



POLITECNICO  
MILANO 1863

# Opportunità e sfide tecnologiche verso il riciclo closed-loop di batterie a Ioni di Litio

Prof. Marcello Colledani  
Roma, 13 Maggio 2026

Full Professor, Politecnico di Milano, Department of Mechanical Engineering  
Coordinator of AFIL SC De-and Remanufacturing for Circular Economy  
Member of the Board of Directors of APRA – Automotive Part Remanufacturing Association  
Member of the Scientific Committee of the Upcell Alliance – European Battery Manufacturing Equipment  
Co-founder and President of the start-up FiberEUse Tech, spin-off of Politecnico di Milano



# IMPORTANZA STRATEGICA DEL RICICLO DELLE BATTERIE IN EUROPA E IN ITALIA

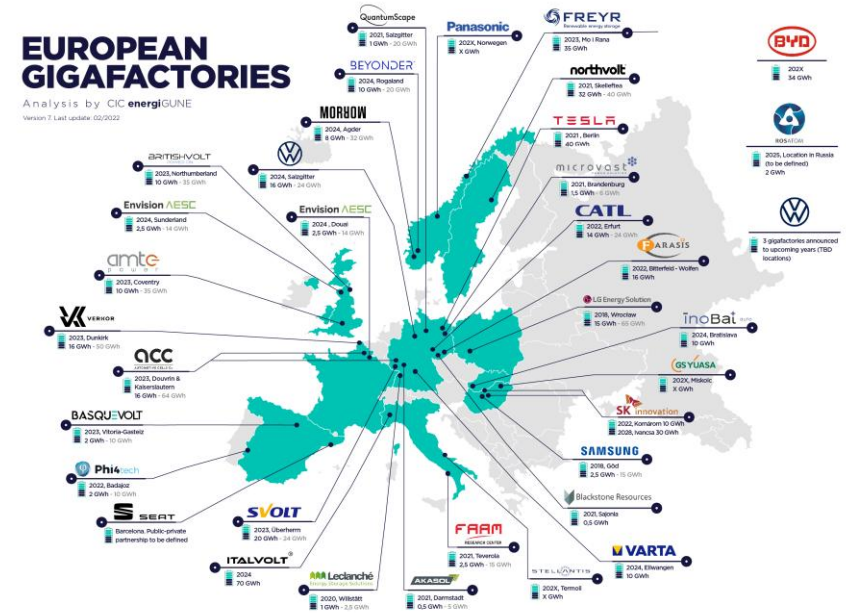
► **TABLE 3** Overview of overall supply-demand balance estimations

Material	Overall demand in 2030 (Mt/year)	Supply in 2030 (Mt/year)	Estimated balance in 2030 (Mt)	Surplus/deficit relative to consumption (%)
Lithium	2.5-3.1	1.8-3.1	-1.3 to 0.6	25% surplus to 42% deficit
Cobalt	0.24-0.39	0.25-0.46	-0.14 to 0.22	94% surplus to 35% deficit
Graphite	6.5-7.4	6.2-7.5	-1.2 to 1	15% surplus to 16% deficit
Nickel	3.9-4.7	4.6-5.7	-0.1 to 1.7	44% surplus to 2% deficit
Copper	31.3-38.1	31.0-39.5	-7.2 to 8.2	26% surplus to 19% deficit
Phosphorous	28.2-29.2	28.0-29.2	-1.2 to 0.9	3% surplus to 4% deficit
Manganese	22.5-26.0	21-24	-5.0 to 1.5	6% surplus to 19% deficit

IRENA 2024 International Renewable Energy Agency

Massimizzare la produzione di materia prima seconda "battery grade" da batterie e scarti già in circolazione e stabilire la base tecnologica per il riciclo di materiali critici verso ed oltre il 2030:

- **Preparare l'eco-sistema a gestire i grandi volumi di batterie da EV da riciclare attesi dopo il 2030.**
- **Aumentare la produzione ed il consumo di materia prima seconda utilizzando gli stock di materiale già in circolazione.**



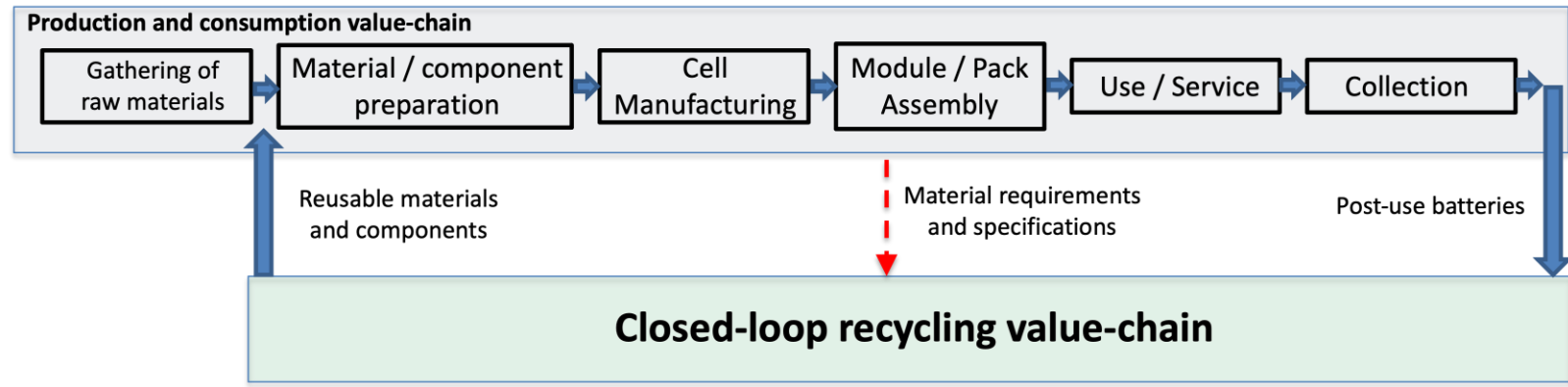
Considerato che, solo in Europa, 25 nuove Gigafactories che richiederanno milioni di tonnellate di materiali per batterie sono attese dal 2025 al 2030, l'impatto del riciclo closed-loop per l'ecosistema Europeo può essere elevatissimo.

A questo va aggiunto un potenziale mercato da 3.5 miliardi di Euro entro il 2030 generato dalla fornitura di tecnologie di produzione (in cui l'Italia è storicamente leader) alle 25 Gigafactory europee e, in futuro, mondiali.

