

TECNOLOGIE, CONSUMI ENERGETICI, COSTI E IMPATTI AMBIENTALI NELL'ESCAVAZIONE, LAVORAZIONE E TRASPORTO DI CALCARE E OLIVINA

Serena De Marco^{1,*}, Stefano Caserini¹

¹Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Milano.

Sommario

Recenti studi mostrano come non sia più possibile raggiungere l'obiettivo emissioni nette zero senza rimuovere CO₂ dall'atmosfera. Alcune strategie climatiche quali l'alcalinizzazione degli oceani o l'enhanced weathering, consistenti nella dissoluzione di rocce o minerali quali calcare o olivina in acqua marina o suolo, possono rimuovere da milioni a miliardi di tonnellate di CO₂ all'anno a fronte di altrettanto alti quantitativi di materie prime, costi e consumi energetici. In questo studio sono analizzati tre anelli della catena di lavorazione di queste materie prime, estrazione, triturazione e trasporto, in modo da identificare componenti e processi che causano dispendi energetici ed economici. Dai risultati emerge che nell'escavazione, il consumo energetico dovuto alla movimentazione dei materiali e al trasporto (~3.8 kWh t⁻¹) incide sul totale (~5 kWh t⁻¹) per circa l'80% e almeno il 50% di questo totale è prodotta da motori diesel. La domanda energetica della macinazione a grana fine è ~3 kWh t⁻¹ per diametri finali di ~1 mm e 822 kWh t⁻¹ per diametri di ~2 µm. Il consumo energetico nella macinazione ultra-fine (< 10 µm) è paragonabile a quello della calcinazione (~988 kWh tCaCO₃⁻¹) necessaria per la produzione di calce spenta. Per quanto riguarda i costi operativi, l'escavazione si aggira intorno a 1.5 € t⁻¹ mentre la triturazione, molto più variabile, tra ~2 € t⁻¹ per diametri finali di 50 µm e ~80 € t⁻¹ per diametri di 2 µm. Il trasporto di lungo raggio è energeticamente oneroso qualora venga condotto su strada tramite camion a diesel e per lunghe distanze; oltre i 100 km, si possono superare i 40 kWh t⁻¹.

Per ciascuna attività, è possibile ottenere riduzione dei consumi energetici fino a circa il 40% con investimenti in nuove tecnologie e nell'efficienza energetica. L'elettrificazione e l'uso di energie rinnovabili può ulteriormente ridurre l'impronta carbonica di queste attività.

Parole chiave: *Calcare, Olivina, Escavazione, Trattamenti, Impatti Ambientali, Risparmio Energetico.*

TECHNOLOGIES, ENERGY CONSUMPTIONS, COSTS AND ENVIRONMENTAL IMPACTS IN THE EXCAVATION, PROCESSING AND TRANSPORTATION OF LIMESTONE AND OLIVINE

Abstract

Recent research shows that it is no longer possible to achieve net-zero emission target without removing CO₂ from the atmosphere. Some Carbon Dioxide Removal (CDR) techniques such as Ocean Alkalinization (spreading of alkaline materials over seawater) and Enhanced Weathering (accelerated dissolution of minerals such as olivine in the ground) may sequester from millions to billions of atmospheric CO₂ per year (Caserini et al., 2021a; Beerling et al., 2020). Worldwide implementation requires extracting and processing equally large amounts of raw materials, mostly given by limestone and olivine-rich rocks, with high costs and energy consumptions. Hence, three main stages of the process chain of such raw materials, have been analysed so as to elucidate components and processes leading to the higher-than-average energy consumptions. Specifically, mining, comminution and long-haul transportation have been surveyed in each of their sub-stages. Mining has been broken down in drilling, blasting and material handling and hauling whereas comminution in crushing, grinding and milling. Environmental impacts in the excavation have also been discussed. Overall, it has been found that material handling and hauling is the crucial stage in the extraction. The energy consumption is of ~3.8 kWh t⁻¹ against the total which is of ~5 kWh t⁻¹. Its energetic impact is thus of 80% over the total and at least 50% of the total energy consumed for tonne of ore mined is caused by diesel engines. Long-haul transportation has been analysed through four transport modes: road, train, maritime and inland waterways transportation via large ships and barges/small vessels respectively. It appears that land transportation, if carried out by diesel-powered trucks and for long distances, is the most energy intensive transport mode; maritime

