

Ricerca di Sistema elettrico



LA 3.6: Processi produttivi di catodi di LIB disegnati per il
"direct recycling"

Francesca Soavi



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DEPARTMENT
OF CHEMISTRY
"GIACOMO CIAMICIAN"



LA 3.6: Processi produttivi di catodi di LIB disegnati per il "direct recycling"

F. Soavi, Dipartimento di Chimica "Giacomo Ciamician", Alma Mater Studiorum Università di Bologna, M. Giorgetti, Dipartimento di Chimica Industriale "Toso Montanari", Alma Mater Studiorum Università di Bologna,

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica -ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema di ricerca 1.2 – Progetto integrato Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico.

Linea di attività: LA 3.6

Responsabile del Progetto: Margherita Moreno, ENEA.

Responsabile del Work Package: Margherita Moreno.

Responsabile Linea di Attività: F. Soavi, Dipartimento di Chimica "Giacomo Ciamician", Alma Mater Studiorum Università di Bologna

Mese inizio previsto: 18

Mese inizio effettivo: 18

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: Si ringrazia per la collaborazione alle attività svolte

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti	4
3	Prodotti attesi.....	4
4	Prodotti ottenuti	4
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati	5
6	Sintesi delle attività svolte	5
7	Dettaglio delle attività svolte	5
7.1	Catodi disegnati per il riciclo diretto.....	6
7.2	Valutazione del recupero del materiale catodico attivo	9
7.3	Disomogeneità degli stati di ossidazione in elettrodi	10
7.4	Conclusioni, collaborazioni e lavoro futuro.....	11
8	Pubblicazioni scientifiche.....	12
9	Eventi di disseminazione	12
9.1	Comunicazioni orali	12
9.2	Comunicazioni poster.....	13

Indice delle figure

Figura 1. Profili di scarica galvanostatica a C/10 di catodi a base di LNMO e PU-PEDOT:PSS e grafite o pVdF e carbon black.....	8
Figura 2. Andamento della capacità specifica a diverse correnti di scarica (C/10, C/5, C/3 e C/1) degli elettrodi di LNMO a base di PU-PEDOT:PSS e grafite con il catodi a base di pVdF e carbon black.....	8
Figura 3. Andamento della capacità specifica durante ripetuti cicli di carica/scarica a C/1 degli elettrodi di LNMO a base di PU-PEDOT:PSS e grafite con il catodi a base di pVdF e carbon black	8
Figura 4. Schema del processo di recupero della black mass di elettrodi a base di LNMO, PU-PEDOT:PSS, Grafite, tramite sedimentazione da sospensione acquosa.	9
Figura 5. Schema del processo di recupero della black mass di elettrodi a base di LNMO, PU-PEDOT:PSS, Grafite, tramite filtrazione da sospensione acquosa.	10
Figura 6. Immagine del sistema bifasico H ₂ O/DMC di flottazione statica che evidenzia la separazione della grafite in DMC e di LNMO/PEDOT:PSS come sedimento della fase acquosa.	10
Figura 7. Mappe 2d-XRF su elettrodi invecchiati di manganese esacianoferrato in semicelle allo Zn-ione.	11

Indice delle tabelle

Tabella 1. Composizione percentuale in massa di catodi di LNMO realizzati con PEDOT:PSS-Pullulano e grafite o con pVdF e carbon black.	7
---	---

1 Risultati attesi

I risultati attesi dalla LA 3.6 - Processi produttivi di catodi di LIB disegnati per il "direct recycling", come da capitolato vigente sono i seguenti:

- Valutazione dello stato dell'arte del "design for recycling" dei processi produttivi di catodi di LIB
- Dimostrazione del recupero diretto di materiali attivi da LIB commerciali esauste, tramite solventi alternativi e biodegradabili
- Caratterizzazione chimico-fisica dei materiali, sia in ingresso che in uscita al processo produttivo, tramite tecniche avanzate, per un'adeguata valutazione comparativa.

2 Risultati ottenuti

- Valutazione dello stato dell'arte del "design for recycling" dei processi produttivi di catodi di LIB pubblicata come review D. Marchese et al., An Overview of the Sustainable Recycling Processes Used for Lithium-Ion Batteries, Batteries 2024, 10(1), 27; <https://doi.org/10.3390/batteries10010027>.
- Dimostrazione del recupero diretto di materiali attivi da elettrodi prodotti su scala di laboratorio. L'attività prevedeva la dimostrazione del recupero diretto da celle esauste. Per avere il controllo della chimica dei materiali e accelerare lo studio, si è preferito dimostrare il processo su elettrodi non ciclati, con l'idea di proporre un'applicazione dei
- I materiali sono stati principalmente caratterizzati mediante tecniche elettrochimiche che hanno dimostrato la fattibilità delle formulazioni proposte.

