UNIVERSITÀ
DI PAVIA

Dipartimento di Scienze Politiche

Corso di Laurea Magistrale in Sviluppo Economico e Relazioni Internazionali

---

Decarbonizzazione industriale e innovazione di processo nei settori hard-to-abate: il caso Unicalce

Relatrice: Chiar.ma Prof.ssa Roberta Rabellotti

Correlatore: Chiar.mo Prof. Emanuele Forlani

Tesi di Laurea
di Carlo Gnecchi

Matr. n. 552147

Anno Accademico 2026-2027

Dietro ogni impresa di successo
c'è qualcuno che ha preso
una decisione coraggiosa.

(Peter Ferdinand Drucker)

Abstract

Questa tesi analizza il tema della decarbonizzazione nell'industria della calce, un settore particolarmente difficile da rendere sostenibile a causa delle emissioni legate direttamente al processo produttivo. Attraverso il caso di Unicalce, il lavoro si concentra sulle strategie adottate dall'azienda per ridurre il proprio impatto ambientale, considerando in particolare l'efficienza energetica, l'utilizzo di combustibili alternativi, l'innovazione dei processi e le prospettive legate alla cattura della CO_2. L'analisi mostra che sono stati compiuti progressi concreti, ma evidenzia anche come le innovazioni attualmente disponibili non siano sufficienti da sole a eliminare le emissioni di processo. Emergono inoltre importanti ostacoli economici, tecnologici e normativi. Il caso Unicalce mostra quindi come la decarbonizzazione sia un percorso graduale, nel quale innovazione, investimenti, politiche pubbliche e collaborazione tra imprese e territorio devono procedere insieme.

Sommario

Introduzione *5*

Capitolo I - La transizione verde e la sfida della decarbonizzazione industriale *8*

1.1 Le politiche europee e nazionali per la neutralità climatica **10**

1.2 I settori "hard to abate": caratteristiche, criticità e potenziale di innovazione **12**

1.2.1 I modelli di politica e incentivi industriali per le industrie "hard to abate" 14

1.3 Ruolo della tecnologia e dell'innovazione di processo nella riduzione delle emissioni **21**

Capitolo II – La sostenibilità industriale nei settori "hard to abate" *26*

2.1 Dimensioni della sostenibilità nei settori "hard to abate" **27**

2.2 Le principali traiettorie tecnologiche per la decarbonizzazione **29**

2.2.1 Efficienza energetica e digitalizzazione 31

2.2.2 Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS) 33

2.3 Le barriere all'innovazione nei settori "hard to abate" **35**

2.4 L'industria della calce: caratteristiche e specificità **38**

2.5 Verso il caso Unicalce **40**

Capitolo III – Metodologia della ricerca *42*

3.1 Obiettivi empirici e domande di ricerca **42**

3.2 Raccolta dati **43**

3.3 Criteri di analisi qualitativa e quantitativa **44**

3.4 Limiti della ricerca **45**

Capitolo IV – Il settore della calce come industria "hard to abate" *46*

4.1 Struttura e dimensione del settore in Italia **47**

4.2 Processi produttivi e principali fonti di emissione di CO_2 ..... **50**

4.3 Le principali tecnologie di mitigazione: cattura e riuso della CO_2, combustibili alternativi, efficienza energetica **53**

Capitolo V – Il caso Unicalce *57*

5.1 Profilo aziendale: storia, struttura e posizionamento nel settore **57**

5.2 Profilo tecnologico di Unicalce **63**

5.2.1 Uso di combustibili alternativi e ricorso agli SRF 65

5.2.2 Fonti energetiche alternative e ottimizzazione dei forni 68
5.2.3 Gestione dell'energia e tecnologie pulite 71
5.2.4 Certificazioni ed EU ETS 72

5.3 Rendicontazione non finanziaria ESG 76
5.3.1 Obiettivi Sociali e di Governance 79

5.4 Investimenti in R&D e partnership con enti di ricerca e imprese del territorio 82

5.5 Risultati e limiti delle strategie adottate 88

Capitolo VI – Discussione dei risultati 93

6.1 Impatto delle innovazioni sulla riduzione delle emissioni di CO_2 93

6.2 Le barriere economiche, tecnologiche e normative alla decarbonizzazione 94

6.3 Opportunità future: transizione verde e vantaggio competitivo 95

Conclusioni e prospettive 97

Bibliografia 100

Sitografia 104

Ringraziamenti 106

Introduzione

Nel corso degli ultimi anni, la transizione verso un'economia a basse emissioni di carbonio è stata una priorità strategica per governi, imprese e società in generale. La crescente consapevolezza degli effetti del cambiamento climatico e della necessità di ridurre le emissioni di gas serra ha spinto l'Unione Europea a creare un quadro politico e regolatorio ambizioso. Come risultato di ciò, sono stati sviluppati il *Green Deal* europeo e il pacchetto *Fit for 55*, che mirano a raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. Come sottolinea la Commissione Europea (2019), la transizione verde non rappresenta soltanto una sfida ambientale, ma anche "una nuova strategia di crescita per trasformare l'Unione in un'economia moderna, efficiente sotto il profilo delle risorse e competitiva" (*European Commission [EC]*, 2019)[1].

È necessario rivedere a fondo i nostri modelli di produzione e di consumo a causa di questa trasformazione. Ciò riguarda in particolare le industrie "*hard to abate"*, cioè quelle in cui ridurre le emissioni di CO_2 è una sfida difficile a causa di vincoli tecnici e processi termochimici che li compongono. Secondo *l'International Energy Agency* (IEA, 2023), questi settori — tra cui acciaio, cemento, fertilizzanti e calce — sono responsabili di oltre il 25% delle emissioni globali di CO_2 industriale, e la loro decarbonizzazione impone "soluzioni tecnologiche radicali e nuovi modelli di business collaborativi" (*International Energy Agency [IEA]*, 2023)[2].

Tra questi, la produzione di calce è un esempio significativo: un processo essenziale per molte industrie, come la siderurgia, le costruzioni, la chimica e l'agricoltura, ma che comporta naturalmente elevate emissioni: la calcinazione del carbonato di calcio ($CaCO_3$) produce il rilascio di CO_2 come sottoprodotto chimico e richiede l'uso di combustibili fossili per il

riscaldamento dei forni. Secondo la *European Lime Association* (EuLA, 2022)**,** "oltre il 70% delle emissioni del settore deriva dal processo stesso di calcinazione, e solo una minor parte è legata all'uso di combustibili fossili" (*European Lime Association* [EuLA], 2022)[3].

Di conseguenza, per ottenere una transizione verde nel settore della calce sono possibili varie strategie: miglioramento dell'efficienza energetica, l'utilizzo di combustibili alternativi (*Solid Recovered Fuels*, SRF), un aumento della percentuale di energia rinnovabile e l'adozione di tecnologie sofisticate per la cattura, l'utilizzo e lo stoccaggio della CO_2 (CCUS).

Tuttavia, come sottolinea Freeman, "*l'innovazione tecnologica non è mai un processo puramente tecnico, ma un fenomeno sociale e istituzionale*" (Freeman, 1992:90)[4], e la diffusione delle tecnologie *low-carbon* è fortemente influenzata dall'ambiente in cui le imprese operano, in particolare dalle politiche pubbliche, dalle normative in vigore e dalle condizioni di mercato.

In questo contesto, questa tesi mira a esaminare come il mercato della calce sta affrontando il problema della decarbonizzazione, prendendo come esempio la principale azienda italiana del settore, Unicalce. L'obiettivo è capire in che modo le nuove tecnologie e i processi possono davvero aiutare a ridurre le emissioni di CO_2, e quali ostacoli - tecnici, economici o legati alle regole - rendono questo percorso più difficile.

Come osserva Porter, "l'innovazione ambientale può rappresentare una fonte di vantaggio competitivo, anziché un costo" (Porter, 1995)[5], quando è integrata nella strategia d'impresa e sostenuta da politiche pubbliche coerenti. Secondo questo punto di vista, la transizione verde può essere vista sia come un ostacolo che come un'opportunità per il rinnovamento industriale e tecnologico. Secondo Mazzucato, "le missioni pubbliche orientate alla sostenibilità possono guidare e accelerare l'innovazione privata" (Mazzuccato, 2013)[6].

L'approccio empirico di tipo qualitativo utilizzato in questo studio è basato

sul metodo del caso studio (Yin, 2018)[7]. Questo approccio consente di esaminare in dettaglio come un'impresa gestisce e sviluppa processi di innovazione sostenibile. La posizione di Unicalce nel percorso di transizione verso la neutralità climatica è valutata utilizzando fonti secondarie come documenti aziendali, report di sostenibilità, dati settoriali e letteratura scientifica.

La tesi è composta da sei capitoli. Il primo e il secondo capitolo forniscono una base teorica per la transizione verde e le politiche di innovazione sostenibile. Si concentrano sui settori "*hard to abate"* sul ruolo delle istituzioni nel sostenere la decarbonizzazione industriale.

L'analisi empirica è presentata nel terzo, quarto e quinto capitolo. Prima viene presentato il settore della calce e le tecnologie più recenti per ridurre le emissioni. Successivamente, il focus è su Unicalce e sulle sue strategie di efficienza energetica, sull'utilizzo di combustibili alternativi (SRF) e sui progetti relativi alla cattura e al riutilizzo della CO_2.

Infine, il sesto capitolo affronta i risultati e le implicazioni del caso, sottolineando i fattori che sostengono o ostacolano l'innovazione verde e suggerendo idee per la transizione del settore.

In conclusione, l'obiettivo di questa tesi è contribuire alla discussione scientifica e politica sui modi per decarbonizzare i settori industriali ad alta intensità energetica. L'obiettivo è dimostrare come l'innovazione può essere essenziale per trovare un equilibrio tra competitività economica e sostenibilità ambientale.

Come afferma la International Energy Agency (IEA, 2023), "la decarbonizzazione dell'industria pesante è la nuova frontiera dell'innovazione climatica" (*International Energy Agency [IEA]*, 2023)[8], e il problema non riguarda solo la nuova tecnologia, ma anche la capacità delle imprese di modificare le loro tattiche per crescere in modo più sostenibile e resiliente.

Capitolo I - La transizione verde e la sfida della decarbonizzazione industriale

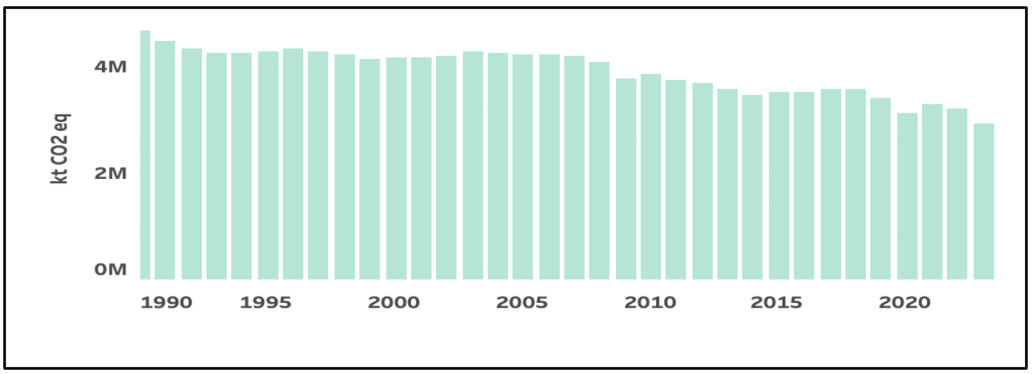
L'obiettivo dell'Unione Europea (UE) è raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. Per raggiungere questo obiettivo, l'UE dovrà ridurre significativamente le emissioni di gas serra (GHG) accelerando in tutte le aree economiche. Come sottolinea la *International Energy Agency* (IEA, 2022), "la maggior parte dei processi industriali attualmente in uso non è in linea con una traiettoria a basse emissioni di carbonio, il che rende il settore industriale fondamentale per la decarbonizzazione" (*International Energy Agency* [IEA], 2022)[9].

L'Unione Europea ha implementato politiche come il *Green Deal*, il *Fit for 55* e il *Clean Industrial Deal* per facilitare questa transizione. Allo stesso tempo, l'Unione mira a rafforzare la produzione industriale per migliorare la resilienza, l'autonomia e la competitività in tutto il mondo.

Il Rapporto Draghi avverte che "alti costi energetici, complessità normativa e innovazione rallentata rischiano di erodere la competitività europea" (*European Commission* [EC], 2024)[10]. Pertanto, l'aumento della capacità produttiva, il sostegno all'innovazione e la garanzia della filiera sono gli obiettivi delle politiche attualmente in atto. Il *Clean Industrial Deal* indica che la decarbonizzazione è correlata alla competitività e considera la sostenibilità un fattore economico.

È interessante notare come solo il settore industriale dei 27 Stati membri dell'UE ha emesso 600 milioni di tonnellate di CO_2 nel 2021, costituendo circa il 20% delle emissioni totali dell'UE di gas serra; queste emissioni sono concentrate principalmente nei seguenti settori: ferro e acciaio (22%), chimica (21 %) e minerali non metallici, come calce e vetro (32 %) (*European Enviroment Agency* [EEA], 2025)[11].

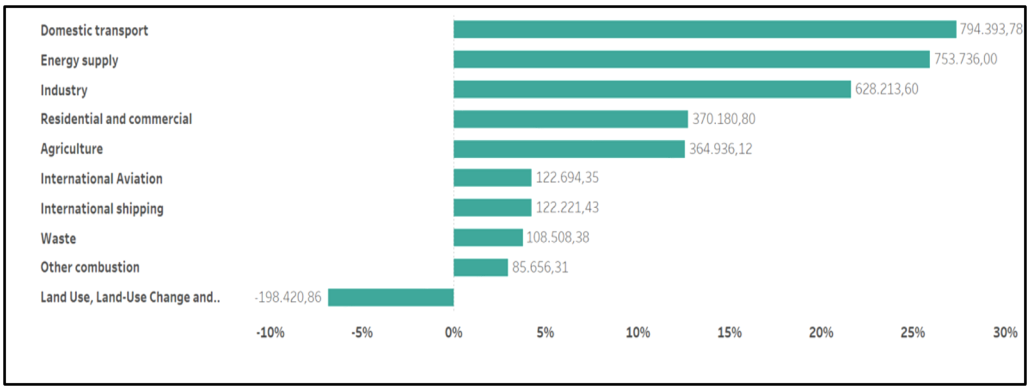
Grafico 1.1: Emissioni di gas serra (in kilotonnellate di CO2 equivalente) nei 27 paesi dell'Unione Europea dal 1990 al 2023



Fonte EEA greenhouse gases - data viewer

Il grafico 1.1 illustra una diminuzione generale delle emissioni di gas serra nell'Unione Europea durante il periodo compreso tra il 1990 e il 2023. Dopo un incremento significativo nei primi anni Novanta, le emissioni hanno subito una diminuzione graduale, con un'ulteriore riduzione più pronunciata a partire dalla fine degli anni Duemila. Tale andamento riflette sia fattori congiunturali sia l'impatto delle politiche climatiche europee e dei processi di transizione energetica.

Grafico 1.2: Quanto ciascun settore economico contribuisce alle emissioni totali dell'UE nel 2023



Fonte: EEA greenhouse gases - data viewer

Il grafico 1.2 illustra che le emissioni dell'Unione Europea nel 2023 sono prevalentemente attribuibili ai settori del trasporto domestico, della

produzione di energia e dell'industria. I settori che contribuiscono maggiormente sono il residenziale-commerciale e l'agricolo, seguiti da aviazione, navigazione e rifiuti. Il settore LULUCF mostra un valore negativo, sottolineando una funzione di assorbimento netto di CO_2.

A causa della loro elevata intensità energetica, della loro dipendenza dai combustibili fossili come materie prime e per l'utilizzo di calore ad alta temperatura, nonché della scarsità di alternative a basse emissioni, questi settori sono considerati "*hard to abate*" o "difficili da decarbonizzare".

Sebbene la riduzione dei livelli di produzione possa aiutare a ridurre le emissioni di gas serra, l'elettrificazione continua a essere una strategia chiave per la decarbonizzazione di settori industriali energivori. Tuttavia, l'elettricità non può sostituire completamente i combustibili fossili come materie prime, come nella riduzione del minerale di ferro o nella produzione di materie plastiche. Per questo motivo, l'idrogeno verde è un'alternativa a basse emissioni, ma meno efficiente.

1.1 Le politiche europee e nazionali per la neutralità climatica

L'allarme sul cambiamento climatico è più forte che mai. Tutte le nazioni stanno assistendo a una rapida *escalation* della crisi ecologica e dell'emergenza climatica, con temperature record ed eventi meteorologici estremi collegati ai cambiamenti climatici. Secondo il bilancio globale della 28ª conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (28ª conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici [COP 28], 2023):

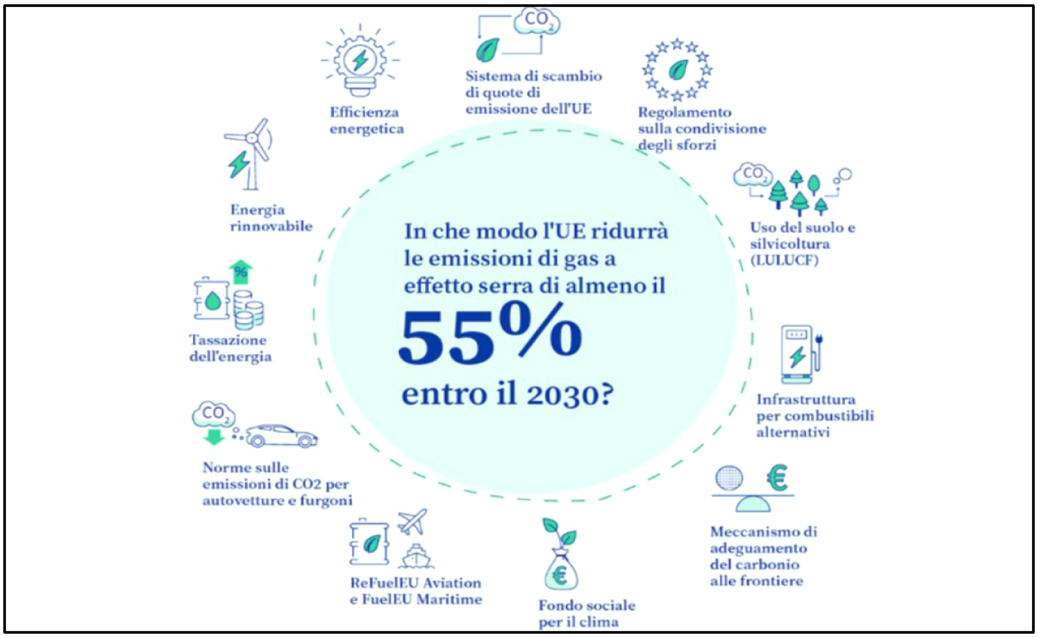
"Gli sforzi globali non sono sufficienti per raggiungere l'obiettivo dell'Accordo di Parigi di limitare l'aumento della temperatura globale a 1,5 °C. Pertanto, le nazioni devono compiere progressi significativi entro il 2030, intensificando le politiche di mitigazione e adattamento, per fermare il degrado climatico e prevenire conseguenze ambientali e sociali irreversibili."[12]

L'Europa non fa eccezione. In questo momento, l'Unione Europea (UE) sta attraversando un momento decisivo per propria politica energetica. Il suo obiettivo è trasformare il continente in un continente climaticamente neutro entro il 2050, come delineato nel *Green Deal* europeo (European Commission [EC], 2019)[13]. Questa transizione è guidata dalla necessità di raggiungere obiettivi climatici ambiziosi che coinvolgono contemporaneamente un contesto geopolitico complesso. Per raggiungere tali traguardi ambiziosi, è necessaria una comprensione approfondita del futuro panorama energetico europeo e una pianificazione accurata di politiche e strategie.

In risposta, la Commissione Europea ha sviluppato piani e strategie dettagliati per soddisfare le esigenze energetiche immediate e a lungo termine. Il piano *REPowerEU* è uno di questi, che è stato lanciato per aumentare l'indipendenza energetica dell'UE e accelerare la transizione verso le energie rinnovabili a causa delle tensioni geopolitiche causate dall'invasione russa dell'Ucraina (*European Commission* [EC], 2022)[14]. La Figura 1.1 (Fig. a pag. 12) rappresenta il pacchetto *Fit for 55*, che mira a ridurre le emissioni nette di gas serra (GHG) di almeno il 55% entro il 2030 basandosi su un insieme integrato di misure che promuovono efficienza energetica, fonti rinnovabili, regolazione delle emissioni e strumenti economici e sociali. Da ultimo il pacchetto Energia Pulita per Tutti gli Europei (*Clean Energy for All Europeans*), che richiede a tutti gli Stati membri dell'UE di redigere Piani Nazionali per l'Energia e il Clima (NECP) decennali (*European Commission* [EC], 2019)[15].
La complessità delle transizioni energetiche è resa particolarmente difficile dalle incertezze (ad esempio geopolitiche o relative all'adozione e alle nuove scoperte tecnologiche). Le tecniche di scenario forniscono un quadro strategico che facilita l'analisi e il sostegno alle decisioni in situazioni di profonda incertezza per affrontare tali ostacoli.

Gli scenari tengono conto di una varietà di fattori mentre studiano i vari percorsi di transizione energetica. Questi fattori includono i progressi tecnologici, le tendenze sociali e le dinamiche politiche. Da tempo la Commissione Europea ha utilizzato l'analisi di scenario per valutare i possibili effetti di una varietà di azioni mentre elabora nuovi obiettivi energetici e climatici, modifica direttive e introduce nuove politiche.

Figura 1.1: In che modo l'UE ridurrà le emissioni di gas serra entro il 2030



Fonte: RES Clima fit for 55

1.2 I settori "hard to abate": caratteristiche, criticità e potenziale di innovazione

Raggiungere l'obiettivo dell'Accordo di Parigi, mantenere la temperatura media globale ben al di sotto dei 1,5 °C, richiede tagli significativi alle emissioni di gas serra (GHG). La maggior parte delle emissioni proviene da fonti industriali ad alta intensità energetica, come gli impianti di cemento e gli stabilimenti siderurgici, anche se la produzione di energia elettrica è considerata l'area più importante per gli interventi di

mitigazione (*Intergovernamental Panel on Climate Change [IPCC],* 2014)[16]. In realtà, la produzione di CO_2 in numerosi processi industriali deriva sia dalla combustione dei combustibili che da fonti non legate alla combustione, ovvero dalle reazioni chimiche che si verificano durante il processo produttivo.

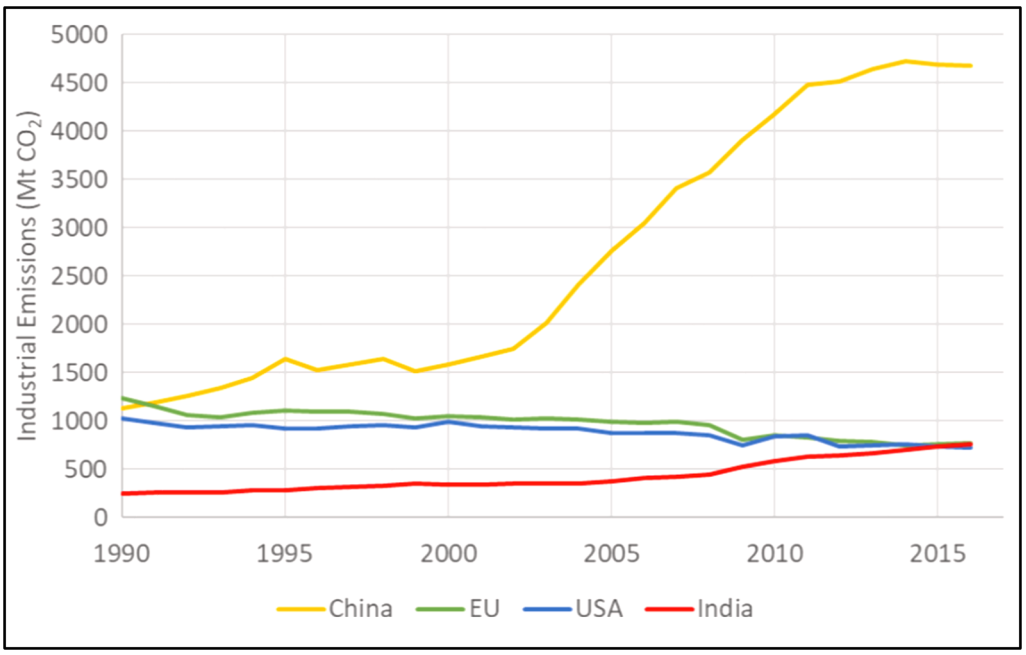
Diversi fonti di dati forniscono diverse stime della quota di emissioni industriali sul totale delle emissioni antropiche globali, a seconda della copertura settoriale e del tipo di gas serra considerato. Ad esempio, secondo Rissman, "nel 2014 le emissioni di gas serra causate dall'uomo in tutto il mondo rappresentavano il 33% del totale" (Rissman, 2020)[17].