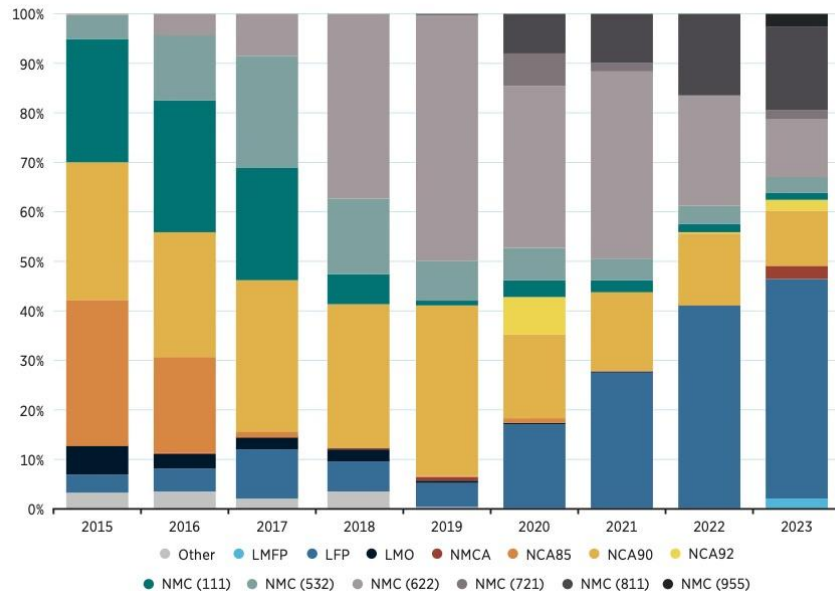
# LE SFIDE TECNOLOGICHE E LA DOMANDA DI INNOVAZIONE

Benefici del closed-loop recycling in grado di fornire materia-prima seconda "in specifica":

- Impatto positivo sull'economia del riciclo e sui tassi di recupero;
- Ridurre la dipendenza da fornitori di materiali battery grade primari.



► FIGURE 8 Global EV battery cathode chemistry mixes for passenger vehicles, 2015-2023

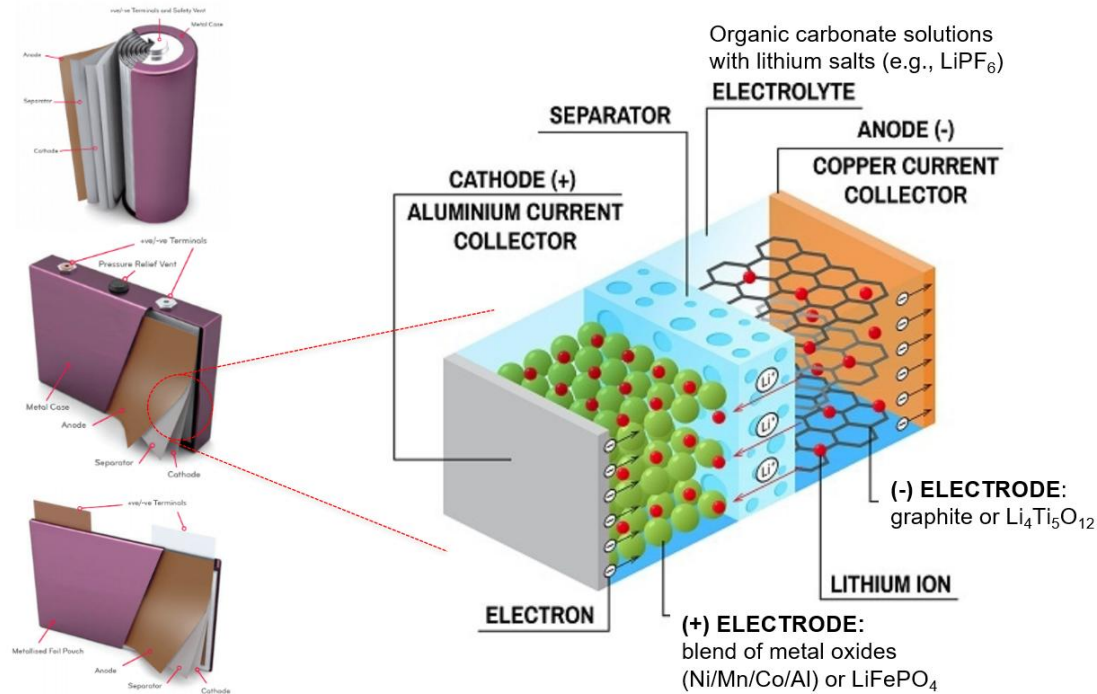


D'altra parte le sfide aperte attualmente limitano le implementazioni industriali di closed-loop recycling delle batterie Li-Ione:

- Design delle celle variabile (geometria, chimica);
- Economia (soprattutto per le chimiche con bassa concentrazione di materiali di valore);
- Qualità insufficiente del materiale riciclato e migliorabile selettività dei processi (soprattutto pre-trattamenti).



# STATO DELL'ARTE TECNOLOGICO



A livello di cella, nella batteria si trovano diversi sotto-componenti:

- Catodo e anodo metallici (collettori di corrente);
- Separatore polimerico;
- Materiali attivi anodici e catodici (black mass);
- Binder: PVDF (polyvinylidene fluoride) o PTFE (Polytetrafluoroethylene);
- Elettrolita: mix di sali di litio and solvent organici;
- Case in alluminio o acciaio.

