM da proporre per il settore biomedicale.



2. Design, fabrication of the Nitinol element through Additive Manufacturing and testing of the prototype on the skull model.
3. Customized Talus prosthesis fabricated via LPBF.

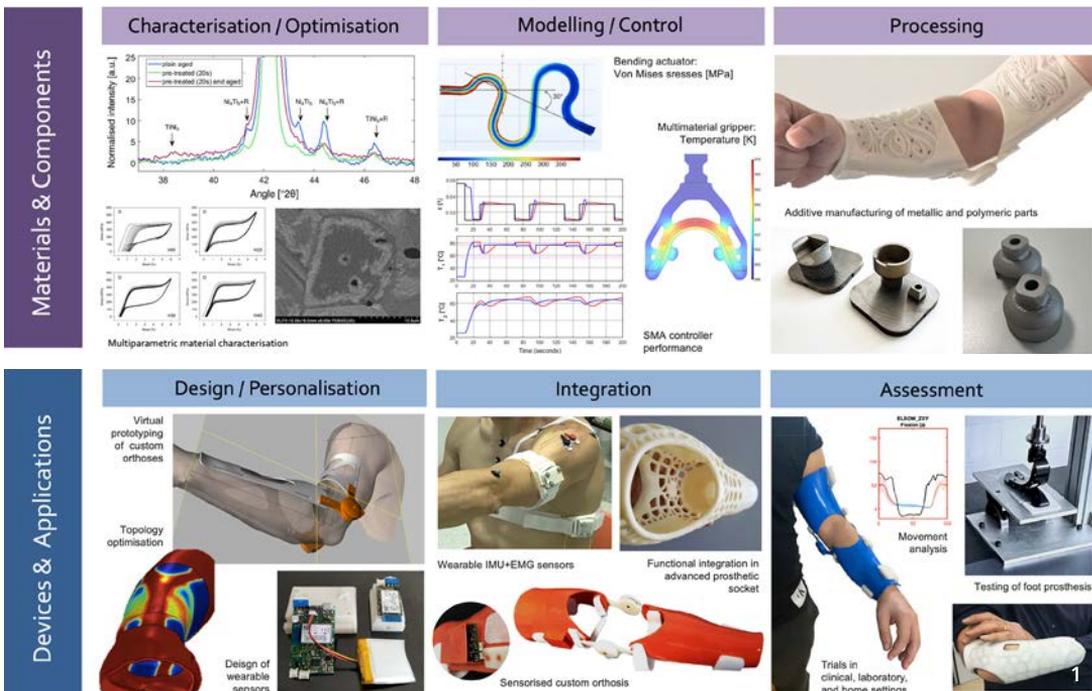
2. Design, realizzazione mediante Manifattura Additiva dell'elemento in Nitinol, e test su cranio del prototipo.
3. Protesi di astragalo personalizzata realizzata mediante LPBF.

REHABILITATION & SPORTS ENGINEERING

Materials Science is crucial for advancements in Biomedical Engineering, particularly in Rehabilitation & Sports Engineering. ICMATE has a vast experience in the design, development, biomechanical and clinical testing of biomedical systems based on the properties of advanced metallic alloys, functional materials and smart composites. These materials are leveraged to build innovative and high-performance rehabilitation biorobots, personalized orthotics and prosthetics, and wearable solutions for physical activity and sports.

Research in this field involves creating hybrid material systems that combine functional metallic alloys, liquid metals, and optimized light metals with additively-manufactured metastructures and nanocomposite matrices. Integrating technologies from Electronics, Mechatronics, Automation, and Artificial Intelligence, the Institute develops smart actuators, multimodal sensors, and advanced controllers to transform material-centered concepts into high-tech medical devices. ICMATE has also expertise in Finite Element Method (FEM) used to solve coupled mechanical, thermal and electrical models of hybrid and composite materials even with complex nonlinear characteristics. Such method is used in a range of practical applications from the study of single material elements to complex fully engineered systems.

Emphasizing user-centered design, the Institute customizes materials to meet individual needs in rehabilitation and neuromotor re-learning, as well as for enhancing athletic performance. Collaborative efforts include partnerships with research hospitals, universities, neuroscience labs, private companies, and non-profits, involving students and researchers. The Institute is also a founding partner of the Centre of Excellence for Rehabilitation Devices and Digital Instruments (CoE REDI).

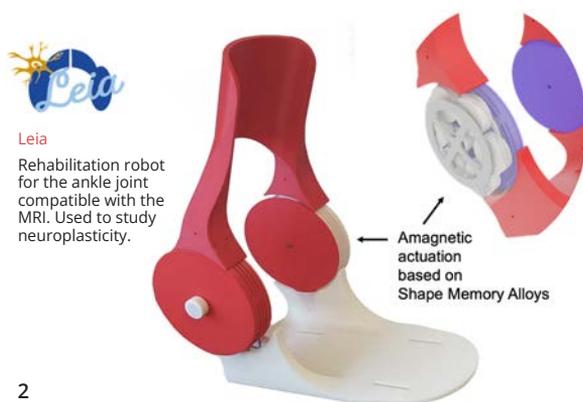


INGEGNERIA DELLA RIABILITAZIONE E DELLO SPORT

La Scienza dei Materiali è cruciale per i progressi dell'Ingegneria Biomedica, in particolare dell'Ingegneria della Riabilitazione e dello Sport. ICMATE ha una vasta esperienza nello sviluppo di sistemi biomedici per queste applicazioni tramite attività di progettazione, sviluppo, caratterizzazione biomeccanica e trial clinici. Le proprietà di leghe metalliche innovative, materiali funzionali e compositi intelligenti vengono valorizzate per realizzare biorobot per la riabilitazione, ortesi e protesi personalizzate, e dispositivi indossabili per l'attività fisica e lo sport.

La ricerca in questo campo prevede la creazione di sistemi ibridi di materiali che combinano leghe metalliche funzionali, metalli liquidi e metalli leggeri, metastrutture ottimizzate e prodotte additivamente e matrici nanocomposite. Integrando tecnologie provenienti dall'elettronica, dalla mecatronica, dall'automazione e dall'intelligenza artificiale, l'Istituto sviluppa attuatori intelligenti, sensori multimodali e controllori avanzati per trasformare i concetti incentrati sui materiali in dispositivi medici di alta tecnologia. Inoltre ICMATE applica metodologie di calcolo numerico agli elementi finiti (FEM) per risolvere modelli meccanici, termici ed elettrici accoppiati di materiali ibridi e compositi anche con caratteristiche non lineari complesse. Tale metodo viene utilizzato in una vasta gamma di applicazioni pratiche, dallo studio di singoli elementi materiali a sistemi complessi, completamente ingegnerizzati.

Ponendo l'accento sullo User Centered Design, l'Istituto personalizza i materiali per soddisfare le esigenze individuali di riabilitazione e per il riapprendimento neuromotorio, nonché per migliorare le prestazioni atletiche. Gli sforzi collaborativi includono partnership con ospedali di ricerca (IRCCS), università, laboratori di neuroscienze, aziende private e associazioni non profit, coinvolgendo studenti e ricercatori. L'Istituto è anche partner fondatore del Centro di Eccellenza sui Dispositivi per la Riabilitazione e gli Strumenti Digitali (CoE REDI).