Secondo il *database* dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (*International Energy Agency* [IEA], 2021)[18], nello stesso anno le emissioni industriali (combustione e non combustione) hanno totalizzato circa 11.000 milioni di tonnellate di CO_2 ($MtCO_2$), che rappresentano circa il 31% di tutte le emissioni globali di CO_2, con notevoli variazioni nelle regioni.

Un aspetto che colpisce è che le emissioni industriali in Cina costituiscono circa il 45% delle emissioni fossili totali, mentre gli Stati Uniti sono responsabili di circa il 14%. Solo i settori industriali pesanti ad alta intensità energetica, come il chimico, il cemento, il ferro e l'acciaio, rappresentano circa il 20% delle emissioni di CO_2 in tutto il mondo.

La domanda di prodotti industriali continuerà a crescere, il che aumenterà la pressione sulle emissioni di gas serra del settore. Ma ci sono pochi modi per ridurre le emissioni nei processi industriali. I miglioramenti di efficienza energetica possono contribuire a ridurle, ma solo in misura limitata. Sebbene non ridurrà le emissioni di processo, una transizione verso *input* energetici a basse emissioni di carbonio - come l'elettrificazione o l'uso di idrogeno come supporto energetico – può ridurre le emissioni legate al consumo di energia. Le emissioni industriali sono considerate "*hard to abate"* a causa di questi fattori.

Grafico 1.3: Emissioni nel settore industriale nelle maggiori regioni del mondo, dal 1990 al 2016



Fonte: Applied Energy

Il grafico 1.3 dimostra l'andamento delle emissioni industriali di anidride carbonica (CO_2) in Cina, Unione Europea (UE), Stati Uniti (USA) e India tra il 1990 e il 2015. È interessante notare come la Cina evidenzia una crescita significativa dopo il 2000, mentre l'Unione Europea e gli Stati Uniti mostrano una lieve diminuzione. Tuttavia, l'India ha mostrato un incremento costante, superando l'Unione Europea e gli Stati Uniti nel 2015.

1.2.1 I modelli di politica e incentivi industriali per le industrie "hard to abate"

Nel dibattito sulla transizione verde, negli ultimi anni è emersa la necessità di ripensare l'approccio tradizionale alla politica industriale. In particolare, è chiaro che una politica industriale verde efficace non può basarsi esclusivamente sulla neutralità tecnologica. Deve invece sostenere

attivamente strade tecnologiche specifiche che possono aiutare a raggiungere gli obiettivi climatici. Tuttavia, un approccio di questo tipo non è privo di rischi. Come spesso accade nelle politiche industriali, può essere difficile individuare in anticipo le tecnologie realmente vincenti; inoltre, l'intervento pubblico può essere influenzato da gruppi di interesse o finire per scoraggiare gli investimenti privati. Allo stesso tempo, rinunciare completamente all'intervento dello Stato potrebbe produrre l'effetto opposto: un sottoinvestimento in tecnologie che, invece, potrebbero avere un ruolo cruciale nella decarbonizzazione del settore industriale.

Per questo motivo, tre principi fondamentali possono aiutare i legislatori a creare una politica industriale verde efficace per l'industria dei materiali di base con l'obiettivo di ridurre i rischi sopra elencati:

1. *Selezionare i domini tecnologici e identificare in modo sistematico e trasparente i fallimenti di mercato pertinenti utilizzando esperti.*
   La probabilità di scegliere i domini tecnologici giusti da sostenere aumenta se si richiede ai governi di fornire documentazione riguardo alla motivazione dell'intervento. Gli *spillover* tecnologici, la dipendenza dal percorso dello sviluppo tecnologico, gli effetti di rete e le barriere finanziarie e informative sono i principali fallimenti di mercato nella decarbonizzazione dell'industria dei materiali di base che giustificano sussidi o interventi normativi mirati. Per affrontare questi fallimenti di mercato, sono necessarie politiche mirate che si concentrano sulla promozione di domini tecnologici specifici. Tuttavia, la trasparenza è fondamentale per ridurre al minimo l'influenza dei gruppi di interesse poiché il sostegno selettivo può essere soggetto alla *regulatory capture*.
2. *Mantenere la neutralità tra i domini tecnologici sostenuti.*
   Poiché i decisori pubblici non dispongono di informazioni perfette

sulle soluzioni tecnologiche più efficienti e sui relativi costi, il governo dovrebbe mantenere condizioni di parità tra i diversi domini tecnologici, evitando di sostenere specifiche imprese o singole famiglie tecnologiche. In questo modo si possono valorizzare le informazioni diffuse nel mercato e lasciare spazio a future innovazioni. Ad esempio, il governo potrebbe indirizzare la sua politica industriale verde verso domini tecnologici specifici, come l'elettrificazione, ma garantendo che le aziende e le aziende tecnologiche concorrenti vengano trattate in modo equo.

3. *Mantenere e rafforzare gli strumenti di politica climatica basati sul mercato, come le tasse sul carbonio e i sistemi di scambio delle emissioni, come pilastri della politica climatica.*
   Per la politica climatica basata sul mercato, gli strumenti essenziali sono quelli che consentono di sfruttare le informazioni private che le aziende e i settori possiedono. Essi promuovono l'innovazione nelle soluzioni tecnologiche più promettenti e accelerano l'adozione di nuove tecnologie in vari settori tecnologici. Inoltre, mantengono incentivi per ridurre le emissioni sostenibili. Di conseguenza, piuttosto che sostituire le politiche climatiche di mercato più ampie, la politica industriale verde dovrebbe essere un componente essenziale delle stesse.

Le politiche industriali verdi sono state discusse e adottate nelle principali economie mondiali negli ultimi anni (Juhász et al., 2022)[19]; Di seguito fornisco alcune brevi considerazioni su due dei più recenti progetti di politiche industriali verdi, *l'Inflation Reduction Act* degli Stati Uniti e *l'European Green Deal Industrial Plan*, analizzandoli attraverso la lente dei tre principi. Per fornire il contesto necessario, offrirò innanzitutto una descrizione sintetica dei principali elementi di queste politiche industriali

verdi.

Il *Green Deal Industrial Plan* e *l'Inflation Reduction Act* (IRA) sono due complessi pacchetti di politiche pubbliche che includono numerose disposizioni in materia climatica. Le misure previste dall'IRA consistono soprattutto in crediti d'imposta, sovvenzioni e programmi di prestito volti a promuovere l'uso di energia sostenibile, l'innovazione tecnologica e la produzione nazionale. L'obiettivo centrale del provvedimento è sostenere la transizione energetica attraverso incentivi fiscali per l'energia pulita, basati sia sugli investimenti sia sulla produzione. È importante notare che entro la fine del 2025 i crediti saranno tecnologicamente neutrali, creando condizioni di parità tra tecnologie come l'eolico, il solare, l'idrogeno e la cattura e la rimozione diretta della sostanza carbonica (Bistline et al., 2023a)[20]. Le sovvenzioni dirette all'innovazione e all'adozione di tecnologie specifiche per l'industria sono ancora relativamente scarse rispetto ai sussidi destinati ai settori dell'energia e dei trasporti. In effetti, di 392 miliardi di dollari, solo 5 miliardi di dollari dell'IRA vengono destinati alla decarbonizzazione industriale (Bistline et al. 2023b)[21]. Tuttavia, poiché tecnologie come l'idrogeno e la cattura del carbonio saranno importanti per il settore industriale, i sussidi complessivi all'industria sono probabilmente più ampi. Esistono inoltre altri programmi che incentivano e sostengono gli investimenti come complemento ai crediti d'imposta dell'IRA. Il *Infrastructure Investment and Jobs Act* (IIJA), ad esempio, finanzia iniziative relative all'idrogeno assegnando 8 miliardi di dollari ai cosiddetti *hub* dell'idrogeno (Krupnick e Bergman 2022)[22].

Infine, l'IRA offre importanti vantaggi alla produzione nazionale per promuovere lo sviluppo delle industrie verdi. Questa caratteristica è fonte di controversie internazionali perché solleva preoccupazioni per un potenziale aumento del protezionismo, con effetti negativi sul commercio globale e, come sottolinea Kleimann, il rischio di una "corsa ai sussidi"

(Kleimann et al., 2023)[23].

Nel marzo 2024 è stato annunciato un primo ciclo di finanziamenti per progetti di riduzione della produzione di carbonio. L'*Industrial Demonstrations Program*, finanziato con fondi dall'IIJA e dall'IRA, ha ricevuto 6,3 miliardi di dollari per sostenere lo sviluppo di tecnologie trasformative in una varietà di settori di materiali di base (come petrolchimica, cemento e acciaio) e in una varietà di settori tecnologici (U.S. Department of Energy, 2024)[24].

Il 27 maggio 2024 il Consiglio dell'UE ha adottato il *Net-Zero Industry Act* (NZIA), che costituisce uno dei pilastri del *Green Deal Industrial Plan*. Spesso interpretato come la risposta europea *all'Inflation Reduction Act* statunitense, il NZIA segna un cambiamento nell'approccio dell'Unione: se in passato l'attenzione era rivolta soprattutto al finanziamento delle fasi iniziali dell'innovazione, oggi l'obiettivo è sostenere in modo più diretto la diffusione e la commercializzazione di tecnologie strategiche a zero emissioni nette.

Questo spostamento riflette, almeno in parte, l'influenza dell'IRA, che pone un forte accento sull'implementazione tecnologica. Il NZIA mira, infatti, ad accelerare la transizione ecologica attraverso la semplificazione delle procedure autorizzative, il sostegno all'ingresso sul mercato delle tecnologie strategiche, il rafforzamento delle competenze della forza lavoro e un maggiore coordinamento tra Stati membri tramite la piattaforma *Net-Zero Europe*.

Diversamente dall'IRA, tuttavia, il NZIA non prevede un finanziamento diretto centralizzato a livello europeo per le tecnologie strategiche: le risorse dovrebbero provenire principalmente dai bilanci nazionali e da strumenti come il Fondo per l'Innovazione dell'UE. Quest'ultimo è finanziato attraverso i proventi della vendita delle quote del sistema europeo di scambio delle emissioni (EU ETS), il cui valore dipende dal prezzo della CO_2. Con un prezzo del carbonio pari a circa 75 €/tCO_2, le

530 milioni di quote previste potrebbero generare circa 40 miliardi di euro nel periodo 2020-2030. I finanziamenti sono destinati a cinque settori:

1) Industrie ad alta intensità energetica.
2) Tecnologie rinnovabili.
3) CCS (*Carbon Capture & Storage*).
4) Accumulo di energia.
5) Edifici e mobilità a emissioni nette zero.

Finora sono stati finanziati 124 progetti con un totale di 6,7 miliardi di euro. Fino ad oggi, quasi la metà dei 3,2 miliardi di euro di finanziamento è stata destinata a sostenere investimenti nella dimostrazione commerciale di tecnologie innovative che producono zero o basse emissioni di carbonio nei settori dell'acciaio, del cemento e della petrolchimica (*European Commission* [EC], 2024)[25].

In relazione ai principi citati in precedenza, diversi componenti dell'IRA (insieme ad atti complementari come l'IIJA) e del NZIA sembrano essere coerenti con il primo e secondo principio, anche se non sempre sono esplicitamente definiti in termini di fallimento del mercato. Gli operatori industriali possono anche beneficiare di crediti d'imposta per tecnologie trasversali come CCS e idrogeno. Questo nonostante il fatto che solo una parte dell'IRA sia dedicata direttamente alla decarbonizzazione del settore dei materiali di base. Inoltre, è ormai riconosciuto che le carenze di coordinamento rappresentano un ostacolo rilevante alla decarbonizzazione industriale. Per questo motivo sono state introdotte misure volte a superare tali criticità, come dimostrano gli *hydrogen hubs* previsti dall'IIJA negli Stati Uniti.

Anche nell'Unione europea il NZIA interviene su fallimenti di mercato che vanno oltre le esternalità legate alle emissioni e alla conoscenza. Tra questi rientrano, ad esempio, la necessità di una fornitura elettrica a zero emissioni coordinata, l'espansione delle reti infrastrutturali e la formazione di una forza lavoro qualificata.

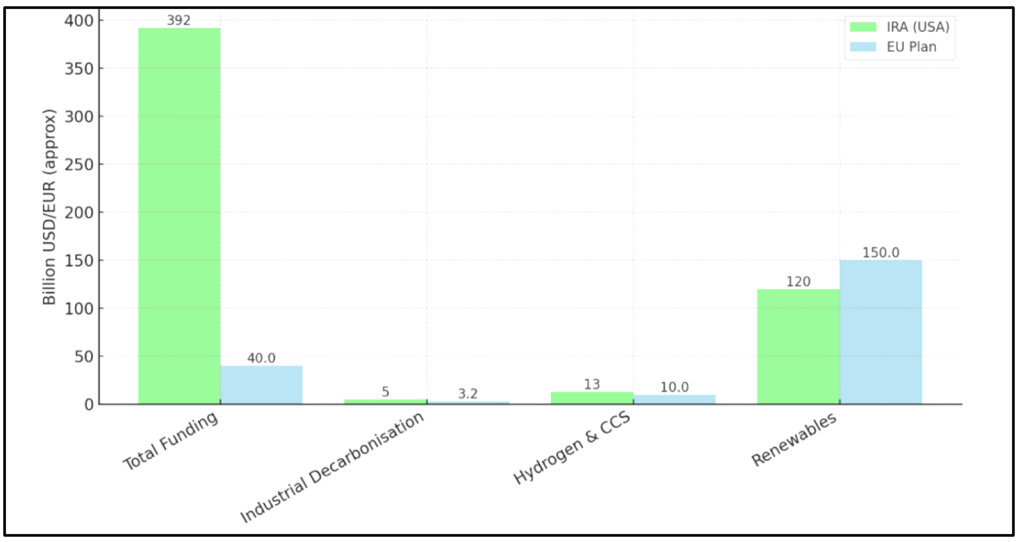
Il regolamento promuove inoltre lo sviluppo di tecnologie strategiche a emissioni nette zero, mentre l'EU *Innovation Fund* sostiene gli investimenti negli ecosistemi industriali collegati a tali tecnologie. Nel caso delle industrie dei materiali di base, queste innovazioni tendono a coincidere con specifici domini tecnologici, risultando coerenti con i Principi 1 e 2.

Un ulteriore elemento rilevante è l'allentamento delle regole sugli aiuti di Stato per le tecnologie strategiche a zero emissioni. Attraverso obiettivi chiari e meccanismi di monitoraggio, l'UE mira così a consentire agli Stati membri di sostenere tali settori, accelerando la transizione verde e riducendo l'incertezza degli investimenti.

Per quanto riguarda il Principio 3, va ricordato che l'Unione europea ha introdotto già dal 2005 un sistema di prezzo del carbonio tramite l'EU ETS, strumento che svolge un ruolo centrale nella sua strategia climatica. Negli Stati Uniti, al contrario, un meccanismo analogo ha finora avuto un'importanza molto più limitata.

La maggior parte del *pricing* del carbonio negli Stati Uniti è realizzata attraverso un piccolo numero di programmi di *cap-and-trade*, come il programma di *cap-and-trade* della California (dal 2012), il programma di *cap-and-invest* di Washington (dal 2023) e la *Regional Greenhouse Gas Initiative* (RGGI), che copre solo il settore energetico in 11 Stati (dal 2009). È importante notare che i valori del carbonio previsti da tali meccanismi sono notevolmente inferiori rispetto al costo sociale della CO_2, che, secondo le stime più recenti, supera i 100 dollari per tonnellata (Hänsel et al., 2020)[26]. Pertanto, come sottolineato nel Principio 3, i responsabili delle politiche pubbliche devono intervenire per aumentare l'efficacia degli strumenti di mercato esistenti.

Grafico 1.4: Confronto tra investimenti pubblici per la politica industriale verde negli Stati Uniti e nell'Unione Europea.



Nostre elaborazioni su dati del Parlamento Europeo - Briefing IRA

Il grafico 1.4 mostra uno squilibrio notevole tra gli investimenti nella politica industriale verde degli Stati Uniti e dell'Europa. Mentre l'UE mostra un impegno più contenuto e frammentato, gli Stati Uniti puntano su un sostegno finanziario massiccio e immediato con *l'Inflation Reduction Act.* L'Europa supera gli Stati Uniti solo nelle energie rinnovabili, indicando una nuova priorità strategica.

1.3 Ruolo della tecnologia e dell'innovazione di processo nella riduzione delle emissioni

L'innovazione tecnologica verde, lo sviluppo economico, l'efficienza energetica e i fattori legati allo stile di vita influenzano direttamente o indirettamente la riduzione delle emissioni di carbonio:

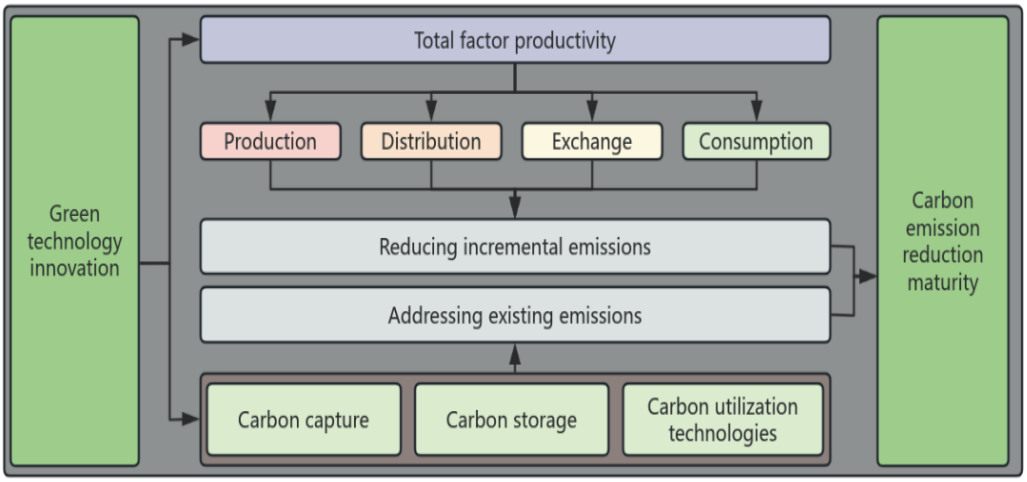
L'effetto diretto dell'innovazione tecnologica verde sulla maturità della riduzione delle emissioni di carbonio.

La transizione dei modelli di sviluppo da una logica basata sulle risorse a

una basata sull'innovazione, da un'espansione puramente quantitativa a un miglioramento strutturale e da una crescita in termini di scala a uno sviluppo di alta qualità dipende dall'innovazione tecnologica verde. È fondamentale per aumentare l'efficienza energetica, e svolge un ruolo significativo nella riduzione delle emissioni di carbonio. L'innovazione tecnologica verde si differenzia dalle tecnologie innovative tradizionali, che spesso non riescono a contenere tali emissioni, fornendo soluzioni specifiche e mirate per ridurle in modo efficace (Tobelmann et al., 2020)[27].
La "riduzione delle emissioni incrementali" e la "gestione delle emissioni esistenti" sono i due meccanismi principali attraverso i quali l'innovazione tecnologica verde contribuisce alla maturità nella riduzione delle emissioni di carbonio (Figura 1.2, pag. 23). La riduzione incrementale delle emissioni si riferisce al processo attraverso cui l'adozione di tecnologie verdi migliora la produttività totale dei fattori e ottimizza processi economici e sociali — dalla produzione alla distribuzione fino al consumo — riducendo l'intensità di carbonio per unità di *output.*
Al contrario, la "gestione delle emissioni esistenti" riguarda la diminuzione delle emissioni già generate, attraverso lo sviluppo e l'impiego di tecnologie di cattura, stoccaggio e utilizzo del carbonio (CCUS), con l'obiettivo di avvicinarsi alla neutralità climatica.
Quando questi due meccanismi operano congiuntamente, si rafforza la riduzione dell'intensità delle emissioni rispetto alla crescita economica, favorendo un percorso di sviluppo più sostenibile. L'adozione di tecnologie verdi può inoltre ridurre i costi di produzione nel medio-lungo periodo, contribuendo al controllo delle emissioni e alla mitigazione dei danni ambientali. In questo modo si crea una condizione potenzialmente compatibile tra crescita economica e sostenibilità ambientale.
Inoltre, le tecnologie verdi consentono la produzione di beni rispettosi dell'ambiente e a basse emissioni di carbonio che possono essere adattati alle esigenze uniche dei consumatori, ottenendo contemporaneamente

vantaggi economici ed ecologici. In base a tali premesse, si può affermare che l'innovazione tecnologica verde esercita un impatto diretto e favorevole sul livello di maturità raggiunto nei processi di riduzione delle emissioni di carbonio.

Figura 1.2: Il meccanismo dell'impatto diretto dell'innovazione tecnologica verde sul grado di maturità della riduzione delle emissioni di carbonio



Fonte: Research on the impact of green technology innovation on carbon emission reduction maturity

L'effetto indiretto dell'innovazione tecnologica verde sulla maturità della riduzione delle emissioni di carbonio.

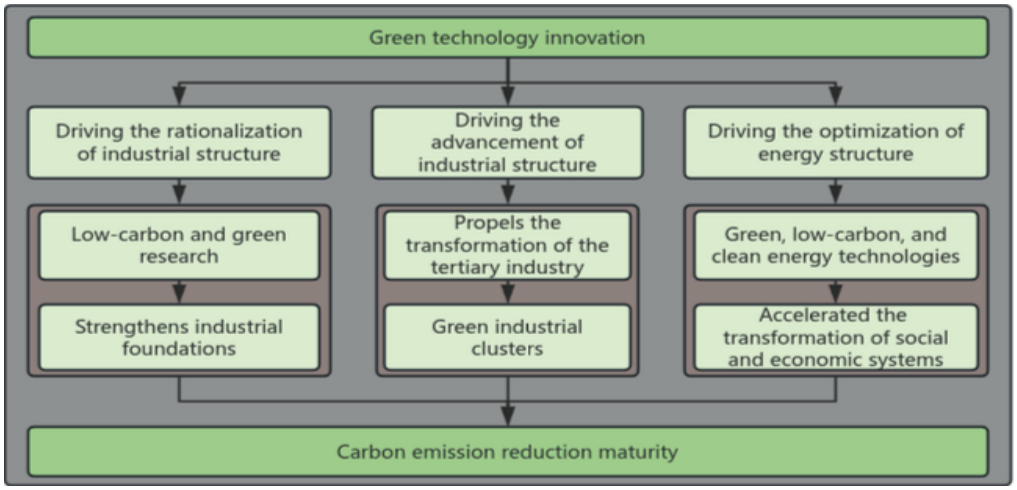
I progressi tecnologici hanno un impatto significativo sia sulla società che sull'economia, e il miglioramento delle strutture industriali è strettamente correlato ai progressi tecnologici. L'innovazione tecnologica verde rafforza le basi industriali attraverso ricerche a basso impatto ambientale e orientate alla sostenibilità che rivoluzionano le pratiche agricole, i processi produttivi, i flussi di produzione e i metodi di coltivazione. È il catalizzatore della trasformazione pulita delle industrie tradizionali come l'agricoltura, la produzione di macchinari, l'edilizia e i trasporti, promuovendone lo sviluppo in chiave verde e ad alto valore aggiunto. Inoltre, l'innovazione tecnologica verde accelera la crescita di settori ad alta efficienza, ad alta tecnologia e a basse emissioni. Ciò facilita

l'integrazione dei risultati dell'innovazione con gli investimenti e le industrie verdi (Wen et al., 2022)[28]. Inoltre, l'innovazione tecnologica verde promuove la trasformazione del settore terziario verso una maggiore diversificazione e specializzazione, promuovendo la creazione di *cluster* industriali verdi. Questo aiuta a costruire un sistema terziario moderno, intelligente e interconnesso migliorando l'efficienza nell'utilizzo delle risorse e ampliando le catene industriali e del valore. Il suo motore principale è la capacità di garantire un'allocazione razionale delle risorse tra i vari settori industriali, promuovendo la razionalizzazione e l'elevazione qualitativa della struttura industriale, il che consente di avanzare verso gli obiettivi di riduzione delle emissioni di carbonio. Quindi, l'innovazione tecnologica verde promuove la razionalizzazione e l'*upgrading* della struttura industriale, migliorando indirettamente la maturità nella riduzione delle emissioni di carbonio (Figura 1.3, pag. 25). Inoltre, la rivoluzione dell'energia verde beneficia dell'innovazione tecnologica verde. La proliferazione di tecnologie energetiche pulite, a basse emissioni e ad alta efficienza ha accelerato notevolmente la trasformazione dei sistemi sociali ed economici in sistemi a basso contenuto di carbonio. Ciò ha reso più facile raggiungere gli obiettivi di "doppia neutralità carbonica". L'innovazione tecnologica verde ha portato a una strutturazione ottimizzata e avanzata dei sistemi di produzione e consumo energetico, trasformando le tradizionali catene del valore dell'energia. I progressi nelle tecnologie rinnovabili come l'energia eolica, solare, geotermica e fotovoltaica hanno aumentato l'efficienza di utilizzo e l'ambito applicativo delle fonti energetiche pulite. D'altra parte, il miglioramento dell'efficienza energetica riduce le emissioni complessive di carbonio. L'innovazione tecnologica verde promuove gradualmente la sostituzione delle fonti "ad alta intensità di carbonio" con fonti "a basse emissioni di carbonio", migliorando la maturità della riduzione delle emissioni. Questo viene fatto promuovendo la produzione e l'adozione di

energia pulita.