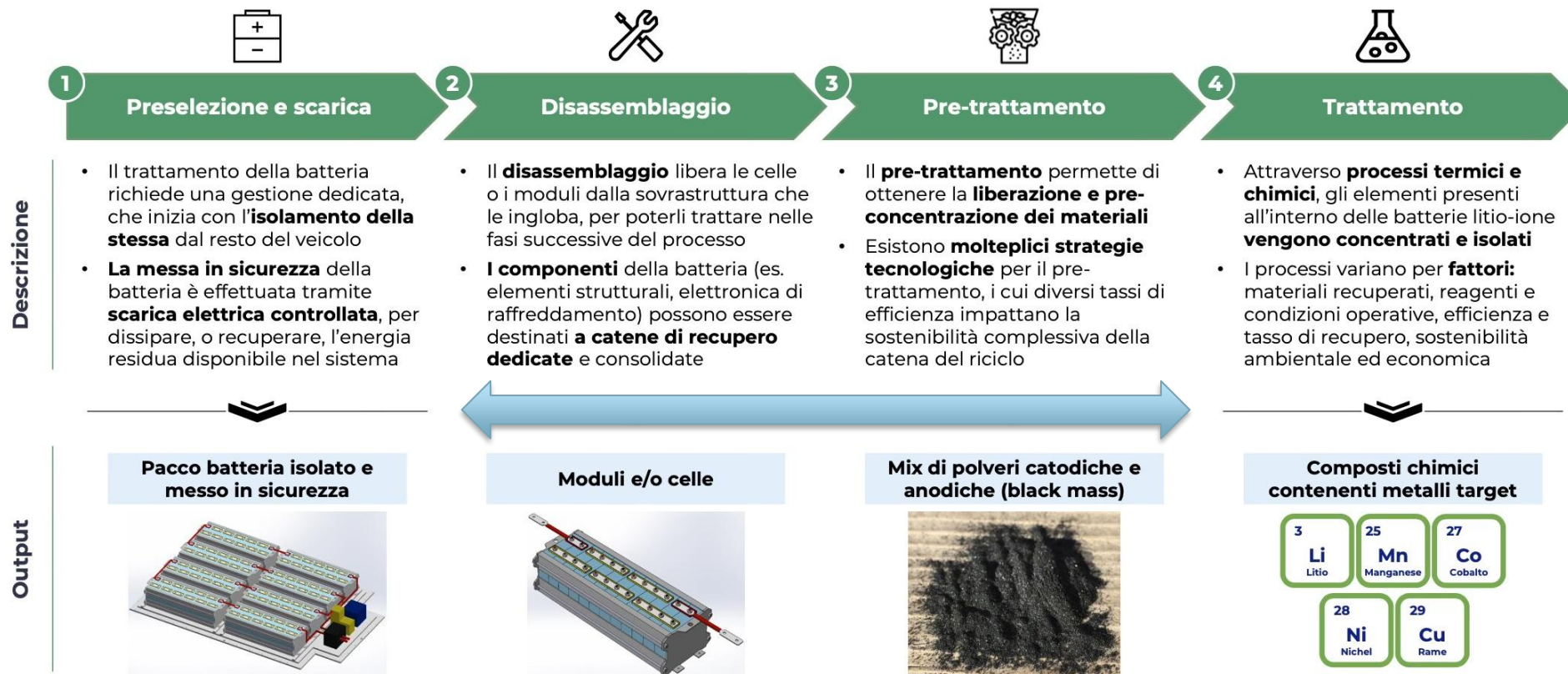
Le strategie di riciclo attuali includono una combinazione di pre-trattamenti meccanici o termici e stadi di end-refining, integrati da processi di disassemblaggio e scarica posizionati a monte.

Colledani, M., Mossali, E., Picone, N., Gentilini, L., Rodriguez, O., Perez, J.-M., *Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments*, Journal of Environmental Management, Volume 264, June 2020



## Le principali fasi del processo di riciclo

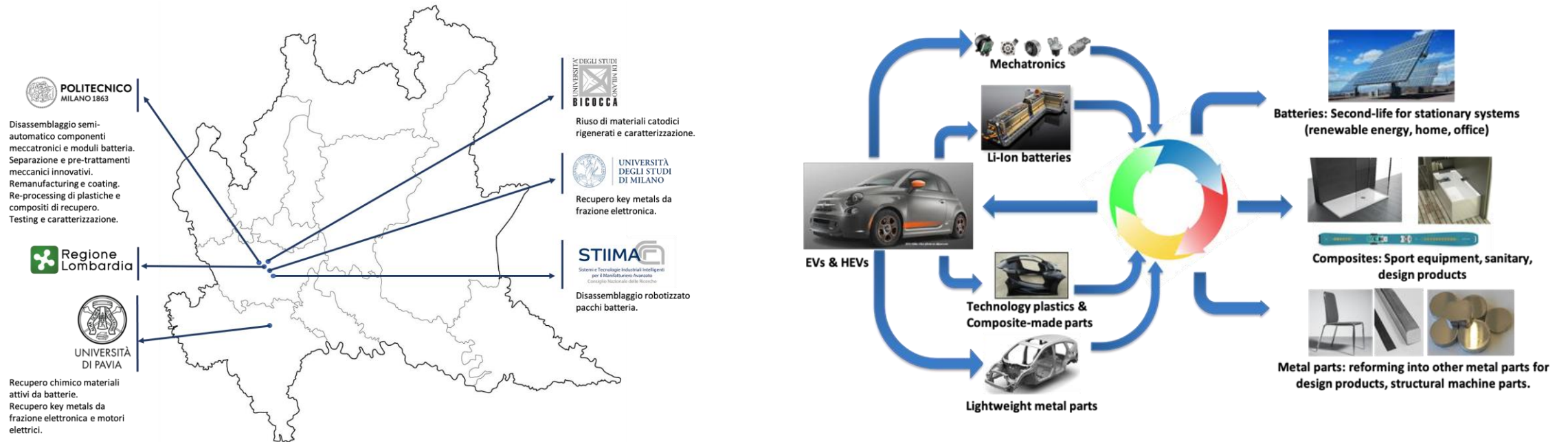
Il processo di riciclo è strutturato in 4 fasi principali



# CAPACITA' E COMPETENZE DELL'ECO-SISTEMA ITALIANO DELL'INNOVAZIONE

Laboratori e impianti a scala pilota innovativi all'avanguardia a disposizione delle aziende del territorio per testare soluzioni di tecnologie di riciclo innovative e sviluppati in collaborazione tra ricerca e industria.

