MAST3RBoost

Promuovere gli standard di produzione per strutture ultra-porose destinate allo stoccaggio dell'idrogeno ad alta densità

Raccomandazioni politiche

Funded by
the European Union

Indice

1. Introduzione 3
2. Sintesi 3
3. Risultati del progetto 4
4. Contributo alle priorità dell'UE 6
5. Sfide chiave per la diffusione industriale 7
6. Valutazione rivista della fattibilità degli obiettivi DOE 9
7. Raccomandazioni politiche 10
8. Impatto socioeconomico 14
9. Lezioni apprese 15
10. Conclusioni e messaggi chiave 16

1. Introduzione

Lo stoccaggio dell'idrogeno è una priorità strategica per l'Unione Europea. Il Green Deal europeo stabilisce l'obiettivo giuridicamente vincolante di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050, e l'idrogeno pulito è stato individuato come uno dei principali fattori abilitanti tecnologici per la decarbonizzazione dell'industria pesante, del trasporto a lunga distanza e di altri settori difficili da elettrificare.

Il Piano REPowerEU, adottato nel maggio 2022, ha ulteriormente accelerato questa agenda fissando l'obiettivo di raggiungere 20 milioni di tonnellate di idrogeno rinnovabile entro il 2030 (10 milioni di tonnellate prodotte all'interno dell'Unione Europea e 10 milioni di tonnellate importate). Questo obiettivo mira a ridurre contemporaneamente la dipendenza dai combustibili fossili importati e ad accelerare la transizione energetica pulita.

La Strategia europea per l'idrogeno, attualmente in fase di revisione con una consultazione pubblica prevista per il secondo trimestre del 2026, mira a sviluppare una catena del valore dell'idrogeno completa, che comprenda la produzione di idrogeno rinnovabile, le infrastrutture di trasporto e distribuzione e le applicazioni finali nell'industria, nei trasporti e negli edifici.

Il Net-Zero Industry Act, entrato in vigore nel giugno 2024, rafforza la capacità manifatturiera europea per le tecnologie pulite, con l'obiettivo che la produzione nazionale soddisfi almeno il 40% del fabbisogno annuale di diffusione dell'UE entro il 2030. Elettrolizzatori, celle a combustibile e tecnologie di stoccaggio dell'idrogeno sono esplicitamente riconosciuti tra le tecnologie strategiche coperte da questa normativa.

Infine, il Piano d'Azione per l'Economia Circolare, che la Commissione Europea intende sostituire con un vincolante Circular Economy Act nel corso del 2026, promuove la valorizzazione dei rifiuti e l'efficienza delle risorse con l'obiettivo di raddoppiare il tasso di utilizzo circolare dei materiali dell'UE fino a circa il 24% entro il 2030.

In questo contesto politico, il progetto Horizon Europe **MAST3RBoost** fornisce evidenze tecniche a diretto sostegno di queste priorità strategiche. Il progetto ha sviluppato materiali ultraporosi sostenibili per lo stoccaggio dell'idrogeno a partire da materie prime derivate da rifiuti, ha applicato l'intelligenza artificiale e l'apprendimento automatico alla scoperta di materiali, ha dimostrato la scalabilità industriale di questi processi e ha progettato, fabbricato e convalidato un serbatoio leggero per lo stoccaggio dell'idrogeno mediante fabbricazione additiva.

Il presente documento traduce questi risultati in raccomandazioni politiche indirizzate alla Commissione Europea e ai legislatori europei.

2. Sintesi

Il progetto Horizon Europe **MAST3RBoost** ha dimostrato che i materiali ultraporosi — inclusi carboni attivi e strutture metallo-organiche (MOF) — possono essere prodotti con successo da flussi di rifiuti agricoli, agroalimentari, municipali e minerari. Questi materiali hanno raggiunto capacità di stoccaggio

Funded by the European Union under grant agreement 101058574. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Health and Digital Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

dell'idrogeno fino al **9,8% in peso** in condizioni criogeniche. Parallelamente, il progetto ha fabbricato con successo un serbatoio leggero in alluminio per lo stoccaggio dell'idrogeno utilizzando la tecnologia **Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM).**

Questi risultati collocano il consorzio in una posizione favorevole per contribuire alla prossima revisione della Strategia europea per l'idrogeno. Tuttavia, un confronto rigoroso con gli obiettivi tecnici fissati dal Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti (DOE) mostra che, sebbene le capacità di stoccaggio gravimetrico raggiunte superino l'obiettivo finale del DOE pari a **6,5% in peso**, questi risultati sono stati ottenuti a **−196 °C**, ben al di sotto dell'intervallo di temperatura operativa richiesto dal DOE (**da −40 °C a 60 °C**). Di conseguenza, i lavori futuri dovrebbero estendere la convalida di questi materiali a temperature operative più rappresentative e a condizioni applicative reali.

Il presente documento traduce i risultati tecnici del progetto in raccomandazioni politiche concrete rivolte a diversi livelli decisionali europei, fornendo al contempo una valutazione rivista e realistica della fattibilità degli obiettivi DOE per questa famiglia di materiali di stoccaggio dell'idrogeno.

3. Risultati del progetto

I risultati ottenuti nel corso del progetto **MAST3RBoost** dimostrano il potenziale delle tecnologie di stoccaggio dell'idrogeno basate su materiali ultraporosi per contribuire agli obiettivi europei di decarbonizzazione, competitività industriale e autonomia strategica. Oltre ai progressi scientifici raggiunti, il progetto ha generato conoscenze, metodologie e capacità industriali preziose, che costituiscono una solida base per le future politiche pubbliche e le attività di normazione.

I principali risultati del progetto possono essere raggruppati in quattro aree complementari.

◆ 3.1 Progressi scientifici e tecnologici

MAST3RBoost ha sviluppato una nuova generazione di materiali ultraporosi per lo stoccaggio dell'idrogeno, inclusi carboni attivi e strutture metallo-organiche (MOF), prodotti mediante processi sostenibili a partire da flussi di rifiuti agricoli, agroalimentari, municipali e industriali.