Alla luce di tali evidenze, L'innovazione tecnologica verde promuove la maturità nella riduzione delle emissioni di carbonio agendo indirettamente su tre dimensioni chiave della trasformazione economica: favorisce la razionalizzazione della struttura industriale, ne sostiene l'avanzamento verso settori ad alto contenuto tecnologico e contribuisce all'ottimizzazione della struttura energetica attraverso la diffusione di fonti pulite.

Figura 1.3: Il meccanismo dell'impatto indiretto. Dell'innovazione tecnologica verde sul grado di maturità della riduzione delle emissioni di carbonio.



Fonte: Research on the impact of green technology innovation on carbon emission reduction maturity

Capitolo II – La sostenibilità industriale nei settori "hard to abate"

Le industrie siderurgiche, dell'alluminio e del cemento rappresentano oltre il 18% delle emissioni globali di CO_2 nel processo globale di neutralità carbonica, poiché queste industrie sono generalmente industrie ad alte emissioni di carbonio (Gailani et al., 2024)[29], quindi è necessaria la profonda decarbonizzazione di questi settori per raggiungere gli obiettivi climatici.

Nel 2023, la Cina ha contribuito al 53,86%, al 58,92% e al 49,68% della produzione globale come principale produttore di acciaio, cemento e alluminio al mondo. Queste industrie sono fortemente dipendente da materie prime ad alta intensità di carbonio (come il calcare e gli elettrodi di grafite) e da fonti energetiche ad alto tenore di carbonio (come il carbone, il *coke*, il *coke* di petrolio, il gas naturale e l'elettricità prodotta dal carbone. Questi settori vengono spesso definiti "*hard to abate*", perché presentano difficoltà rilevanti nella riduzione delle emissioni. Proprio per questo, se si vuole avanzare seriamente nelle politiche globali di decarbonizzazione, è necessario comprendere in modo puntuale come si generano le emissioni di CO_2 in questi settori e costruire percorsi di mitigazione coerenti con le caratteristiche dei loro processi industriali.

È vero che esistono ostacoli tecnici, legati alla natura stessa della produzione siderurgica e cementiera. Tuttavia, questa tesi sostiene che la loro decarbonizzazione non sia un obiettivo irrealistico. Al contrario, molte soluzioni tecnologiche sono già disponibili, mentre altre sono in fase di sviluppo avanzato. Ciò che spesso manca non è la tecnologia, ma un contesto politico e istituzionale capace di sostenerne la diffusione.

Continuare a descrivere questi settori come intrinsecamente "difficili da abbattere" rischia quindi di diventare una narrazione limitante. Non esiste

un'unica traiettoria di transizione, ma le evidenze mostrano che le principali opzioni di mitigazione sono note. La loro adozione dipende soprattutto da scelte politiche, investimenti adeguati e capacità istituzionale.

2.1 Dimensioni della sostenibilità nei settori "hard to abate"

Quando si tratta di settori industriali che sono considerati "*hard to abate*", la sostenibilità non può essere limitata a una sola considerazione, né può essere interpretata esclusivamente in termini ambientali. Invece, ha molteplici aspetti. Ciò è dovuto alla forte esposizione alla concorrenza internazionale, processi produttivi ad alta intensità energetica ed emissioni di processo difficilmente eliminabili in questi settori (*International energy Agency* [IEA], 2023)[30]. In una situazione come questa, la transizione ecologica richiede un complesso equilibrio tra obiettivi di sostenibilità economica, coesione sociale e obiettivi climatici.

Dimensione Ambientale

Poiché questi settori contribuiscono in misura significativa alle emissioni globali di gas serra, il dibattito sui settori difficili da abbattere si concentra sull'impatto ambientale. *L'International Energy Agency* afferma che le industrie che consumano energia come l'acciaio, il cemento e la chimica sono responsabili di circa un terzo delle emissioni industriali di CO_2 in tutto il mondo. La maggior parte delle emissioni in questi settori deriva da reazioni chimiche che si verificano durante i processi produttivi. Di conseguenza, le soluzioni basate sull'efficienza energetica o sulla sostituzione delle fonti fossili sono insufficienti.

L'elettrificazione dei processi industriali, l'uso di idrogeno a basse emissioni di carbonio e l'adozione di tecnologie di cattura e stoccaggio della CO_2 (CCS) sono alcune delle principali opzioni di mitigazione.

Tuttavia, la letteratura sottolinea che tali tecnologie hanno ancora problemi di scalabilità, costi elevati e incertezza tecnologica (Bataille et al., 2018)[31].

Dimensione Economica

Nei settori ad alte emissioni di CO_2, la sostenibilità economica è una delle principali criticità. L'adozione di tecnologie *low-carbon* comporta spesso un aumento significativo dei costi di produzione, mettendo sotto pressione la competitività delle aziende che operano nei mercati globali (Di Bella et al., 2025)[32]. La possibilità di *carbon leakage*, che è la delocalizzazione delle attività produttive verso nazioni con normative ambientali meno rigorose, aumenta questo rischio. Per questo motivo, molti studi sottolineano l'importanza delle politiche pubbliche nel rendere la decarbonizzazione industriale economicamente sostenibile. Per allineare gli incentivi economici agli obiettivi climatici, sono considerati fondamentali strumenti come il *carbon pricing*, i sussidi all'innovazione, i contratti per differenza e i meccanismi di aggiustamento alle frontiere del carbonio (Aghion et al., 2020)[33].

Dimensione sociale

In quanto questi settori sono spesso profondamente radicati nei territori e offrono una quantità significativa di posti di lavoro stabili e qualificati, la transizione di queste industrie ha implicazioni sociali significative. La riconversione industriale può avere un impatto negativo sulla distribuzione, in particolare per i lavoratori e le comunità locali che sono stati impiegati in attività che emettono emissioni di carbonio elevate (OECD, 2023)[34]. In questo contesto, la dimensione sociale della sostenibilità include la protezione dell'occupazione, la riqualificazione delle competenze e l'accettazione sociale delle infrastrutture necessarie alla decarbonizzazione. Nella letteratura, il concetto di *Just Transition* è

diventato un riferimento chiave, sottolineando quanto sia importante accompagnare la transizione ecologica con politiche sociali e del lavoro per ridurre gli effetti negativi e rafforzare il consenso sociale (Newell & Mulvaney, 2013)[35].

Dimensione tecnologica ed istituzionale

La sostenibilità in questi settori dipende fortemente dall'innovazione tecnologica e dall'ambiente istituzionale. La decarbonizzazione industriale richiede spesso tecnologie in fase di sviluppo o dimostrazione, che richiedono investimenti significativi e infrastrutture dedicate, come reti di idrogeno o sistemi di trasporto di CO_2 (*International Energy Agency* [IEA], 2023)[36]. Di conseguenza, la letteratura sottolinea l'importanza delle istituzioni pubbliche nella pianificazione degli investimenti, nella riduzione dell'incertezza e nella promozione della diffusione delle innovazioni. Secondo Mazzucato (Mazzuccato, 2018)[37], in questa prospettiva, lo Stato assume un ruolo attivo come "*mission oriented actor"*. È in grado di guidare il cambiamento tecnologico e industriale verso obiettivi di sostenibilità a lungo termine.

2.2 Le principali traiettorie tecnologiche per la decarbonizzazione

Per affrontare il processo di decarbonizzazione nei settori industriali "*hard to abate*", è possibile distinguere tra approcci tradizionali e strategici. L'approccio tradizionale si concentra su interventi incrementali e consolidati che mirano all'ottimizzazione dei processi esistenti, mentre l'approccio strategico implica cambiamenti strutturali nei modelli produttivi, nelle traiettorie tecnologiche e nell'asse della produzione. Le leve tradizionali sono le seguenti:

- **Efficienza energetica**, rivedere i processi produttivi per ridurre la quantità di energia (termica ed elettrica) necessaria per mantenere

la quantità di output prodotto.

- **Economia circolare**, attraverso l'utilizzo di materiali riciclati o scarti dalla produzione.
- **Combustibili e materie prime *low carbon*** possono essere ottenuti sostituendo i combustibili e le materie prime attuali con alternative a bassa intensità carbonica, tra cui:
    - Il *charcoal/biocoal*, che è il carbone prodotto dalla pirolisi di biomasse (materiale organico) in assenza di ossigeno, viene utilizzato nei processi siderurgici, in particolare in altoforno per sostituire parzialmente il *carbon coke*; inoltre, può essere utilizzato nelle sodiere per produrre bicarbonato di sodio in sostituzione del *petcoke*.
    - Il ferro preridotto, noto anche come *Direct Reduced Iron* (DRI), che può essere ottenuto utilizzando metano o idrogeno come agenti riducenti di minerali di ferro; È una materia prima utilizzabile nella siderurgia per produrre acciaio sia in altoforno (in sostituzione del *carbon coke*) che in forno elettrico. È un'alternativa ad emissioni significativamente più basse rispetto alla produzione di acciaio a ciclo integrato convenzionale.
    - Combustibile solido secondario (CSS), ottenuto dalla componente secca dei rifiuti non pericolosi urbani attraverso trattamenti appropriati per separarlo da altri materiali non combustibili come vetro, metalli e inerti; trova impiego per sostituire i combustibili convenzionali in alcuni processi produttivi come la produzione di cemento.

Le leve strategiche sono invece Elettrificazione, *Green Fuels e Carbon Capture, Utilization & Storage* (CCUS):

- **Elettrificazione**, modificando i processi produttivi per consentire

l'utilizzo dell'energia elettrica come sostituto dei combustibili fossili. L'elettrificazione è una soluzione possibile per quei processi in cui le temperature necessarie lo consentono, ma richiede comunque un notevole salto tecnologico nei processi produttivi dei settori in questione. Ad oggi, si stima che la leva strategica abbia il minor impatto. Tuttavia, è importante tenere d'occhio i progressi tecnologici che potrebbero rendere l'elettrificazione applicabile e competitiva in termini di costi rispetto ad altre leve.

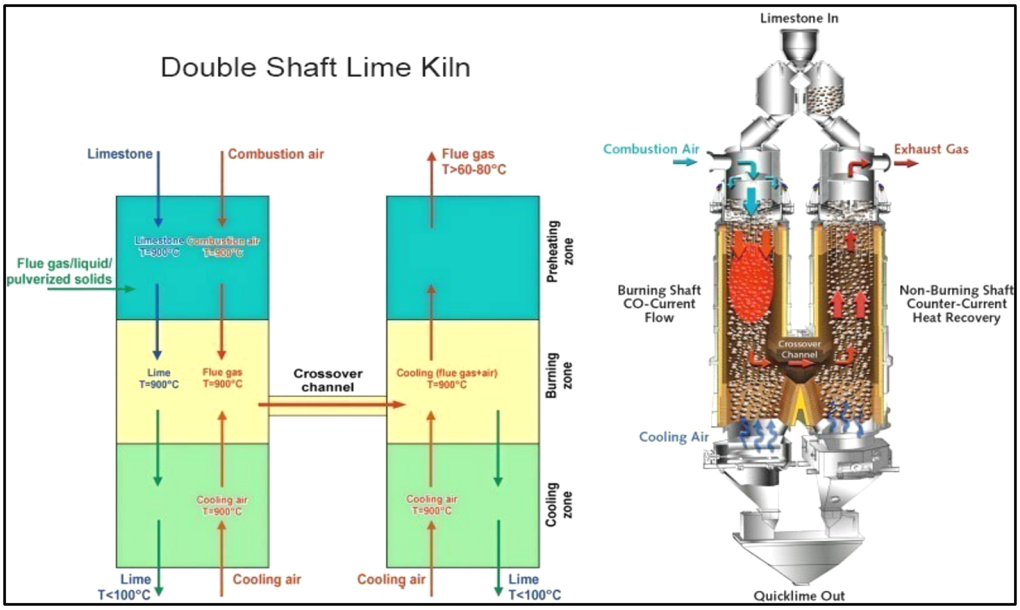
- Utilizzo di ***Green fuels***, come idrogeno e biometano, come sostituto dei combustibili fossili (gas naturale); L'utilizzo di questi combustibili può richiedere adattamenti impiantistici, in particolare per l'idrogeno, che è già utilizzato o potrebbe essere utilizzato in molti impianti esistenti come miscela di idrometano con un mix volumetrico 20% idrogeno - 80% metano, e direttamente nei poli chimici presenti in tutto il paese. Un aumento della quota di idrogeno nel mix richiede modifiche impiantistiche minori se è entro una certa soglia; se è al di fuori di questa soglia, richiede modifiche impiantistiche più significative per l'ammodernamento e il rifacimento degli impianti.
- ***Carbon Capture, Utilization and Storage*** (CCUS), che include la raccolta, il trasporto, lo stoccaggio o il riutilizzo dell'anidride carbonica proveniente dai processi di produzione; Questa tecnologia consente la cattura delle emissioni del processo e mantiene quasi invariato il processo produttivo.

2.2.1 Efficienza energetica e digitalizzazione

L'efficienza energetica è una delle principali leve di intervento nel breve periodo per ridurre le emissioni di gas serra nei settori industriali "*hard to*

abate". La maturità dei processi produttivi in questi settori e l'elevata intensità energetica li distinguono; tuttavia, anche miglioramenti incrementali possono portare a significative riduzioni dei consumi energetici e delle emissioni correlate (Bataille, 2018)[38]. Per questo motivo, la ricerca indica l'efficienza energetica come una *no-regret option*, che può produrre benefici economici ed ambientali contemporaneamente, ma non è sufficiente da sola per raggiungere una decarbonizzazione profonda (*International Energy Agency* [IEA], 2023)[39]. Il recupero del calore di scarto, l'ottimizzazione dei forni e dei sistemi di combustione, il miglioramento dell'isolamento degli impianti e l'adozione di sistemi avanzati di gestione dell'energia sono alcune delle principali strategie per l'efficienza energetica. Un esempio di applicazione concreta di tali strategie è rappresentato dai forni Maerz con configurazione a doppio *shaft* (Figura 2.1), nei quali la progettazione dell'impianto consente una maggiore integrazione termica e un più efficiente recupero del calore, riducendo il fabbisogno energetico complessivo del processo produttivo.

Figura 2.1: Forno Maerz che utilizza il principio della tecnologia di accumulo termico a flusso parallelo.



Fonte: Agico cement

Rosenow afferma che anche se questi interventi possono aiutare a ridurre l'intensità energetica dei processi industriali, incontrano limiti strutturali nei settori "*hard to abate*", dove le reazioni chimiche che derivano dai processi produttivi rappresentano una parte significativa delle emissioni (Rosenow et al., 2020)[40].

In questo contesto, la digitalizzazione è un elemento essenziale per aumentare l'efficienza energetica. Una gestione più precisa e dinamica dei flussi energetici è possibile grazie all'utilizzo di tecnologie digitali come sensori IoT, sistemi di monitoraggio in tempo reale, analisi dei *big data*, intelligenza artificiale e controllo automatizzato dei processi. Ciò favorisce anche l'ottimizzazione continua delle prestazioni operative. Nelle industrie ad alta emissione di CO_2, caratterizzate da processi complicati e condizioni operative variabili, l'integrazione tra efficienza energetica e strumenti digitali è particolarmente importante. In questi settori, i sistemi di controllo intelligenti possono migliorare l'affidabilità e ridurre gli sprechi energetici (Zhang et al., 2022)[41]. Tuttavia, la digitalizzazione e l'efficienza energetica agiscono principalmente come leve incrementali, influenzando l'ottimizzazione dei processi esistenti invece che le emissioni dei processi. Per questo motivo, la letteratura sottolinea come tali strumenti dovrebbero essere considerati condizioni abilitanti per l'adozione di traiettorie tecnologiche più trasformative, come l'elettrificazione dei processi, l'utilizzo di idrogeno a basse emissioni e la cattura e lo stoccaggio del CO_2 (Bataille, 2018)[42].

2.2.2 Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS)

Le tecnologie di *Carbon Capture, Utilization and Storage* (CCUS) rappresentano una leva strategica per la riduzione delle emissioni industriali, consentendo la cattura della CO_2 prodotta, il suo utilizzo in processi industriali o il suo stoccaggio sicuro in formazioni geologiche

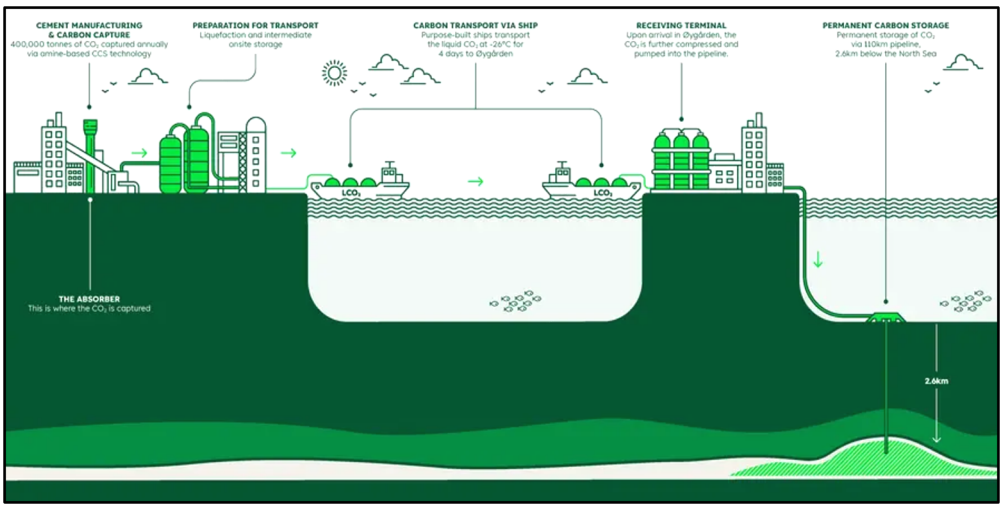
profonde (S&P Global, 2024)[43].

Il CCUS è composto da tre fasi principali:

1 *Cattura* della CO_2 dai flussi di gas dei processi industriali;
2 *Trasporto* della CO_2 attraverso sistemi di trasporto liquefatto o condotte;
3 *Utilizzo o stoccaggio*, dove la CO_2 può essere trasformata in prodotti chimici, combustibili sintetici o stoccata in formazioni geologiche sicure (Latrach, 2025)[44].

Gli impianti CCUS sono in espansione in tutto il mondo: Attualmente, lungo tutta la catena, dalla cattura allo stoccaggio, sono in fase di sviluppo oltre 700 progetti, con circa 45 impianti commerciali in funzione e una capacità complessiva di cattura di più di 50 milioni di tonnellate di CO_2 all'anno (*International Energy Agency* [IEA], 2024)[45]. Tuttavia, questa capacità rimane molto al di sotto di quanto richiesto dagli scenari *Net-Zero*, e solo una piccola percentuale è attribuibile a settori industriali, a parte quelli convenzionali come il trattamento del petrolio e il gas naturale. Le previsioni globali indicano che il CCUS sarà molto più diffuso nei prossimi decenni: L'Agenzia Internazionale per l'Energia stima che nel 2030 la cattura totale di CO_2 potrebbe raggiungere circa 840 milioni di tonnellate all'anno, con oltre 450 milioni di tonnellate provenienti dal settore industriale, con un'importante contribuzione dai settori cemento (circa 258 milioni di tonnellate), chimica (178 milioni di tonnellate) e siderurgia (*International Energy Agency* [IEA], 2025)[46]. Alcuni progetti industriali dimostrano l'applicazione concreta di queste tecnologie nei settori "*hard to abate*". Un esempio è il progetto di *Heidelberg Materials* (Fig. 2.2 a pag.35) in Norvegia, dove un impianto di produzione di cemento che cattura il CO_2 punta a sequestrare circa 400 000 tonnellate di CO_2 all'anno, quasi il 50% delle emissioni dell'impianto. Il gas raccolto viene inviato alla struttura di stoccaggio sottomarina *Northern Lights* nel Mare del Nord.

Figura 2.2: Il progetto CCUS Brevik di Heidelberg Materials



Fonte: Heidelberg Materials

2.3 Le barriere all'innovazione nei settori "hard to abate"

I settori "*hard to abate*" sono un terreno di battaglia nel dibattito sull'innovazione e sulla transizione verso modelli di sviluppo sostenibile. Questi settori sono un luogo in cui emergono con particolare evidenza le tensioni tra obiettivi climatici, vincoli produttivi e competitività economica. L'innovazione tecnologica in questi settori non segue traiettorie lineari né rapide, ma è fortemente influenzata da limiti strutturali che ne rallentano lo sviluppo e l'adozione. Analizzare questi limiti ci consente di comprendere perché la decarbonizzazione industriale richiede cambiamenti significativi nelle strutture e nei metodi. Il livello di maturità delle tecnologie disponibili è uno dei principali ostacoli all'innovazione nei settori ad alto livello di emissioni. La cattura e lo stoccaggio della CO_2 (CCUS), l'idrogeno verde e i combustibili sintetici sono soluzioni spesso considerate essenziali per la decarbonizzazione industriale, ma molte di queste soluzioni sono ancora in fase di dimostrazione o di prima

applicazione industriale (European Commission [EC], 2023)[47]. Queste tecnologie spesso presentano problemi di scalabilità ed efficienza energetica, il che ne limita l'uso su larga scala. L'integrazione della CCUS nei processi industriali richiede adattamenti complicati e costosi, oltre a infrastrutture di trasporto e stoccaggio della CO_2 che sono ancora poco sviluppate in Europa, secondo il *Joint Research Centre* della Commissione Europea (Martínez Castilla, 2024)[48]. Di conseguenza, anche le migliorie tecnologiche più recenti non sono in grado di ridurre significativamente le emissioni in un breve periodo. I settori "*hard to abate*" hanno cicli di vita lunghi e sono *capital-intensive*. L'adozione di innovazioni radicali, che richiedono investimenti iniziali elevati e tempi di ritorno incerti, è particolarmente impegnativa a causa di ciò. La Commissione Europea afferma che i costi della produzione di tecnologie *low-carbon* sono ancora spesso superiori a quelli delle alternative tradizionali. Ciò è particolarmente vero in assenza di un prezzo del carbonio stabile e prevedibile (*European Commission* [EC], 2022)[49]. Questa situazione fa sentire le imprese più esposte al rischio; quindi, tendono a rimandare le decisioni di investimento o a preferire soluzioni incrementali. Secondo la letteratura sull'economia dell'innovazione, è difficile che il settore privato assuma da solo il rischio di sperimentare nuove traiettorie tecnologiche in condizioni di incertezza elevata. Di conseguenza, le politiche pubbliche e i meccanismi di condivisione del rischio sono fondamentali (Mazzucato, 2018)[50].

Il *lock-in* tecnologico è un altro limite significativo. Economie di scala, competenze specializzate e infrastrutture dedicate sono le conseguenze di decenni di investimenti cumulativi che hanno portato a tecnologie utilizzate nei settori "*hard to abate*". Questo processo ha portato a traiettorie tecnologiche solide che sono difficili da abbandonare (Unruh, 2000)[51]. Tale dipendenza comporta una forte inerzia dei sistemi produttivi

in Europa, che impedisce l'introduzione di alternative. Quindi, le aziende tendono a concentrarsi su miglioramenti di efficienza dei processi esistenti invece di innovazioni trasformative, che richiederebbero una riorganizzazione dell'intera catena industriale (Aghion et al., 2016)[52].

In questo settore, ci sono ostacoli all'innovazione dovuti a fattori non solo tecnologici ed economici, ma anche alle strutture istituzionali. Secondo *l'European Commission* (*European Commission* [EC], 2019)[53], il *Green Deal* è stato promesso, ma ci sono ancora dubbi normativi e divisioni nelle politiche industriali e climatiche tra i paesi membri in Europa. Inoltre, più restrizioni sulle politiche climatiche possono causare preoccupazioni per la perdita di competitività e la delocalizzazione delle emissioni, un fenomeno noto come *carbon leakage*, in settori che sono soggetti alla concorrenza globale. I legislatori spesso optano per approcci graduali o compensativi a causa di questo pericolo, il che a sua volta riduce la pressione innovativa sulle imprese (Fischer et al., 2019)[54].

La dimensione sociale dell'innovazione rappresenta un aspetto cruciale della transizione. Tecnologie come la CCUS e altre soluzioni per la decarbonizzazione stanno incontrando resistenze in diverse comunità locali, soprattutto per timori legati alla sicurezza e all'impatto ambientale. Queste opposizioni possono rallentare o persino bloccare progetti industriali, anche quando risultano tecnicamente realizzabili.

Allo stesso tempo, la trasformazione dei settori "*hard to abate*" comporta effetti rilevanti sul mercato del lavoro e sulle competenze richieste, in particolare nelle aree fortemente dipendenti da industrie ad alta intensità di carbonio. La transizione, dunque, non è soltanto una questione tecnologica, ma anche sociale e territoriale.