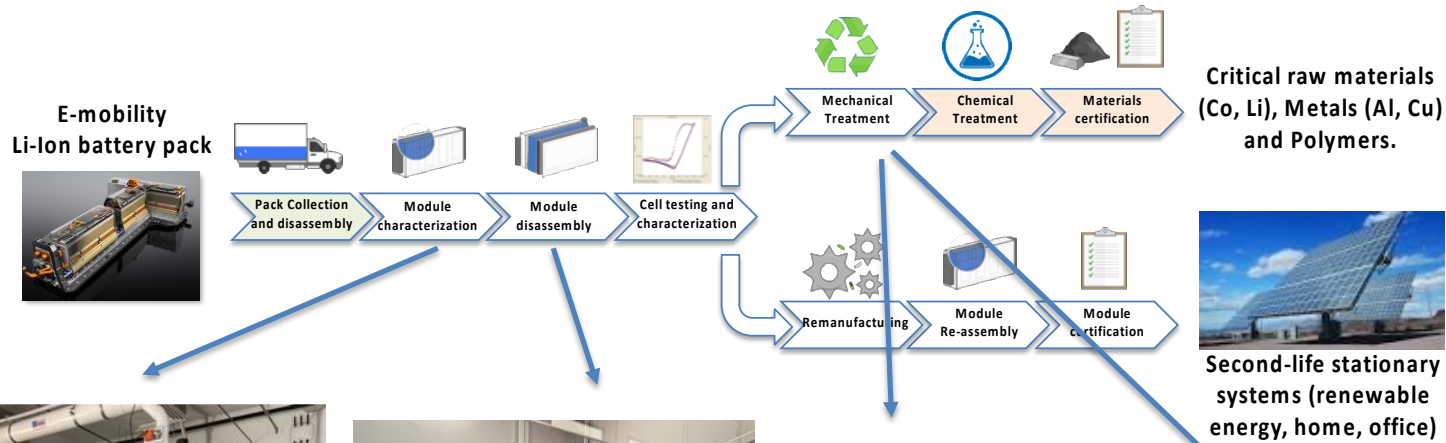
Nel 2020 la Regione Lombardia ha lanciato un "Accordo di collaborazione per la realizzazione di un'innovativa infrastruttura pilota regionale di supporto alla transizione verso l'economia circolare" di Regione Lombardia, focalizzato su processi di economia circolare per il veicolo elettrico.



L'accordo ha co-finanziato 5 MEuro di infrastrutture per aumentare la capacità di innovazione degli istituti di ricerca in Lombardia e per supportare la transizione verso l'economia circolare dell'industria del eco-sistema locale.



# CAPACITA' E COMPETENZE DELL'ECO-SISTEMA ITALIANO DELL'INNOVAZIONE



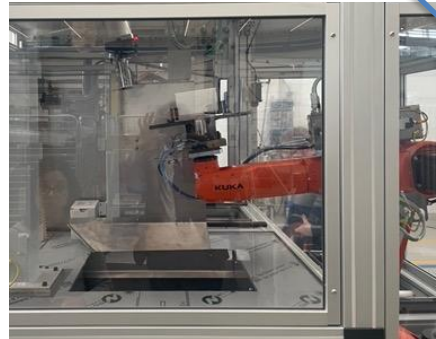
*Una soluzione di pre-trattamento altamente selettiva, sostenibile, automatizzata e human-centric è stata sviluppata in collaborazione con diverse aziende italiane ed è pronta allo scale-up ad alti volumi di produzione.*



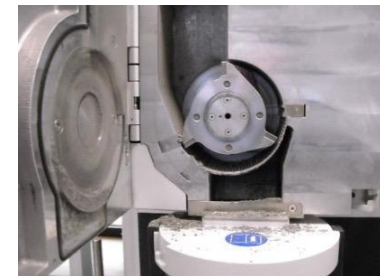
**Battery cycling and testing equipment for RUL prediction**



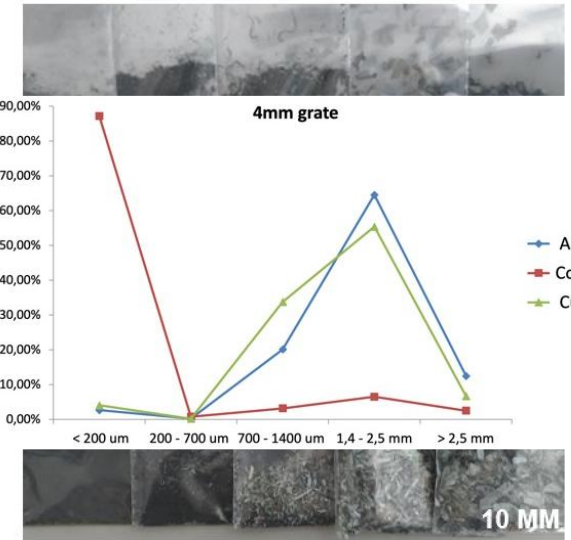
**Battery module disassembly -reassembly**