Tra i risultati più significativi figurano lo sviluppo di carboni attivi con aree superficiali specifiche fino a 3.300 m²/g e capacità di adsorbimento dell'idrogeno fino al 9,8% in peso in condizioni criogeniche, insieme a nuovi MOF sintetizzati da materie prime derivate da rifiuti con proprietà ottimizzate per applicazioni di stoccaggio dell'idrogeno.

Il progetto ha inoltre integrato strumenti di intelligenza artificiale e apprendimento automatico per accelerare la scoperta e l'ottimizzazione dei materiali, sviluppando banche dati FAIR, modelli predittivi e metodologie di apprendimento attivo, riducendo in modo significativo lo sforzo sperimentale necessario per identificare nuovi materiali promettenti.

◆ 3.2 Scalabilità industriale e dimostrazione tecnologica

Uno dei risultati più importanti di MAST3RBoost è stato dimostrare che i materiali sviluppati possono andare oltre la ricerca su scala di laboratorio. Il progetto ha convalidato con successo la scalabilità di diversi materiali ultraporosi dalla produzione di laboratorio alla fabbricazione su scala pilota, individuando al contempo le principali sfide associate alla loro futura diffusione industriale.

Funded by the European Union under grant agreement 101058574. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Health and Digital Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

Parallelamente, il progetto ha progettato e fabbricato un serbatoio leggero per lo stoccaggio dell'idrogeno basato sulla tecnologia **Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)**, incorporando rivestimenti interni sviluppati specificamente per il funzionamento criogenico. Il serbatoio è stato sottoposto a prove strutturali e di pressione, fornendo informazioni preziose per la sua futura convalida e qualificazione tecnologica.

◆ 3.3 Sostenibilità ed economia circolare

MAST3RBoost ha dimostrato che i materiali avanzati per lo stoccaggio dell'idrogeno possono essere prodotti da risorse secondarie, riducendo la dipendenza dalle materie prime vergini e promuovendo al contempo modelli di produzione industriale più sostenibili.

L'utilizzo di residui agricoli, rifiuti agroalimentari, imballaggi in alluminio, bottiglie di PET e drenaggi acidi di miniera come materie prime fornisce una dimostrazione pratica del potenziale dell'economia circolare per lo sviluppo di tecnologie energetiche avanzate.

Inoltre, il progetto ha valutato gli impatti ambientali, economici e di sicurezza delle tecnologie sviluppate mediante l'analisi del ciclo di vita (LCA), il calcolo dei costi del ciclo di vita (LCC) e studi di valutazione del rischio, fornendo una base oggettiva per le future decisioni industriali e normative.

◆ 3.4 Contributo alla competitività europea

I risultati del progetto rafforzano la capacità dell'Europa di sviluppare tecnologie indigene di stoccaggio dell'idrogeno, integrando ricerca sui materiali avanzati, intelligenza artificiale, fabbricazione additiva, materiali sostenibili e processi industriali scalabili.

Nel loro insieme, questi risultati rafforzano la posizione dell'Europa nei settori strategici legati all'idrogeno pulito, sostenendo la creazione di nuove capacità industriali, catene di approvvigionamento più resilienti e una minore dipendenza tecnologica da paesi terzi.

Area strategica	Risultati chiave	Rilevanza per le politiche dell'UE
Materiali avanzati	Sviluppo di carboni attivi ad alte prestazioni e strutture metallo-organiche (MOF)	Rafforza la leadership europea nelle tecnologie di stoccaggio dell'idrogeno
Intelligenza artificiale	Repository di dati FAIR, modelli predittivi e metodologie di apprendimento attivo	Accelera la digitalizzazione della ricerca e dell'innovazione
Scalabilità industriale	Produzione su scala pilota e densificazione dei materiali	Colma il divario tra ricerca e diffusione industriale
Fabbricazione avanzata	Serbatoio leggero per lo stoccaggio dell'idrogeno realizzato con WAAM e rivestimenti criogenici	Rafforza le capacità europee nella fabbricazione avanzata
Economia circolare	Utilizzo di flussi di rifiuti come materie prime	Sostiene la transizione verso un'industria a basse emissioni di carbonio ed efficiente nell'uso delle risorse

Funded by the European Union under grant agreement 101058574. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Health and Digital Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

4. Contributo alle priorità dell'UE

La politica europea sull'idrogeno si è evoluta in modo significativo negli ultimi anni, incorporando obiettivi legati alla decarbonizzazione industriale, al rafforzamento della capacità manifatturiera europea, alla promozione dell'economia circolare e all'accelerazione della digitalizzazione dei processi industriali. I risultati ottenuti da MAST3RBoost forniscono preziose evidenze tecniche a sostegno dell'attuazione di queste politiche e possono fungere da riferimento per future iniziative di ricerca, innovazione e diffusione industriale.

Questo allineamento dimostra che i risultati di MAST3RBoost vanno ben oltre i progressi scientifici e tecnologici, fornendo evidenze che possono orientare le future decisioni in materia di ricerca, innovazione, normazione e sviluppo industriale all'interno dell'Unione Europea. Le raccomandazioni politiche presentate in questo documento si basano su questi risultati e sulle lezioni apprese nel corso del progetto.