Queste trasformazioni possono causare conflitti sociali e ostacolare l'innovazione se non vengono implementate politiche di transizione eque (European Trade Union Institute, 2021)[55].

2.4 L'industria della calce: caratteristiche e specificità

Al giorno d'oggi, l'industria della calce (Figura 2.3) sta affrontando una sfida importante per mitigare il cambiamento climatico a causa delle emissioni significative e inevitabili che si verificano durante il processo di produzione. Tuttavia, ha il potenziale per diventare *carbon negative* nel lungo termine. In altre parole, potrebbe diventare un "*net sink"* di assorbimento delle emissioni dall'atmosfera piuttosto che una fonte di emissioni nell'atmosfera.

Figura 2.3: Impianto per la produzione di calce della società Lhoist



Fonte: OilGasNews

È risaputo che la produzione di calce rilascia nell'atmosfera emissioni significative di CO_2, sia a causa dell'elevato consumo energetico richiesto dai forni ad alta temperatura, sia per effetto delle emissioni di processo legate alla decomposizione chimica del carbonato di calcio. Proprio per questa combinazione di fattori strutturali, il settore della calce rientra pienamente tra le attività "*hard to abate"*. Ciò che è meno noto è che, dopo la fase di produzione, i prodotti a base di calce riassorbono CO_2 dall'atmosfera. La quantità di CO_2 riassorbita può essere equivalente a una parte significativa delle emissioni di processo (più di un terzo, in media

nel primo anno).
Si potrebbero persino ottenere emissioni nette negative se il riassorbimento di CO_2 durante la fase di utilizzo e di fine vita dei prodotti a base di calce superasse le emissioni di produzione. L'eliminazione virtuale delle emissioni di produzione potrebbe essere possibile utilizzando fonti energetiche a basse emissioni di carbonio e catturando e immagazzinando in modo permanente le emissioni di processo (ad esempio, attraverso tecnologie di cattura e stoccaggio del carbonio con stoccaggio in formazioni geologiche o prodotti durevoli) piuttosto che semplicemente emetterle nell'atmosfera.

L'industria della calce svolge un ruolo centrale in numerosi settori produttivi e il materiale rimane, in larga misura, difficilmente sostituibile a causa delle sue proprietà chimiche specifiche. È impiegata in ambiti che spaziano dalla siderurgia all'edilizia, fino alla gestione ambientale, dove viene utilizzata, ad esempio, come assorbente nella depurazione dei fumi o come agente precipitante nel trattamento degli effluenti.
Nel processo siderurgico la calce agisce come fondente, consentendo la rimozione di impurità quali silice, fosforo e zolfo dal minerale di ferro durante la fusione. Questo passaggio è essenziale per ottenere acciaio di elevata qualità, poiché favorisce la formazione di scorie facilmente separabili. In assenza della calce, sia l'efficienza produttiva sia le caratteristiche finali del prodotto risulterebbero compromesse.
Anche il settore delle costruzioni fa ampio uso di materiali a base di calce, come malte, intonaci e leganti. Oltre a migliorarne la lavorabilità, la calce contribuisce ad aumentare la durabilità e la resistenza dei materiali, rafforzando la capacità degli edifici di resistere agli agenti atmosferici e al degrado nel tempo. Nelle opere infrastrutturali — tra cui ferrovie, aeroporti e autostrade — il trattamento dei terreni con calce rappresenta inoltre una tecnica consolidata per stabilizzare e migliorare le proprietà

meccaniche dei suoli.

Infine, prodotti a base di calce sono ampiamente impiegati nei sistemi di abbattimento delle emissioni industriali e nelle centrali elettriche, dove permettono di rimuovere inquinanti come l'anidride solforosa (SO_2) e altri gas acidi prima del rilascio in atmosfera. I prodotti a base di calce sono efficaci nel catturare questi inquinanti, contribuendo a rendere l'aria più pulita e a garantire la conformità ambientale. La calce è anche un prodotto agricolo fondamentale nella cura degli animali, nell'alimentazione animale e nella catena alimentare umana, nonché una componente essenziale del trattamento dell'acqua potabile per il consumo umano.

2.5 Verso il caso Unicalce

Questa tesi si concentra ora sull'analisi di un caso empirico concreto dopo aver delineato il quadro teorico di riferimento sui temi dell'innovazione, della sostenibilità e dello sviluppo. Il passaggio dalla teoria alla realtà aziendale consente di vedere idee come innovazione, responsabilità sociale e governance si traducono in pratiche organizzative e strategiche (Yin, 2018)[56]. Il metodo del caso studio è ideale per l'analisi di processi complessi perché consente di esaminare in dettaglio le dinamiche interne e le interazioni tra l'azienda e il suo contesto istituzionale e territoriale. Il focus sul gruppo Unicalce è una delle molte motivazioni che sono rilevanti per gli obiettivi di questa ricerca. Innanzitutto, Unicalce opera in un settore industriale tradizionale che produce calce calcica, dolomitica e derivati. Il marchio ha una storia lunga e i suoi prodotti sono efficienti energeticamente e ambientalmente. Nonostante ciò, l'azienda si è impegnata molto nella sostenibilità, nell'innovazione e nella responsabilità ambientale. Unicalce si impegna a "operare in modo sostenibile, mettendo al centro l'ambiente, le persone e il territorio che ci circonda" e vede nella reportistica di sostenibilità uno strumento fondamentale per tracciare e

comunicare il proprio impegno ambientale e sociale nel tempo, attraverso temi ESG (*Environment, Social & Governance*) e target di miglioramento continuo (Unicalce, 2024)[57].

Di conseguenza, la scelta di Unicalce non è una scelta casuale: L'azienda ha scelto di pubblicare report e documenti che mostrano il suo percorso volontario verso la sostenibilità, rendendo visibili i suoi obiettivi e le sue prestazioni, nonostante non sia soggetta all'obbligo normativo di rendicontazione di sostenibilità. Questo aspetto rende Unicalce un caso di studio molto interessante perché consente di analizzare il ruolo proattivo delle imprese nei processi di sviluppo sostenibile anche senza obblighi formali. Tale comportamento si inserisce nel dibattito più ampio sul rapporto tra impresa e società, mostrando come le aziende possano assumere un ruolo attivo nella gestione delle sfide ambientali e sociali di oggi.

Capitolo III – Metodologia della ricerca

In questo capitolo viene descritta la metodologia utilizzata per lo studio del caso Unicalce e vengono mostrate le tecniche utilizzate per raccogliere e analizzare i dati, nonché le fonti utilizzate e le regole utilizzate per garantire rigore scientifico. L'obiettivo è fornire un quadro chiaro del percorso empirico seguito, sottolineando come le scelte metodologiche consentano di rispondere alle domande di ricerca e di ottenere risultati affidabili e coerenti con il quadro teorico generale.

3.1 Obiettivi empirici e domande di ricerca

L'obiettivo di questo studio è analizzare il caso di Unicalce, impresa attiva in un settore ad alto impatto ambientale, per comprendere come innovazione, sostenibilità e organizzazione si intreccino nella gestione aziendale. In particolare, la ricerca intende approfondire il modello produttivo e organizzativo dell'azienda, con attenzione ai processi di innovazione; esaminare le strategie adottate per ridurre l'impatto ambientale; valutare il modo in cui le dimensioni economica, ambientale e territoriale vengono integrate nelle pratiche operative; e collocare l'esperienza di Unicalce nel quadro più ampio delle trasformazioni che interessano il settore industriale di riferimento.
Lo studio è guidato da alcune domande centrali:

- In che modo Unicalce affronta le sfide dell'innovazione in un settore ad alta intensità energetica?
- Quali strumenti e risorse impiega per ridurre l'impatto ambientale delle proprie attività?
- In che misura il caso Unicalce rappresenta un esempio di adattamento dell'industria tradizionale alle nuove esigenze di sostenibilità?

La scelta di Unicalce risponde a una logica di caso significativo. Unicalce opera in un settore tradizionalmente considerato ad alta intensità emissiva e caratterizzato da forti vincoli tecnologici, ma ha intrapreso volontariamente un percorso strutturato di rendicontazione ESG e di innovazione ambientale, pur non essendo soggetta a obblighi normativi stringenti in materia di reporting di sostenibilità.
Questo rende il caso interessante per verificare se eventualmente e in che misura l'innovazione ESG possa configurarsi come strategia competitiva
L'analisi si fonda prevalentemente su fonti secondarie ma la ricchezza documentale disponibile permette una ricostruzione coerente delle strategie adottate da Unicalce e delle loro implicazioni industriali.

3.2 Raccolta dati

Al fine di fornire una panoramica completa e triangolare del caso di studio, la ricerca si basa su una varietà di fonti per rispondere a tali domande. Le figure più importanti di Unicalce sono state intervistate utilizzando un metodo non-strutturato per valutare la loro conoscenza dei processi produttivi, delle strategie aziendali e delle politiche ambientali. In particolare, il responsabile geologia e sostenibilità; la responsabile risorse umane; un ingegnere di processo e supporto tecnico; un coordinatore ambientale; e due ingegneri di ricerca e sviluppo. Le interviste hanno permesso di approfondire le opinioni degli attori coinvolti nel processo decisionale, lasciando spazio a temi imprevisti. Inoltre, sono stati esaminati molti documenti aziendali e di settore, come presentazioni interne, materiali istituzionali, report di sostenibilità, dichiarazioni ambientali di prodotto, bilanci di sostenibilità dell'Associazione Cama, *scorecard* di EcoVadis e piano strategico di sostenibilità. Con l'aiuto di queste fonti, è stato possibile ricostruire l'evoluzione dell'azienda, approfondire gli aspetti organizzativi e integrare le informazioni raccolte

tramite le interviste, il che ha rafforzato la validità dell'analisi. Le informazioni relative ai consumi energetici, alle emissioni e alle misure per mitigare gli impatti ambientali sono un'ulteriore fonte di dati. La loro funzione principale è descrittiva e interpretativa, consentendo di collegare le strategie dell'azienda ai risultati osservabili in termini di performance ambientali. Infine, la ricerca ha utilizzato rapporti di settore e studi istituzionali per contestualizzare Unicalce all'interno del contesto industriale più ampio, sottolineando le tendenze, gli standard produttivi e i problemi comuni affrontati dalle aziende che operano nello stesso settore.

3.3 Criteri di analisi qualitativa e quantitativa

I dati raccolti sono stati esaminati attraverso un approccio integrato, che ha combinato strumenti qualitativi e quantitativi. La componente qualitativa si è concentrata sull'analisi dei documenti aziendali e delle interviste, interpretate tramite un'analisi tematica volta a individuare convergenze, differenze e ricorrenze nei contenuti emersi. Le categorie analitiche sono state definite in modo induttivo, a partire dai dati empirici, e successivamente messe in relazione con il quadro teorico di riferimento. La componente quantitativa ha invece utilizzato indicatori ambientali - relativi a consumi, emissioni e misure di mitigazione - con una funzione di supporto e integrazione rispetto ai risultati qualitativi. L'integrazione delle diverse fonti e tecniche ha consentito di costruire una lettura articolata del caso Unicalce, mettendone in luce le specificità e collegandole alle più ampie dinamiche di crescita industriale e sostenibilità.

3.4 Limiti della ricerca

L'accesso e l'uso delle informazioni aziendali sono alcuni dei problemi che la ricerca attuale mostra. Durante il lavoro di analisi, ho avuto la possibilità di consultare i dati interni dell'azienda oggetto di studio; questi dati sono stati fondamentali per comprendere meglio le dinamiche organizzative e strategiche dell'impresa. Non ho ricevuto, tuttavia, una formale autorizzazione alla loro pubblicazione.

Per questo motivo, pur tenendo conto di tali informazioni durante l'elaborazione complessiva dell'analisi e nell'interpretazione dei risultati, non è stato possibile riportare direttamente alcuni documenti aziendali e dati quantitativi riservati per motivi di sicurezza e protezione dell'impresa.

L'anonimato dei partecipanti alle interviste è un altro limite. In un tentativo di mantenere la riservatezza e proteggere le parti interessate, non sono stati riportati né i nomi dei dipendenti né alcun elemento che potesse renderli identificabili. Per quanto riguarda la riduzione del livello di dettaglio descrittivo, questa scelta è anche una condizione necessaria per garantire la correttezza etica e l'affidabilità metodologica della ricerca.

Nel complesso, questi vincoli non hanno compromesso la validità dell'analisi, ma hanno cambiato il modo in cui è stato presentato, favorendo la ricostruzione interpretativa piuttosto che la diffusione di dati sensibili.

Capitolo IV – Il settore della calce come industria "hard to abate"

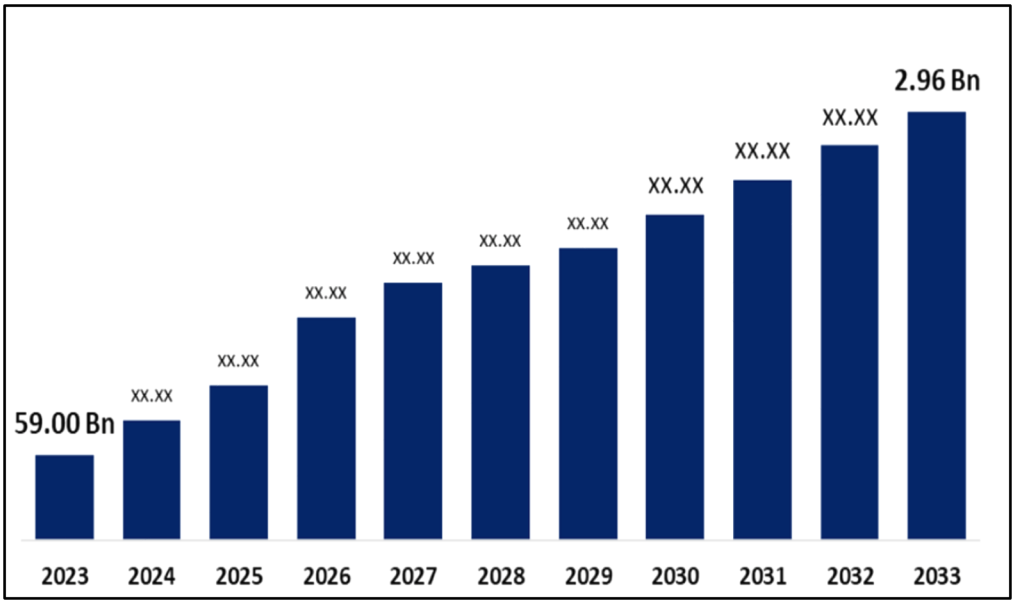
E interessante notare come il settore europeo della calce si sta impegnando per ridurre le proprie emissioni dirette di CO_2 di circa il 20% rispetto ai livelli del 2019 entro il 2030. Questo obiettivo è particolarmente sfidante in quanto il settore della calce è classificato come "*hard to abate*", cioè caratterizzato da processi produttivi intrinsecamente emissivi e da un'elevata intensità energetica, che rendono difficile la riduzione delle emissioni attraverso misure tradizionali. Il raggiungimento di tali riduzioni delle emissioni dipende dalla realizzazione di cinque prerequisiti, tra cui:

1. Accesso a biomassa a tasso zero, idrogeno verde e combustibili derivati dai rifiuti;
2. Accesso a infrastrutture multimodali per il trasporto di CO_2;
3. Accesso e disponibilità sufficiente di elettricità decarbonizzata;
4. Accesso a capacità permanenti di stoccaggio e utilizzo di CO_2 (CCUS);
5. Parallelamente, il settore della calce lavorerà per ottenere il riconoscimento della rimozione di CO_2 attraverso la carbonatazione della calce.

Tra il 2023 e il 2030, gli sforzi di riduzione delle emissioni saranno realizzati principalmente attraverso il passaggio a combustibili alternativi e l'ammodernamento dei forni, seguiti dall'introduzione delle prime tecnologie di forni predisposti per il CCUS. Ciononostante, il periodo 2023-2030 sarà cruciale per portare le tecnologie abilitanti ai massimi livelli di maturità tecnologica. Il settore della calce intensificherà i propri sforzi di ricerca e innovazione e promuoverà le politiche necessarie per realizzare il suo pieno potenziale.

Come descritto nel grafico 4.1, il mercato globale della calce è stato valutato 44,08 miliardi di dollari nel 2023 e dovrebbe superare i 59,00 miliardi di dollari entro il 2033, con un tasso di crescita annuale composto (CAGR) del 2,96% dal 2023 al 2033 (Eula, 2022)[58]. Le normative ambientali, la crescita industriale e le tendenze sostenibili stanno aumentando la domanda e guidando l'espansione del mercato. L'innovazione, lo sviluppo dei prodotti e la crescente domanda globale di soluzioni a base di calce dominano l'ambito di attività dei principali attori

Grafico 4.1: Dimensione del mercato globale della calce dal 2023 al 2033



Fonte: Eula

4.1 Struttura e dimensione del settore in Italia

Il settore della calce in Italia è un settore industriale maturo e consolidato che si trova all'interno delle industrie di base e strettamente collegato a filiere produttive strategiche come (figura 4.2 a pag. 48):

Grafico 4.2: Distribuzione % degli utilizzi della calce nei diversi settori industriali



Fonte: Nostre elaborazioni sui dati di Eula

- **Industria siderurgica (38%)**: La desolforazione e l'affinazione dell'acciaio richiedono calce. Le sue proprietà migliorano le caratteristiche meccaniche del prodotto finale eliminando impurità e regolando la composizione chimica delle leghe.
- **Costruzioni e infrastrutture (26%)**: La calce è utilizzata nell'edilizia per creare intonaci e malte resistenti e traspiranti, consolidare terreni argillosi, creare sottofondi e rilevati stradali. Quando viene aggiunto all'asfalto come additivo, migliora anche la durata delle pavimentazioni.
- **Agricoltura (4%)**: La correzione dell'acidità del suolo con la calce è un metodo agronomico che è stato utilizzato per molto tempo e continua ad essere utilizzato. In linea con i principi dell'agricoltura sostenibile e rigenerativa, il suo utilizzo promuove la biodisponibilità dei nutrienti essenziali e migliora le condizioni del terreno.
- **Settore ambientale ed ecologico (16%)**: La calce è comunemente utilizzata per trattare le acque reflue, eliminare i metalli pesanti dagli scarichi e stabilizzare i fanghi. È utilizzato nell'industria energetica per depurare i fumi e ridurre le emissioni di ossidi di

zolfo, fluoruri e composti fosforici.

- **Industria chimica (6%)**: funziona come regolatore del pH e reagente in una varietà di sintesi chimiche, nonché come additivo in processi produttivi che richiedono stabilità e purezza.
- **Filiera alimentare e farmaceutica (9%)**: utilizzato come aggiunta per regolare l'acidità, assistere nella raffinazione dello zucchero e assorbire la CO2 durante la conservazione dei prodotti ortofrutticoli. Trova spazio anche in prodotti farmaceutici come dentifrici.
- **Industria del vetro (1%)**: contribuisce a migliorare la stabilità chimica e meccanica del vetro, rendendolo meno solubile e rendendolo più resistente agli agenti atmosferici.

Il settore della calce è poco conosciuto al grande pubblico, ma svolge un ruolo cruciale in numerosi processi industriali e infrastrutturali. Proprio per questo rappresenta un elemento fondamentale del funzionamento dell'economia reale. In Italia il comparto presenta una concentrazione produttiva medio-alta, con pochi grandi gruppi industriali, spesso fortemente radicati nei territori in cui operano. Gli impianti, infatti, sono strettamente legati alla disponibilità delle risorse naturali - in particolare ai giacimenti calcarei - il che rende l'attività produttiva difficilmente delocalizzabile. Ne deriva un settore profondamente ancorato al contesto locale, non solo dal punto di vista economico ma anche normativo e ambientale.

Tra le principali realtà italiane di questo settore si collocano:

- Unicalce S.p.a.
- Fassa S.r.l.
- Fornaci Calce Grigolin S.p.a.
- Fornaci Zulian S.r.l.

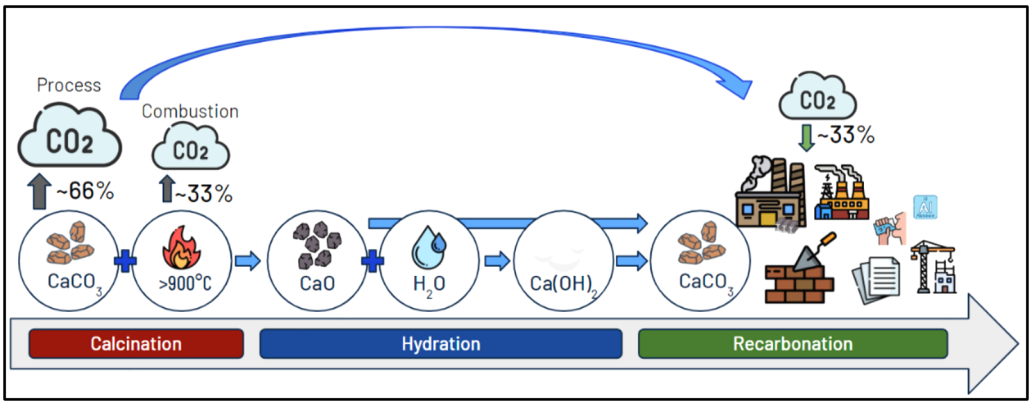
- Italcalce S.r.l.
- Leone La Ferla S.p.a.

4.2 Processi produttivi e principali fonti di emissione di CO_2

La storia della calce, una delle materie prime più antiche e versatili utilizzate dall'umanità, risale a oltre quattromila anni di sviluppo tecnologico. L'uso di esso è stato visto utilizzare dalle civiltà mesopotamiche nei primi impasti a base di leganti già in epoca protostorica. Inoltre, è stato utilizzato nella costruzione di infrastrutture monumentali, come la Grande Muraglia cinese o le reti stradali e gli acquedotti romani, secondo documenti archeologici. Grazie alle sue proprietà chimico-fisiche e alla crescente attenzione verso soluzioni più sostenibili, la calce continua a essere importante in numerosi settori industriali anche oggi, nonostante l'evoluzione dei materiali da costruzione.

La produzione della calce inizia con l'estrazione e la lavorazione del calcare, che viene riscaldato per produrre calce, causando il rilascio di CO_2. Durante le fasi di utilizzo e di fine vita, i prodotti a base di calce riassorbono la CO_2 dall'atmosfera, compensando in modo significativo alcune delle emissioni rilasciate durante la produzione (figura 4.3 a pag. 51).

Figura 4.3: Ciclo della calce



Fonte: Eula & South Pole

Il ciclo della calce è un processo chimico in cui il calcare (carbonato di calcio, $CaCO_3$) viene riscaldato per produrre calce viva (ossido di calcio, CaO), il prodotto principale dell'industria della calce, e viene rilasciata anidride carbonica (CO_2). La calce reagisce con l'acqua per formare calce idrata (idrossido di calcio, $Ca(OH)_2$). Quando la calce idrata viene utilizzata in una varietà di applicazioni, la CO_2 presente nell'atmosfera reagisce con la calce idrata disponibile, che viene ricarbonata per formare calcare, completando il ciclo. Il ~33% di CO_2 che viene riassorbito dall'atmosfera (a destra) corrisponde alle emissioni di processo (~66%, a sinistra) durante la produzione della calce e viene riassorbito durante il primo anno di utilizzo.

Il processo produttivo si compone di tre fasi (figura 4.4 a pag. 53):

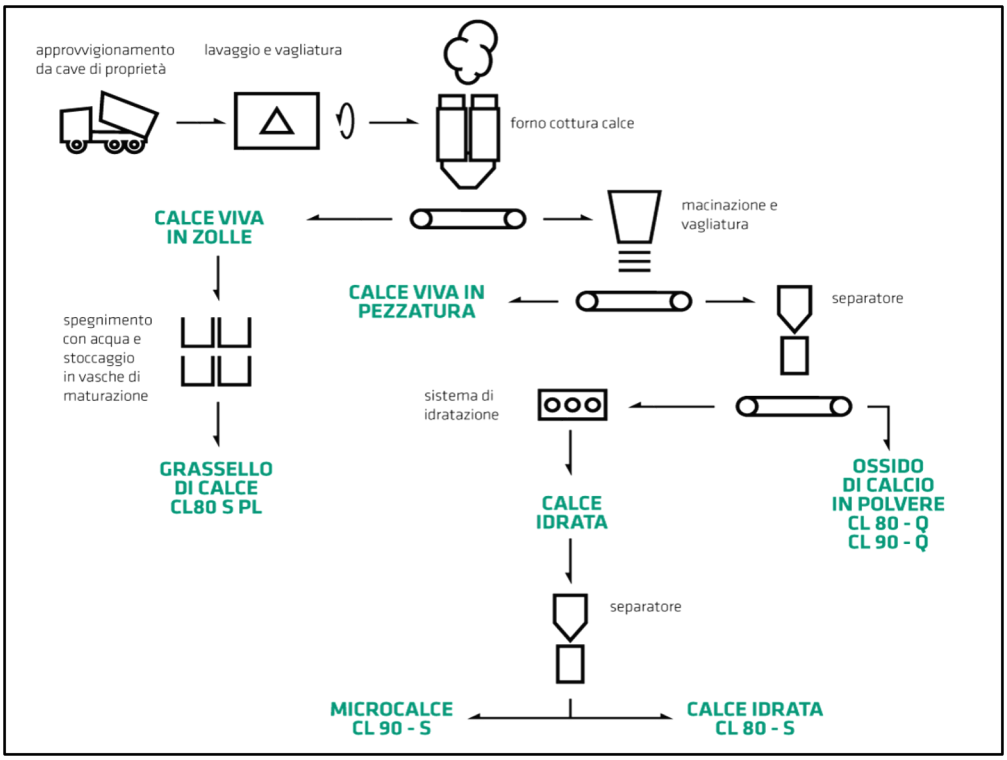
- **Calcinazione:** Dopo l'estrazione del calcare ($CaCO_3$), il ciclo della calce inizia con la calcinazione del calcare. Questo processo inizia con il riscaldamento del calcare frantumato in un forno ad alte temperature, tipicamente comprese tra 900 e 1000 gradi Celsius. Durante la calcinazione, il calcare si decompone in calce, detta anche calce viva (CaO), e rilascia CO_2. È imposrtante notare come

queste emissioni di processo costituiscono in genere più di due terzi delle emissioni totali causate dalla produzione di calce. Meno di un terzo delle emissioni totali di CO_2 proviene dalla combustione di combustibili fossili (o da una miscela di combustibili fossili e biogenici) necessaria per raggiungere le alte temperature richieste e non fa parte del ciclo della calce.