3 Prodotti attesi

Deliverable RT-1.02-3.06: Eco-design di celle di batterie al litio, dai processi produttivi di componenti allo smaltimento/riuso/riciclo- Rapporto Tecnico

4 Prodotti ottenuti

Il presente Rapporto Tecnico corrisponde al prodotto di questa LA 3.6.

Inoltre, sono stati prodotte almeno 3 formulazioni di catodi a base di LNMO puntando al relativo recupero diretto, con prestazioni competitive rispetto a quelle di elettrodi con formulazione convenzionale.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Il piano di rischi includeva la possibilità di ottenere capacità degli elettrodi prodotti con leganti alternativi inferiore al target e una resa di recupero inferiore al 70%. Ma tali rischi non si sono verificati, Infatti, **l'obiettivo prefissato di "dimostrare che leganti alternativi permettono di mantenere le stesse prestazioni: capacità almeno pari al 90% del valore dichiarato dal produttore della polvere" è stato raggiunto.** La stabilità a ripetuti cicli di carica scarica degli elettrodi preparati con leganti alternativi è risultata leggermente inferiore a quanto atteso, ma confrontabile a quella di elettrodi a base di pVdF.

Inoltre, **l'obiettivo di ottenere una resa del recupero diretto dei materiali catodici (Black mass: materiale attivo e carbone) superiore al 70% è stata raggiunta.** È però da sottolineare che l'attività prevedeva la dimostrazione del recupero diretto da celle esauste. Per avere il controllo della chimica dei materiali e accelerare lo studio, si è preferito dimostrare il processo su elettrodi non ciclati, con l'idea di proporre un'applicazione dei risultati per il recupero di scarti di produzione.

6 Sintesi delle attività svolte

LA 3.6 ha affrontato il "design for recycling", cioè la definizione di processi produttivi sostenibili di materiali elettrodici di batterie litio-ione, recuperabili tramite riciclo diretto.

Inizialmente è stata condotta un'analisi approfondita dello stato dell'arte dei processi di riciclo (vd.D. Marchese et al., Batteries 2024, 10, 27).

Successivamente è stata sviluppata la produzione di elettrodi con leganti che permettono il recupero diretto delle polveri attive a fine vita o da scarti di produzione con semplice trattamento acquoso. In particolare, è stato valutato l'utilizzo di un composito a base di pullulano e del polimero conduttore PEDOT:PSS per diminuire e/o eliminare la frazione carboniosa difficilmente separabile nella black mass recuperata.

Per la valutazione degli stati di ossidazione dei metalli da frazioni di riciclo, è stato messo a punto il metodo di analisi di spettro XANES e spettri di microscopia XRF, su analoghi del Blu di Prussia come modelli.

7 Dettaglio delle attività svolte

Le attività svolte sono state dedicate alla definizione di un assetto produttivo e di recupero/riciclo di LIB che ne renda sostenibile l'impatto economico e ambientale, puntando cioè ad un "desing for recycling".

L'analisi dello stato dell'arte dei processi di produzione e di riciclo delle LIB ha evidenziato la criticità della presenza di elementi come il cobalto, di polimeri fluorurati e di elettroliti basati su solventi organici infiammabili.

I processi di recupero comprendono generalmente quattro fasi: i) pretrattamento delle LIB per la loro gestione in sicurezza (stato di carica 0%); ii) separazione del materiale attivo dal collettore di corrente; iii) lisciviazione; e iv) separazione dei metalli preziosi nelle soluzioni di lisciviazione. I metalli critici dei catodi delle LIB a fine vita vengono recuperati mediante processi pirometallurgici, idrometallurgici, o mediante riciclo diretto, e quest'ultimo è quello maggiormente sostenibile.

La possibilità di recuperare direttamente il materiale elettrodico elettroattivo mediante separazione fisica, è alla base del cosiddetto "direct recycling". Con tale approccio, il materiale viene isolato durante il processo di separazione senza alterarne significativamente la composizione o la struttura cristallina. Sebbene siano ancora in fase di sviluppo, i processi di "direct recycling" sono estremamente attrattivi in quanto permettono di eliminare trattamenti addizionali ed evitare lo sviluppo di prodotti secondari associati ai processi piro- e/o idrometallurgici. Per la separazione fisica sono generalmente utilizzati solventi organici con grande affinità per il legante fluorurato pVdF, come NMP, DMAC, DMF e DMSO che indeboliscono l'adesione tra collettore di corrente e materiale attivo. Un'ulteriore sfida è quella di separare le parti non solubili presenti nella cosiddetta "black mass", ossia i materiali elettroattivi e le nanoparticelle carboniose utilizzate come additivi conduttori elettronici.