1. Overview of the application fields for the proposed materials and technologies.

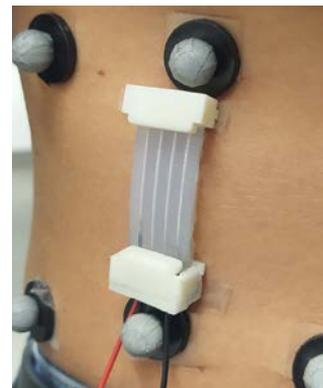
2. Biorobotics. Functional materials embedded in robotic systems improve technological integration and provide adaptability. In the picture, the Leia wearable robot.

3. Soft technologies. Liquid metals sensor and shape memory alloy actuator for sports training feedback. The sensor was attached to the chest skin at the location of maximum expected stretch during a respiration cycle.

1. Vista d'insieme dei campi di applicazione dei materiali e delle tecnologie proposte.

2. Biorobotica. Materiali funzionali inseriti in sistemi robotici migliorano l'integrazione tecnologica e conferiscono flessibilità d'uso. Nella figura, il robot indossabile Leia.

3. Tecnologie soft. Sensore con metalli liquidi e attuttore in lega a memoria di forma per fornire feedback nell'allenamento sportivo. Il sensore è stato fissato alla pelle del torace nel punto di massimo allungamento previsto durante un ciclo respiratorio.



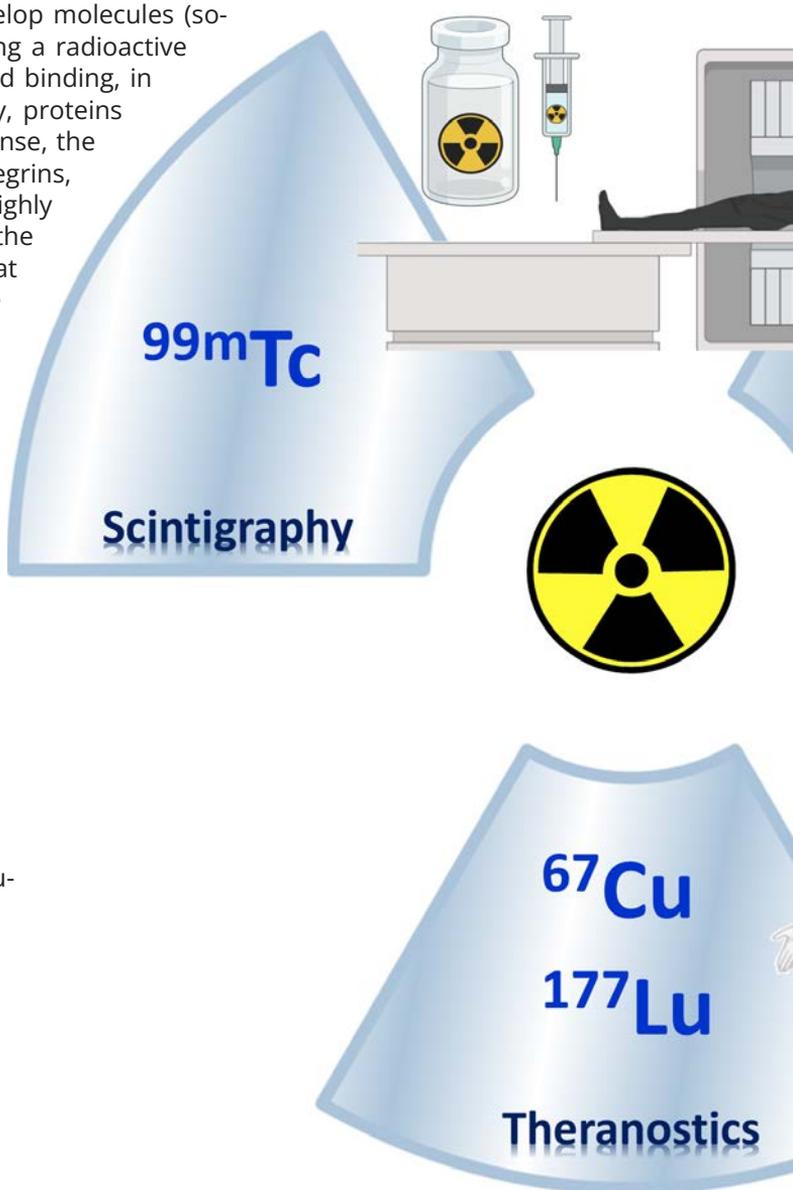
NEW SELECTIVE RADIOPHARMACEUTICALS FOR IMAGING AND THERAPEUTIC APPLICATIONS OF HIGHLY AGGRESSIVE TUMORS

Imaging and targeted therapy with radionuclides are gaining prominence in the management of cancer patients and play an increasingly important role in precision medicine and, therefore, in the possibility of creating ever more personalized treatments. ICMATE is involved in research activities aiming at creating novel precision diagnostic and therapeutic tools in the radiopharmaceutical field.

The research projects aim to develop molecules (so-called molecular probes) containing a radioactive nucleus capable of recognizing and binding, in a highly specific and selective way, proteins characteristic of tumors. In this sense, the focus of the research is on the integrins, which are overexpressed in many highly aggressive tumors and involved in the formation of new blood vessels that feed cancer cells, and on prostate specific membrane antigen (PSMA), expressed by prostate, breast, and kidney cancer cells.

The radioactive isotopes considered are technetium-99m, the workhorse in scintigraphic techniques; copper-64, an emerging radionuclide for positron emission tomography (PET); copper-67 and lutetium-177, useful in therapeutic applications.

The development of these highly selective radiopharmaceuticals could lead not only to a more precise diagnostic capacity for primary and metastasis cancer, but also to new targeted therapeutic strategies.



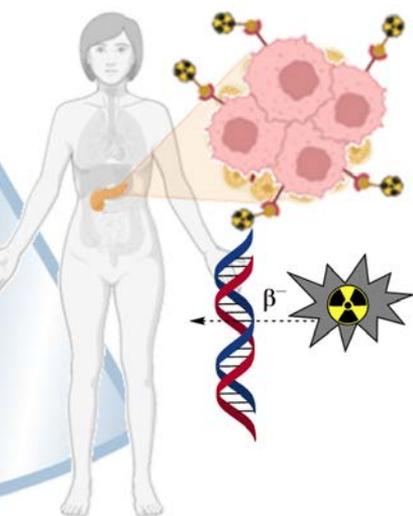
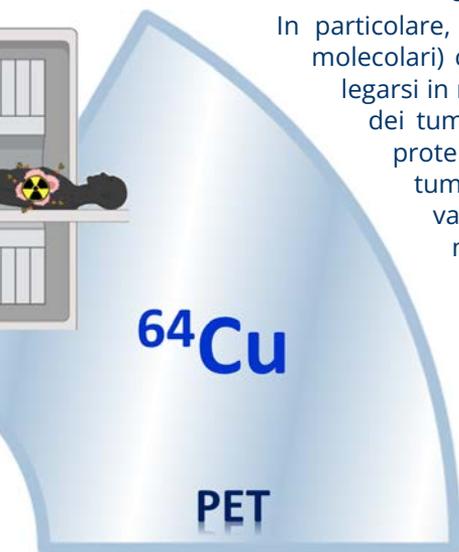
NUOVI RADIOFARMACI SELETTIVI PER APPLICAZIONI DI IMAGING E TERAPEUTICHE DI TUMORI ALTAMENTE AGGRESSIVI