- **Idratazione:** Dopo la calcinazione, la calce prodotta può essere ulteriormente lavorata mescolandola con acqua. Questa reazione produce calce idrata o idrossido di calcio ($Ca(OH)_2$). Grazie alle sue proprietà reattive, la calce idrata viene utilizzata in varie applicazioni, come discusso in precedenza. Se la calce (CaO) viene utilizzata direttamente, la trasformazione per idratazione in $Ca(OH)_2$ può avvenire durante l'applicazione. Poiché il ciclo complessivo della calce rimane fondamentalmente lo stesso indipendentemente dal fatto che si utilizzi calce viva o idrossido di calcio, entrambe le forme sono indicate collettivamente come “calce” per semplicità, ove appropriato, nella presente relazione.

- **Ricarbonatazione:** Nel corso della loro fase di utilizzo o alla fine del loro ciclo di vita, i prodotti a base di calce catturano CO_2 dall' atmosfera. Questo processo riconverte la calce nella sua forma stabile, il carbonato di calcio.

Figura 4.4: Schema di produzione della calce



Fonte: Grigolin

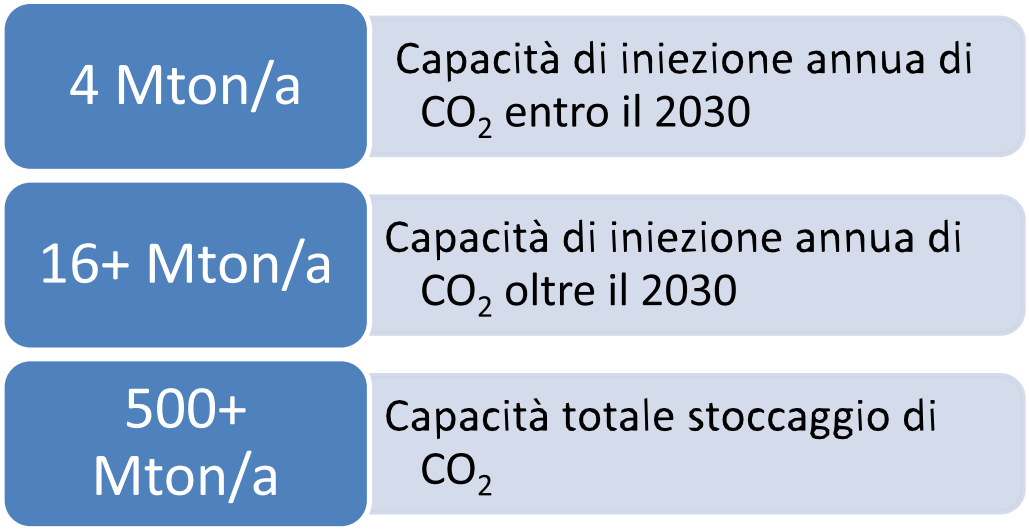
4.3 Le principali tecnologie di mitigazione: cattura e riuso della CO_2, combustibili alternativi, efficienza energetica

Come spiegato nel capitolo precedente, il settore della calce presenta un profilo emissivo molto importante a causa della combinazione di emissioni processuali e di emissioni energetiche associate alla decomposizione del carbonato di calcio durante il processo di calcinazione. Ci sono due fonti di emissioni distinte, quindi è necessario utilizzare una varietà di tecnologie di mitigazione. Queste tecnologie possono intervenire sui consumi energetici e sulle emissioni intrinseche al processo produttivo. La cattura e la gestione del CO_2, l'utilizzo di combustibili alternativi e il miglioramento dell'efficienza energetica sono tra le principali soluzioni attualmente in discussione (Simoni et al., 2022)[59].

Dal momento che le emissioni processuali, che costituiscono dal 65 al 70% delle emissioni totali e che non possono essere eliminate semplicemente sostituendo i combustibili, la cattura della CO2 risulta una tecnologia essenziale per la decarbonizzazione del settore. La cattura post-combustione, che utilizza solventi chimici come le ammine per separare il metano dai gas di scarico, è una delle tecnologie più studiate. Il vantaggio di questa soluzione è che può essere utilizzata come aggiornamento di impianti esistenti. Tuttavia, poiché comporta elevati consumi energetici e costi operativi significativi, la sua diffusione è limitata. La combustione del *oxy-fuel* è un'alternativa alla combustione del combustibile in un'atmosfera arricchita di ossigeno piuttosto che in aria. In questo modo, il processo di cattura diventa più semplice poiché i fumi di combustione sono principalmente composti da CO_2 e vapore acqueo. Ma l'uso di unità di separazione dell'aria per produrre ossigeno puro aumenta i costi e richiede più energia, il che rende questa tecnologia ancora poco diffusa nel settore della calce. Invece, il *carbon looping* è una tecnologia di cattura basata sull'uso di ossidi di calcio come sorbenti di CO_2. In questo processo, il carbonio ossigenato reagisce con il CO_2 per produrre $CaCO_3$, che può essere successivamente rigenerato attraverso il riscaldamento. Il *looping* del carbone ha un grande vantaggio perché è molto coerente con i processi produttivi dell'industria della calce e utilizza materiali che sono già presenti nel ciclo industriale, il che consente una maggiore integrazione tecnologica e un potenziale contenimento dei costi (Simoni et al., 2022)[60]. La CO_2, una volta ottenuta, può essere recuperata o stoccata. In questo senso, un esempio significativo di applicazione su scala nazionale è il progetto Ravenna CCS, sviluppato congiuntamente da SNAM ed Eni, che rappresenta la prima grande iniziativa italiana dedicata alla cattura, al trasporto e allo stoccaggio permanente di CO_2 a fini ambientali. Come descritto dalla figura 4.5 (Fig. 45 a pag. 55), la capacità di iniezione prevista è di circa 4 milioni di tonnellate all'anno entro il 2030, con un

potenziale incremento a oltre 16 milioni di tonnellate annue dopo il 2030, mentre la capacità totale di stoccaggio supera le 500 milioni di tonnellate.

Figura 4.5: I numeri del progetto CCS a Ravenna



Fonte: Ravenna CCS

Per produrre materiali da costruzione, la carbonatazione minerale è un'opzione di riuso che sfrutta la capacità della calce di riassorbire il carbonio durante il suo ciclo di vita. Tuttavia, la letteratura sottolinea che il riuso è possibile solo in quantità inferiore ai volumi di CO_2 emessi, quindi lo stoccaggio geologico è una soluzione strutturale duratura (*European Lime Association* [EULA], 2016)[61].

Oltre alla raccolta di CO2, è necessario ridurre le emissioni di combustione utilizzando combustibili alternativi. A condizione che siano prodotte e utilizzate in modo sostenibile, le biomasse hanno il potenziale per essere neutrali nelle emissioni di CO2, il che le rende una delle opzioni più importanti. L'utilizzo di combustibili derivati dai rifiuti (RDF o SRF) è un'altra soluzione. Ciò consente di ridurre il consumo di combustibili fossili e integra il settore della calce nell'economia circolare. Tuttavia, per limitare gli effetti ambientali locali di tali combustibili, sono necessari

sistemi di controllo delle emissioni sofisticati (Unicalce, 2024)[62].

Infine, la misura più immediata nel breve periodo è il miglioramento dell'efficienza energetica. Il consumo di energia e le emissioni correlate possono essere ridotti attraverso interventi come l'ottimizzazione dei forni, il recupero del calore residuo dai gas di scarico, il preriscaldamento delle materie prime e la digitalizzazione dei processi produttivi. Ciò viene fatto senza alterare drasticamente il funzionamento delle operazioni industriali. Anche se queste soluzioni non sono sufficienti per compensare le emissioni processuali, costituiscono un importante passaggio nel processo di trasformazione del settore verso modelli produttivi più sostenibili (*International Energy Agency* [IEA], 2020)[63].

Capitolo V – Il caso Unicalce

Il motto di Unicalce mostra come un'azienda tradizionale del settore della calce può combinare innovazione tecnologica e sostenibilità ambientale: "Innoviamo la tradizione". Con una lunga storia di produzione di calce e derivati, Unicalce si distingue per l'adozione di soluzioni tecnologiche avanzate per ridurre le emissioni di CO2, ottimizzare i processi produttivi e utilizzare fonti energetiche alternative. L'azienda promuove lo sviluppo sostenibile e l'innovazione nel territorio in cui opera, combinando interventi tecnici con una rendicontazione trasparente delle proprie performance ESG. Inoltre, promuove collaborazioni con enti di ricerca e partner industriali.

Figura 5.1: Logo di Unicalce



Fonte: Unicalce

5.1 Profilo aziendale: storia, struttura e posizionamento nel settore

Unicalce S.p.A. è stata fondata nel 1997 dall'unione di aziende storiche del settore calce, come Gnecchi-Donadoni S.p.A. e Ghisalberti S.p.A., che erano in attività rispettivamente dal 1923 e dal 1927. La prima operava a Maggianico (Lecco) con due forni alimentati a legna. A Brembilla (Bergamo), la seconda si distingueva subito per un metodo di produzione

innovativo. La storia del gruppo Unicalce prende avvio ben prima della sua fondazione formale. Un ruolo centrale è svolto da Dolomite Colombo, fondata nel 1936 a Lecco e guidata dalla famiglia Colombo, che nel corso degli anni Sessanta diventa il principale motore finanziario di un processo di aggregazione industriale. Un passaggio decisivo in questa fase è l'acquisizione del pacchetto azionario della Gnecchi-Donadoni, che segna l'inizio di una strategia di crescita per linee esterne. In questa prospettiva si colloca anche la nascita di Sider Calce, fondata nel 1969 da Ghisalberti con un impianto produttivo a Campiglia Marittima. La presenza dell'azienda nel centro Italia si consolida ulteriormente nel 1986 con l'acquisizione di Calce San Pellegrino di Narni, che rafforza il posizionamento geografico e produttivo del gruppo.

Nel tempo, il nucleo originario viene ampliato attraverso l'integrazione di diverse realtà produttive distribuite sul territorio nazionale, tra cui Calce Dolomia, Simet, Campania Calce e Latincalce. Questo processo progressivo di consolidamento porta alla fondazione ufficiale di Unicalce nel 1997. Nei primi anni Duemila la crescita prosegue sia tramite nuove acquisizioni, come Calci Idrate, sia attraverso l'avvio di Premier Unicalce, linea dedicata ai premiscelati per l'edilizia.

Oggi il gruppo Unicalce rappresenta uno dei principali operatori europei nel settore della calce ed è leader in Italia. Il controllo rimane in capo alla Dolomite Colombo S.p.A., mentre nella compagine societaria è presente anche Carmeuse Holding S.A., uno dei maggiori produttori mondiali del settore. Questa struttura proprietaria riflette una combinazione di radicamento nazionale e apertura internazionale.

Dal punto di vista produttivo, l'attività del gruppo si concentra sull'estrazione e la lavorazione dei carbonati, da cui derivano calce e inerti destinati a molteplici utilizzi. L'offerta comprende, tra gli altri, grassello di calce, malte umide, ossidi e idrati di magnesio, ossido dolomitico e miscele desolforanti, oltre a prodotti specifici per l'agricoltura e la

zootecnia. Accanto a questi, vengono realizzati inerti impiegati sia nell'edilizia sia in applicazioni industriali. Un ruolo rilevante è svolto infine dai prodotti per l'edilizia a marchio Premier, che affiancano alle produzioni tradizionali una gamma di premiscelati e finiture a base di calce.

L'azienda ha 13 stabilimenti produttivi attivi in Italia (Figura 5.2 a pag. 60) e collaborazioni con altre aziende del settore sia in Italia che all'estero. La capacità produttiva di calce è di due milioni di tonnellate annue. Il quartier generale di Lecco ospita le principali attività amministrative e direzionali.

Figura 5.2: Sedi e stabilimenti produttivi attivi

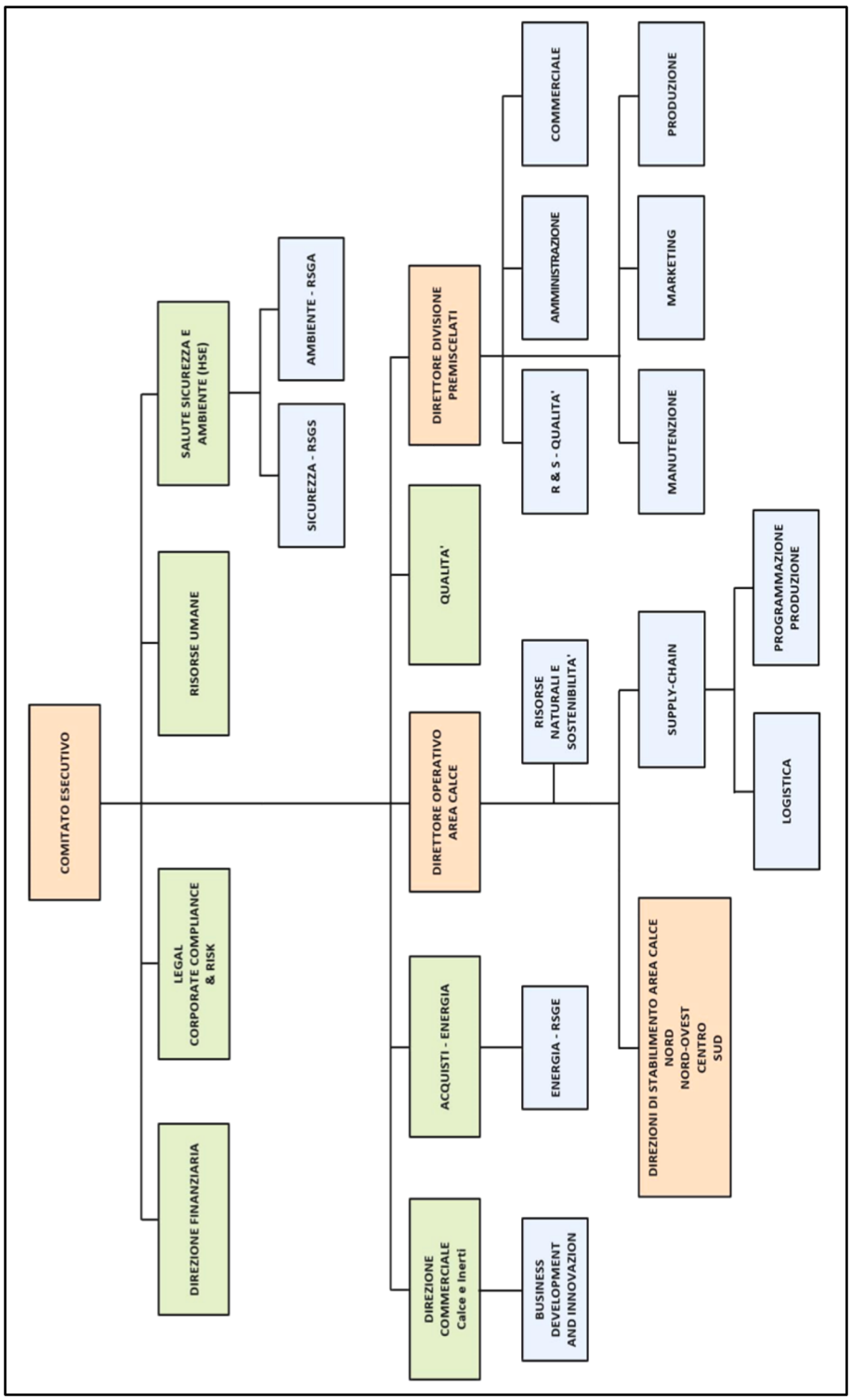
AREA	STABILIMENTO	PROVINCIA	ATTIVITÀ
	SEDE DIREZIONALE DI LECCO	BERGAMO	Uffici direzionali ed operativi
NORD OVEST	VALBREMBILLA	BERGAMO	Cava - Produzione di calce
NORD OVEST	LISSO	BERGAMO	Produzione di calce
NORD OVEST	CASNIGO	BERGAMO	Cava
NORD OVEST	MAGGIANICO	LECCO	Cava - Produzione di calce
NORD EST	BERNEZZO	CUNEO	Cava - Produzione di calce
NORD EST	GENOVA	GENOVA	Cava
CENTRO	CAMPIGLIA MARITTIMA	LIVORNO	Produzione premiscelati
CENTRO	TERNI	TERNI	Produzione premiscelati
CENTRO	NARNI - SAN PELLEGRINO	TERNI	Cava - Produzione di calce
CENTRO	NARNI - MADONNA SCOPERTA	TERNI	Cava - Produzione premiscelati
CENTRO	SCOPPITO	L'AQUILA	Cava
CENTRO	ITRI	LATINA	Cava - Produzione di calce
SUD	PALAGIANO	TARANTO	Cava - Produzione di calce e premiscelati



Fonte: Dichiarazione ambientale EMAS 2025. Unicalce S.P.A.

L’attuale organizzazione dell’azienda (Grafico 5.3 a pag. 62) vede attualmente al vertice un Comitato Esecutivo che ha la responsabilità operativa e gestionale dell’azienda e che costituisce l’Alta Direzione in quanto ha il potere di stabilire, sulla base degli indirizzi societari, in maniera diretta e determinante la politica, gli obiettivi ed il programma ambientali del Sito, con capacità di spesa per sostenerne l’attuazione. È responsabile dell'andamento globale degli stabilimenti del gruppo, dell'attuazione delle strategie e delle politiche aziendali e della loro gestione organizzativa. Nell’ambito dei Sistemi di Gestione Ambientale definisce in particolare la Politica Ambientale e le procedure generali. Dal Comitato Esecutivo dipendono il Direttore Operativo Area Calce con funzioni di coordinamento delle direzioni di stabilimento per l’area calce e pietrischi e il Direttore Divisione Premiscelati.

Grafico 5.3: Organigramma aziendale



Fonte: Dichiarazione ambientale EMAS 2025. Unicalce S.P.A.

5.2 Profilo tecnologico di Unicalce

L'innovazione tecnologica di Unicalce si concentra sui processi produttivi, in particolare sulla fase di cottura del calcare nei forni, che è il fulcro dell'attività industriale. Ad oggi, l'azienda utilizza forni tradizionali insieme a tecnologie più sofisticate, come i forni rigenerativi, che offrono una maggiore efficienza energetica grazie al recupero del calore. La qualità della calce prodotta non subisce cambiamenti rilevanti; ciò che viene modificato è soprattutto il processo produttivo. L'innovazione introdotta consente infatti di ridurre in modo significativo i consumi energetici per unità di prodotto. Si tratta di un'innovazione incrementale, tipica di un settore industriale maturo, in cui non si punta a rivoluzionare il sistema produttivo, ma piuttosto a renderlo progressivamente più efficiente.

Un ambito particolarmente rilevante di innovazione riguarda la fonte energetica utilizzata nei forni. Negli ultimi anni, anche a causa di pressioni normative e ambientali sempre più stringenti, Unicalce ha avviato l'impiego di forni alimentati a biomassa, andando a sostituire, almeno in parte, i combustibili fossili tradizionali. Questa scelta permette di ridurre l'impronta carbonica del processo produttivo e si inserisce in un percorso più ampio di transizione energetica. Da un punto di vista sociologico, tale decisione non può essere interpretata esclusivamente come una scelta tecnica o economica: essa risponde anche a vincoli esterni di natura normativa, ambientale e sociale, che incidono in modo crescente sulle strategie aziendali. L'innovazione assume quindi una funzione che va oltre l'efficienza produttiva, contribuendo alla sostenibilità e alla legittimazione dell'impresa nel lungo periodo.

L'innovazione tecnologica interessa anche la fase estrattiva. In questo ambito, l'adozione di cave sotterranee, in alternativa a quelle a cielo aperto, consente di ridurre il consumo di suolo e l'impatto sul paesaggio.

Ciò ha effetti rilevanti anche sul piano sociale, poiché contribuisce a limitare i conflitti con le comunità locali. Questa soluzione, tuttavia, non è priva di criticità: richiede l'impiego di tecnologie avanzate di scavo e ventilazione, sistemi di monitoraggio strutturale e standard elevati di sicurezza sul lavoro. In questo caso emerge chiaramente la dimensione sociotecnica dell'innovazione, nella quale le scelte tecnologiche si intrecciano con aspetti organizzativi e con la gestione del rischio.

Accanto alle innovazioni di tipo impiantistico ed energetico, Unicalce sta investendo anche nella digitalizzazione dei processi produttivi. I sistemi di monitoraggio digitale e di raccolta dei dati permettono un controllo più puntuale dei parametri operativi, migliorando la manutenzione degli impianti e riducendo i tempi di fermo. Allo stesso tempo, essi consentono una misurazione più accurata dei consumi energetici e delle emissioni, facilitando il rispetto degli obblighi di monitoraggio e rendicontazione previsti a livello europeo.

Nel complesso, il caso Unicalce mostra come, nei settori industriali tradizionali, l'innovazione assuma prevalentemente la forma di un adattamento continuo ai vincoli tecnologici, ambientali e regolativi. Attraverso il miglioramento dell'efficienza dei forni, l'utilizzo di fonti energetiche alternative, tecniche estrattive meno impattanti e la digitalizzazione dei processi, l'azienda cerca di contenere gli effetti delle politiche climatiche europee, in particolare del sistema EU ETS, mantenendo al tempo stesso la propria competitività.

L'innovazione tecnologica emerge così come un fattore centrale di sviluppo qualitativo e di resilienza industriale in un contesto caratterizzato da crescenti vincoli ambientali e da un rafforzamento della regolazione climatica a livello europeo.

5.2.1 Uso di combustibili alternativi e ricorso agli SRF

Nel caso di Unicalce, l'utilizzo di combustibili alternativi e il progressivo ricorso agli SRF (*Solid Recovered Fuels*) sono componenti fondamentali della strategia per ridurre l'intensità carbonica del processo produttivo. Dal punto di vista tecnico, una parte consistente della capacità produttiva dell'azienda risulta già compatibile con l'impiego di combustibili solidi alternativi. In particolare, oltre la metà degli impianti è in grado di utilizzare questa tipologia di combustibili, mentre circa un terzo della capacità produttiva complessiva – fino a circa il 40% – può operare con livelli elevati di sostituzione dei combustibili fossili tradizionali. La quota restante continua invece a basarsi prevalentemente su alimentazioni convenzionali, oppure fa un ricorso ancora limitato ai combustibili alternativi. Nel complesso, questo dato suggerisce che la diversificazione del mix energetico non rappresenti più una scelta marginale, ma costituisca ormai un elemento strutturale del modello operativo dell'azienda.

La possibilità di utilizzare combustibili differenti dipende da una serie di parametri tecnici specifici. Tra questi rientrano il potere calorifico inferiore (PCI), la composizione chimica del combustibile e la quantità di aria necessaria a garantire una combustione efficace. Tali caratteristiche influenzano direttamente il funzionamento degli impianti e ne determinano la compatibilità con determinate fonti energetiche.

A titolo di confronto, il gas naturale presenta un PCI indicativo di circa 8.700 kcal/Nm³ ed è costituito quasi interamente da metano, con un contenuto di zolfo relativamente contenuto. Il *petcoke*, invece, ha un PCI di circa 8.000 kcal/kg ed è caratterizzato da una percentuale di carbonio molto elevata, generalmente compresa tra l'85% e l'87%. La biomassa si colloca su valori di PCI decisamente inferiori, in genere tra 3.800 e 4.100

kcal/kg, ed è contraddistinta da una maggiore presenza di ossigeno e da un contenuto di umidità più elevato.