**Battery cell case cutting**



**Material shredding and separation of black mass**

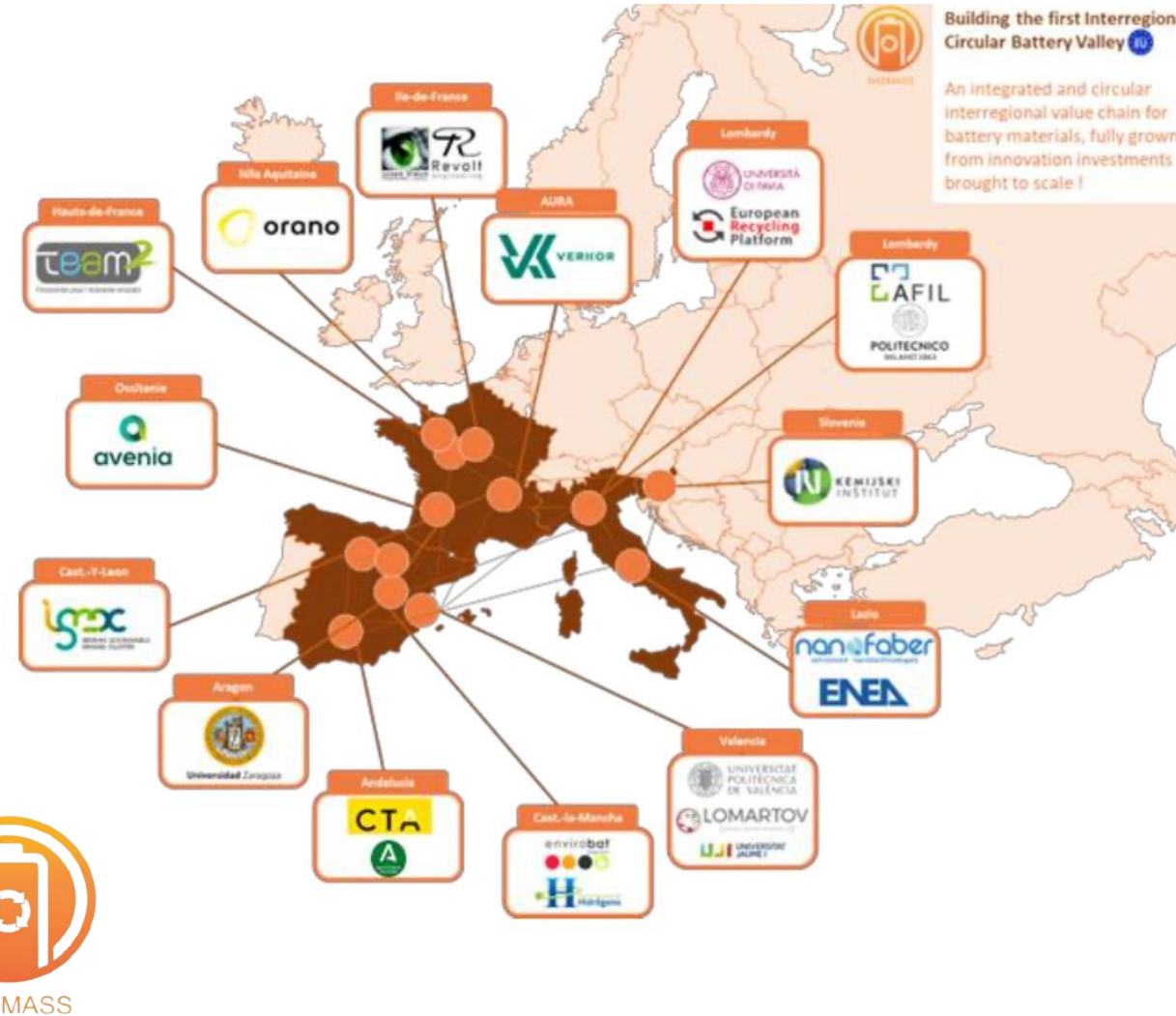
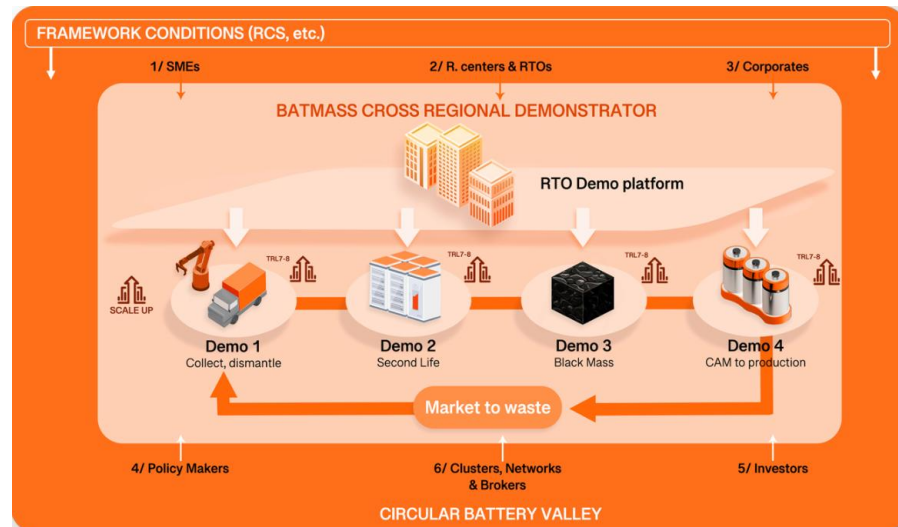




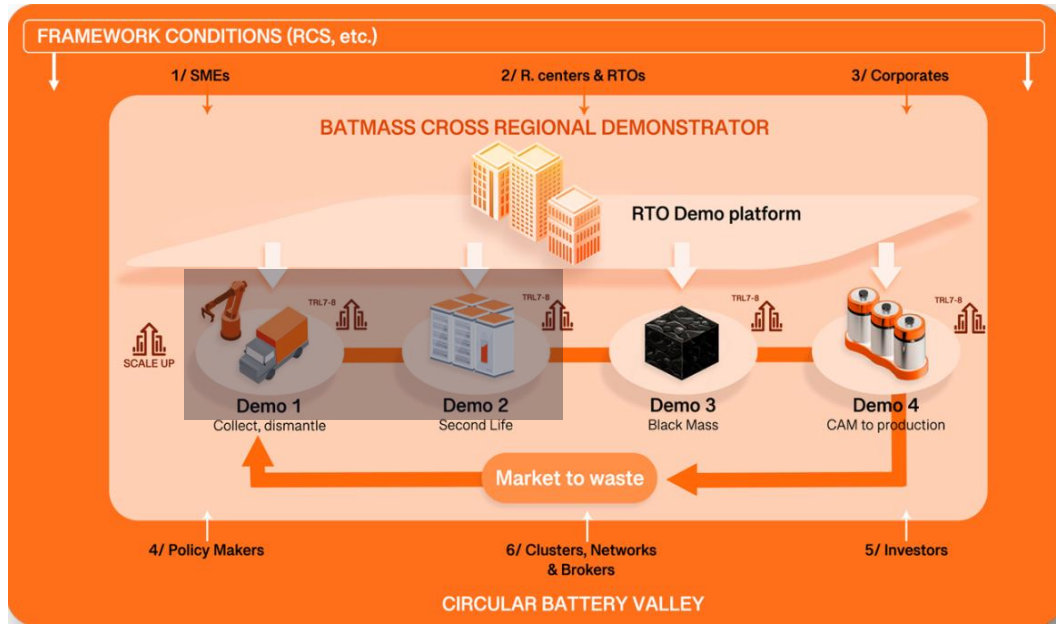
# BATMASS - EU circular BAttery valley for second life, recycling, and re-manufacturing of materials and black MASS

BATMASS aims to implement the first EU Circular Battery Valley. It offers a portfolio of cross-regional investments in TRL6+ innovations in circular technologies and processes for battery materials. BATMASS will mobilize a fully comprehensive interregional ecosystem around 4 Demonstrators (or 'Demo lighthouses') meant to scale up, commercialize and deploy breakthrough GreenTech.