L'imaging e la terapia mirata con radionuclidi stanno ottenendo sempre più consenso nella gestione dei pazienti oncologici e svolgono un ruolo sempre più rilevante nella medicina di precisione e nella possibilità, quindi, di creare trattamenti sempre più personalizzati. ICMATE è attivo nella ricerca in quest'ambito, attraverso progetti che si propongono di creare nuovi strumenti di precisione basati sull'utilizzo di radiofarmaci per la diagnostica per immagini medico-nucleare, per la radioterapia interna e per approcci che combinano diagnosi e terapia (teranostica).

In particolare, il lavoro mira a sviluppare molecole (le cosiddette sonde molecolari) contenenti un elemento radioattivo e capaci di riconoscere e legarsi in modo altamente specifico e selettivo a proteine caratteristiche dei tumori. A tal riguardo, l'attenzione della ricerca è focalizzata su proteine di diverso tipo, quali le integrine, sovra-esprese in molti tumori altamente aggressivi e coinvolte nella formazione di nuovi vasi sanguigni che alimentano le cellule tumorali, e l'antigene di membrana prostatico specifico (PSMA), presente sulla superficie di cellule di cancro della prostata, del seno e del rene.

Gli elementi radioattivi considerati sono il tecnezio-99m, radionuclide di elezione nelle scintigrafie; il rame-64, radionuclide emergente per la diagnostica con tomografia ad emissione di positroni (PET); il rame-67 e il lutezio-177, isotopi utili nelle applicazioni teranostiche.

La messa a punto di questi radio-farmaci altamente selettivi potrebbe portare a una più precisa capacità diagnostica sia per il tumore primario sia per le metastasi, ma anche a nuove strategie terapeutiche mirate.

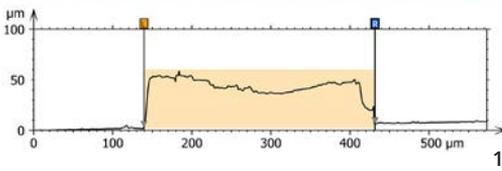
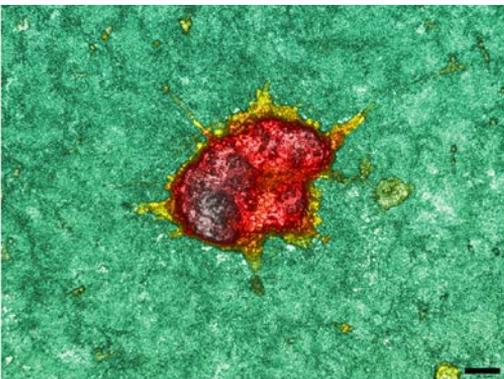


ADVANCED MATERIALS AND EXPERIMENTAL TECHNIQUES FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS

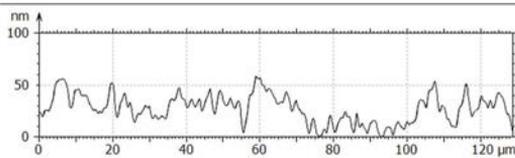
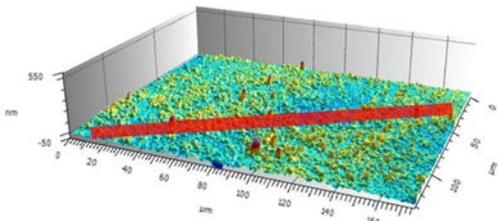
In the field of imaging for biomedical applications, it is important to employ appropriate functionalised materials and experimental techniques that optimise key requirements such as penetration depth, image contrast and biocompatibility.

ICMATE develops innovative markers, so-called SHG materials that emit light through the mechanism of second harmonic generation, and which can be used as nano-probes for multiphoton microscopy.

Furthermore, an important aspect to consider when nano-materials are used for medical diagnostics concerns their potential adverse effect on health, i.e. their toxicity. Beside the certified protocols adopted to evaluate these effects, chemical-physical studies of the interaction of these nanomaterials with model bio-interfaces that simulate tissues and membranes relevant for biomedical diagnosis are important. Such research provides a preliminary knowledge of the actual interaction mechanisms, enabling optimal engineering of new nanomaterials.



1



2

In addition, an innovative and non-invasive procedure for the assessment of cell viability *in vitro* by discriminating between pathological and healthy cells is 3D confocal and interferometric optical profilometry. Specifically, the imaging technique with micro/nanometer scale resolution, by assessing the volume of individual cells in response to a given cytotoxic compound or drug, can distinguish between the proliferation and cell death mechanism, providing indications on the efficacy of a treatment from the very first moments after administration. ICMATE develops this technique also in the characterisation of innovative 3D cell aggregates prepared on superhydrophobic surfaces, the spheroids, for *in vitro* study to simulate more realistic physiological conditions.

1. Image and its line profile for a spheroid, a 3D cell aggregate, obtained by the 3D confocal profilometry technique.

2. Image and its line profile for a superhydrophobic surface, obtained by the 3D confocal profilometry technique.

1. Immagine e relativo profilo di uno sferoide, un aggregato di cellule 3D, acquisiti mediante profilometria 3D confocale.

2. Immagine e relativo profilo di una superficie superidrofobica acquisiti mediante profilometria 3D confocale.

MATERIALI AVANZATI E TECNICHE SPERIMENTALI PER APPLICAZIONI BIOMEDICHE

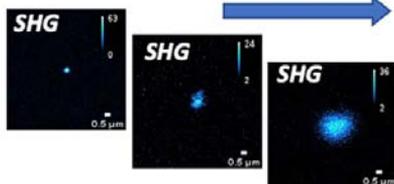
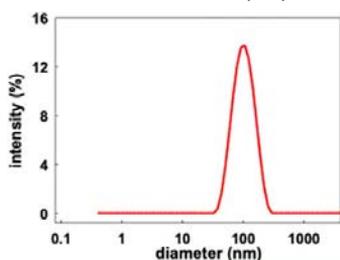
Nel campo dell'imaging per applicazioni biomediche, è importante impiegare appropriati materiali funzionalizzati e tecniche sperimentali in grado di ottimizzare requisiti chiave, quali la profondità di penetrazione, il contrasto dell'immagine e la biocompatibilità.

ICMATE sviluppa marcatori di tipo innovativo, i cosiddetti materiali SHG che emettono luce attraverso il meccanismo di generazione di seconda armonica, e che possono essere impiegati come nano-sonde per la microscopia multifotonica.