Le conseguenze operative di queste differenze risultano evidenti se si considera un apporto energetico equivalente pari a 1.000 kcal. Per ottenere tale quantità di energia sono necessari circa 0,11- 0,12 Nm^3 di gas naturale, con un fabbisogno d'aria di circa 1,1 Nm^3. Nel caso del *petcoke,* l'energia equivalente richiede circa 0,12–0,13 kg di combustibile e un volume d'aria simile. La biomassa, al contrario, necessita di una quantità significativamente maggiore di materiale, pari a circa 0,24–0,26 kg, per fornire lo stesso contributo energetico.

Questo aspetto comporta una produzione di volumi più elevati di gas combusti e una maggiore incidenza dell'umidità sul bilancio termico complessivo. Di conseguenza, l'impiego della biomassa come combustibile solido secondario comporta un aumento delle portate volumetriche all'interno del sistema a parità di energia utile, con effetti diretti sulla gestione della combustione e sul controllo delle emissioni.

Ulteriori criticità possono emergere in relazione alla composizione chimica dei combustibili solidi. In particolare, la presenza di cloro richiede un attento controllo qualitativo, poiché durante la combustione possono formarsi fumi contenenti acido cloridrico (HCl). In questi casi diventa necessario prevedere sistemi di abbattimento specifici, come l'iniezione di reagenti alcalini, per ridurre le concentrazioni emissive. Allo stesso tempo, le frazioni inorganiche presenti nei combustibili solidi non vengono eliminate nel processo di combustione, ma permangono nelle ceneri finali, con possibili effetti sulla composizione chimica della calce prodotta.

Grafico 5.4: La tabella seguente riassume i principali parametri energetici dei combustibili considerati nel caso Unicalce, rapportati a un apporto energetico equivalente di 1.000 kcal.

Combustibile	PCI indicativo	Quantità per 1.000 kcal	Aria necessaria per 1.000 kcal*	Caratteristiche rilevanti
Gas naturale	≈ 8.700 kcal/Nm³	≈ 0,11–0,12 Nm³	≈ 1,1 Nm³	Alto contenuto di CH_4, assenza di ceneri
Petcoke	≈ 8.000 kcal/kg	≈ 0,12–0,13 kg	≈ 1,1 Nm³	Elevato contenuto di C (≈85–87%), possibile presenza di S
Biomassa	≈ 3.800–4.100 kcal/kg	≈ 0,24–0,26 kg	≈ 1,0–1,1 Nm³	Maggiore contenuto di O_2 e umidità, maggiori volumi di fumi

Fonte: Nostre elaborazioni su dati Unicalce

Dal confronto riassunto nel Grafico 5.4 emerge chiaramente che la biomassa, a parità di energia utile, deve essere impiegata in quantità molto maggiori rispetto ai combustibili fossili. Questo aspetto non è neutro dal punto di vista operativo, poiché incide sulle portate, sui volumi dei gas combusti, sulla gestione delle ceneri e sulle modalità di controllo delle emissioni.

Dal punto di vista ambientale ed energetico, l'aumento dell'utilizzo di biomasse nel mix aziendale ha effetti rilevanti. In primo luogo, permette di ridurre la quota di CO_2 di origine fossile associata a ogni unità di prodotto. Inoltre, rende possibile l'utilizzo energetico di materiali che, altrimenti, sarebbero semplicemente destinati allo smaltimento. L'analisi cumulativa della capacità installata evidenzia come le sostituzioni energetiche già realizzate abbiano ridotto in modo significativo la dipendenza dal gas naturale. Questo aspetto appare particolarmente

rilevante se si considerano sia gli obblighi derivanti dai meccanismi di scambio delle quote di emissione, sia l'instabilità dei mercati energetici, rispetto ai quali l'azienda risulta oggi maggiormente resiliente.

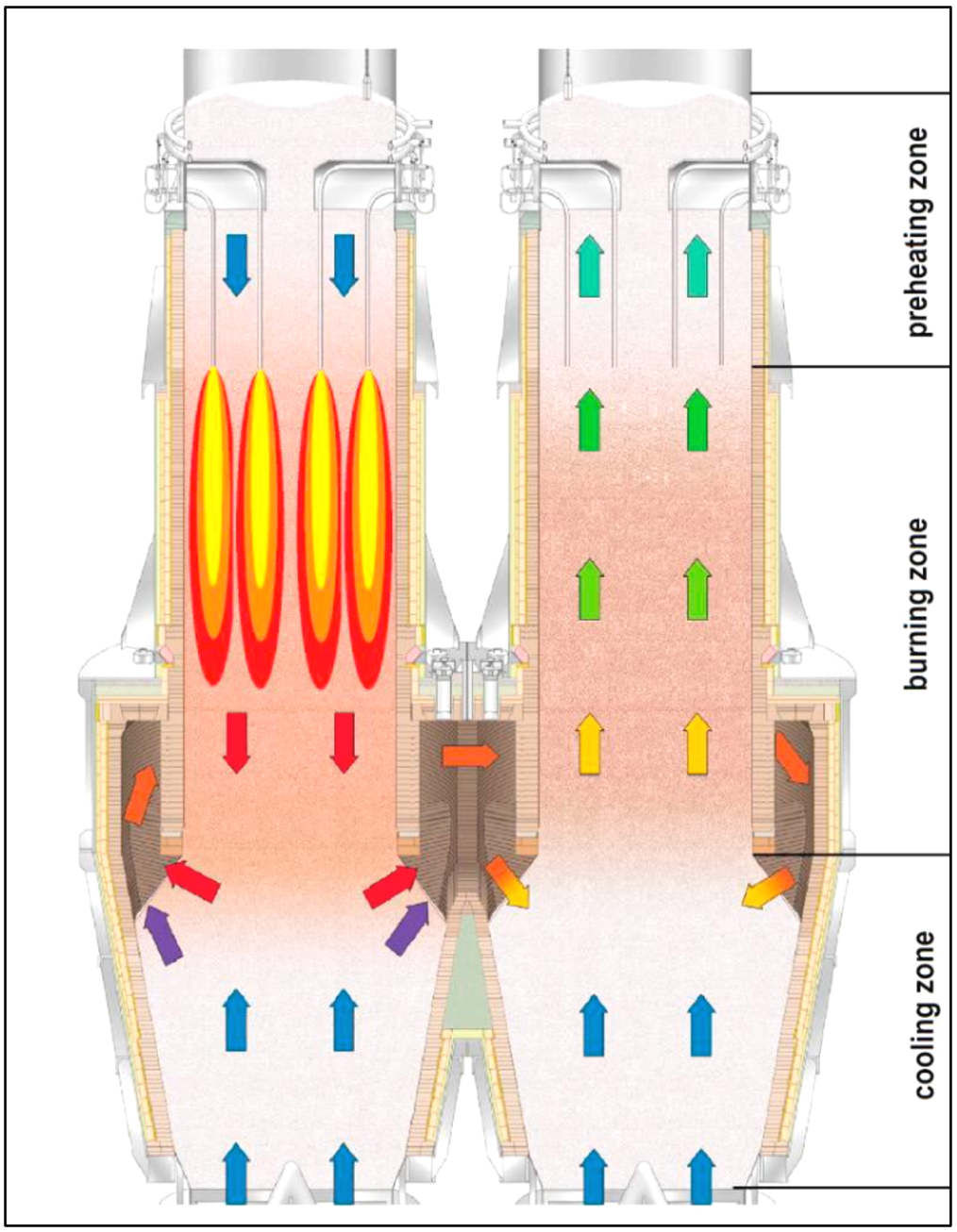
Nel complesso, il caso Unicalce mostra come l'adozione di biomasse sia basata su valutazioni tecniche puntuali in termini di potere calorifico, rapporto aria/combustibile, composizione chimica e gestione delle emissioni. Inoltre, rappresentano una scelta industriale organizzata che può coniugare efficienza energetica, sostenibilità ambientale e flessibilità gestionale.

5.2.2 Fonti energetiche alternative e ottimizzazione dei forni

L'ottimizzazione dei forni rigenerativi a doppio tino (PFRK) è strettamente correlata all'integrazione di biomassa e altri SRF nel ciclo produttivo di Unicalce. Al fine di mantenere un consumo specifico di calce di 800–870 kcal/kg, questi forni funzionano con un principio di recupero termico tra due tini alternativi. La tecnologia rigenerativa ha un'elevata efficienza termica intrinseca che consente di compensare, se non completamente, il PCI inferiore della biomassa rispetto ai combustibili fossili. La maggior parte dei forni verticali rigenerativi a doppio tino (PFRK) utilizzati dal gruppo Unicalce sono affiancati in misura più limitata da altre configurazioni verticali, come forni a tino anulare o impianti di nuova generazione tecnologica, che sono presenti in particolari siti produttivi. L'esigenza di massimizzare l'efficienza termica e garantire un controllo accurato del processo di calcinazione è la ragione per cui la tecnologia PFRK è la scelta più comune.

Processo nel forno rigenerativo

Figura 5.5: Forno rigenerativo a doppio tino (PFRK)



Fonte: Unicalce

Il forno PFRK (Fig. 5.5) è costituito da due tini verticali collegati da un canale di interconnessione. I due tini funzionano contemporaneamente: Uno è in fase di combustione, mentre l'altro è in fase di rigenerazione. Il principio di funzionamento utilizza la zona di cottura per il riscaldamento

in “equicorrente” e la zona di preriscaldo per il recupero termico in controcorrente. Il combustibile viene immesso nel tino in combustione attraverso lance verticali situate nella parte superiore della zona di cottura. Prima di essere mescolata con il combustibile, l'aria di combustione viene riscaldata attraverso il materiale caldo quando viene introdotta sopra il letto di pietra. La miscela aria-combustibile trasferisce il calore lentamente e regolarmente mentre scende in “equicorrente” con il materiale. Per la calcite la dissociazione del carbonato di calcio avviene principalmente a 890–910 °C, invece per la dolomite intorno a 680–700 °C. I gas caldi prodotti durante la fase di combustione passano poi attraverso il canale di collegamento ed entrano nel tino di rigenerazione. Qui, la pietra cruda viene riscaldata in controcorrente dai gas caldi che vengono prodotti dalla combustione. Questo la prepara al ciclo successivo. Questo meccanismo, che si inverte ogni 12–15 minuti, consente un elevato recupero termico e una notevole riduzione delle perdite energetiche.

Parametri tecnici di ottimizzazione

L'utilizzo di biomassa richiede un rigoroso controllo dei parametri operativi del forno:

- La distribuzione termica e la lunghezza della fiamma nel letto di pietra sono influenzate dal **fattore di eccesso d'aria (λ)**, che è tipicamente compreso tra 1,05 e 1,30. A causa della variabilità del PCI e dell'aria di trasporto correlata al combustibile, la gestione di λ diventa più difficile quando ci sono combustibili solidi.
- **L'aria di raffreddamento calce (ACL)**, espressa in Nm^3/kg CaO, ha un impatto diretto sul consumo specifico generale. Un eccesso di aria di raffreddamento aumenta la quantità di energia necessaria, mentre valori troppo bassi compromettono la stabilità del prodotto e il recupero termico.
- Un altro indicatore importante è la **temperatura operativa**: La

temperatura del canale varia dal 900 al 1100 °C in base al tipo di materiale trattato; la temperatura dei fumi in uscita è direttamente correlata al livello di recupero energetico. Ogni aumento di circa 10 °C nei fumi può causare un aumento di circa 10 kcal/kg CaO nel consumo specifico.

- Infine, il **livello di CO_2 residuo** nella calce funge da indicatore di qualità: percentuali comprese tra 0,3% e 1,5% indicano una cottura ideale. Il bilanciamento della temperatura, del tempo di permanenza e del profilo di fiamma in presenza di biomassa è fondamentale per evitare fenomeni di *overcooking* e *undercooking*.

La presenza dei forni PFRK in Unicalce consente l'integrazione tecnica sostenibile della biomassa nel ciclo produttivo. Per mantenere la stabilità operativa e la qualità del prodotto, l'elevata efficienza rigenerativa, il controllo preciso dei parametri di combustione e il monitoraggio continuo delle emissioni consentono una graduale riduzione della quota di combustibile fossile. Pertanto, l'ottimizzazione dei forni è la condizione tecnica necessaria per rendere efficace la strategia energetica basata su combustibili alternativi.

5.2.3 Gestione dell'energia e tecnologie pulite

L'energia rappresenta un elemento chiave per Unicalce, in quanto risorsa indispensabile per lo svolgimento dei propri processi produttivi. Consapevole della sua centralità, l'Azienda attribuisce grande valore a una gestione energetica efficiente e ha definito una politica energetica strutturata, con obiettivi chiari e orientati al miglioramento continuo delle proprie performance. La politica energetica è concentrata sull'uso ottimizzato delle risorse, sull'introduzione di tecnologie all'avanguardia e su misure per aumentare l'efficienza energetica. Vengono inoltre condotte

periodicamente analisi energetiche per identificare eventuali criticità e porre soluzioni più sostenibili.

Nel corso dell'ultimo periodo, sono stati realizzati importanti interventi di efficientamento energetico in diversi stabilimenti del gruppo (annualmente rendicontati ad ENEA), con l'obiettivo di ridurre i consumi e migliorare le prestazioni complessive degli impianti. Tra le azioni intraprese figurano l'ammodernamento delle sale compressori, l'installazione di sistemi di monitoraggio dei consumi e la sostituzione di macchinari obsoleti con apparecchiature di nuova generazione ad alta efficienza. In alcuni casi, è stato ottimizzato anche il layout impiantistico, riposizionando le sale di generazione in aree più baricentriche rispetto alle utenze, così da migliorare la distribuzione dell'energia e ridurre le dispersioni.

Sono inoltre stati installati nuovi motori elettrici ad alta efficienza, con risultati significativi in termini di riduzione dei consumi (fino a 10.598 kWh in un caso). Alcuni interventi hanno incluso anche il *revamping* di edifici, la sostituzione di soffianti obsoleti con modelli più performanti e l'installazione di motori per una potenza complessiva di 72 kW.

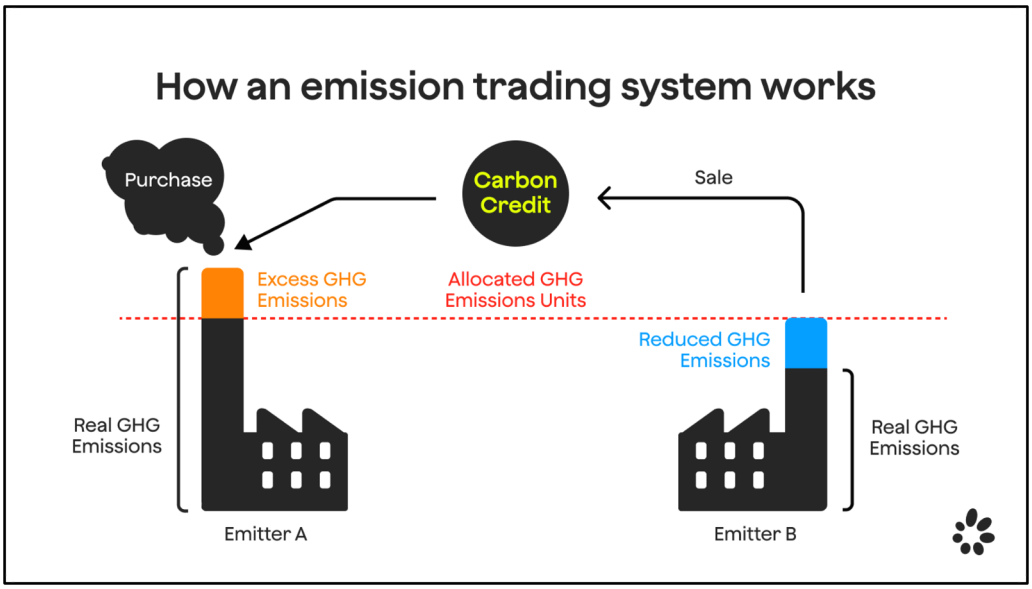
In linea con gli obiettivi aziendali, sono stati introdotti compressori di maggiore potenza (fino a 250 kW) e sostituiti, in alcuni casi, fino a 35 motori con versioni più efficienti. In altri contesti, è stata completata la sostituzione integrale dei motori obsoleti, contribuendo concretamente alla riduzione dei consumi.

5.2.4 Certificazioni ed EU ETS

Unicalce è direttamente coinvolta nel sistema europeo di scambio delle quote di emissione (EU ETS), poiché la produzione di calce è tra le attività industriali che sono sottoposte a monitoraggio e restituzione delle quote di

CO_2. Infatti, il processo produttivo produce emissioni sia dalla combustione dei combustibili utilizzati nei forni che dalla reazione chimica di decarbonatazione del carbonato di calcio. Di conseguenza, l'azienda è tenuta a contabilizzare le proprie emissioni ogni anno e a restituire un numero di quote corrispondente alla CO2 verificata. Di conseguenza, rimane esposta al prezzo di mercato del carbonio e alle crescenti restrizioni delle politiche climatiche europee.

Figura 5.6: Funzionamento del sistema EU ETS



Fonte: Contropiede

La figura 5.6 rappresenta il funzionamento di un sistema *di emission trading* (ETS): viene fissato un tetto massimo alle emissioni complessive e distribuite quote alle imprese; quelle che superano il limite devono acquistare crediti sul mercato, mentre quelle che riducono le proprie emissioni possono venderli.

Per Unicalce, la gestione ambientale assume un ruolo strategico soprattutto alla luce del contesto normativo in cui l'azienda opera. Non si

tratta più soltanto di rispettare obblighi formali, ma di costruire strumenti che permettano sia una legittimazione verso l'esterno sia un maggiore controllo interno delle proprie performance ambientali. In questa direzione si colloca l'adozione di un sistema articolato di certificazioni e strumenti di rendicontazione.

In particolare, l'azienda ha pubblicato quattro Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD), relative alla Calce Calcica, alla Calce Dolomitica, alla Calce Idrata Calcica e alla Calce Magnesiaca. Le EPD sono conformi alla norma ISO 14025:2006 e risultano registrate presso *The International EPD® System*. Esse sono state sviluppate secondo la PCR 2021:03 "*Basic Chemicals*" e si basano su un'analisi del ciclo di vita (*Life Cycle Assessment*), realizzata tramite il *software OpenLCA* e il *database Ecoinvent*, con dati riferiti all'anno 2023.

I confini del sistema sono generalmente definiti come "*cradle to gate with options*" e comprendono le fasi a monte, i processi produttivi principali e una parte delle fasi a valle, limitata al trasporto e al fine vita dell'imballaggio. La fase d'uso del prodotto è invece esclusa, scelta che risulta comprensibile se si considera l'elevata varietà di applicazioni finali della calce.

La pubblicazione delle EPD non ha soltanto una funzione informativa. Essa presuppone infatti l'esistenza di un sistema interno strutturato per la raccolta, l'elaborazione e la validazione dei dati ambientali. Questo aspetto diventa particolarmente rilevante nel contesto attuale, in cui clienti e partner industriali sono sempre più chiamati a includere le emissioni dei fornitori nei propri inventari di emissioni di *Scope* 3. In questo senso, le EPD contribuiscono a migliorare il posizionamento competitivo dell'impresa, favorendo la trasparenza e facilitando l'integrazione dell'azienda all'interno di filiere produttive orientate alla decarbonizzazione.

Come mostrato in figura 5.7 (fig. a pag. 75), tutti gli stabilimenti Unicalce

sono certificati secondo gli standard ISO per qualità (ISO 9001:2015), ambiente (ISO 14001:2015) e salute e sicurezza sul lavoro (ISO 45001:2018). Inoltre, la maggior parte dei siti produttivi ha ottenuto anche la registrazione EMAS e la certificazione sui sistemi di gestione dell'energia (ISO 50001:2018), a conferma del forte impegno dell'azienda verso una gestione responsabile e sostenibile.

Figura 5.7: Certificazioni ISO ed EMAS per stabilimento

IMPIANTO	ISO 14001	EMAS	ISO 50001
SEDE DIREZIONALE LECCO	✓	✓	
BERNEZZO	✓	✓	✓
CAMPIGLIA MARITTIMA	✓	✓	
ITRI	✓		✓
LECCO	✓		
LISSO	✓		
NARNI – MADONNA SCOPERTA	✓	✓	✓
NARNI – SAN PELLEGRINO	✓	✓	✓
PALAGIANO	✓		✓
TERNI	✓	✓	
VAL BREMBILLA	✓		✓
GENOVA			

Nostre elaborazioni su fonte Unicalce

L'azienda riceve un punteggio ambientale di 68/100 dalla *Sustainability Scorecard EcoVadis* 2025, un punteggio di 100/100 nella categoria certificazioni e un posizionamento nel percentile 80°. La *scorecard* evidenzia inoltre la rendicontazione delle emissioni di *Scope 1, Scope 2 e Scope 3* e le misure per ridurre l'intensità del carbonio, tra cui miglioramento dell'efficienza energetica, utilizzo di fonti energetiche rinnovabili, *audit* energetici e cambio di combustibile.

L'interazione tra il sistema ETS dell'Unione europea e le certificazioni ambientali adottate dall'azienda è fondamentale per la definizione della strategia aziendale. A causa del fatto che le emissioni hanno un impatto diretto sulla struttura dei costi, l'ETS impone un costo esplicito alla CO_2. Di conseguenza, le iniziative per l'efficientamento energetico e la riduzione dell'intensità delle emissioni sono strumenti per la gestione del rischio economico associato alla volatilità del prezzo delle quote di emissione oltre a essere interventi ambientali. Anche se la reazione di decarbonatazione è una componente strutturale delle emissioni, la riduzione dei consumi energetici e l'utilizzo di combustibili alternativi consentono di contenere la componente emissiva legata alla combustione, attenuando l'esposizione dell'azienda al mercato delle quote. Quindi, il caso Unicalce mostra un modello di integrazione tra i requisiti regolatori dell'UE ETS e gli strumenti di certificazione ambientale volontaria. La rendicontazione ESG rafforza la legittimazione istituzionale dell'impresa, le certificazioni ISO ed EMAS rafforzano la governance interna e le EPD migliorano la trasparenza lungo la catena del valore.

5.3 Rendicontazione non finanziaria ESG

La rendicontazione non finanziaria è diventata progressivamente uno strumento fondamentale per le aziende di maggiori dimensioni per garantire trasparenza e responsabilità nel contesto dei cambiamenti della legislazione europea sulla sostenibilità. È importante chiarire che Unicalce non è formalmente tenuta a redigere una rendicontazione ESG secondo gli standard previsti dalla *Corporate Sustainability Reporting Directive* (CSRD), dal momento che non rientra nei requisiti dimensionali fissati dalla normativa. La scelta di pubblicare un report di sostenibilità va quindi letta come una decisione volontaria, che segnala la volontà dell'azienda di comunicare in modo più strutturato e trasparente il proprio impegno nelle

dimensioni ambientale, sociale e di *governance*.

Proprio l'assenza di un obbligo formale rende questa scelta particolarmente significativa. In questo caso, la comunicazione ESG non risponde a una semplice necessità di conformità normativa, ma assume una funzione più ampia. Diventa infatti uno strumento di posizionamento reputazionale, di dialogo con gli *stakeholder* e, più in generale, di costruzione di un'immagine aziendale coerente con le trasformazioni in atto nel contesto economico e regolativo.

L'evoluzione del *reporting* in Unicalce mostra come la sostenibilità stia progressivamente assumendo un ruolo centrale nella strategia d'impresa, superando una concezione puramente accessoria o limitata alla comunicazione. L'allineamento volontario ai principi della CSRD e agli *European Sustainability Reporting Standards* (ESRS) consente inoltre di adottare criteri di rendicontazione più rigorosi e comparabili, contribuendo a migliorare la qualità e la credibilità delle informazioni diffuse. In questo senso, la rendicontazione diventa uno strumento attraverso cui l'azienda rende esplicite le proprie priorità strategiche, le azioni intraprese e le responsabilità che intende assumersi nel medio-lungo periodo.

L'identificazione e il coinvolgimento sistematico degli *stakeholder* lungo l'intera catena del valore sono un primo elemento centrale della comunicazione ESG di Unicalce. La mappatura delle persone che le attività dell'azienda possono influenzare o essere influenzate include fornitori, dipendenti, clienti, istituzioni, comunità locali e società civile. Il risultato di questo processo è la creazione di strumenti di consultazione come questionari e momenti di confronto che consentono di raccogliere aspettative e percezioni relative alle questioni ESG considerate più significative. La comunicazione aziendale di Unicalce si basa su una logica che non è puramente unidirezionale. L'impresa, infatti, non si limita a diffondere informazioni verso l'esterno, ma cerca di integrare nel proprio processo decisionale anche stimoli, richieste e aspettative provenienti dagli *stakeholder*.

In questo senso, la comunicazione assume una dimensione più dialogica, che va oltre la semplice funzione informativa.

Un elemento centrale di questo approccio è rappresentato dall'adozione del principio della doppia materialità. Attraverso l'analisi di Impatti, Rischi e Opportunità (IRO), Unicalce distingue tra la materialità d'impatto, legata agli effetti che l'attività aziendale produce sull'ambiente, sull'economia e sulla comunità, e la materialità finanziaria, connessa invece ai rischi e alle opportunità ESG in grado di influenzare le *performance* economiche dell'impresa. Il *report* non si limita a elencare i temi considerati rilevanti, ma rende espliciti anche i criteri utilizzati per la loro valutazione, come la gravità, la portata e la probabilità degli impatti. Viene inoltre chiarito il ruolo svolto dal *management* e dal Comitato Sostenibilità nel processo di validazione. Questo aspetto contribuisce a rafforzare la credibilità della rendicontazione, poiché rende trasparenti non solo i risultati finali, ma anche le procedure attraverso cui vengono definite le priorità.