Ma un approccio decisamente sostenibile è quello di produrre gli elettrodi pensando al recupero diretto dei materiali attivi tramite solventi green. Una risposta è la processazione degli elettrodi mediante leganti polimerici solubili in acqua o solventi non tossici e alla formulazione degli elettrodi puntando a componenti additive elettroniche alternative alle nanoparticelle di carbonio, difficili da separare. Un'opportunità è data dall'utilizzo di grafite o polimeri conduttori elettronici come PEDOT:PSS.

Quindi, la presente linea di attività si è proposta di contribuire al "design for recycling" e quindi alla definizione di processi produttivi sostenibili di materiali elettrodici di LIB focalizzandosi sulla produzione di elettrodi recuperabili tramite riciclo diretto.

Sono state condotte due principali attività: i) la produzione di elettrodi a base di leganti processabili in acqua come il pullulano e sostituendo il nanoparticolato di carbone con grafite e/o PEDOT:PSS, ii) la valutazione del recupero diretto di materiale attivo da tali elettrodi. Queste attività sono descritte rispettivamente nelle sezioni 7.1 e 7.2.

Inoltre, uno studio preliminare sulle tecniche atte ad una valutazione dell'invecchiamento di elettrodi come esempio per verificare delle disomogeneità negli stati di ossidazione è mostrato nella sezione 7.3.

7.1 Catodi disegnati per il riciclo diretto

Sono stati realizzati catodi di batterie LIB, a base di $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ commerciale (LNMO NANOMYTE®, NEI Corporation), utilizzando due tipologie di leganti: un legante convenzionale come pVdF (*Solef 5130, Solvay*) e miscele idrosolubili di pullulano e/o PEDOT:PSS. Inoltre è stata valutata la possibilità di sostituire il nanoparticolato di carbone additivo conduttore (Super C65 Imerys) con grafite (SFG44, Imerys), più facilmente separabile per filtrazione rispetto a SuperC65. In A. Brilloni et al, *Electrochim. Acta*, 418 (2022) 140376 avevamo già dimostrato che catodi realizzati con pullulano come legante hanno prestazioni analoghe a quelle di elettrodi a base di pVdF e permettono un facile ed efficiente recupero diretto della black mass. D'altra

parte in A. Brilloni, et al. Energies 15 (2022) 2608, abbiamo evidenziato che il polimero PEDOT:PSS può agire come legante bifunzionale e fungere da barriera protettiva verso reazioni secondarie, indesiderate, in catodi a base di LNMO. La presenza di tale polimero conduttore ha permesso infatti di ottenere una ritenzione di capacità del 100% durante 250 cicli condotti a C/1, utilizzando l'elettrolita LP30.

Ma una delle criticità di PEDOT:PSS è la sua bassa solubilità in solventi convenzionali, e ciò si riflette sulla difficoltà di recupero di tale materiale e pertanto sui costi di dei corrispondenti elettrodi. Pertanto, in LA3.6 abbiamo valutato formulazioni di catodi LNMO a base di un legante composito Pullulano-PEDOT:PSS che mantiene la facile separazione fisica per trattamento in acqua di PU e il contributo di conduzione elettronica di PEDOT:PSS, necessario quando si intende rimuovere o sostituire il nanoparticolato carbonioso

La Tabella 1. Composizione percentuale in massa di catodi di LNMO realizzati con PEDOT:PSS-Pullulano e grafite o con pVdF e carbon black. riporta le composizioni percentuali in massa di catodi di LNMO realizzati con PEDOT:PSS-Pullulano e grafite o con pVdF e carbon black.

Codice elettrodo	% LNMO	%PEDOT:PSS	%Pullulan	% pVdF	% carbon black	% graphite
LNMO-PE-GR1	85	5	5	-	-	5
LNMO-PE-GR2	85	3	2	-	-	10
LNMO-PE-GR3	80	5	5	-	-	0
LNMO-PVdF_C	80	-	-	10	10	-

Tabella 1. Composizione percentuale in massa di catodi di LNMO realizzati con PEDOT:PSS-Pullulano e grafite o con pVdF e carbon black.