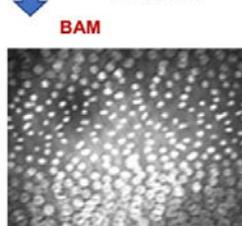
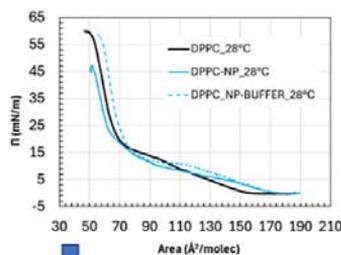
Un aspetto importante da considerare quando vengono utilizzati nano-materiali per la diagnosi medica, riguarda il loro potenziale effetto avverso sulla salute, ovvero la loro tossicità. Al di là dei protocolli certificati adottati per valutare questi effetti, sono importanti studi chimico-fisici dell'interazione di questi nanomateriali con bio-interfacce modello che simulano i tessuti e le membrane rilevanti per la diagnosi biomedica. Tali ricerche forniscono una conoscenza preliminare dei reali meccanismi di interazione consentendo un'ottimale ingegnerizzazione di nuovi nano-materiali.

Inoltre, una procedura innovativa e non invasiva della vitalità cellulare in vitro discriminando fra cellule patologiche e sane è la profilometria ottica 3D confocale e interferometrica. Nello specifico la tecnica di imaging con risoluzione su scala micro/nanometrica, valutando il volume delle singole cellule in risposta ad un determinato composto citotossico o farmaco, è in grado di distinguere tra la proliferazione e il meccanismo di morte cellulare fornendo indicazioni sull'efficacia di un trattamento fin dai primi istanti dopo la somministrazione. ICMATE utilizza questa tecnica anche nella caratterizzazione di aggregati cellulari 3D innovativi preparati su superfici superidrofobiche, gli sferoidi, per lo studio in vitro in grado di simulare condizioni fisiologiche più realistiche.

PARTICLES SIZE DISTRIBUTION (DLS) OF MARKER



MARKER INCORPORATION IN A BIO LAYER



From the synthesis to the characterization of SHG nano-markers: control of particle sizes by Dynamic Light Scattering, evaluation of the emission of second harmonics and measurement of the interaction with model lipid layers by Langmuir trough and by Brewster Angle Microscopy (BAM).

Dalla sintesi alla caratterizzazione di nano-sonde SHG: controllo delle dimensioni di particelle attraverso Dynamic Light Scattering (DLS), valutazione dell'emissione di seconda armonica e misura dell'interazione con strati lipidici modello mediante bilancia di Langmuir e Brewster Angle Microscopy (BAM).

DIGITAL TECHNOLOGIES FOR ACCURATE PREDICTION OF ADVANCED MATERIALS

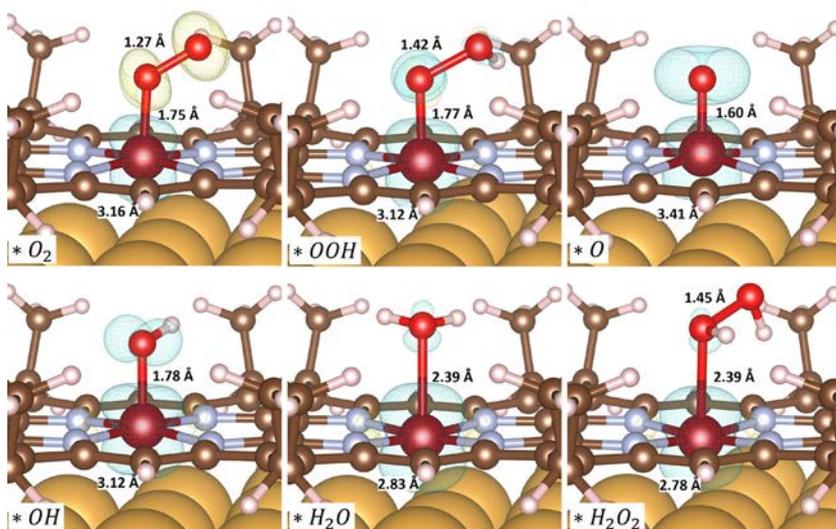
Digital chemistry integrates digital technologies, computational methods, and data science techniques to enhance chemical research, analysis, and applications. ICMATE research focuses on computational chemistry and employing simulations and modeling to understand chemical structures, properties, reactions, and interactions.

At ICMATE, the structural, electronic, and functional properties of molecular films supported on metals and oxides surfaces are predicted by density functional theory (DFT) calculations. Processes involving the interconversion of self-assembled phases and the interchange of atoms between films and the supporting solid are also investigated.

Recent studies further explore alloy metal nanoparticles renowned for their unique optical properties, particularly their ability to support collective excitations of electrons known as plasmons. These nanoparticles, composed of elements like gold, platinum, and silver, exhibit distinctive plasmonic behavior, whereas elements like iron and cobalt confer magnetic and catalytic properties instead.

Advancements in predicting the optical properties of nanoparticles containing both plasmonic and magnetic elements represent significant strides in their development and understanding. Quantum calculations facilitate determining the material's dielectric function, describing its interaction with light, and deriving the nanoparticles' absorption spectrum. Accurately predicting light-matter interactions in these nanosystems and strategically designing candidate materials hold profound implications for fundamental fields such as quantum optics, magneto-plasmonics, and plasmon-enhanced catalysis.

The conversion of chemical energy into electrical energy, and vice versa, is a cornerstone of renewable energy production and storage. These processes often rely on catalysts containing precious metals. At ICMATE, we employ computational approaches to identify effective catalysts that utilize single atoms of non-precious metals as active sites, thereby optimizing the consumption of raw materials.



Oxygen Reduction Reaction at a single-iron site.

Reazione di Riduzione dell'Ossigeno su un singolo atomo di ferro.

TECNOLOGIE DIGITALI PER LA PREDIZIONE ACCURATA DI MATERIALI AVANZATI

La chimica digitale integra tecnologie digitali, metodi computazionali e tecniche di scienza dei dati per migliorare la ricerca, l'analisi e le applicazioni chimiche. Presso ICMATE, la nostra ricerca si concentra sulla chimica computazionale impiegando simulazioni e modellazione per comprendere le strutture chimiche, le proprietà, le reazioni e le interazioni.