Priorità strategica dell'UE	Contributo di MAST3RBoost	Valore aggiunto per la politica pubblica
Green Deal europeo	Sviluppo di materiali sostenibili per lo stoccaggio dell'idrogeno prodotti da materie prime derivate da rifiuti attraverso processi produttivi a minore impatto.	Sostiene la decarbonizzazione industriale e la transizione verso un'economia climaticamente neutra.
REPowerEU	Sviluppo di soluzioni innovative per lo stoccaggio dell'idrogeno che possono contribuire alla diffusione di un'economia europea dell'idrogeno.	Rafforza la sicurezza energetica e riduce la dipendenza dai combustibili fossili importati.
Strategia europea per l'idrogeno	Sviluppo e convalida di materiali avanzati e sistemi di stoccaggio dell'idrogeno basati sull'adsorbimento.	Amplia il portafoglio di tecnologie di stoccaggio dell'idrogeno disponibili per applicazioni future.
Piano d'Azione per l'Economia Circolare	Valorizzazione di flussi di rifiuti agricoli, agroalimentari, industriali e minerari come materie prime per materiali funzionali.	Promuove modelli di produzione più circolari ed efficienti nell'uso delle risorse.
Net-Zero Industry Act	Scalabilità industriale di materiali avanzati e componenti di fabbricazione mediante Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM).	Rafforza la capacità manifatturiera europea nelle tecnologie strategiche a zero emissioni nette.
Strategia europea per la digitalizzazione e l'intelligenza artificiale	Applicazione di intelligenza artificiale, apprendimento automatico e dati FAIR per accelerare lo sviluppo di nuovi materiali.	Dimostra il potenziale dell'IA per accelerare l'innovazione industriale.

◆ Implicazioni chiave per lo sviluppo delle politiche europee

Funded by the European Union under grant agreement 101058574. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Health and Digital Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

I risultati del progetto dimostrano che lo sviluppo di tecnologie avanzate di stoccaggio dell'idrogeno richiede un approccio integrato che combini ricerca sui materiali, strumenti digitali, fabbricazione avanzata, sostenibilità e dimostrazione tecnologica.

L'esperienza acquisita nel corso del progetto evidenzia che la transizione dalla ricerca all'applicazione industriale dipende non solo dall'eccellenza scientifica, ma anche dalla disponibilità di infrastrutture di prova, da un'efficace collaborazione tra organizzazioni di ricerca e industria e da quadri normativi che facilitino l'adozione sul mercato delle tecnologie emergenti.

Inoltre, il progetto conferma il potenziale dell'economia circolare come fattore chiave della transizione energetica. L'utilizzo di flussi di rifiuti agricoli, agroalimentari, industriali e minerari come materie prime per materiali funzionali dimostra che è possibile sviluppare soluzioni innovative riducendo al contempo la dipendenza dalle risorse vergini e promuovendo un uso più efficiente dei materiali disponibili.

Un altro aspetto particolarmente rilevante è l'integrazione dell'intelligenza artificiale e dell'apprendimento automatico nel processo di sviluppo dei materiali. La creazione di infrastrutture di dati, modelli predittivi e metodologie di apprendimento attivo dimostra il potenziale di queste tecnologie nell'accelerare l'innovazione, ottimizzare i processi sperimentali e sostenere lo sviluppo di materiali avanzati per applicazioni energetiche.

Infine, l'esperienza acquisita durante MAST3RBoost evidenzia l'importanza di continuare a rafforzare le attività di dimostrazione tecnologica, convalida e trasferimento delle conoscenze. Lo sviluppo di soluzioni complesse che integrano materiali innovativi, processi di fabbricazione avanzati e condizioni operative impegnative richiede periodi di convalida adeguati, infrastrutture specializzate e una stretta collaborazione tra i diversi attori dell'ecosistema europeo dell'innovazione.

Nel complesso, i risultati del progetto forniscono una solida base scientifica e tecnica in grado di sostenere future iniziative europee di ricerca e innovazione, attività di normazione e politiche pubbliche volte ad accelerare lo sviluppo e la diffusione di tecnologie di stoccaggio dell'idrogeno più sicure, sostenibili e competitive.

Allo stesso tempo, l'esperienza acquisita durante il progetto ha permesso di individuare diverse sfide scientifiche, tecnologiche e industriali che devono essere affrontate per facilitare la diffusione su larga scala di queste tecnologie. Queste sfide sono trattate nella sezione seguente.

5. Sfide chiave per la diffusione industriale

Nonostante i significativi progressi compiuti durante MAST3RBoost, il consorzio ha individuato diverse barriere che continuano a limitare lo sviluppo e la diffusione su larga scala delle tecnologie avanzate di stoccaggio dell'idrogeno. L'individuazione di queste sfide rappresenta uno dei risultati più preziosi del progetto, fornendo evidenze in grado di orientare future politiche di ricerca, innovazione, normazione e industria.

Disponibilità limitata di infrastrutture di prova criogeniche e ad alta pressione

Lo sviluppo e la convalida di sistemi avanzati di stoccaggio dell'idrogeno richiedono infrastrutture di prova in grado di operare in condizioni combinate di alta pressione e criogenia. L'esperienza acquisita

Funded by the European Union under grant agreement 101058574. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Health and Digital Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

durante il progetto ha evidenziato la disponibilità limitata di tali strutture, sia all'interno del consorzio sia in tutta Europa. Ciò ha limitato la pianificazione di alcune attività sperimentali e ha dimostrato la necessità di rafforzare le capacità di ricerca europee in questo ambito attraverso future iniziative.

Inoltre, la convalida di dimostratori complessi che integrano materiali innovativi, processi di fabbricazione avanzati e sistemi di stoccaggio dell'idrogeno richiede periodi di messa in servizio, verifica e prova che possono superare la durata di un tipico progetto di ricerca. L'esperienza acquisita suggerisce che i futuri programmi europei dovrebbero prevedere meccanismi che consentano di estendere queste fasi di convalida ogniqualvolta requisiti di sicurezza, disponibilità di infrastrutture o sfide di integrazione dei sistemi giustifichino tempi aggiuntivi.

Scalabilità industriale preservando le prestazioni dei materiali

Il passaggio dalla produzione su scala di laboratorio alla fabbricazione su scala pilota ha introdotto variazioni impreviste nelle prestazioni dei materiali e nella conservazione della struttura porosa, richiedendo un'ulteriore ottimizzazione dei processi di densificazione e granulazione.

La necessità di set di dati più ampi per migliorare i modelli di intelligenza artificiale

L'applicazione dell'intelligenza artificiale e dell'apprendimento automatico alla scoperta di nuovi materiali ha dimostrato un notevole potenziale per accelerare la ricerca sullo stoccaggio dell'idrogeno. Tuttavia, la capacità predittiva di questi modelli dipende direttamente dal volume, dalla qualità e dalla diversità dei dati disponibili per l'addestramento.