Le prestazioni elettrochimiche degli elettrodi sono state valutate tramite test voltammetrici e galvanostatici e spettroscopia di impedenza, utilizzando l'elettrolita convenzionale LP30 (1m LiPF₆ in etilene carbonato:dimetilcarbonato 1:1). La Figura 1. Profili di scarica galvanostatica a C/10 di catodi a base di LNMO e PU-PEDOT:PSS e grafite o pVdF e carbon black confronta i profili galvanostatici a C/10 degli elettrodi di LNMO a base di PU-PEDOT:PSS e grafite con il catodi a base di pVdF e carbon black .Figura 2. Andamento della capacità specifica a diverse correnti di scarica (C/10, C/5, C/3 e C/1) degli elettrodi di LNMO a base di PU-PEDOT:PSS e grafite con il catodi a base di pVdF e carbon black. mostra l'andamento della capacità specifica degli elettrodi a diverse correnti di scarica: C/10, C/5, C/3 e C/1. Le curve e i valori di capacità specifica sono sovrapponibili e indicano che le nuove formulazioni permettono di ottenere la stessa capacità specifica degli elettrodi convenzionali, pari a 125 mAh/g alle diverse correnti. **L'obiettivo prefissato di "dimostrare che leganti alternativi permettono di mantenere le stesse prestazioni: capacità almeno pari al 90% del valore dichiarato dal produttore della polvere" è da considerarsi pertanto raggiunto.** La stabilità degli elettrodi a ripetuti cicli di carica scarica a C/1, riportata in Figura 3 è analoga per le diverse formulazioni ma è risultata inferiore a quanto prefissato. Gli elettrodi, sia con Pu_PEDOT:PSS e pVdF mostrano una diminuzione di capacità dell'80% in 180 cicli. Tale risultato è anomalo, e da rivalidare, in quanto,

come riportato sopra, in A. Brilloni, et al. Energies 15 (2022) 26, elettrodi sia a base di PEDOT:PSS che di pVdF avevano mostrato stabilità decisamente superiore.

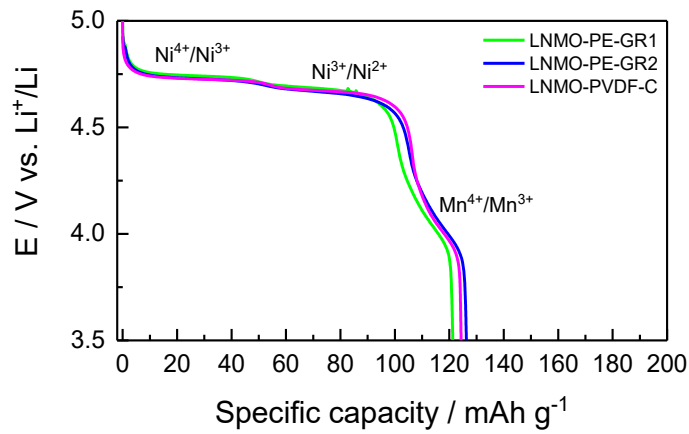


Figura 1. Profili di scarica galvanostatica a C/10 di catodi a base di LNMO e PU-PEDOT:PSS e grafite o pVdF e carbon black

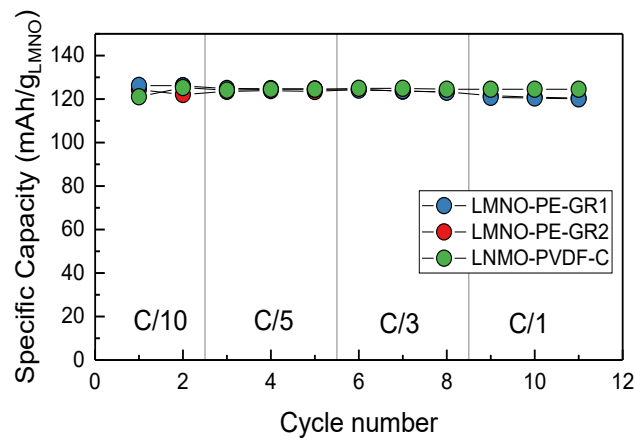


Figura 2. Andamento della capacità specifica a diverse correnti di scarica (C/10, C/5, C/3 e C/1) degli elettrodi di LNMO a base di PU-PEDOT:PSS e grafite con il catodi a base di pVdF e carbon black.