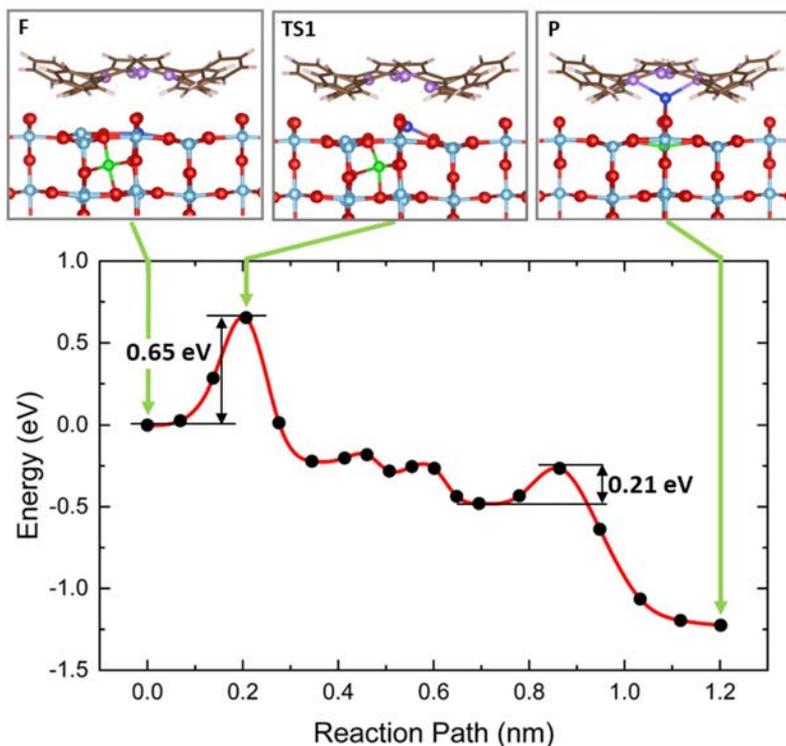
ICMATE ha vasta competenza nella modellizzazione delle proprietà strutturali, elettroniche e funzionali di film sottili supportati su superfici di metalli e ossidi modellizzati con metodi DFT. Vengono inoltre studiati i processi di interconversione di fasi autoassemblate e lo scambio di atomi tra il film e il solido su cui sono supportati.

Recenti studi presso ICMATE esplorano nanoparticelle di leghe metalliche rinomate per le loro proprietà ottiche uniche, in particolare la loro capacità di supportare eccitazioni collettive degli elettroni note come plasmoni. Queste nanoparticelle, composte da elementi come oro, platino e argento, mostrano un comportamento plasmonico distintivo, mentre elementi come ferro e cobalto conferiscono proprietà magnetiche e catalitiche.

I progressi nella previsione delle proprietà ottiche delle nanoparticelle contenenti elementi plasmonici e magnetici rappresentano significativi passi avanti nel loro sviluppo e comprensione. I calcoli quantistici facilitano la determinazione della funzione dielettrica del materiale, descrivendo la sua interazione con la luce e derivando lo spettro di assorbimento delle nanoparticelle. Prevedere accuratamente le interazioni luce-materia in questi nanosistemi e progettare strategicamente materiali è di rilevanza per disegnare nuovi dispositivi per l'ottica quantistica,

la magneto-plasmonica e la fotocatalisi assistita da plasmonica.

La trasformazione dell'energia chimica in elettrica e viceversa è un pilastro della produzione e stoccaggio di energia da fonti rinnovabili. Questi processi di solito impiegano catalizzatori a base di metalli preziosi. Attraverso l'uso di tecniche computazionali, ICMATE ricerca catalizzatori più sostenibili, che utilizzino singoli atomi di metalli non preziosi.



A porphyrin extracts a Ti atom from TiO₂.

Una porfirina estrae un atomo di titanio dal TiO₂.

DESIGN OF LIQUID METAL-CERAMIC INTERFACES AT HIGH TEMPERATURES

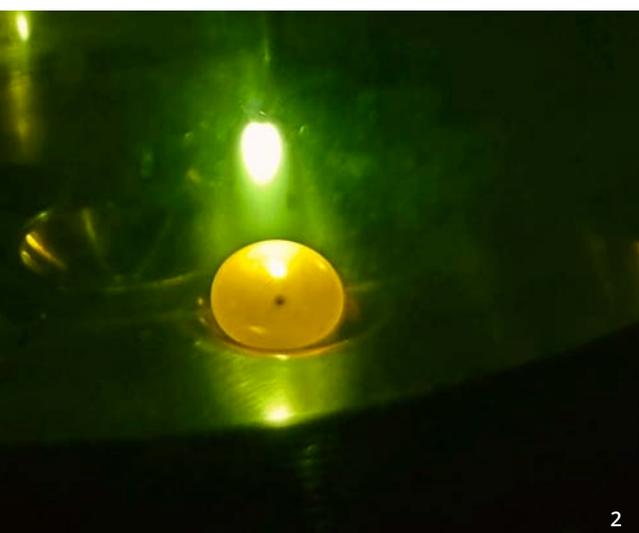
Designing metal-ceramic interfaces for critical applications—such as ceramic and metal-ceramic joining by brazing, casting, and biomaterials' development—requires a multifaceted materials science approach. This work focuses on wettability studies, examining how liquid alloys interact with ceramic surfaces at high temperatures. Key interfacial phenomena, including adsorption, dissolution, infiltration, and compound formation, determine microstructural evolution and are crucial for optimizing material performance and fabrication. Given the high atomic mobility and reactivity at elevated temperatures, CALPHAD thermodynamic modeling provides a powerful tool to predict phase equilibria, elemental activity, processing parameters.

For biomedical applications, ICMATE research extends to alloy surface modifications to enhance biodegradability and biocompatibility.

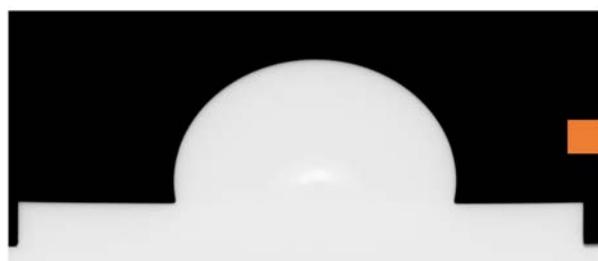


The synergy of modeling and experiments enables the development of compositionally complex materials, such as High-Entropy Alloys (HEAs).

ICMATE investigates refractory metal additions (e.g. Ta, Mo, W) to AlCoCrFeNi HEAs to improve mechanical and interfacial properties. Research also focuses on Ti-based refractory HEAs (e.g. TiZrTaHfNb) either for biomedical applications as a substitute of Ti alloys when joined to ZrO₂, or in aerospace applications as brazing interlayers for High-Entropy Ceramics. Experimental validation of an in-house thermodynamic database supports the design of CALPHAD-engineered HEAs for industrial use.



ANALYSIS OF WETTING



DESIGN DI INTERFACCE METALLO LIQUIDO-CERAMICO AD ALTA TEMPERATURA

La progettazione di interfacce metallo-ceramico per applicazioni critiche, come, ad esempio, le giunzioni per brasatura di materiali ceramici, i processi di colata o la progettazione di biomateriali, richiede un approccio multidisciplinare basato sulla scienza dei materiali. Gli *studi di bagnabilità* ad alta temperatura, ovvero l'analisi delle interazioni tra metalli liquidi e superfici ceramiche, sono al centro di questa ricerca. L'evoluzione microstrutturale di questi sistemi è determinata dai *fenomeni all'interfaccia* liquido/solido quali adsorbimento, dissoluzione e formazione di composti che influenzano prestazioni e processi produttivi. Poiché l'elevata mobilità atomica e la forte reattività ad alte temperature rendono complessa l'interpretazione sperimentale, la modellizzazione termodinamica via CALPHAD consente di prevedere equilibri di fase e attività degli elementi, ottimizzando i parametri di processo.