La narrazione aziendale si concentra poi su alcuni temi ESG ritenuti particolarmente significativi. Sul piano ambientale, l'attenzione è rivolta soprattutto al cambiamento climatico, con un *focus* sul miglioramento dell'efficienza dei processi produttivi, sull'aumento dell'utilizzo di fonti rinnovabili e sullo sviluppo di soluzioni logistiche più sostenibili. In ambito sociale, la salute e la sicurezza dei lavoratori vengono presentate come priorità strategiche, sostenute da standard operativi elevati e da misure preventive volte a ridurre i rischi legati alle attività produttive. Il tema dell'economia circolare viene affrontato in modo più realistico, riconoscendo l'utilizzo di risorse non rinnovabili e ponendo l'accento sulla necessità di un uso più efficiente dei materiali e di un miglioramento continuo delle performance ambientali. Sul versante della *governance*, infine, l'attenzione alla trasparenza, alla tutela della *privacy* e alla protezione dei segnalanti contribuisce a costruire l'immagine di un'impresa orientata alla responsabilità e alla correttezza nei confronti dei propri *stakeholder*.

L’innovazione, infine, è presentata come leva trasversale, capace di sostenere sia la digitalizzazione sia il percorso di sostenibilità, anche attraverso collaborazioni con *partner* accademici e territoriali.
L’adozione volontaria di un sistema di rendicontazione non finanziaria può essere interpretata come una strategia di legittimazione nel contesto locale in cui l’azienda opera. Unicalce non si limita a fornire dati, ma contribuisce a costruire un quadro interpretativo attraverso cui la propria attività viene valutata dalla comunità e dagli altri portatori di interesse. In questa prospettiva, la rendicontazione ESG assume una funzione di *accountability* multilivello, finalizzata a rafforzare fiducia, trasparenza e comparabilità delle informazioni. Il *report,* dunque, non è soltanto un adempimento tecnico, ma uno strumento attraverso cui l’impresa rende pubbliche le proprie responsabilità e consolida un dialogo continuo con il territorio, integrando dimensioni economiche, ambientali e sociali in una visione di sviluppo sostenibile.

5.3.1 Obiettivi Sociali e di Governance

Come definito nella figura 5.8 (fig. 5.8 a pag. 80), Unicalce a ha definito un insieme organizzato di obiettivi sociali e di *governance*, accompagnati da scadenze temporali e da un monitoraggio dello stato di avanzamento, nel quadro del proprio impegno ESG. Tali obiettivi sono articolati per aree di intervento e *stakeholder* coinvolti, come emerge dalla mappatura delle azioni previste, e riflettono il tentativo di rendere la sostenibilità parte integrante della pianificazione strategica. Questo approccio sottolinea il desiderio di superare una logica meramente dichiarativa, rafforzando invece la dimensione operativa e misurabile degli impegni assunti.

Figura 5.8: Obiettivi sociali e di governance nell'ambito della strategia ESG



Fonte: Report SOWE

Sul piano della *governance*, l'adozione di un sistema strutturato di *Enterprise Risk Management* rappresenta un passaggio rilevante verso l'integrazione dei rischi ESG nei meccanismi di controllo interno e nei processi decisionali. La pubblicazione del *Report* di Sostenibilità, insieme agli aggiornamenti periodici sui temi ESG, contribuisce a rafforzare trasparenza, *accountability* e coerenza strategica. In questa stessa direzione si colloca l'attenzione alla correttezza della comunicazione, soprattutto alla luce dell'evoluzione normativa in materia di *green claims*,

che impone *standard* più rigorosi e una maggiore affidabilità delle informazioni ambientali diffuse al mercato.

Per quanto riguarda la dimensione sociale, gli obiettivi aziendali si concentrano in primo luogo sulla salute e sicurezza dei lavoratori. L'adozione di buone prassi operative, la riduzione degli infortuni e il coinvolgimento attivo dei dipendenti nelle tematiche di sicurezza segnano il passaggio da un approccio prevalentemente conforme alla normativa a una logica orientata alla prevenzione e alla costruzione di una cultura condivisa. A ciò si affiancano interventi riconducibili al *welfare* aziendale, che comprendono il monitoraggio dei bisogni del personale, iniziative per il benessere psico-fisico, azioni di supporto alla conciliazione tra vita lavorativa e privata e un rafforzamento della comunicazione interna.

Accanto alla dimensione interna, l'azienda estende la propria attenzione sociale alla catena di fornitura e al contesto territoriale. Le attività di mappatura e valutazione dei fornitori secondo criteri ESG, insieme alla definizione di una *policy* per una *supply chain* responsabile, indicano la volontà di presidiare gli impatti sociali anche lungo il perimetro esteso dell'organizzazione. Allo stesso modo, le iniziative rivolte alle comunità locali, in particolare attraverso collaborazioni con enti pubblici e del terzo settore, evidenziano un orientamento alla costruzione di relazioni stabili e a progetti di sviluppo condiviso.

Nel complesso, l'analisi degli obiettivi sociali e di *governance* mostra come l'ESG stia progressivamente trovando spazio nei meccanismi di governo aziendale e nella struttura organizzativa. La definizione di azioni concrete, associate a strumenti di monitoraggio, contribuisce a configurare la sostenibilità non come un insieme di iniziative isolate, ma come una leva strategica per lo sviluppo dell'impresa nel medio-lungo periodo.

5.4 Investimenti in R&D e partnership con enti di ricerca e imprese del territorio

Unicalce utilizza la sua attività di ricerca e sviluppo come leva strategica centrale nel suo percorso verso l'innovazione industriale e la transizione verso modelli produttivi più sostenibili. L'azienda ha gradualmente indirizzato i suoi investimenti verso il miglioramento dell'efficienza della produzione, la valorizzazione di materiali secondari e sottoprodotti e l'integrazione di principi di economia circolare e il rafforzamento del dialogo con le comunità scientifiche e accademiche.
La strategia di *R&D* si sviluppa attraverso due linee guida complementari: da un lato i progressi tecnologici nel processo e nei prodotti; dall'altro, stabilire collaborazioni organizzate con università, dipartimenti di ricerca e laboratori specializzati. In questo contesto, l'azienda collabora con diversi enti accademici, tra cui:

- **Università degli Studi di Napoli Federico II**, con il Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse, nell'ambito del progetto di recupero della scoria bianca per la stabilizzazione dei terreni;
- **Politecnico di Milano**, coinvolto in attività di confronto tecnico-scientifico sui materiali e sulle applicazioni innovative nel settore delle costruzioni e dei leganti;
- **Università degli Studi di Milano (Statale)**, nell'ambito di relazioni tecnico-scientifiche e collaborazioni su materiali e sostenibilità;
- **Università di Bologna**, citata tra gli atenei con cui l'azienda intrattiene rapporti in ambito formativo e di ricerca applicata.

Oltre alle collaborazioni universitarie, Unicalce utilizza centri tecnici e laboratori specializzati, tra cui il laboratorio Poliedro di Brescia per le

prove sui misti cementati, il Mining Test Center TOMRA per le sperimentazioni relative al processo di scomposizione dei minerali e la stazione sperimentale del vetro a Murano per le sperimentazioni sul prodotto Spherolime.
All'interno di questo quadro sono collocati i principali progetti di investimento in R&D attualmente in corso.

Limestone Sorting

Il progetto *Limestone Sorting* nasce dall'esigenza di valorizzare la Corniola presente nella cava di Narni, materiale di copertura del calcare compatto utilizzato per la produzione di calce. La Corniola è un carbonato di calcio con una significativa presenza di silice, caratteristica che la rende inadatta alla produzione diretta di calce. Attualmente viene quindi commercializzata come inerte a basso valore aggiunto. La cava presenta volumi già stoccati particolarmente rilevanti, ai quali si aggiungeranno ulteriori quantitativi previsti nell'ambito dell'ampliamento dell'attività estrattiva.
Il progetto prevede l'impiego della tecnologia di selezione mineraria a raggi X (XRT), che consente di separare i materiali in base alla densità atomica. I *test* semi-industriali condotti presso il *Mining Test Center* di Tomra hanno evidenziato risultati promettenti: un elevato tasso di recupero del materiale riutilizzabile nella produzione, una significativa riduzione del contenuto di silice nel prodotto selezionato e la possibilità di integrare una quota controllata di materiale recuperato nel *mix* di alimentazione dei forni, mantenendo i parametri chimici entro limiti tecnicamente accettabili.
Dal punto di vista economico, lo scenario di *sorting* consente di trasformare un sottoprodotto a basso valore in una risorsa interna, aumentando il valore generato lungo la filiera produttiva. L'intervento

contribuisce inoltre a migliorare la pianificazione strategica nel medio-lungo periodo e a ridurre i tempi e i costi di gestione dei cumuli.
Nel complesso, il progetto rappresenta un esempio concreto di innovazione di processo ispirata ai principi dell'economia circolare, in cui l'ottimizzazione tecnologica si traduce in una più efficiente valorizzazione delle risorse.

Spherolime

Il progetto *Spherolime* è uno degli sviluppi più innovativi di Unicalce e ha una forte concentrazione strategica sul mercato del vetro. Il mercato in questione si divide principalmente in due settori: il vetro piano, utilizzato nell'edilizia e nel settore automobilistico, e il vetro cavo, utilizzato nella casa, nel *packaging* alimentare, nelle industrie farmaceutiche e nelle profumerie. Per produrre vetro, è necessaria una miscela principalmente composta da silice, sodio e stabilizzanti del reticolo vetroso. Questi includono tradizionalmente calcare e dolomite crudi, che forniscono magnesio e calcio alla ricetta vetraria.
Tuttavia, nel corso degli ultimi anni, il sistema europeo di scambio delle emissioni (ETS) ha avuto un impatto significativo sul settore, con particolare attenzione alle emissioni associate alle materie prime carbonatiche. In effetti, le emissioni di vetraio sono causate sia dalla decomposizione termica del calcare e della dolomite (emissioni di processo) che dall'utilizzo di gas naturale nei forni fusori (emissioni energetiche). Il vetro, come la calce, è considerato un settore "*hard to abate*" a causa delle elevate temperature operative e della mancanza di alternative tecnologiche mature per la completa decarbonizzazione.

In questo contesto è stato progettato lo *Spherolime*, che è stato sviluppato con l'obiettivo di ridurre le emissioni di carbonio nel mercato del vetro

modificando le emissioni associate alle materie prime. L'idea tecnologica alla base del progetto è trasferire la fase di decarbonatazione dal forno da vetraio al forno da calce, dove il processo è già ottimizzato dal punto di vista energetico e impiantistico. L'utilizzo di ossidi già decarbonatati consente di eliminare la fase endotermica di decomposizione del carbonato nel forno fusorio, con una conseguente riduzione sia del consumo energetico sia delle emissioni dirette. Dal punto di vista della contabilizzazione delle emissioni, ciò comporta un miglioramento del bilancio emissivo diretto del cliente, spostando parte delle emissioni dalla categoria *Scope* 1 del produttore di vetro verso le emissioni a monte della filiera.

Il prodotto, costituito da sferette compatte di calce idrata, è progettato per garantire maggiore stabilità nel flusso del materiale e per ridurre criticità operative quali polveri fuggitive e intasamenti degli impianti. La forma sferica migliora la dosabilità e consente una gestione più controllata nei sistemi di carico del forno rispetto all'impiego di polveri fini.

Dal punto di vista tecnico, gli ossidi di calcio e magnesio rappresentano componenti fondamentali della ricetta vetraria. Eliminando la fase di decomposizione carbonatica nel forno, l'utilizzo di *Spherolime* mantiene il contributo di tali elementi e migliora le prestazioni complessive del processo: i *test* evidenziano una più efficace affinazione del vetro, un aumento della resa del forno e dinamiche di fusione più efficienti. Ne derivano risparmi energetici significativi e una riduzione rilevante delle emissioni complessive di CO_2 rispetto all'impiego di materie prime carbonatiche convenzionali. Per il cliente, questo si traduce in un miglioramento dell'efficienza produttiva e della qualità del prodotto finale, anche a parità di perimetro emissivo complessivo.

Il progetto è stato sviluppato in modo graduale. Dopo una prima fase di *test* interni, finalizzati a verificare le caratteristiche chimico-fisiche del materiale e la compatibilità con le formulazioni vetrarie, è stata avviata

una collaborazione con la Stazione Sperimentale del Vetro di Murano per approfondire gli effetti sulla qualità del vetro prodotto. Sono stati inoltre condotti studi modellistici relativi sia al vetro piano sia al vetro cavo, al fine di valutare l'impatto dell'introduzione del prodotto nei diversi segmenti applicativi.

Parallelamente, l'azienda ha esplorato la possibilità di un finanziamento per la realizzazione di un impianto dedicato attraverso la partecipazione al programma europeo LIFE. Dopo una fase iniziale gestita con il supporto di soggetti terzi, Unicalce sta progressivamente internalizzando la progettazione e l'industrializzazione del processo, con l'obiettivo di consolidare il controllo tecnologico e preparare una diffusione su scala industriale.

La strategia prevede inoltre un dialogo costante con i clienti del settore vetro, al fine di favorire la creazione di una massa critica e accelerare l'adozione del prodotto. Il progetto si configura così come una soluzione win-win: per i vetrai, riduzione delle emissioni dirette, maggiore efficienza energetica e miglioramento qualitativo; per Unicalce, sviluppo di un prodotto innovativo in linea con gli obiettivi di decarbonizzazione della filiera e con le crescenti aspettative del mercato europeo. Nel lungo periodo, l'ambizione è quella di avvicinarsi alla realizzazione di un prodotto a emissioni prossime allo zero, rafforzando al contempo la posizione competitiva dell'impresa in un contesto industriale sempre più orientato alla sostenibilità.

Recupero della scoria bianca per la stabilizzazione dei terreni

Il recupero della scoria bianca, un sottoprodotto del processo siderurgico, è il terzo filone di ricerca. A differenza della scoria nera, già utilizzata come inerte, la scoria bianca è storicamente considerata un materiale problematico, anche per la possibile presenza di fenomeni di rigonfiamento. Ciò significa costi di conferimento elevati e più problemi

relativi alla disponibilità di siti di smaltimento. Il riutilizzo della scoria bianca e l'ossido di calcio sono entrambi utilizzati nel progetto per stabilizzare i terreni argillosi. La stabilizzazione tradizionale avviene miscelando terreno argilloso, calce viva (CaO) e acqua. Il composto cementante, prodotto dalla reazione chimica tra ossido di calcio e minerali argillosi, migliora le proprietà geotecniche del terreno, aumenta la portanza e riduce la plasticità. L'idea progettuale prevede l'utilizzo di scoria bianca insieme all'ossido di calcio per la stabilizzazione dei terreni. L'obbiettivo è:

- valorizzare un sottoprodotto industriale;
- ridurre i costi di smaltimento per il settore siderurgico;
- diminuire il consumo di materie prime vergini;
- contribuire alla sostenibilità complessiva della filiera.

L'Università degli Studi di Napoli Federico II ha collaborato allo sviluppo del progetto. Le ricerche sperimentali vengono condotte all'interno con il supporto della linea Premier, mentre le indagini sui misti cementati vengono condotte dal laboratorio Poliedro di Brescia. Le scorie oggetto di studio provengono da partner dell'azienda operatori del settore siderurgico. Alcune formulazioni sono attualmente in fase di caratterizzazione di laboratorio, mentre altre sono in fase applicativa.

L'analisi dei progetti mostra come l'attività di ricerca e sviluppo di Unicalce non sia episodica, ma strutturata come un sistema integrato di collaborazione scientifica e innovazione tecnologica. *Le partnership* con università e centri di ricerca - fondate su sperimentazione controllata, validazione scientifica e trasferimento tecnologico - rafforzano il collegamento tra ambito accademico e contesto produttivo, rendendo l'innovazione parte integrante della strategia aziendale. L'azienda dimostra inoltre la capacità di trasformare criticità operative e ambientali

in leve di innovazione, come nel caso della valorizzazione della pietra grigia e del recupero della scoria bianca. In queste iniziative, il vincolo tecnico o ambientale diventa punto di partenza per ripensare il processo produttivo.

Nel complesso emerge un modello industriale che integra efficienza, sostenibilità e competitività, orientato a generare valore nel medio-lungo periodo attraverso un adattamento continuo ai vincoli tecnologici e regolativi.

5.5 Risultati e limiti delle strategie adottate

Per evitare una lettura meramente descrittiva del caso è utile ricondurre le evidenze emerse a tre punti teorici discussi nei capitoli precedenti:

Sul tema dell'innovazione come vantaggio competitivo "le strategie di efficientamento energetico, utilizzo di combustibili alternativi e miglioramento continuo dei processi possono essere interpretate non soltanto come misure di sostenibilità, ma come strumenti per consolidare il posizionamento competitivo nel medio periodo, attraverso riduzione dei costi energetici e miglioramento reputazionale. In relazione al ruolo delle politiche pubbliche, il caso Unicalce mostra come strumenti quali il sistema ETS europeo e gli incentivi alla transizione energetica influenzino le scelte strategiche aziendali, riducendo l'incertezza degli investimenti e orientando le scelte tecnologiche. Infine, rispetto alle barriere strutturali tipiche dei settori "hard to abate" — (come elevati costi di investimento, *lock-in* tecnologico, lunga vita utile degli impianti), il caso di Unicalce evidenzia una prevalenza di innovazioni incrementali, suggerendo come la transizione industriale sia un processo graduale e fortemente condizionato da vincoli tecnico-economici. Questi punti consentono di interpretare il caso di Unicalce non come esperienza isolata, ma come

espressione delle dinamiche più ampie che caratterizzano la trasformazione dell'industria italiana ed europea ad alta intensità energetica.

L'analisi delle strategie utilizzate da Unicalce consente di valutare in modo più sistematico la portata effettiva del percorso di transizione intrapreso dall'azienda. Un orientamento chiaro verso la riduzione dell'impatto ambientale e l'allineamento con gli obiettivi europei di decarbonizzazione è delineato dalle azioni descritte nei paragrafi precedenti, dall'impiego di combustibili alternativi agli investimenti in ricerca e sviluppo fino alla strutturazione di una rendicontazione ESG. Tuttavia, i risultati dell'analisi mostrano che questi risultati sono correlati a limiti sistemici e strutturali che caratterizzano l'intero settore della calce.

Risultati conseguiti

Il miglioramento dell'efficienza energetica dei processi produttivi è un primo elemento importante. L'intensità energetica per tonnellata di prodotto è stata ridotta attraverso l'ottimizzazione dei forni, l'attenzione alla gestione termica e l'adozione di soluzioni tecnologiche volte a ridurre i consumi. Di conseguenza, l'innovazione di processo rimane una leva essenziale per combattere le emissioni indirette derivanti dall'utilizzo di combustibili fossili. L'introduzione progressiva di combustibili alternativi come gli SRF è un passo importante in avanti. La sostituzione parziale delle fonti fossili convenzionali riduce le emissioni di CO_2 e aumenta la valorizzazione dei materiali provenienti dalle filiere di recupero. Ciò porta a una maggiore circolarità. La crescente pressione per modelli produttivi più sostenibili è particolarmente evidente quando si considera questo aspetto.

Un secondo risultato è il rafforzamento della dimensione organizzativa e strategica della sostenibilità. L'adozione delle pratiche ESG e la

rendicontazione non finanziaria mostrano un cambiamento nella cultura aziendale. In particolare, l'analisi di doppia materialità sottolinea il fatto che le persone stanno diventando sempre più consapevoli dell'impatto che le attività aziendali hanno sull'ambiente e dei rischi e delle opportunità che i contesti regolatori e climatici offrono all'impresa. Questa sezione non è solo formale: rappresenta un cambiamento nel modo in cui l'azienda costruisce la sua legittimazione sociale e si relaziona con i suoi *stakeholder*.

Tali strategie posizionano Unicalce come un giocatore attivo nel settore "*hard to abate"*. La sostenibilità diventa sempre più un fattore di differenziazione sul mercato e l'adesione ai meccanismi dell'UE ETS e alla certificazione ambientale rafforza la credibilità dell'azienda nei confronti di clienti, istituzioni e partner finanziari. Un ulteriore vantaggio deriva dalle collaborazioni con enti di ricerca e imprese locali, come progetti di innovazione tecnologica. Queste *partnership* mostrano che l'innovazione è il risultato di interazioni complesse tra imprese, università e attori locali. Il caso Unicalce conferma l'importanza dei *network* territoriali e della collaborazione nella diffusione delle tecnologie verdi.

Limiti strutturali e criticità

Tuttavia, nonostante i progressi descritti, ci sono limiti significativi che limitano l'ampia portata delle tattiche utilizzate.

Il primo e più importante è la natura stessa del processo di produzione della calce. Non è la combustione dei carburanti che causa la maggior parte delle emissioni di CO_2, ma la decomposizione chimica del $CaCO_3$ durante la fase di calcinazione. Pertanto, sono emissioni che derivano dal processo di trasformazione della materia prima. Un vincolo strutturale è presentato da questo elemento: In assenza di tecnologie per la cattura, l'utilizzo o lo stoccaggio della CO_2 (CCUS), anche in presenza di un'ottimizzazione energetica completa, una parte significativa delle emissioni rimarrebbe

inevitabile. Ulteriori criticità emergono proprio su questo aspetto. Anche se le tecnologie di raccolta del carbonio sono apparentemente promettenti, sono ancora soggette a costi elevati, difficoltà tecnologiche e, soprattutto, mancanza di infrastruttura. È necessario un intervento coordinato a livello nazionale ed europeo a causa dell'assenza di reti consolidate per il trasporto e lo stoccaggio della CO_2. In questo senso, la decarbonizzazione dei settori "*hard to abate"* non può essere affrontata solo da aziende specifiche; è necessaria una strategia che abbraccia il sistema.

La sostenibilità economica degli investimenti nel lungo periodo costituisce un secondo vincolo. Le innovazioni che vengono messe in atto comportano costi significativi e ritorni che si verificano gradualmente, spesso dipendendo dagli incentivi pubblici o dalla stabilità del sistema normativo. Le decisioni di investimento possono essere influenzate dall'incertezza regolatoria, soprattutto in un settore con margini bassi e grandi spese di capitale.

Infine, anche se la rendicontazione ESG segna un progresso significativo, si colloca ancora in un ambiente in evoluzione, con norme e parametri non sempre uniformi a livello europeo. Ciò può rendere la valutazione imparziale delle prestazioni ambientali più difficile da fare rispetto ad altri operatori del settore.

Valutazione complessiva

Nel complesso, il caso Unicalce dimostra che anche in un settore che ha difficoltà a ridurre la produzione di anidride carbonica, è possibile perseguire una strada concreta per l'innovazione che mira alla sostenibilità. L'azienda è coinvolta in un processo di trasformazione graduale ma coerente che incorpora azioni tecnologiche, riorganizzazione interna e integrazione territoriale. Nonostante ciò, l'analisi mostra come le scelte strategiche siano inevitabilmente influenzate da elementi che esulano dal contesto aziendale: limitazioni sulla produzione chimica, limitazioni

sull'infrastruttura e dubbi sulla regolamentazione. Di conseguenza, una delle ipotesi chiave del lavoro è confermata dal caso esaminato: La transizione verde nei settori "*hard to abate"* da gestire non può essere ottenuta attraverso azioni isolate; piuttosto, richiede una collaborazione a più livelli tra aziende, istituzioni e sistemi di ricerca. Il capitolo successivo si concentrerà sull'impatto delle innovazioni e delle barriere sistemiche alla decarbonizzazione industriale. Questo quadro servirà da base per la discussione più ampia del capitolo.

Capitolo VI – Discussione dei risultati

Il quadro teorico delineato nei capitoli precedenti e le domande di ricerca formulate nel capitolo metodologico sono affrontate nel presente capitolo per discutere criticamente le evidenze ottenute dall'analisi del caso Unicalce. In questo capitolo si intende valutare in modo interpretativo la portata effettiva delle strategie aziendali. Ciò è dovuto al fatto che nei capitoli empirici precedenti l'attenzione si è concentrata sulla descrizione delle strategie aziendali, delle innovazioni implementate e del contesto settoriale. Tre dimensioni principali costituiscono la struttura dell'analisi: il modo in cui le innovazioni possono ridurre le emissioni di CO_2, le difficoltà che ostacolano la decarbonizzazione industriale e le prospettive future di trasformazione strutturale e vantaggio competitivo. Il capitolo risponde alle tre domande di ricerca e analizza il caso Unicalce come un esempio di adattamento innovativo in un settore energivoro e quali condizioni sono necessarie affinché questo percorso possa avere successo nel lungo periodo.