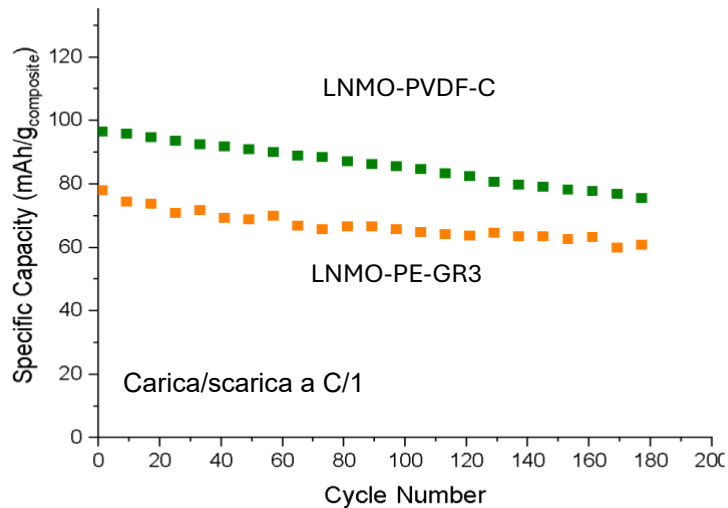


Figura 3. Andamento della capacità specifica durante ripetuti cicli di carica/scarica a C/1 degli elettrodi di LNMO a base di PU-PEDOT:PSS e grafite con il catodi a base di pVdF e carbon black

7.2 Valutazione del recupero del materiale catodico attivo

È stato valutato il recupero diretto dei materiali catodici degli elettrodi prodotti con PU-PEDOT:PSS e grafite tramite semplice trattamento con acqua successiva sedimentazione o filtrazione.

La Figura 4 mostra che immergendo elettrodi di scarto in acqua è possibile separare direttamente e totalmente (100%) la black mass dal collettore di corrente in alluminio. Pertanto la miscelazione del PEDOT:PSS con Pullulano risulta una strategia efficace per recuperare facilmente la black mass. Inoltre, la sospensione acquosa contiene solamente LNMO, PU-PEDOT:PSS e grafite, nelle stesse proporzioni utilizzate nella produzione dei catodi. La Figura 4 mostra che tale sospensione sedimenta spontaneamente per produrre un film omogeneo compatto (tipo gel) sul fondo del contenitore, separato dalla fase liquida. Tale fenomeno potrebbe essere messo in relazioni alle note proprietà di self-healing di PEDOT:PSS. Pertanto, ciò suggerisce che la sospensione potrà essere riutilizzata direttamente per produrre nuovi elettrodi mediante casting/doctor blade, previa semplice sedimentazione ed evaporazione dell'eccesso di acqua. Questa strategia è in validazione.

Pertanto, l'obiettivo di ottenere una resa del recupero diretto dei materiali catodici (Black mass: materiale attivo e carbone) superiore al 70% è stata raggiunta.

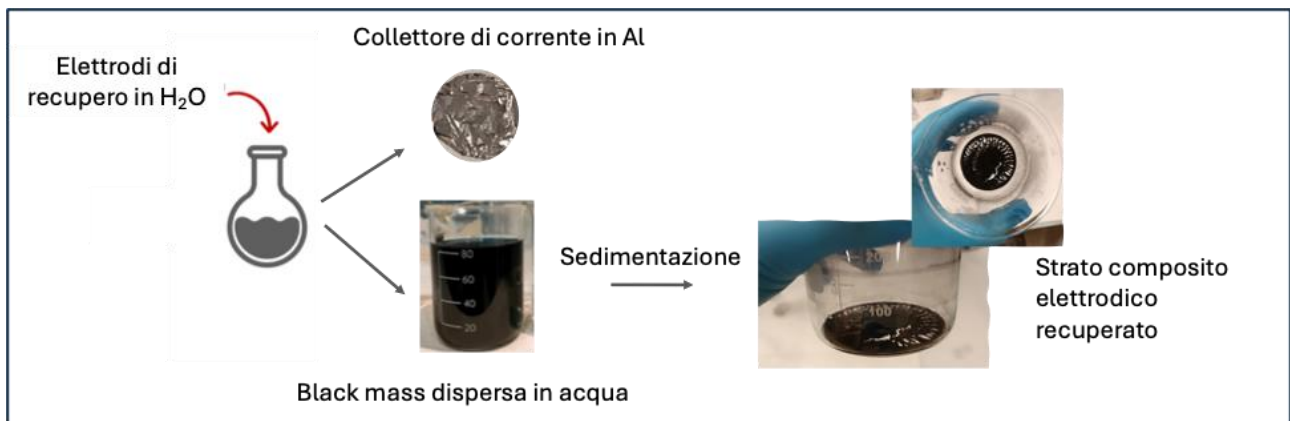


Figura 4. Schema del processo di recupero della black mass di elettrodi a base di LNMO, PU-PEDOT:PSS, Grafite, tramite sedimentazione da sospensione acquosa.