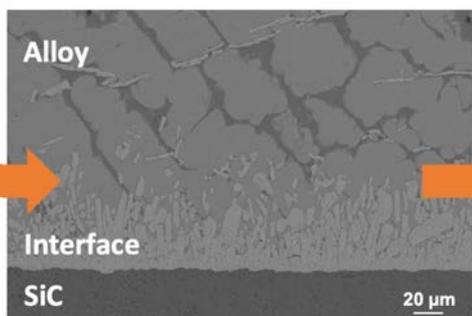
Nel settore biomedico, la ricerca in ICMATE esplora modifiche superficiali delle leghe per migliorarne biodegradabilità e biocompatibilità.

L'integrazione esperimenti-modelli consente lo studio di materiali complessi come le leghe ad alta entropia (HEAs). Ad esempio, vengono analizzati gli effetti degli elementi refrattari (es. Ta, Mo, W) nelle leghe AlCoCrFeNi per migliorarne proprietà meccaniche e interfaciali. Sono inoltre sviluppate HEAs refrattarie a base di Ti (es. TiZrTaHfNb), studiate sia giuntate a ZrO_2 come alternativa alle leghe di Ti nei dispositivi biomedici, sia come materiale d'apporto per la brasatura di ceramici ad alta entropia in ambito aerospaziale.

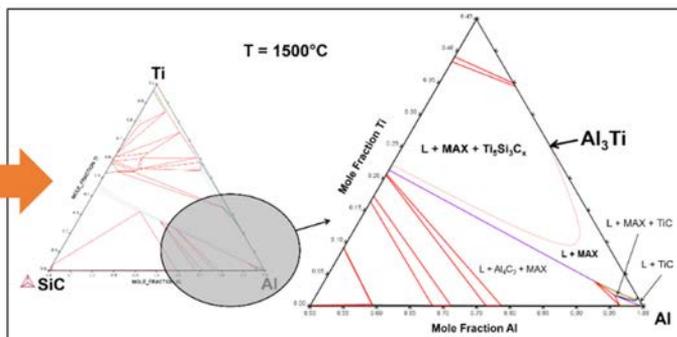
Gli esperimenti hanno consentito la validazione, ancora in progress, di un database termodinamico multicomponente, aprendo la strada allo sviluppo di nuove HEAs progettate con il metodo CALPHAD.

1. Arc melting device.
2. Molten metal during arc melting process.
3. Wetting test, characterization and thermodynamic modeling by CALPHAD.
1. Strumento per fusione ad arco (arc melting).
2. Metallo fuso durante processo di arc melting.
3. Test di bagnabilità, caratterizzazione e modellizzazione termodinamica mediante CALPHAD.

INTERFACIAL CHARACTERIZATION



INTERFACE MODELING BY CALPHAD



SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CULTURAL HERITAGE

Cultural Heritage is an invaluable socioeconomic resource: the legacy of physical artifacts and intangible attributes of a society, inherited from the past, whose preservation is a main mission of UNESCO and European Community. ICMATE, leveraging its analytical, chemical, and engineering expertise, embraces this mission through a broad, transdisciplinary approach. It tackles artefact conservation by understanding materials, their environmental interactions, and degradation processes, evaluating conservation states, ultimately proposing preventive protocols and developing new, sustainable protective materials. For instance, characterizing materials in modern and contemporary paintings helps understand techniques, assess condition, and potentially verify authenticity. These aspects are investigated in situ and in lab, using contactless and micro-invasive techniques, comparing data with simulations. Results can be integrated with air quality monitoring in museums to assess the environmental impact on works of art. For stone artefacts, ICMATE develops innovative materials and studies conservation compounds. This includes

developing compatible, often geopolymer-based, binders for structural consolidation and reinforcement of historical buildings, also improving their energy efficiency.

Finally, ICMATE heads the Journal of Cultural Heritage (JCH), a leading multidisciplinary journal on scientific aspects of Cultural Heritage conservation, targeting both scientists and conservators/restorers.



In situ contactless reflection infrared spectroscopic analysis on contemporary paintings (Guggenheim Museum, Venice).

Studies on oriental lacquerwares belonging to the Museum of Oriental Art of Venice in order to determine the provenance of the artefacts.

Analisi di spettroscopia infrarossa in riflessione su opere pittoriche contemporanee (Guggenheim Museum, Venezia).

Studi su lacche orientali appartenenti alla collezione del Museo di Arte Orientale di Venezia al fine di determinare la provenienza dei manufatti.

SCIENZA E TECNOLOGIA DEI BENI CULTURALI

Il patrimonio culturale è una risorsa socioeconomica inestimabile: rappresenta il lascito di manufatti e attributi immateriali ereditati dal passato, la cui salvaguardia e trasmissione alle generazioni future è una missione principale di UNESCO e Comunità Europea. ICMATE, con un solido background analitico, esperienza in sintesi chimica e competenze ingegneristiche, interpreta questa missione in modo ampio e transdisciplinare. ICMATE affronta la conservazione dei manufatti studiando i materiali, la loro interazione con l'ambiente e i fenomeni di degrado, valutando lo stato di conservazione. L'obiettivo è elaborare protocolli di conservazione preventiva e sviluppare nuovi materiali sostenibili e compatibili per la protezione. Ad esempio, caratterizzare i materiali nelle opere pittoriche moderne e contemporanee permette di comprendere le tecniche esecutive, valutare lo stato di conservazione e supportare la verifica di autenticità. Questi aspetti sono studiati in situ e in laboratorio, con tecniche contactless o micro-invasive, confrontando i dati con simulazioni. I risultati si integrano con il monitoraggio della qualità dell'aria indoor nei musei per valutare gli effetti ambientali sui manufatti. Per i manufatti lapidei storico-artistici, ICMATE sviluppa materiali innovativi per consolidamento e protezione, studiando anche composti tradizionali. L'istituto si occupa inoltre di leganti innovativi e compatibili, anche geopolimerici, per il consolidamento e rinforzo strutturale degli edifici storici e il miglioramento dell'efficienza energetica.

ICMATE dirige il Journal of Cultural Heritage (JCH), principale rivista multidisciplinare su aspetti scientifici e tecnologici della conservazione del Patrimonio Culturale, rivolta a scienziati, conservatori e restauratori.



Laser-Induced Incandescence (LII) technique for indoor air quality monitoring at the Ambrosiana Art Gallery in Milan.

Misure LII per il monitoraggio della qualità dell'aria indoor presso la Pinacoteca Ambrosiana di Milano.



TECHNOLOGY TRANSFER AT CNR-ICMATE

CNR-ICMATE leverages its expertise to foster industry collaboration, supporting innovation through research contracts, technology transfer, third-party services, and regulatory activities, in alignment with CNR's Third Mission.

Key Areas of Industrial Support:

1. Advanced Materials & Additive Manufacturing

- Development of metal alloys for high-temperature applications.
- Additive manufacturing (3D printing) of metals, ceramics, and composites for aerospace, biomedical, and energy sectors.
- High-performance cooling systems and thermal energy storage solutions.