Durante MAST3RBoost è stata creata una banca dati di materiali ultraporosi caratterizzati, che ha consentito lo sviluppo di modelli predittivi e supportato l'identificazione di formulazioni di materiali promettenti. Tuttavia, l'ampliamento di questi set di dati e la loro integrazione con dati generati da altri progetti europei migliorerebbero significativamente la robustezza e la capacità predittiva di questi modelli.

La disponibilità di repository di dati europei aperti, interoperabili e armonizzati migliorerebbe notevolmente le prestazioni predittive, faciliterebbe il riutilizzo delle conoscenze generate attraverso la ricerca finanziata con fondi pubblici e accelererebbe lo sviluppo di nuovi materiali per applicazioni energetiche.

È necessaria un'ulteriore convalida in condizioni operative reali

Sebbene il progetto abbia compiuto notevoli progressi nello sviluppo di materiali ultraporosi, componenti e soluzioni integrate di stoccaggio dell'idrogeno, sarà comunque necessaria un'ulteriore convalida in condizioni operative rappresentative delle applicazioni reali.

I materiali sviluppati nell'ambito di MAST3RBoost hanno mostrato prestazioni eccezionali, con carboni ultraporosi che hanno raggiunto capacità di stoccaggio dell'idrogeno fino al **9,8% in peso** in condizioni criogeniche (**100 bar e −196 °C**). Tuttavia, la maggior parte dei risultati sperimentali è stata ottenuta in queste condizioni di prova, rendendo necessario estendere la convalida a intervalli di temperatura e condizioni operative che riflettano più fedelmente le applicazioni pratiche nei trasporti, nell'industria e nello stoccaggio energetico stazionario.

Inoltre, l'esperienza acquisita durante lo sviluppo del dimostratore ha evidenziato la complessità dell'integrazione e della convalida di sistemi che combinano materiali innovativi, tecnologie di fabbricazione avanzate e condizioni operative impegnative. La disponibilità di infrastrutture

Funded by the European Union under grant agreement 101058574. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Health and Digital Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

specializzate, i requisiti di sicurezza e il tempo necessario per completare le attività di messa in servizio e convalida possono, in determinate circostanze, superare la durata dei progetti standard di ricerca e innovazione.

In questo contesto, i futuri programmi europei di R&I dovrebbero prevedere meccanismi che consentano di proseguire le attività di dimostrazione e convalida tecnologica ogniqualvolta necessario, facilitando così una transizione più efficace dalla ricerca alla dimostrazione e infine alla diffusione industriale.

Le attività di normazione dovrebbero iniziare parallelamente allo sviluppo tecnologico

L'esperienza acquisita durante MAST3RBoost dimostra l'importanza di avviare le attività di normazione parallelamente allo sviluppo tecnologico, anziché dopo il completamento del progetto.

L'introduzione di soluzioni innovative per lo stoccaggio dell'idrogeno basate su materiali avanzati, fabbricazione additiva e rivestimenti funzionali richiede che i processi di qualificazione e normazione evolvano allo stesso ritmo dello sviluppo tecnologico.

In particolare, lo sviluppo di serbatoi per lo stoccaggio dell'idrogeno fabbricati mediante **Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)**, unitamente all'applicazione di rivestimenti interni progettati specificamente per condizioni criogeniche, evidenzia la necessità di continuare a generare evidenze sperimentali a sostegno della futura revisione delle norme applicabili alle attrezzature a pressione, ai sistemi di stoccaggio dell'idrogeno e al trasporto di merci pericolose.

Incoraggiare una collaborazione precoce tra progetti di ricerca, industria, organismi di normazione e autorità di regolamentazione ridurrà il tempo necessario per i futuri processi di qualificazione e certificazione, facilitando l'adozione sicura e affidabile sul mercato di queste tecnologie emergenti.

6. Valutazione rivista della fattibilità degli obiettivi DOE

Il **Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti (DOE)** ha stabilito obiettivi tecnici riconosciuti a livello internazionale per i sistemi di stoccaggio dell'idrogeno a bordo nei veicoli leggeri. È importante sottolineare che questi obiettivi si riferiscono al **sistema di stoccaggio completo**, comprendente il serbatoio di stoccaggio, il materiale di stoccaggio, le valvole, l'isolamento e i componenti ausiliari, piuttosto che al solo materiale di stoccaggio. Di conseguenza, il materiale di stoccaggio stesso deve raggiungere prestazioni significativamente superiori rispetto al sistema complessivo.

Parametro	Obiettivo DOE 2025 (sistema)	Obiettivo finale DOE (sistema)	Risultato MAST3RBoost (materiale)	Condizioni di prova
Capacità gravimetrica	5,5% in peso	≈ 6,5% in peso	Fino al **9,8% in peso** (carboni ultraporosi)	100 bar, −196 °C
Capacità volumetrica	40 g H_2/L	≈ 50 g H_2/L	Non riportata a livello di sistema	—
Intervallo di temperatura operativa	da −40 °C a 60 °C	da −40 °C a 60 °C	−196 °C (temperatura di prova)	Ben al di sotto dell'intervallo operativo DOE

Funded by the European Union under grant agreement 101058574. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Health and Digital Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

Pressione	<10 MPa (100 bar)	<10 MPa (100 bar)	100 bar (materiale); serbatoio di stoccaggio testato con successo sotto pressione, incluso il test di scoppio a **360 bar**	Prove eseguite sia sui materiali che sui componenti

I materiali sviluppati nell'ambito di MAST3RBoost, in particolare i carboni ultraporosi, che hanno raggiunto valori di assorbimento di idrogeno fino al **9,8% in peso** superano l'obiettivo finale gravimetrico del DOE **a livello di materiale**. Tuttavia, questi risultati sono stati ottenuti in condizioni criogeniche (**−196 °C**), ben al di sotto dell'intervallo di temperatura operativa del DOE pari a **da −40 °C a 60 °C** stabilito per le applicazioni nei veicoli leggeri. Allo stesso modo, le strutture metallo-organiche (MOF) del consorzio, con capacità di stoccaggio dell'idrogeno fino a **1,44% in peso** a **−196 °C** e **1 bar**, restano significativamente al di sotto degli obiettivi DOE, sia in termini di temperatura operativa che di pressione.