- **Duration:** September 2023 – Feb 2027 (42 Months).
- **Consortium:** 15 beneficiaries, 4 pilots.
- **Coordinating partner:** Politecnico di Milano



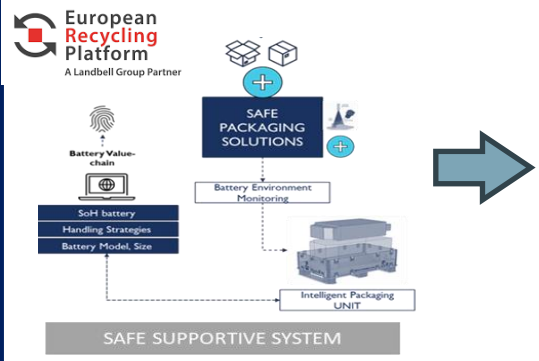
# BATMASS - EU circular BAttery valley for second life, recycling, and re-manufacturing of materials and black MASS. Pilots



**Demo 2a – Envirobat: "POWER WALL"** manufacturing pilot for the electric vehicle industry. Intended for stationary use in homes or industries, and others for mobile use. The use of PCB button contact system and cylindrical cell level fusion will allow safe assembly. Thanks to its easy assembly and pack design, no spot welder will be needed, making the replacement of individual cells as simple as possible.



**Demo 1 – ERP:** Digitally-enhanced battery packaging solution for safe transportation, discharge, dismantling, sorting and testing of collected battery packs and modules.



**Demo 2b – Green Vision:** (i) Design and development of new direct re-use second-life stationary system for domestic storage applications. (ii) Development of a new scalable testing equipment for second-life decisions.



# BATMASS - EU circular BATtery valley for second life, recycling, and re-manufacturing of materials and black MASS. Pilots

**Partner description:** Esco Mobility (<https://escomobility.it/>), Palermo (IT), is an innovative startup based in Palermo that provides products and solutions for urban micromobility. The company's core business is fleet management services, through which it has worked closely with leading shared mobility operators, ensuring high quality standards, operational continuity and efficiency.

**Vehicle to be piloted:** Cargo Bike

**Role:** pilot in Palermo



**Partner Description:** EUInnova (<https://www.euinnova.eu/>), Bruxelles (BE), acts as an innovation enhancer at the intersection of policy, research, technology and real-world deployment. EUInnova helps connect policy objectives and viable business models into a coherent innovation pathway.

**Vehicle to be piloted:** e-scooter

**Role:** Replication, Policy Uptake, Pilot in Brussels



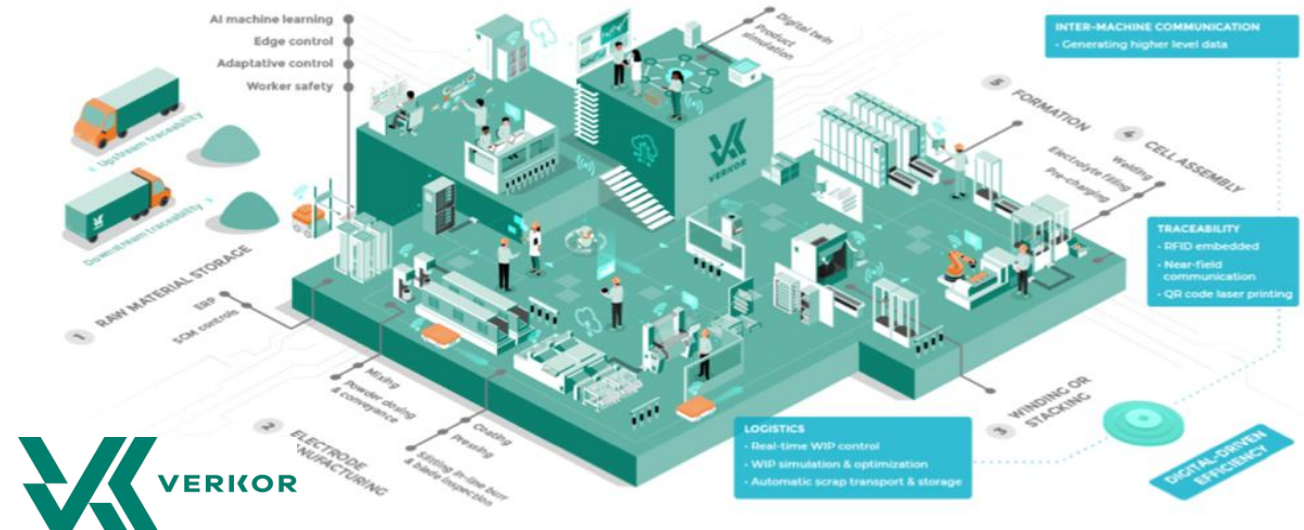
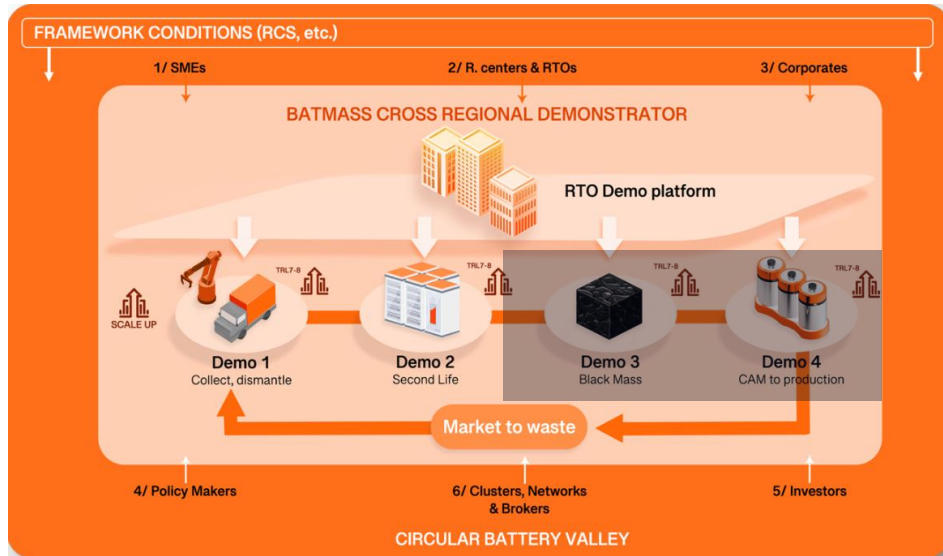
**Partner Description:** UNEEDIT (<https://www.uneed-it.eu/>), Rome (IT) supports public and private clients in navigating the complex and evolving challenges of the transport and mobility sector. Our expertise lies in conducting in-depth analyses of clients' specific needs, identifying all relevant factors and objectives, and determining the most effective technical approaches and solutions.