Lo studio del recupero diretto dei materiali elettrodici è proseguito con l'ambizione di isolare le varie componenti. A tal fine, come schematizzato in Figura 5, una volta separata la black mass dal collettore di corrente tramite immersione in acqua, la stessa è stata filtrata e separata dalla soluzione acquosa. La fase liquida consiste in una soluzione acquosa di pullulano, che dunque può essere recuperato per evaporazione. La fase solida è un materiale composito e complesso, costituito da LNMO, PEDOT:PSS (non solubile in acqua) e grafite. Non si possono escludere tracce di Pullulano.

Al fine di isolare il materiale elettroattivo LNMO, la polvere composita recuperata è stata soggetta ad una flottazione statica (Static floatation), ossia è stata dispersa in un sistema bifasico costituito da acqua e dimetil carbonato (DMC). La Figura 6 riporta l'immagine del sistema bifasico H₂O/DMC di flottazione statica. Evidenzia la separazione della grafite da LNMO/PEDOT:PSS. La grafite, affine a DMC, viene concentrata nella fase liquida organica surnatante. Il composito LNMO/PEDOT:PSS è presente come sedimento della fase acquosa.

La Figura 6 dimostra quindi che tale approccio è efficace per separare la grafite ma non assicura la separazione di LNMO da PEDOT:PSS. Nessun trattamento provato con vari solventi (TEP, DMSO) a diverse temperature è risultato efficace nell'isolare LNMO dal polimero. Il materiale recuperabile è pertanto un composito nel quale le particelle di LNMO sono verosimilmente rivestite dal polimero e comunque riutilizzabili per nuove formulazioni elettrodiche.

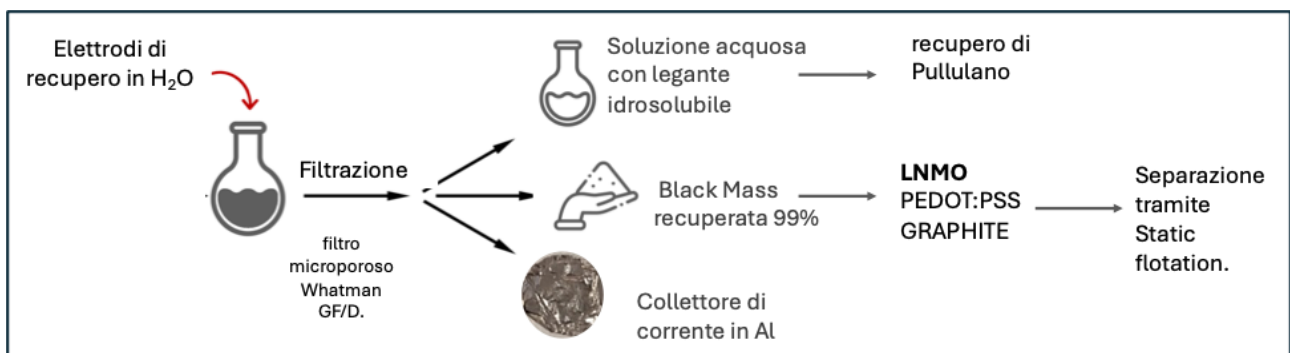


Figura 5. Schema del processo di recupero della black mass di elettrodi a base di LNMO, PU-PEDOT:PSS, Grafite, tramite filtrazione da sospensione acquosa.

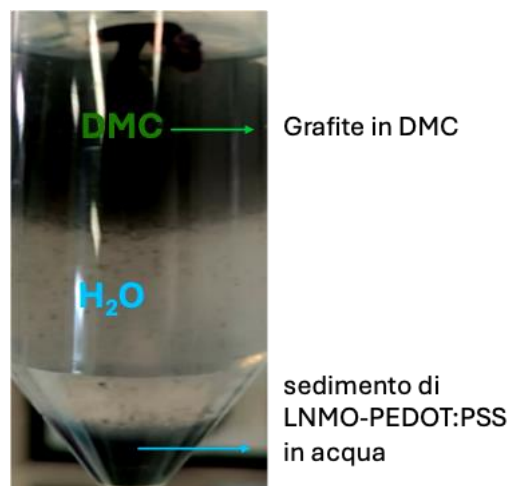


Figura 6. Immagine del sistema bifasico H₂O/DMC di flottazione statica che evidenzia la separazione della grafite in DMC e di LNMO/PEDOT:PSS come sedimento della fase acquosa.