Una valutazione equilibrata porta a due conclusioni complementari.

In primo luogo, **a livello di materiale**, il progetto fornisce chiare evidenze che i carboni ultraporosi derivati da rifiuti possono raggiungere, mediante crioadsorbimento, capacità di stoccaggio gravimetrico dell'idrogeno superiori all'obiettivo finale del DOE.

In secondo luogo, **a livello applicativo**, gli obiettivi DOE sono stati sviluppati specificamente per sistemi di stoccaggio dell'idrogeno a bordo che operano a temperatura ambiente o prossima ad essa nei veicoli leggeri. Al contrario, i materiali sviluppati e valutati nell'ambito di MAST3RBoost sono più adatti a **sistemi di stoccaggio dell'idrogeno criogenici o ibridi crio-compressi**, in particolare per il trasporto pesante, marittimo, ferroviario e per applicazioni di stoccaggio industriale stazionario, dove l'infrastruttura criogenica è già disponibile o si prevede che venga diffusa.

Di conseguenza, gli obiettivi DOE, così come attualmente formulati, dovrebbero essere interpretati con cautela quando vengono confrontati con tecnologie di stoccaggio basate sul crioadsorbimento. Sebbene rappresentino un parametro di riferimento riconosciuto a livello internazionale per la valutazione dei sistemi di stoccaggio dell'idrogeno, sono stati definiti per condizioni operative e scenari applicativi sostanzialmente diversi da quelli considerati nell'ambito di MAST3RBoost.

I confronti futuri dovrebbero pertanto tenere esplicitamente conto di variabili come la temperatura operativa, garantendo che gli obiettivi DOE non vengano utilizzati come unico parametro di riferimento per valutare il potenziale di questa classe di materiali di stoccaggio.

Di conseguenza, la valutazione delle tecnologie emergenti di stoccaggio dell'idrogeno dovrebbe considerare non solo le prestazioni di stoccaggio raggiunte a livello di materiale, ma anche le condizioni operative, il livello di maturità tecnologica (TRL) e l'applicazione d'uso finale prevista. Un simile approccio fornirà una valutazione più equilibrata delle soluzioni di stoccaggio innovative, facilitandone al contempo l'integrazione nelle future strategie europee di ricerca, innovazione e sviluppo industriale.

7. Raccomandazioni politiche

Funded by the European Union under grant agreement 101058574. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Health and Digital Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

Ogni raccomandazione è strutturata attorno a quattro elementi: **contesto, evidenze generate da MAST3RBoost, impatto politico atteso e portatori di interesse target**, al fine di facilitarne la valutazione e l'integrazione nei processi legislativi e di programmazione europei in corso.

R1. Riconoscere il crioadsorbimento come un percorso distinto di stoccaggio dell'idrogeno

Contesto: La continua evoluzione del quadro politico europeo sull'idrogeno, guidata dalla Strategia europea per l'idrogeno, da REPowerEU e dalla prossima legislazione sui mercati e le infrastrutture dell'idrogeno, offre l'opportunità di ampliare il riconoscimento delle tecnologie emergenti di stoccaggio dell'idrogeno che completano le soluzioni convenzionali di idrogeno compresso e liquefatto.

In questo contesto, è necessario sviluppare criteri di valutazione specificamente adattati alle caratteristiche e alle condizioni operative di queste tecnologie emergenti.

Evidenze da MAST3RBoost: I risultati ottenuti durante MAST3RBoost dimostrano che i materiali ultraporosi sviluppati raggiungono capacità di stoccaggio dell'idrogeno fino al 9,8% in peso in condizioni criogeniche (100 bar e −196 °C).

Questi risultati evidenziano il potenziale delle tecnologie di stoccaggio basate sul crioadsorbimento per applicazioni specifiche, dimostrando al contempo che la loro valutazione dovrebbe tenere conto delle particolari condizioni operative e dei diversi livelli di maturità tecnologica rispetto ad altre soluzioni di stoccaggio dell'idrogeno.

Impatto politico atteso: Riconoscere il crioadsorbimento come un percorso distinto di stoccaggio dell'idrogeno consentirebbe lo sviluppo di criteri di valutazione più appropriati, sosterrebbe tabelle di marcia tecnologiche dedicate e contribuirebbe a diversificare l'ecosistema europeo dello stoccaggio dell'idrogeno, incoraggiando l'innovazione e riducendo i rischi associati alle tecnologie emergenti.

R2 Rafforzare il sostegno alle attività di dimostrazione su scala pilota e industriale

Contesto: Colmare il divario tra la ricerca di laboratorio e la diffusione industriale rimane una delle maggiori sfide per le tecnologie emergenti di stoccaggio dell'idrogeno.

Diverse iniziative europee hanno individuato la cosiddetta "valle della morte" tra la ricerca e l'adozione sul mercato come una delle principali barriere all'innovazione, in particolare per le tecnologie che richiedono infrastrutture specializzate, procedure di convalida complesse e investimenti di capitale significativi.

Evidenze da MAST3RBoost: Il progetto ha dimostrato con successo la scalabilità dei materiali ultraporosi dalla produzione di laboratorio alla fabbricazione su scala pilota, sia per i carboni attivi che per le strutture metallo-organiche (MOF).

Inoltre, l'esperienza acquisita durante lo sviluppo del dimostratore e l'integrazione dei sistemi ha mostrato che la convalida di tecnologie complesse richiede tempi aggiuntivi, infrastrutture specializzate e rigorose procedure di sicurezza che possono superare la durata delle convenzionali azioni di ricerca e innovazione.

Funded by the European Union under grant agreement 101058574. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Health and Digital Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

Questi risultati dimostrano chiaramente l'importanza di rafforzare le fasi di dimostrazione e convalida tecnologica per facilitare l'effettivo trasferimento dei risultati della ricerca verso applicazioni industriali.