**Vehicle to be piloted:** e-bike

**Role:** Exploitation, Business Models



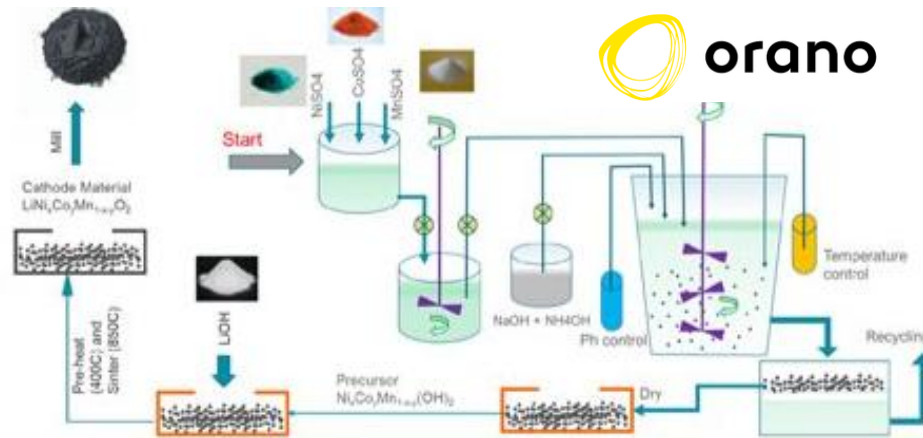
# BATMASS - EU circular BAttery valley for second life, recycling, and re-manufacturing of materials and black MASS. Pilots



**Demo 4 – Verkor:** Highly innovative, digitalized and fully automatic pilot line for new batteries in the region of Aubergne Rhone Alpes integrating recycled raw materials as feedstock for cathode manufacturing, in line with the battery regulation.

Battery grade materials

**Demo 3 – Orano:** Novel Hydrometallurgical process-chain to obtain Ni, Mn and Co salts and LiOH with high purity (BGM) to be used as precursors to synthesize layered cathode oxide materials.

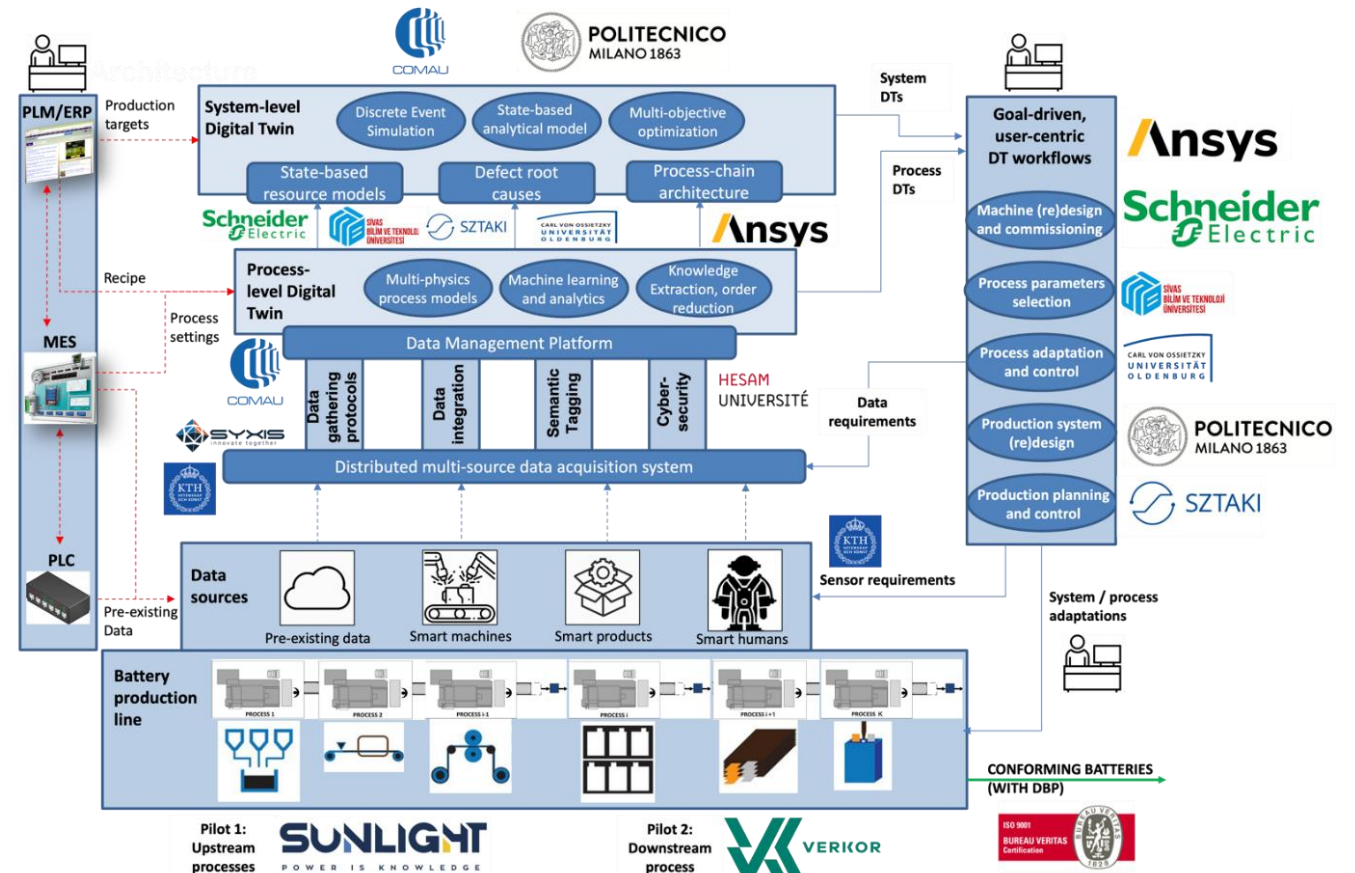


# BATTwin: Flexible and scalable digital-twin platform for enhanced production efficiency and yield in battery cell production lines



**BATTwin** aims at designing, developing and demonstrating a novel Digital Twin Platform supporting a digitally-enhanced zero-defect manufacturing approach for the European battery manufacturing industry.

- Coordinating partner: Politecnico di Milano.
- 16 partners.
- 10 companies, 4 SMEs.
- 10 EU member states, UK.
- Funding: 6.9 M€.
- Starting date: Dec 1st 2023.