6.1 Impatto delle innovazioni sulla riduzione delle emissioni di CO_2

La prima domanda di ricerca riguardava la capacità di un'impresa di affrontare le sfide dell'innovazione in un settore energivoro e di tradurre tale innovazione in una riduzione concreta dell'impatto ambientale.
I risultati delle interviste e dell'analisi dei documenti indicano che Unicalce ha utilizzato una strategia di innovazione principalmente focalizzata sull'efficienza di processo. La componente energetica della produzione è stata ridotta grazie all'ottimizzazione dei forni, alla progressiva sostituzione dei combustibili fossili con SRF e all'attenzione alla gestione energetica. I dati aziendali sui consumi e sulle emissioni

combinati con le informazioni contenute nei documenti di sostenibilità mostrano una tendenza a ridurre le emissioni per tonnellata di prodotto, in particolare nei luoghi in cui è stata implementata una maggiore integrazione di combustibili alternativi. Tuttavia, l'analisi tecnica del processo produttivo mostra che la calcinazione del carbonato di calcio, un processo chimico che è parte integrante della produzione di calce, è responsabile di una parte significativa delle emissioni. A causa di ciò, le innovazioni incrementali che l'azienda ha implementato hanno un impatto significativo ma non dominante sul profilo emissivo complessivo. Le interviste con i responsabili tecnici mostrano che molte persone sono consapevoli di questa limitazione strutturale. In particolare, è chiaro che la riduzione delle emissioni di processo richiede l'implementazione di tecnologie estreme come il *Carbon Capture, Utilization and Storage* (CCUS), che attualmente non sono state implementate su scala industriale in Italia. Di conseguenza, il caso Unicalce dimostra una dinamica di innovazione coerente e progressiva, ma con un impatto parziale sulla decarbonizzazione profonda, in risposta alla prima domanda di ricerca. Il quadro teorico è confermato dall'evidenza empirica: La riduzione delle emissioni è un processo cumulativo e multilivello che richiede innovazioni incrementali, che sono necessarie ma non sufficienti nei settori *hard-to-abate.*

6.2 Le barriere economiche, tecnologiche e normative alla decarbonizzazione

La seconda domanda di ricerca riguardava le tecniche e le risorse mobilitate dall'impresa e gli ostacoli che ne limitano l'efficacia.
L'analisi dei processi produttivi mostra chiaramente le barriere tecnologiche. Le emissioni di processo sono un vincolo strutturale che non può essere superato solo attraverso strategie di efficientamento. Le

soluzioni radicali come il CCUS o l'utilizzo dell'idrogeno verde richiedono infrastrutture che attualmente mancano a livello nazionale. Le interviste sottolineano che la pianificazione degli investimenti in tecnologie di cattura è ostacolata da una mancanza di reti per il trasporto e lo stoccaggio della CO_2. La transizione economica richiede grandi investimenti di capitale e ritorni nel lungo periodo. Gli strumenti di incentivazione e i meccanismi di sostegno legati al quadro regolatorio europeo (ETS, fondi per l'innovazione) hanno reso possibile una parte significativa degli interventi realizzati, secondo l'analisi documentale. Ma dipendere da tali strumenti porta a questioni di incertezza a causa della variabilità del prezzo del carbonio e della disponibilità futura di risorse pubbliche. Il caso sottolinea un conflitto tra obiettivi climatici e capacità di implementazione a livello normativo e istituzionale. L'assenza di un coordinamento infrastrutturale efficace limita la possibilità per le imprese di intraprendere percorsi di trasformazione radicale, mentre il *Green Deal* e il *Fit for 55* delineano obiettivi stringenti. L'evidenza empirica suggerisce che la decarbonizzazione dipende da un ecosistema istituzionale coerente, non solo dalla volontà o dalla capacità innovativa dell'impresa. Il caso Unicalce mostra che l'azienda può ridurre l'impatto mobilitando competenze tecniche, capitale relazionale e risorse organizzative, ma il successo della transizione è ostacolato da ostacoli sistemici che richiedono interventi di politica industriale coordinati.

6.3 Opportunità future: transizione verde e vantaggio competitivo

La terza domanda di ricerca chiedeva se il caso Unicalce potesse essere un esempio di come l'industria tradizionale potesse adattarsi alle nuove esigenze di sostenibilità.

Le prove empiriche dimostrano che l'azienda ha incorporato la considerazione ambientale e di *governance* nella sua strategia senza

limitarsi a soddisfare un minimo requisito normativo. Un processo di apprendimento organizzativo e di rafforzamento delle competenze interne è evidente attraverso l'adozione di strumenti di rendicontazione ESG, la partecipazione a iniziative di settore e le collaborazioni con enti di ricerca. Le interviste sottolineano che le persone vedono l'innovazione come un modo per posizionarsi strategicamente nel medio-lungo periodo e non solo come una risposta ai vincoli imposti dalla regolamentazione. L'anticipo nell'adozione di pratiche sostenibili facilita l'accesso a mercati più esigenti e a partnership industriali qualificate in un contesto in cui le catene del valore europee richiedono *standard* ambientali crescenti.

Tuttavia, l'analisi che considera il contesto globale, in particolare le politiche di sostegno degli Stati Uniti, suggerisce che il vantaggio competitivo derivante dalla transizione verde non è automatico. Non esistendo un sistema stabile di incentivi e infrastrutture, è possibile che gli investimenti ambientali causino un aumento dei costi senza un ritorno competitivo adeguato. Di conseguenza, il caso Unicalce può essere considerato un caso di adattamento progressivo e consapevole, ma non ancora un caso di trasformazione radicale. La capacità di integrare innovazione tecnologica, sostegno pubblico e cooperazione territoriale in un modello coerente di sviluppo industriale sostenibile sarà fondamentale per il suo percorso futuro.

L’analisi del caso Unicalce suggerisce di interrogarsi criticamente su alcuni aspetti delle strategie adottate. In particolare, emerge una forte dipendenza dal quadro regolatorio e dal prezzo della CO2: ciò solleva la questione se tali strategie siano pienamente autonome o condizionate dalla stabilità delle politiche climatiche. Il caso suggerisce inoltre che la decarbonizzazione industriale non è soltanto una sfida tecnica, ma un processo sistemico che coinvolge imprese, istituzioni e territori.

Conclusioni e prospettive

Questa tesi è nata da una domanda che, nel corso della ricerca, si è rivelata più complessa di quanto inizialmente immaginassi: come si può decarbonizzare un settore "hard-to-abate"? La letteratura offre modelli, scenari tecnologici e target climatici sempre più ambiziosi, ma osservare il problema dal punto di vista di un'impresa concreta cambia radicalmente la prospettiva. Attraverso l'analisi del caso di Unicalce, ho cercato di comprendere cosa significhi affrontare la transizione ecologica in un settore in cui una quota rilevante delle emissioni non dipende dall'energia utilizzata, bensì dal processo chimico stesso di produzione.

L'indagine ha mostrato che la decarbonizzazione nei settori "hard-to-abate" non è né immobile né impossibile. Al contrario, esistono margini di miglioramento significativi. Il caso analizzato evidenzia progressi concreti: riduzione dell'intensità emissiva, investimenti in efficienza energetica, maggiore integrazione della sostenibilità nella *governance* aziendale, rafforzamento della rendicontazione e della pianificazione strategica. Questi risultati dimostrano che anche in presenza di vincoli tecnologici importanti, l'impresa può attivare dinamiche di apprendimento organizzativo e di innovazione ambientale.

Tuttavia, proprio l'analisi empirica mette in luce un elemento decisivo: l'efficienza ha un limite strutturale. Quando le emissioni sono di processo, una parte della CO_2 è intrinseca alla trasformazione del materiale. Questo significa che le innovazioni incrementali, pur necessarie, non sono sufficienti per raggiungere la neutralità climatica. A un certo punto, la riduzione delle emissioni richiede un salto qualitativo: tecnologie di cattura della CO_2, trasformazioni radicali del processo produttivo, accesso a energia rinnovabile competitiva su larga scala. In altre parole, richiede

un cambiamento di sistema.
Ed è qui che emerge uno dei messaggi centrali di questa tesi: la decarbonizzazione dei settori "hard-to-abate" è un problema di coordinamento collettivo prima ancora che un problema tecnologico isolato. Anche un'impresa proattiva resta vincolata se mancano infrastrutture condivise per il trasporto e lo stoccaggio della CO_2, se i costi dell'energia rinnovabile per usi ad alta temperatura rimangono elevati, o se il quadro regolatorio è instabile. La transizione, dunque, non può essere scaricata esclusivamente sulla responsabilità aziendale. Essa richiede politiche industriali coerenti, investimenti pubblici strategici e una visione territoriale integrata.

Un secondo elemento che il caso consente di evidenziare riguarda il rapporto tra sostenibilità e competitività. Spesso queste due dimensioni vengono presentate come alternative: o si tutela l'ambiente, o si preserva la competitività industriale. L'analisi svolta suggerisce una lettura più articolata. L'innovazione ambientale può rafforzare la capacità organizzativa, migliorare la gestione del rischio, accrescere la reputazione e stimolare nuove competenze interne. In questo senso, la sostenibilità può diventare un fattore di resilienza. Tuttavia, questa convergenza non avviene automaticamente. Senza un ambiente istituzionale solido, senza strumenti di *de-risking* pubblico e senza una domanda di mercato per prodotti a basse emissioni, il rischio è che gli investimenti *green* si traducano in un aggravio competitivo.

Il contributo di questa ricerca, a mio avviso, consiste proprio nell'aver mostrato come la trasformazione dei settori "hard-to-abate" non dipenda esclusivamente dalla disponibilità di tecnologie avanzate né unicamente dalla pressione regolatoria. Essa è il risultato dell'interazione tra impresa, politica industriale e territorio. L'impresa può innovare e riorganizzarsi; la

politica può orientare, incentivare e stabilizzare; il territorio può creare ecosistemi favorevoli. Ma nessuno di questi attori, isolatamente, è sufficiente.

Guardando avanti, emergono alcune aree nelle quali sarà necessario fare di più per rendere credibile la decarbonizzazione dei settori "hard-to-abate". In primo luogo, occorre accelerare lo sviluppo e la scalabilità delle tecnologie di cattura, utilizzo e stoccaggio della CO_2, superando le attuali incertezze infrastrutturali. In secondo luogo, diventa cruciale garantire accesso competitivo a energia rinnovabile per usi industriali ad alta temperatura, condizione indispensabile per evitare fenomeni di rilocalizzazione delle emissioni. In terzo luogo, è necessario sostenere la creazione di mercati per materiali a basse emissioni, anche attraverso strumenti di domanda pubblica verde e standard ambientali chiari. Infine, un coordinamento europeo più forte appare essenziale per evitare frammentazioni regolatorie che potrebbero penalizzare le imprese più esposte alla concorrenza internazionale.

In conclusione, la ricerca conferma che la decarbonizzazione dei settori "hard-to-abate" è una sfida strutturale, non risolvibile con interventi marginali o esclusivamente aziendali. Ma mostra anche che il cambiamento è possibile quando l'azione dell'impresa si inserisce in un quadro politico e territoriale coerente. La transizione industriale non è soltanto una questione ambientale: è una questione di capacità collettiva di progettare il futuro produttivo europeo. E, forse, la lezione più importante che questo caso suggerisce è che la neutralità climatica non sarà il risultato di una singola innovazione rivoluzionaria, ma di un processo graduale, coordinato e profondamente istituzionale, in cui tecnologia, politica e organizzazione evolvono insieme.

Bibliografia

Aghion, P., Dechezleprêtre, A., Hémous, D., Martin, R., Van Reenen, J. (2016). *Carbon taxes, path dependency, and directed technical change: Evidence from the auto industry*. Journal of Political Economy, 124(1).

Aghion, P., Dechezleprêtre, A., Hémous, D., Martin, R., Van Reenen, J. (2020). *Carbon taxes, path dependency, and directed technical change*. Journal of Political Economy, 128(1), 1–51.

Bataille, C. (2018). *A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement*. Journal of Cleaner Production, 187, 960–973.

Bistline, J., Brown, M., Domeshek, M., Marcy, C., Roy, N., Blanford, G. (2023a). *Power sector impacts of the Inflation Reduction Act of 2022*. IOP Science, 19(1), 014-013.

Bistline, J., Mehrotra, N., Wolfram, C. (2023b). *Economic implications of the climate provisions of the Inflation Reduction Act*. National Bureau of Economic Research.

Di Bella, A., Brown, T., Tavoni, M. (2025). *Pursuing decarbonization and competitiveness: a narrow corridor for European green industrial transformation*. Cornell University.

European Commission (2019). *The European Green Deal*. Brussels.

European Commission (2019). *Fit for 55: delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality*. Brussels.

European Commission (2022). *REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition*. Brussels.

European Commission (2023). *Net-Zero Industry Act: Building a competitive and climate-neutral Europe*. Brussels.

European Commission (2024). *Innovation Fund – Portfolio of signed projects*. Brussels.

European Commission (2024). *The Draghi report on EU Competitiveness*. Brussels.

European Environment Agency (2025). *EEA greenhouse gases – Data viewer*. Copenhagen.

European Lime Association (2016). *Views of the lime industry on carbon capture and re-use (CCU)*. Brussels.

European Lime Association (2022). *A Pathway to Negative CO_2 Emissions by 2050.* Brussels.

European Trade Union Institute (2021). *A just transition for industry in Europe*. Brussels.

Fischer, C., Newell, R., Preonas, L. (2019). *Environmental and technology policy options in the electricity sector*. Energy Policy, 132, 1066–1077.

Freeman, C. (1992). *The Economics of Hope: Essays on Technical Change, Economic Growth and the Environment*. Pinter Publishers, New York.

Gailani, A., Cooper, S., Allen, S. (2024). *Assessing the potential of decarbonization options for industrial sectors*. Joule.

Hänsel, M.C., Drupp, M.A., Johansson, D.J., Nesje, F., Azar, C., Freeman, M.C., Groom, B., Sterner, T. (2020). *Climate economics support for the UN climate targets*. Nature Climate Change, 10(8), 781–789.

International Energy Agency (2020). *Energy Technology Perspectives 2020: Special report on carbon capture utilisation and storage*. Paris.

International Energy Agency (2021). *Indicators for CO_2 emissions (Edition 2020), IEA CO_2 Emissions from Fuel Combustion Statistics*. Paris.

International Energy Agency (2022). *Europe – Countries & Regions*. Paris.

International Energy Agency (2023). *Emissions from industry*. Paris.

International Energy Agency (2023). *Energy Technology Perspectives*. Paris.

International Energy Agency (2024). *Carbon Capture, Utilization and Storage*. Paris.

International Energy Agency (2025). *CCUS in the transition to net zero emissions*. Paris.

IPCC (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge and New York.

Juhász, R., Lane, N., Oehlsen, E., Pérez, C. (2022). *The who, what, when, and how of industrial policy: a text-based approach*. University of Oxford.

Kleimann, D., Poitiers, N., Sapir, A., Tagliapietra, S., Véron, N., Veugelers, R., Zettelmeyer, J. (2023). *Green tech race? The US Inflation Reduction Act and the EU Net Zero Industry Act*. The World Economy, 46(12), 3420–3434.

Krupnick, A., Bergman, A. (2022). *Incentives for clean hydrogen production in the Inflation Reduction Act*. Resources for the Future.

Latrach, M. (2025). *Enhanced Prediction of CO_2 Solubility under Geological Conditions for CCUS via Improved Pitzer Parameters and Physics-Informed Machine Learning*. arXiv.

Martínez Castilla, G. (2024). *The role of carbon capture across hard-to-abate industries in the EU*. Joint Research Centre, European Commission.

Mazzucato, M. (2013). *The Entrepreneurial State: Debunking Public vs. Private Sector Myths*. Anthem Press, 103–110.

Mazzucato, M. (2018). *The Entrepreneurial State*. London.

Newell, P., Mulvaney, D. (2013). *The political economy of the 'just transition'*. The Geographical Journal, 179(2), 132–140.

OECD (2023). *Industrial Transition and Employment*.

Porter, M.E., Van der Linde, C. (1995). *Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship*. Journal of Economic Perspectives, 9(4), 97–118.

Rissman, J. (2020). *Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070*. ScienceDirect.

Rosenow, J., Cowart, R., Thomas, S., Neuhoff, K., Eyre, N. (2020). *Industrial energy efficiency and decarbonisation: current state and future pathways*. Energy Policy.

S&P Global (2024). *Making Carbon Capture, Utilization and Storage Attractive in Reaching Net-Zero*.

Simoni, M., Wilkes, M.D., Brown, S., Martínez, I., Romano, M.C. (2022). *Decarbonising the lime industry: State of the art*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 168, 112765.

Tobelmann, D., Wendler, T. (2020). *The impact of environmental innovation on carbon dioxide emissions*. Journal of Cleaner Production.

Unicalce (2024). *Report di sostenibilità 2024*.

Unicalce (2024). *Il percorso di decarbonizzazione per l'abbattimento delle emissioni di CO_2*.

United Nations Framework Convention on Climate Change (2023). *28ª Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (COP28)*. Dubai.

Unruh, G.C. (2000). *Understanding carbon lock-in*. Energy Policy, 28(12), 817–830.

U.S. Department of Energy (2024). *Industrial Demonstrations Program*. Washington D.C.

Wen, J.M., Yue, H. (2022). *Regional carbon emission peak pressure and corporate green technology innovation*. Accounting and Economics Research.

Yin, R.K. (2018). *Case Study Research and Applications: Design and Methods* (6th ed.). Sage Publications, Los Angeles. (compare 2 volte nell'elenco originale)

Zhang, Y., Liu, Z., Zhang, H., Tan, T. (2022). *Digital transformation and energy efficiency in energy-intensive industries*. Energy Economics, 105.

Sitografia

Agico Cement. (n.d.). *Maerz kiln – Parallel flow regenerative lime kiln*. https://www.agicocement.com

Applied Energy. (n.d.). *Industrial CO_2 emissions data and regional trends*. https://www.sciencedirect.com/journal/applied-energy

European Commission. (2019). *The European Green Deal*. https://ec.europa.eu

European Commission. (2022). *REPowerEU Plan*. https://ec.europa.eu

European Commission. (2024). *Net-Zero Industry Act*. https://ec.europa.eu

European Environment Agency (EEA). (2025). *Greenhouse gases – data viewer*. https://www.eea.europa.eu

European Lime Association (EuLA). (2022). *Lime industry and CO_2 emissions*. https://www.eula.eu

Heidelberg Materials. (n.d.). *Brevik CCS Project*. https://www.heidelbergmaterials.com

International Energy Agency (IEA). (2022–2025). *Industry and emissions reports*. https://www.iea.org

OilGasNews. (n.d.). *Lhoist lime plant image*. https://www.oilgasnews.com

Parlamento Europeo. (2024). *Briefing on the Inflation Reduction Act*. https://www.europarl.europa.eu

RES Clima. (n.d.). *Fit for 55 infographic*. https://www.res-clima.org

S&P Global. (2024). *Carbon Capture, Utilization and Storage overview*. https://www.spglobal.com

Unicalce S.p.A. (2024). *Report di sostenibilità e documentazione istituzionale*.
https://www.unicalce.it

U.S. Department of Energy. (2024). *Industrial Demonstrations Program*.
https://www.energy.gov

Ringraziamenti

Chiudere questo percorso significa, prima di tutto, fermarsi un attimo. Fermarsi davvero. Guardare indietro e rendersi conto che l'università non è stata solo esami, lezioni e scadenze, ma un pezzo di vita pieno, complesso, a tratti faticoso, spesso intenso. È stato un periodo fatto di crescita, cambiamenti, dubbi e decisioni, ma soprattutto di persone. Questa tesi porta il mio nome sulla copertina, ma dentro ci sono tracce evidenti di chi mi ha accompagnato, sostenuto, messo in discussione e aiutato a diventare quello che sono oggi.

Papà Giulio è stato, fin da sempre, un riferimento solido. Da lui ho imparato il valore del lavoro fatto bene, con serietà e rispetto per ciò che si fa. Mi ha insegnato che le cose vanno portate a termine, anche quando richiedono fatica, anche quando l'entusiasmo iniziale viene meno. L'impegno, quello vero, non è qualcosa che si racconta o si ostenta: è qualcosa che si dimostra ogni giorno, con costanza. Mi ha insegnato anche un'altra cosa importante, forse meno scontata: che le scorciatoie non sono necessariamente sinonimo di superficialità. Quando sono intelligenti, quando servono ad arrivare al risultato senza perdersi inutilmente, fanno parte del gioco. Saper trovare la strada giusta, senza complicarsi la vita più del necessario, è una forma di intelligenza pratica che mi ha accompagnato anche in questo percorso.

Mamma Raffaella mi ha insegnato qualcosa di altrettanto fondamentale, ma in modo diverso. Con te non sono mai stato quello che dice sempre sì. Anzi, spesso sono andato fino in fondo alle mie idee, anche quando questo significava discutere, confrontarsi duramente, mettere in discussione. È stato proprio in questo confronto continuo, a volte acceso, che ho costruito la mia indipendenza. Mi hai lasciato spazio, mi hai lasciato scegliere,

anche quando sarebbe stato più facile decidere al posto mio. Nel farlo, mi hai dato la responsabilità delle mie decisioni, con tutto ciò che comporta. Quella fiducia, mai scontata, è stata una delle basi più solide su cui ho costruito il mio percorso, dentro e fuori l'università.

Le mie sorelle maggiori, Viola e Natalie, sono state un punto di riferimento costante fin da quando ero piccolo. Crescere guardandole affrontare la vita, ognuna a modo proprio, mi ha insegnato più di quanto forse loro stesse sappiano. Ironia, complicità e presenza non sono solo parole: sono ciò che hanno sempre portato nella mia vita, nei momenti leggeri come in quelli più complessi. Da bambino le osservavo per capire come muovermi nel mondo; oggi, da adulto, continuo a trovare in loro un confronto sincero, diretto, e la certezza di avere qualcuno su cui poter contare davvero.

I miei nonni hanno lasciato un segno profondo nel mio modo di essere, nel mio modo di guardare le cose e di stare con gli altri. In particolare, la nonna Leda, con le risate a casa sua, con quelle battute sottili dette con calma, che arrivano sempre al momento giusto. Sono momenti semplici, quotidiani, apparentemente piccoli, ma sono proprio quelli che restano impressi nel tempo e che continuano a dare forma ai ricordi più autentici.

Mio nipote Carlo rappresenta una forza contagiosa. La sua curiosità, la sua testardaggine e quella voglia instancabile di fare, di scoprire e di imparare ricordano ogni giorno quanto sia importante mantenere vivo l'entusiasmo. Con lui torno bambino, anche adesso che sono cresciuto, e riscopro le cose che amavo con la stessa intensità. Gli auguro di custodire sempre questa energia, questa fame di mondo, senza lasciarla mai andare, anche quando crescere renderà tutto un po' più complicato.

Un sincero ringraziamento va alla Professoressa Rabellotti per la guida attenta e costante durante questo lavoro. Mi ha spinto a ragionare con

maggiore profondità e rigore, aiutandomi a non fermarmi alle prime risposte e a costruire un percorso più consapevole. Le sue indicazioni, sempre chiare e puntuali, sono state fondamentali per dare solidità a questa ricerca.

Grazie a Unicalce per aver reso possibile questo lavoro e, in particolare, a David per il tempo dedicato, per la disponibilità e per la competenza condivisa. Il confronto diretto e concreto ha trasformato un'idea iniziale in qualcosa di reale, permettendomi di capire cosa significa portare una ricerca fuori dai confini teorici.

Un ringraziamento speciale va ai miei amici e alle mie amiche, quelli di sempre e quelli incontrati lungo il cammino. A chi c'è fin dai tempi del liceo e a chi si è aggiunto strada facendo. Le serate, le risate, le bevute, le discussioni infinite che sembravano non portare da nessuna parte e invece hanno sempre lasciato qualcosa. Alcuni sono cresciuti insieme a me, altri sono entrati nella mia vita mentre stavo già cambiando, ma tutti hanno contribuito a rendere questi anni veri, pieni, vissuti fino in fondo. Un pensiero particolare va ai membri del gruppo A.D.M., compagni di viaggio irrinunciabili, tra caos, lealtà e un'amicizia che non ha bisogno di troppe spiegazioni.

A Clara, che mi è stata accanto fin dal primo esame all'università, quando tutto era ancora da costruire e nulla era scontato. Abbiamo attraversato insieme ogni fase di questo percorso, condividendo non solo l'università, ma molto di più: i viaggi, le giornate normali che diventano speciali, la cucina condivisa, il nostro amore per il sushi e la quotidianità vissuta fianco a fianco. Questo traguardo non rappresenta solo la fine di un percorso accademico, ma una tappa importante di tutto ciò che abbiamo costruito insieme, passo dopo passo.

Se oggi chiudo questa tesi con soddisfazione è anche perché, in molti momenti, questo è stato un percorso solitario. Spesso me la sono cavata con le mie forze, con la mia determinazione e con quella furbizia che mi ha permesso di trovare soluzioni quando serviva. Ma sapere di avere intorno persone che credevano in me, anche quando io stesso avevo dei dubbi, ha fatto la differenza.

Questo percorso porta il mio nome.
Ma dentro c'è molto di più.
Ad Maiora.