Impatto politico atteso: Ampliare il sostegno alle attività di dimostrazione e convalida ridurrebbe i rischi tecnologici, accelererebbe il trasferimento di conoscenze dalla ricerca all'industria e faciliterebbe una più rapida adozione sul mercato delle tecnologie innovative di stoccaggio dell'idrogeno in tutta Europa.

R3. Rafforzare le infrastrutture europee di prova per le tecnologie avanzate di stoccaggio dell'idrogeno

Contesto: L'accesso a infrastrutture di prova specializzate è essenziale per accelerare lo sviluppo e la convalida delle tecnologie avanzate di stoccaggio dell'idrogeno.

Tuttavia, l'attuale capacità europea di eseguire prove in condizioni criogeniche combinate, alte pressioni e valutazione integrata dei sistemi rimane limitata, rappresentando una barriera significativa per la qualificazione e la certificazione delle soluzioni emergenti di stoccaggio dell'idrogeno.

Evidenze da MAST3RBoost: Il progetto ha dimostrato chiaramente che la disponibilità limitata di strutture di prova in grado di operare in condizioni combinate di alta pressione e criogenia ha limitato diverse attività di convalida e caratterizzazione.

Allo stesso modo, l'integrazione e la messa in servizio del dimostratore hanno evidenziato la complessità della convalida di tecnologie emergenti che richiedono infrastrutture altamente specializzate e procedure di sicurezza dedicate.

Impatto politico atteso: Rafforzare le infrastrutture europee di prova per l'idrogeno accelererebbe la qualificazione e la certificazione delle nuove tecnologie di stoccaggio dell'idrogeno, ridurrebbe i tempi di convalida, favorirebbe la collaborazione tra organizzazioni di ricerca e industria e rafforzerebbe la sovranità tecnologica europea in un settore strategico per la transizione energetica.

> *Tali infrastrutture faciliterebbero inoltre la generazione di dati sperimentali armonizzati, sostenendo le future attività di normazione e lo sviluppo di metodologie comuni per valutare le tecnologie emergenti di stoccaggio dell'idrogeno.*

R4. Promuovere l'uso dell'intelligenza artificiale e dell'apprendimento automatico per accelerare lo sviluppo di materiali avanzati

Contesto: La Strategia digitale europea, la Strategia europea per i dati e l'Artificial Intelligence Act riconoscono il potenziale trasformativo dell'intelligenza artificiale nell'accelerare la ricerca, l'innovazione e la competitività industriale. Nel campo dei materiali avanzati, l'accesso a dati di alta qualità e lo sviluppo di modelli predittivi sono fattori abilitanti chiave per ridurre i tempi e i costi associati alla scoperta e all'ottimizzazione di nuovi materiali.

Evidenze da MAST3RBoost: Durante il progetto è stata sviluppata una banca dati completa di materiali ultraporosi caratterizzati, e sono state applicate tecniche di apprendimento automatico (ML) e di apprendimento attivo per supportare la selezione e l'ottimizzazione dei materiali di stoccaggio dell'idrogeno.

Funded by the European Union under grant agreement 101058574. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Health and Digital Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

L'esperienza acquisita ha dimostrato il notevole potenziale di questi strumenti per accelerare la ricerca, evidenziando al contempo la necessità di set di dati più ampi, diversificati e interoperabili per migliorare le prestazioni predittive e la generalizzabilità dei modelli sviluppati.

Impatto politico atteso: Rafforzare le infrastrutture di dati europee e promuovere l'applicazione di tecniche di apprendimento automatico accelererà la scoperta di materiali avanzati, ottimizzerà i flussi di lavoro sperimentali e ridurrà sia i tempi che i costi di sviluppo per le tecnologie di stoccaggio dell'idrogeno.

Inoltre, queste misure faciliteranno il riutilizzo delle conoscenze generate dai progetti di ricerca europei e rafforzeranno la competitività scientifica e industriale dell'Europa.

R5. Integrare le attività di normazione fin dalle prime fasi dello sviluppo tecnologico

Contesto: Le tecnologie emergenti di stoccaggio dell'idrogeno si stanno evolvendo più rapidamente rispetto agli attuali processi di normazione e certificazione. In particolare, le soluzioni basate su materiali avanzati e fabbricazione additiva richiedono che i quadri normativi esistenti evolvano parallelamente per facilitare la futura qualificazione, certificazione e adozione sul mercato.

Evidenze da MAST3RBoost: Durante il progetto è stato progettato e fabbricato un serbatoio leggero per lo stoccaggio dell'idrogeno utilizzando la tecnologia Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), integrata da rivestimenti interni sviluppati specificamente per applicazioni criogeniche.

Un programma completo di prove strutturali, non distruttive e di pressione ha generato preziose evidenze tecniche sul comportamento e sulle prestazioni di questi componenti innovativi.

> *L'esperienza acquisita nel corso del progetto ha dimostrato chiaramente l'importanza di ampliare le evidenze sperimentali disponibili e di rafforzare le attività di convalida e qualificazione tecnologica per facilitare la futura integrazione di queste soluzioni nei processi europei di normazione.*

Impatto politico atteso: L'integrazione delle attività di normazione in una fase iniziale ridurrà i tempi necessari per la qualificazione e la certificazione delle tecnologie emergenti di stoccaggio dell'idrogeno, ne faciliterà l'adozione sul mercato e rafforzerà la competitività dell'industria europea nello sviluppo di soluzioni avanzate di stoccaggio dell'idrogeno.

R6. Promuovere l'uso di materie prime circolari per materiali avanzati di stoccaggio dell'idrogeno

Contesto: L'Unione Europea sta promuovendo un modello industriale più sostenibile e resiliente attraverso iniziative come il Piano d'Azione per l'Economia Circolare, il Critical Raw Materials Act e il Net-Zero Industry Act.

Queste iniziative mirano a ridurre la dipendenza dalle materie prime vergini e importate, a rafforzare l'autonomia strategica dell'Europa e a incoraggiare l'uso di risorse secondarie nei settori industriali chiave.