2. Energy & Sustainability

- Materials for hydrogen production/storage (e.g., catalysts, membranes).
- Thermal energy storage with phase change materials (PCMs) and advanced alloys.
- Thermoelectric generators (TEGs) for waste heat recovery and sustainable energy.

3. Corrosion & Surface Treatments

- Corrosion protection and monitoring for marine, aerospace, and industrial applications.
- Coatings and surface treatments to enhance material durability.
- Access to MARECO marine facility for multidisciplinary corrosion research.

4. Smart & Functional Materials

- Elastocaloric/magnetocaloric materials for solid-state cooling.
- Shape memory alloys (SMAs) for biomedical and industrial uses.
- Soft matter and complex fluids research, including microgravity experiments.

5. Industry Collaboration & Prototyping

- Pilot plants for testing and scaling up novel materials.
- Prototyping and consulting for customized solutions.
- Strategic partnerships for EU-funded projects.

Technology Transfer Activities:

- **Research Contracts** – Developing tailored technologies with industrial partners.
- **Licensing Agreements** – Transferring patented technologies for commercial use.
- **Consulting Services** – Providing expert solutions for technological challenges.
- **Training & Workshops** – Sharing knowledge on materials, energy, and innovation.
- **Industry Consortia Participation** – Collaborating in large-scale R&D projects.

By bridging research and real-world applications, CNR-ICMATE drives industrial innovation, advancing materials science, energy solutions, and sustainability for economic and environmental impact.



TRASFERIMENTO TECNOLOGICO PRESSO CNR-ICMATE

CNR-ICMATE mette a disposizione la propria competenza per favorire la collaborazione con l'industria, sostenendo l'innovazione e sviluppo industriale, in linea con la Terza Missione del CNR.

Settori chiave di supporto industriale:

1. Materiali Avanzati e Manifattura Additiva

- Sviluppo di leghe metalliche per applicazioni ad alta temperatura.
- Stampa 3D di metalli, ceramiche e compositi per i settori aerospaziale, biomedicale ed energetico.
- Sistemi di raffreddamento ad alte prestazioni e soluzioni per lo stoccaggio di energia termica.

2. Energia e Sostenibilità

- Materiali innovativi per la produzione e lo stoccaggio dell'idrogeno (catalizzatori, membrane).
- Tecnologie di accumulo termico con materiali a cambiamento di fase (PCM) e leghe avanzate.
- Generatori termoelettrici (TEG) per il recupero del calore di scarto e soluzioni energetiche sostenibili.

3. Corrosione e Trattamenti Superficiali

- Protezione e monitoraggio della corrosione per applicazioni marine, aerospaziali e industriali.
- Sviluppo di rivestimenti e trattamenti per migliorare la durabilità dei materiali.
- Partecipazione a MARECO, infrastruttura per la ricerca multidisciplinare sulla corrosione.

4. Materiali Intelligenti e Funzionali

- Materiali elastocalorici e magnetocalorici per sistemi di raffreddamento a stato solido.
- Leghe a memoria di forma (SMA) per applicazioni biomedicali e industriali.
- Studio di soft matter e fluidi complessi, inclusi esperimenti in microgravità.

5. Collaborazione Industriale e Prototipazione

- Impianti pilota per testare e scalare nuovi materiali e processi.
- Prototipazione e consulenza per soluzioni personalizzate.
- Partenariati strategici per progetti finanziati dall'UE.

Attività di Trasferimento Tecnologico:

Contratti di Ricerca – Sviluppo di tecnologie su misura con partner industriali.

Licenze Tecnologiche – Trasferimento di brevetti per applicazioni commerciali.

Consulenze – Soluzioni esperte per sfide tecnologiche e innovazione.

Formazione e Workshop – Condivisione di competenze su materiali, energia e tecnologie avanzate.

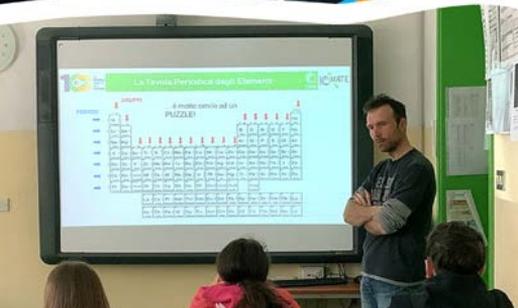
Partecipazione a Consorzi Industriali – Collaborazioni in progetti di ricerca su larga scala.

Attraverso queste attività, CNR-ICMATE crea un ponte tra ricerca e applicazioni industriali, promuovendo l'innovazione nei materiali, nell'energia e nella sostenibilità, con un impatto positivo sull'economia e sull'ambiente.

OUTREACH AND CITIZENS SCIENCE

ICMATE contributes to bringing scientific culture into schools, introducing the scientific method and fostering hands-on experimentation together, from primary to secondary education. This is achieved through workshops and seminars for school groups, training courses for teachers, and opening its laboratories to students through dedicated projects for secondary schools. ICMATE is actively committed to promoting gender equality in science, challenging stereotypes that hinder access to STEM careers, and fostering an inclusive and diverse scientific community. Ongoing training also involves interactions with third age universities, through lessons and seminars and collaboration with sector associations for professional courses.

Finally ICMATE promotes public engagement by organizing and participating in initiatives at international, national and local level, for dissemination and valorisation of scientific culture, both for the general public and for specific audiences. The institute enters the classic places of scientific culture, such as museums, festivals and scientific dissemination events ad for example the European Researchers' Nights and the Science festivals; it also experiments with other forms of communication such as theater and photography.



Initiatives for schools, from primary to secondary school, in the classroom and in the ICMATE laboratories.

Iniziative per le scuole, dalla primaria alla scuola secondaria di secondo grado, in aula e nei laboratori di ICMATE.



SCIENZA E CITTADINANZA

ICMATE contribuisce a portare la cultura scientifica nelle scuole, facendo conoscere il metodo scientifico e imparando a sperimentare insieme, dalla scuola primaria a quella secondaria, attraverso laboratori e seminari per gruppi scolastici e corsi di formazione per insegnanti e aprendo i propri laboratori a studenti attraverso progetti per la scuola secondaria. ICMATE si impegna attivamente a promuovere la parità di genere nella scienza, contrastando gli stereotipi che ostacolano l'accesso alle carriere STEM e favorendo una comunità scientifica inclusiva e diversificata.