POLITECNICO  
MILANO 1863

# Opportunità e sfide tecnologiche verso il riciclo closed-loop di batterie a Ioni di Litio

Prof. Marcello Colledani  
Roma, 13 Maggio 2026

Full Professor, Politecnico di Milano, Department of Mechanical Engineering  
Coordinator of AFIL SC De-and Remanufacturing for Circular Economy  
Member of the Board of Directors of APRA – Automotive Part Remanufacturing Association  
Member of the Scientific Committee of the Upcell Alliance – European Battery Manufacturing Equipment  
Co-founder and President of the start-up FiberEUse Tech, spin-off of Politecnico di Milano



## Disassemblaggio

Il disassemblaggio della batteria permette di ottenere singoli moduli e celle

### Disassemblaggio a livello modulo

- Il **disassemblaggio dei moduli dal pacco** isola le celle litio-ione dalle complesse sovrastrutture della batteria
- Le attività possono essere formalizzate e condivise da batterie di architetture e componenti diversi, attraverso la rimozione di **cover esterna** in metallo, **liquido refrigerante** (se presente), **plug e dei fusibili di sicurezza, blocco di connessione elettrica di potenza, dispositivi elettronici di controllo e moduli**
- Le **giunzioni** tra i diversi componenti sono di tipo **meccanico**



### Disassemblaggio a livello cella

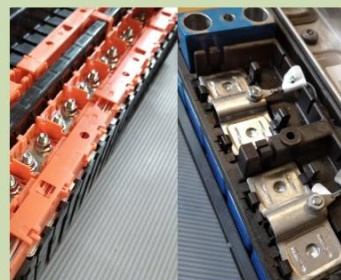
- Il **disassemblaggio delle celle dai moduli** costituisce uno step facoltativo della strategia di disassemblaggio, e garantisce la rimozione di componenti strutturali ed elettronici che inficerebbero le performance di riciclo a valle
- Le **giunzioni** tra i moduli sono diversificate:
  - Le celle sono quasi sempre **saldate**, con tecnologia spesso laser o a ultrasuoni
  - Viene fatto uso di **colle** per migliorare la stabilità del modulo
  - Il case metallico esterno può essere **rivettato**



Esempi e applicazioni



- Il disassemblaggio è spesso **effettuato manualmente**
- **L'automazione dei processi** e realizzazione di soluzioni semi-/automatizzate è sviluppata da diversi istituti di ricerca e attori industriali:
  - **Unità robotiche** per task ripetibili
  - **Unità collaborative di supporto**
  - Intere **linee semi-automatizzate**



- **L'automazione dei processi** dipende dalla geometria della cella<sup>1</sup> e dalla saldatura:
  - **Cilindriche:** connesse da busbar lamellari tramite saldatura a resistenza
  - **Prismatiche:** connesse da placchette metalliche tramite saldatura laser
  - **Pouch:** saldatura a ultrasuoni per connettere i terminali senza componenti aggiuntivi

## Trattamento per l'estrazione di metalli

Esistono due processi di trattamento per l'estrazione di metalli, con output diversi

### Processo di estrazione di metalli

	Pirometallurgico	Idrometallurgico
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Opzione tecnologica matura</b> che prevede lo stimolo di reazioni chimiche e fisiche attraverso <b>alte temperature operative</b></li> <li>• La fase conclusiva è la <b>fusione di una lega ricca di cobalto, rame e nichel</b>, destinata poi ad una successiva purificazione chimica</li> <li>• Possono essere incluse fasi <b>preliminari di tostatura e/o calcinazione</b>, per isolare i metalli catodici riducendo l'ossigeno e introducendo carbonio a creare CO<sub>2</sub>, ottenendo un pre-concentrato da purificare tramite idrometallurgia e recuperando litio sotto forma di carbonato</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Tre fasi principali</b></li> <li>1 <b>Lisciviazione</b>: solubilizzazione degli ossidi metallici della black mass, per cui il metodo più utilizzato industrialmente è l'aggressione attraverso acidi inorganici<sup>1</sup>; alternativamente è possibile utilizzare acidi organici<sup>2</sup>, ammoniacca o microorganismi (bio-lisciviazione)</li> <li>2 <b>Purificazione</b> delle soluzioni ottenute e dei composti metallici</li> <li>3 <b>Precipitazione chimica</b> (tramite ossalati), estrazione dei solventi e deposizione elettrolitica</li> </ul>
<b>Pro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Affidabilità</b> nella gestione di input variabili e poco controllati</li> <li>• <b>Ritmi produttivi</b> elevati</li> <li>• <b>Basse emissioni</b> di residui organici volatili e gas nocivi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soluzione più adatta al <b>recupero</b> dei metalli, in particolare <b>litio e cobalto</b></li> <li>• <b>Tassi di recupero</b> più elevati rispetto alla pirometallurgia</li> <li>• Portfolio più ampio di <b>materiali rivalorizzabili</b></li> </ul>
<b>Contro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevate <b>temperature</b> operative e forti <b>consumi energetici</b></li> <li>• <b>Tasso di recupero</b> dei materiali target minore rispetto ai processi idrometallurgici</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Processi difficilmente controllabili</b>, poiché molto sensibili alla black mass in input, specie se contaminata da alluminio e rame</li> </ul>
<b>Output</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La lega fusa a valle dei processi pirometallurgici permette il recupero di <b>cobalto, nichel e rame</b> con efficienze di Co &gt; 80 %; Ni ~ 95 %; Cu ~ 95 %</li> <li>• Tutti i restanti materiali vengono considerati come <b>scarto</b></li> <li>• La <b>tostatura</b> permette di ottenere quasi <b>tutti i metalli catodici</b>:             <ul style="list-style-type: none"> <li>– Per le NMC, l'efficienza di recupero arriva a Ni 98%, Mn 98%, Co 93%</li> <li>– Si può inoltre ottenere carbonato di litio con efficienza sopra il 90%</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La tipologia di composti chimici ottenibili e la loro efficienza di recupero dipende fortemente dal tipo di reagenti e reazioni chimiche utilizzate</li> <li>• Gli <b>acidi inorganici</b> permettono <b>efficienze oltre il 90%</b> anche a scala industriale e ne è stata dimostrata in laboratorio la capacità di recupero fino al 100% Li, 99% Mn, 98% Co, 96% Ni</li> </ul>