Funded by the European Union under grant agreement 101058574. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Health and Digital Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

Evidenze da MAST3RBoost: I risultati ottenuti nell'ambito di MAST3RBoost dimostrano la fattibilità della produzione di materiali avanzati di stoccaggio dell'idrogeno a partire da un'ampia gamma di flussi di rifiuti, tra cui residui agricoli (come gusci di pistacchio e segatura di eucalipto), rifiuti agroalimentari, imballaggi in alluminio, bottiglie di PET e drenaggi acidi di miniera.

Questi materiali hanno raggiunto prestazioni competitive di stoccaggio dell'idrogeno, dimostrando che la valorizzazione dei rifiuti può contribuire contemporaneamente all'economia circolare e allo sviluppo di tecnologie energetiche avanzate.

Impatto politico atteso: Incoraggiare l'uso di materie prime circolari ridurrà la dipendenza dell'Europa dalle materie prime vergini e importate, rafforzerà l'autonomia strategica nei materiali avanzati, diminuirà l'impronta ambientale associata alla produzione dei materiali e accelererà la transizione verso un'economia più circolare, competitiva e climaticamente neutra.

R7. Promuovere spazi di dati aperti europei per i materiali avanzati

Contesto: La disponibilità di dati aperti, interoperabili e riutilizzabili è uno dei pilastri della politica europea di ricerca e innovazione.

Tuttavia, gran parte delle informazioni generate dai progetti di ricerca finanziati con fondi pubblici rimane frammentata tra i singoli consorzi, limitando il riutilizzo delle conoscenze e riducendo il potenziale di strumenti digitali come l'apprendimento automatico per accelerare lo sviluppo di nuovi materiali.

Evidenze da MAST3RBoost: Durante il progetto sono stati generati preziosi set di dati sui materiali ultraporosi di stoccaggio dell'idrogeno e sul comportamento di componenti fabbricati mediante tecnologie avanzate di fabbricazione additiva (WAAM).

Questi set di dati hanno consentito lo sviluppo di modelli di apprendimento automatico a supporto della selezione e dell'ottimizzazione dei materiali, dimostrando l'importanza di una gestione strutturata dei dati per accelerare la ricerca e migliorare le capacità predittive.

Impatto politico atteso: La creazione di spazi di dati europei interoperabili faciliterebbe il riutilizzo delle conoscenze generate dalla ricerca finanziata con fondi pubblici, accelererebbe lo sviluppo di materiali avanzati mediante tecniche di apprendimento automatico, ridurrebbe la duplicazione degli sforzi sperimentali e rafforzerebbe la leadership scientifica e industriale europea nei materiali avanzati e nelle tecnologie dell'idrogeno.

8. Impatto socioeconomico

Al di là dei suoi risultati scientifici e tecnologici, MAST3RBoost genera significativi benefici economici, industriali, ambientali e sociali. L'integrazione di materiali avanzati, principi dell'economia circolare, processi di fabbricazione innovativi e tecnologie digitali illustra il tipo di innovazione necessaria per rafforzare la competitività dell'Europa, accelerando al contempo la transizione verso un sistema energetico più sostenibile e resiliente.

- **Valorizzazione dei rifiuti:** MAST3RBoost ha dimostrato la fattibilità della conversione di rifiuti agricoli, agroalimentari, industriali e minerari in materie prime ad alto valore per la produzione di materiali avanzati di stoccaggio dell'idrogeno. Questo approccio contribuisce alla riduzione dei

Funded by the European Union under grant agreement 101058574. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Health and Digital Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

rifiuti, aumenta il valore economico dei flussi di rifiuti sottoutilizzati e promuove modelli di produzione industriale più circolari ed efficienti nell'uso delle risorse.

- **Riduzione della dipendenza dalle materie prime vergini:** L'uso di risorse secondarie come precursori per materiali funzionali riduce la dipendenza dalle materie prime vergini e importate, rafforza la resilienza delle catene di approvvigionamento europee e riduce l'esposizione dell'industria alle fluttuazioni dei mercati globali delle materie prime.
- **Maggiore competitività industriale:** Il progetto ha dimostrato con successo la scalabilità di diversi materiali ultraporosi dal laboratorio alla scala pilota, generando conoscenze e capacità industriali in grado di sostenere lo sviluppo di nuove catene del valore europee nelle tecnologie di stoccaggio dell'idrogeno. Questi progressi facilitano il trasferimento tecnologico, riducono i rischi associati all'adozione di soluzioni innovative e rafforzano la posizione competitiva dell'industria europea.
- **Sostegno all'autonomia strategica europea:** Lo sviluppo di tecnologie di stoccaggio dell'idrogeno basate su risorse, competenze e capacità industriali europee contribuisce a rafforzare l'autonomia strategica dell'UE in un settore essenziale per la transizione energetica. La disponibilità di soluzioni tecnologiche prodotte in Europa riduce la dipendenza dai fornitori esterni, favorendo al contempo catene di approvvigionamento più resilienti e diversificate.
- **Contributo agli ecosistemi regionali di innovazione:** La collaborazione tra organizzazioni di ricerca, partner industriali e centri tecnologici ha rafforzato la capacità di innovazione in diverse regioni europee, promuovendo la generazione di conoscenze specialistiche e sostenendo la creazione di posti di lavoro altamente qualificati nei settori dei materiali avanzati, della fabbricazione additiva, delle tecnologie digitali e della valorizzazione dei rifiuti.
- **Contributo alla transizione energetica:** Le tecnologie sviluppate nell'ambito di MAST3RBoost ampliano il portafoglio di soluzioni di stoccaggio dell'idrogeno disponibili per sostenere la diffusione di sistemi energetici più flessibili e sostenibili. Sebbene siano ancora necessarie ulteriori convalide e una maggiore maturazione tecnologica, il progetto ha stabilito una solida base per le future applicazioni industriali e per lo sviluppo di politiche europee a sostegno delle tecnologie dell'idrogeno pulito.