7.3 Disomogeneità degli stati di ossidazione in elettrodi

È stato compiuto uno studio preliminare su composti modello del tipo del Blu di Prussia allo scopo di verificare ed esplorare nuove tecniche analitiche in grado di sondare la disomogeneità negli stati di ossidazione in elettrodi, anche invecchiati. La tecnica utilizzata è stata la fluorescenza a raggi X bidimensionale (2D-XRF). Grazie alla modalità bidimensionale, non solo sono state seguite le dinamiche di variazione di concentrazione del metallo prima e dopo il processo di invecchiamento, ma è stata rivelata anche la loro distribuzione spaziale.

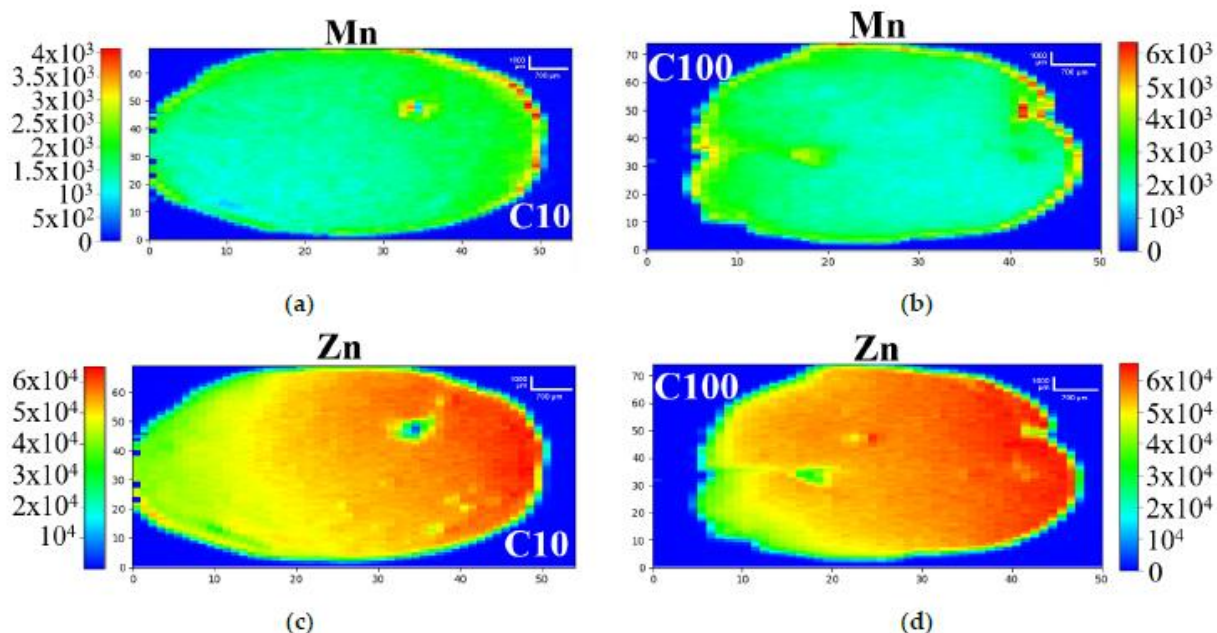


Figura 7. Mappe 2d-XRF su elettrodi invecchiati di manganese esacianoferrato in semicelle allo Zn-ione.

Ad esempio, la Figura 7 mostra le distribuzioni degli elementi Zn e Mn in elettrodi invecchiati (10 cicli e 100 cicli), dove la distribuzione dello zinco appare più irregolare.

La tecnica 2D-XRF in questo caso è stata applicata per la prima volta in questa tipologia di elettrodi ma il test risulterà utile per applicare in futuro simili concetti a materiali elettrodi ottenuti da riciclo.

7.4 Conclusioni, collaborazioni e lavoro futuro

Catodi di LMNO possono essere preparati utilizzando PEDOT:PSS/Pullulano come legante idrosolubile e sostituendo il carbon black con grafite. Gli elettrodi mostrano prestazioni simili agli elettrodi di riferimento PVdF-carbon black.

La formulazione elettrodica proposta permette un facile recupero diretto della black mass tramite separazione dal collettore di corrente con acqua. Si ottiene una sospensione acquosa che può essere riutilizzata per la produzione di nuovi elettrodi tramite casting diretto.

La grafite può essere separata da LNMO-PEDOT:PSS tramite una sorta di flottazione statica, ma PEDOT:PSS non può essere separato da LNMO a causa della sua bassa solubilità in qualsiasi mezzo. Tuttavia, la polvere recuperata, che corrisponde a grani di LNMO rivestiti di PEDOT:PSS potrebbe essere comunque riutilizzata per produrre nuovi elettrodi e l'approfondimento dello studio di tale processo di recupero è in corso.