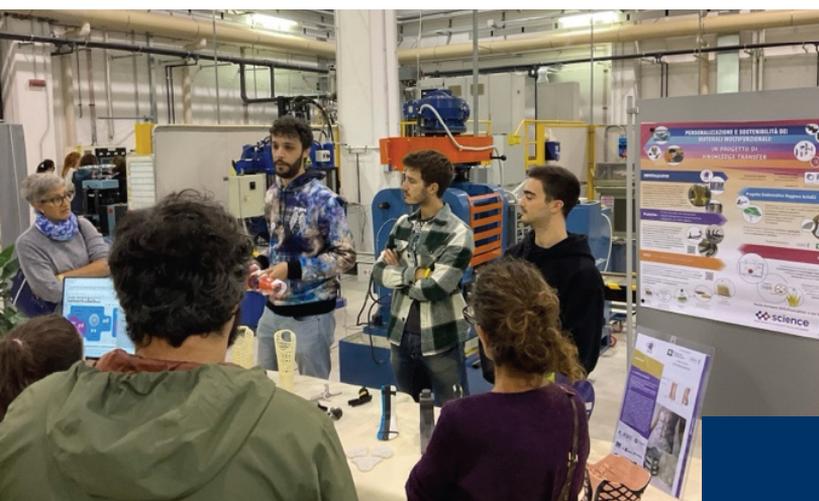
La formazione continua prevede anche l'interazione con le università della terza età, attraverso lezioni e seminari e la collaborazione con associazioni di settore per corsi professionali.

ICMATE infine promuove il coinvolgimento del pubblico progettando e partecipando ad iniziative a livello internazionale, nazionale e locale, per la diffusione e la valorizzazione della cultura scientifica, sia per il grande pubblico che per pubblici specifici. L'istituto entra nei luoghi classici della cultura scientifica, come musei, festival ed eventi di divulgazione scientifica come, ad esempio, la Notte Europea dei Ricercatori e delle Ricercatrici (ERN) ed i Festival della Scienza; sperimenta anche altre forme di comunicazione come il teatro e la fotografia.



Outreach and public engagement initiatives in scientific exhibitions and special events.

Iniziative di divulgazione scientifica e public engagement durante festival scientifici e giornate dedicate.



Contacting email address: name.surname@cnr.it

- 1 Simona Barison, Stefano Fasolin, Luca Pezzato, Filippo Agresti, Jacopo Isopi, Stefano Boldrini, Alberto Ferrario, Marco Natali, Alvise Miozzo
- 2 Massimo Viviani
- 3 Paola Bassani, Simona Barison
- 4 Silvia Maria Deambrosis, Enrico Miorin, Cecilia Mortalò, Valentina Zin
- 5 Gregorio Bottaro, Marzio Rancan
- 6 Carlo Fanciulli
- 7 Adelaide Nespoli, Elena Villa, Francesca Passaretti
- 8 Maria Teresa Buscaglia, Vincenzo Buscaglia, Giovanna Canu
- 9 Davide Barreca
- 10 Barbara Vercelli
- 11 Marta Maria Natile
- 12 Sabrina Presto
- 13 Nicola Comisso, Luca Mattarozzi, Enrico Verlato, Lourdes Vazquez Gomez
- 14 Giuliano Angella
- 15 Riccardo Donnini, Dario Ripamonti
- 16 Silvana De Iuliis, Francesca Migliorini
- 17 Chiara Cantaluppi, Laura Crociani
- 18 Alessandro Galenda, Naida El Habra, Francesca Visentin
- 19 Enrico Garbin, Alessia Famengo, Matteo Panizza
- 20 Francesca Ravera, Eva Santini
- 21 Simone Battiston, Stefania Fiameni
- 22 Alessandro Benedetti, Corrado Tomasi
- 23 Carlo Alberto Biffi, Jacopo Focchi, Ausonio Tuissi
- 24 Simone Pittaccio, Lorenzo Garavaglia
- 25 Cristina Bolzati, Nicola Salvarese
- 26 Francesca Cirisano, Michele Ferrari
- 27 Daniel Forrer, Andrea Vittadini
- 28 Sofia Gambaro, Donatella Giuranno, Fabrizio Valenza
- 29 Luca Nodari, Patrizia Tomasin
- 30 Monica Favaro, Daniela Treska, Silvia Schiavon

Technical support: Enrico Bassani, Nicola Bennato, Enrico Bragagnolo, Elvio Bullita, Davide Della Torre, Riccardo Mauro Mason, Francesco Mocellin, Francesco Montagner, Tullio Ranucci, Gaetano Tagliapietra, Paolo Tognana

Administrative staff: Tiziana Collodel, Marcella Costigliolo, Domenica Ferretti, Davide Giberti, Tamara Locatelli, Teresa Mollo, Elena Parodi, Elena Parpaiola, Claudia Zambolin

Editors:

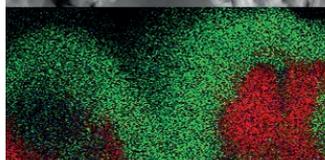
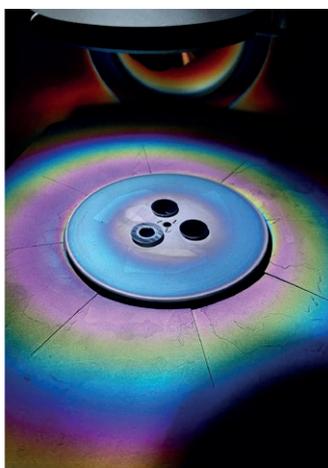
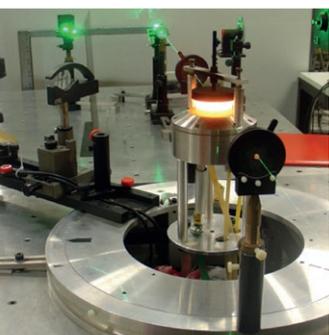
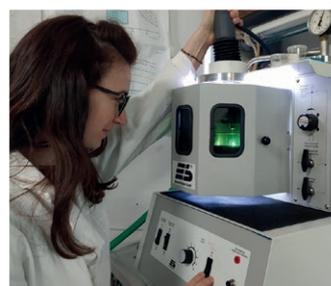
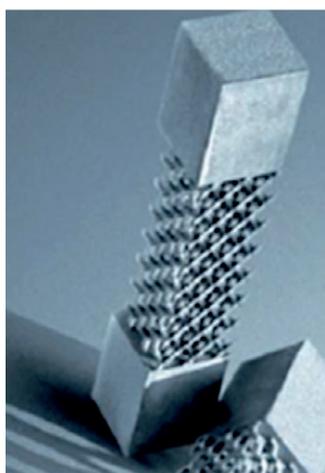
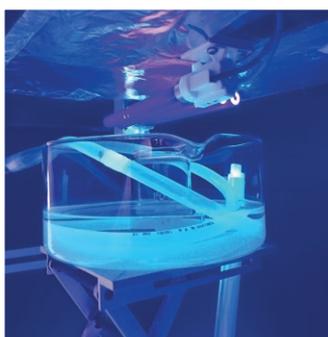
Riccardo Donnini, Monica Favaro, Maria Losurdo

Curators:

Giovanna Canu, Sabrina Presto, Enrico Bragagnolo, Alessia Famengo, Valentina Zin, Davide Della Torre, Laura Crociani, Donatella Giuranno, Paola Bassani, Matteo Panizza, Dario Ripamonti, Francesco Mocellin, Elena Parpaiola, Davide Barreca, Marta M Natile, Nicola Salvarese, Riccardo Donnini, Alessandro Galenda, Angelo Volpi, Carlo Alberto Biffi

Image Credit:

ICMATE staff and their collaborators



**Consiglio Nazionale
delle Ricerche**