Nel complesso, i risultati dimostrano che gli investimenti in ricerca e innovazione sui materiali avanzati per lo stoccaggio dell'idrogeno generano benefici che vanno ben oltre l'eccellenza scientifica, contribuendo alla crescita economica, alla competitività industriale, alla sostenibilità ambientale e all'autonomia strategica europea.

Questi impatti rafforzano l'importanza di continuare a sostenere iniziative di ricerca collaborativa in grado di colmare il divario tra la scoperta scientifica e l'attuazione industriale.

9. Lezioni apprese

- **Scalabilità:** Il passaggio dalla produzione su scala di laboratorio alla fabbricazione su scala pilota ha introdotto variazioni impreviste nella porosità e nelle prestazioni dei materiali. Anticipare cicli iterativi di ottimizzazione per i processi di densificazione e granulazione è pertanto essenziale per evitare di compromettere i tempi del progetto e la scalabilità industriale.

Funded by the European Union under grant agreement 101058574. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Health and Digital Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

- **Intelligenza artificiale:** L'efficacia dei modelli di apprendimento automatico dipende direttamente dal volume, dalla qualità e dalla diversità dei dati di caratterizzazione disponibili. Sebbene il set di dati generato durante MAST3RBoost si sia rivelato prezioso per lo sviluppo di modelli predittivi, set di dati comprendenti circa 50 materiali caratterizzati restano insufficienti per sfruttare appieno il potenziale dell'intelligenza artificiale per la scoperta accelerata di materiali.
- **Infrastrutture di prova:** La disponibilità limitata di strutture europee in grado di combinare prove di idrogeno ad alta pressione con condizioni operative criogeniche ha richiesto significativi adattamenti dei piani sperimentali del progetto. Questa esperienza evidenzia una lacuna strutturale che va ben oltre MAST3RBoost e riguarda il più ampio ecosistema europeo della ricerca sull'idrogeno.
- **Rivestimenti interni:** Una modifica progettuale del serbatoio di stoccaggio dell'idrogeno, da una configurazione a due pezzi a una struttura monolitica, ha richiesto una completa riprogettazione della strategia di rivestimento interno. Lungi dal rappresentare una battuta d'arresto, questa sfida ha portato allo sviluppo di un processo di rivestimento "out-of-the-bath" più avanzato, con un forte potenziale di trasferimento tecnologico ad altri settori industriali.
- **Convalida industriale:** I problemi iniziali di perdite e i difetti di saldatura TIG individuati durante la fase di convalida del dimostratore sono stati risolti con successo attraverso la riprogettazione dei giunti di tenuta e di sezioni selezionate dello scambiatore di calore. Questa esperienza sottolinea l'importanza di prevedere tempo sufficiente per i cicli di riprogettazione e ottimizzazione durante la convalida di componenti fabbricati in modo additivo.

10. Conclusioni e messaggi chiave

1. MAST3RBoost dimostra il potenziale dei materiali avanzati derivati da flussi di rifiuti per applicazioni di stoccaggio dell'idrogeno, fornendo chiare evidenze che l'economia circolare può sostenere lo sviluppo di soluzioni energetiche di alto valore riducendo al contempo la dipendenza dalle materie prime vergini.
2. I materiali sviluppati hanno raggiunto capacità di stoccaggio gravimetrico dell'idrogeno superiori agli obiettivi di riferimento del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti (DOE) quando valutati in condizioni criogeniche. Le loro applicazioni più adatte sono pertanto attese nel trasporto pesante, nel trasporto marittimo, nei sistemi ferroviari e nello stoccaggio industriale stazionario, piuttosto che nei veicoli leggeri a temperatura ambiente.
3. Lo sviluppo del dimostratore leggero di stoccaggio dell'idrogeno utilizzando la tecnologia **Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)**, insieme alle prove strutturali e di pressione condotte durante il progetto, ha generato preziose conoscenze tecniche a sostegno delle future attività di qualificazione, convalida e normazione per le tecnologie avanzate di stoccaggio dell'idrogeno.
4. L'esperienza acquisita nel corso di MAST3RBoost ha individuato diverse aree prioritarie che richiedono ulteriori azioni, tra cui il rafforzamento delle infrastrutture europee di prova, lo sviluppo di spazi di dati europei per applicazioni di apprendimento automatico e l'integrazione delle attività di normazione fin dalle prime fasi dello sviluppo tecnologico. Queste priorità potrebbero essere affrontate efficacemente attraverso strumenti europei esistenti come **Horizon Europe**, il **Clean Hydrogen Partnership** e le organizzazioni europee di normazione (**CEN** e **CENELEC**).

Funded by the European Union under grant agreement 101058574. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Health and Digital Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

5. Il prossimo passo verso l'accelerazione della diffusione di queste tecnologie consiste nel rafforzare la dimostrazione, la convalida tecnologica, la normazione e la diffusione industriale attraverso meccanismi di finanziamento dedicati, quadri normativi di sostegno e una collaborazione continua tra organizzazioni di ricerca, industria e autorità pubbliche.

*Nel complesso, **MAST3RBoost** fornisce alla Commissione Europea una solida base di evidenze scientifiche e tecniche a sostegno di un percorso alternativo e complementare di stoccaggio dell'idrogeno, accanto alle soluzioni attualmente riconosciute nel quadro normativo e politico europeo.*

L'esperienza acquisita durante il progetto dimostra che queste tecnologie hanno un potenziale significativo per contribuire agli obiettivi europei di transizione energetica e competitività industriale. Tuttavia, la loro diffusione su larga scala richiederà investimenti continui in attività di dimostrazione, convalida tecnologica, normazione e sviluppo di infrastrutture specializzate in grado di sostenere la loro transizione verso applicazioni commerciali e industriali.

Le raccomandazioni politiche presentate in questo documento forniscono una tabella di marcia pratica per sostenere questo processo, rafforzando il ruolo della ricerca e dell'innovazione europee nello sviluppo di tecnologie di stoccaggio dell'idrogeno più sicure, sostenibili e competitive.

Funded by the European Union under grant agreement 101058574. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Health and Digital Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.