La collaborazione con ENEA ha anche attivato ulteriori studi. In particolare, prevediamo di condurre una valutazione e validazione della sostenibilità ambientale, economica e sociale dei processi proposti tramite LCA (Dr. Giuseppe Di Florio) e approfondendo la valutazione della qualità dei materiali recuperati e della resa di processo mediante tecniche analitiche avanzate.

Per rendere il processo produttivo degli elettrodi maggiormente sostenibile e scalabile, abbiamo avviato la collaborazione con Dott.ssa Maria Montanino ENEA per la realizzazione di catodi a base di LNMO e PEDOT:PSS tramite «gravure printing».

8 Pubblicazioni scientifiche

L'attività LA 3.6 ha prodotto le seguenti pubblicazioni scientifiche:

- 1) D. Marchese, C. Giosuè, A. Staffolani, M. Conti, S. Orcioni, F. Soavi, M. Cavalletti, P. Stipa, An Overview of the Sustainable Recycling Processes Used for Lithium-Ion Batteries, Batteries 10 (2024) 27
- 2) M. Li, M. Maisuradze, A. Mullaliu, I. Carlomagno, G. Aquilanti, J. R. Rikkert Plaisier, M. Giorgetti, Structural Evolution of Manganese Prussian Blue Analogue in Aqueous ZnSO₄ Electrolyte, Small 2024, 20, Art. No. 2404584.

9 Eventi di disseminazione

Le attività della linea LA 3.6 sono state divulgate in occasione di convegni nazionali e internazionali tramite le seguenti comunicazioni orali e poster

9.1 Comunicazioni orali

- 1) A. Staffolani, F. Soavi, Sustainable Electrochemical Energy Storage, Giornata della Ricerca del CIRI-FRAME- TECNOLOGIE PER L'EFFICIENZA ENERGETICA E LA DECARBONIZZAZIONE, Marina di Ravenna (Italy), 24/07/2023
- 2) A. Staffolani, F. Soavi, New Generation batteries: a sustainability approach, NanoInnovation 2023, Roma (Italy), 18-22/09/2023
- 3) A. Staffolani, A. Trebbi, A. Ashir, F. Mascetti, C. Samori, A. G. Rombolà, S. D'Agostino, N. Manyala, F. Soavi, Development of Sustainable Processes for LIBs Recycling, International Symposium on Beyond Li-Ion Batteries 2024 - BeLi24, Padova (Italy), 1-6/09/2024.
- 4) M. Maisuradze, M. Li, I. Carlomagno, G. Aquilanti, M. Giorgetti, Post-mortem analysis of MnHCF-based cathode materials via synchrotron-based 2D X-ray fluorescence technique, BeLi24, International Symposium on Beyond Li-Ion Batteries 2024 - BeLi24, Padova (Italy), 1-6/09/2024.
- 5) F. Soavi, A. Staffolani, M. Giovannucci, E. Petri, F. Mascetti, F. Capodarca, S. Mojtahedi, S. Xierzati, A. Gregucci, LIB cathode production processes designed for "direct recycling", NanoInnovation 2024, Roma (Italy), 9-13/09/2024.

9.2 Comunicazioni poster

- 1) A. Staffolani, A. Aishabibi Ashir, A. Trebbi, F. Mascetti, F. Soavi, Design of Lithium-Ion Batteries Cathodes for Direct Recycling of Production Scraps, 75th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, Montréal (Canada) 18-23/08/2024.
- 2) A Staffolani, A. Ashir, M. Giorgetti, M. Giovannucci, N. Manyala, F. Mascetti, E. Petri, A. G. Rombolà, C. Samori, F. Soavi, A. Trebbi, Designing Sustainable Processes for Lithium-ion Battery Recycling, 37th Topical Meeting of the International Society of Electrochemistry "Electrochemical energy for a greener and more sustainable future society", Stresa (Italy), 9-12/06/2024
- 3) E. Petri, M. Giovannucci, S. Mojtahedi, A. Gregucci, F. Mascetti, L. Yeasmin, F. Capodarca, A. Trebbi, A. Ashir, S. Xierzati, P. Stragliotto, A. Staffolani, F. Soavi, ENERCUBE: from basic studies to scaling up, Il Distretto Chimico del Navile si presenta, Bologna (Italy) 30/05/2024
- 4) E. Petri, M. Giovannucci, S. Mojtahedi, A. Gregucci, N. Albanelli, F. Capodarca, N. Kuniyil, J. Goldmann, A. Trebbi, A. Ashir, O. B. Saban, A. Staffolani, F. Soavi, LEME-ENERCUBE: from basic studies to scaling up, Il Distretto Chimico del Navile si presenta, Bologna (Italy) 25/07/2023