IdA



* Per contatti: Piazza Leonardo Da Vinci, 20133 Milano. serena.demarco@polimi.it

Ricevuto il 30-8-2022; Correzioni richieste il 5-10-2022; Accettazione finale il 12-5-2022.

transportation is the cheapest; rail transportation is the most efficient. Road transportation, if distance is greater than 100 km, may exceed 40 kWh t⁻¹. The other pivotal stages are grinding and milling. Here, the energy demand can greatly vary with the kind of equipment used, the geological hardness of the rock and most of all, with the diameter of the end-product. Calculations show that energy consumption is ~ 3 kWh t⁻¹ for diameter grain size of ~ 1 mm and ~ 822 kWh t⁻¹ for ~ 2 μm (Strefler et al., 2018). These processes never produce particles with a single size but distribution of particles with different sizes. The micronized scale can be necessary since dissolution in the water of alkaline materials is largely controlled by particle grain size; the lower the diameter, the fastest the dissolution (Rinder et al., 2021). Electricity is the primary source of energy used to power equipment. Another extremely energy intensive operation is calcination. It is required if slaked lime (Ca(OH)₂) is used instead of mined and ground limestone (CaCO₃). Thus, a comparison has been

done. It has been found out that, in calcination, energy consumption may require up to ~988 kWh tCaCO₃⁻¹, which is a contribution reached only in the ultra-fine milling. For what concerns operating costs, in the excavation the total cost is about ~ 1.5 €t⁻¹ whereas in comminution, similarly to the energy consumptions, costs are much more variable, ranging from ~2 € t⁻¹ for diameter grain size of 50 μm and ~80 € t⁻¹ for 2 μm. (Strefler et al., 2018). Other influencing factors are the cost of electricity, labour costs and fluctuations in the market prices. Nevertheless, both material handling, hauling and milling can lower their current energy consumption of at least 37%, if investment on new technologies, policies to upscale renewables, energy efficiency and electrification could take place at a fast-enough pace and within a wider system approach.

Keyword: *Limestone, Olivine, Excavation, Processing, Environmental Impacts, Energy Saving.*

1. Introduzione

1.1. Obiettivo della ricerca

L'ultimo rapporto IPCC (2022) evidenzia come la neutralità climatica a metà secolo richieda, oltre alla decarbonizzazione totale, anche l'utilizzo di tecniche di rimozione della CO₂ atmosferica (Negative Emission Technologies, NET) al fine di bilanciare il residuo di CO₂ accumulatosi nel corso dei decenni. Tale residuo è dato dalla differenza tra l'emissione di CO₂ in atmosfera e la CO₂ rimossa tramite sink naturali quali l'oceano o le foreste. Sono utilizzabili a questo fine tecniche quali la cattura diretta dall'aria (*direct air capture, DAC*) o l'energia da biomassa con cattura e stoccaggio del carbonio (*Bio-energy with carbon capture and storage, BECCS*).

L'implementazione a vasta scala di altre di queste NET, quali l'Alcalinizzazione degli oceani (Ocean Alkalinization, OA), l'Enhanced Weathering (EW) e/o tecniche di stoccaggio della CO₂ quali il Buffered Accelerated Weathering of Limestone (BAWL, Caserini et al., 2021b), richiederà, a sua volta, centinaia di milioni o miliardi di tonnellate di materie prime da estrarre, trattare e lavorare ogni anno. Le rocce a miglior tasso di rimozione di CO₂ sono calcare e quelle ad alto contenuto di olivina (Darton et al., 2018). Recentemente è stato mostrato come la disponibilità a scala planetaria di tali risorse naturali non sia un fattore limitante per un diffuso sviluppo delle NET (Caserini et al., 2022). Alcuni degli impedimenti principali consisterebbero, piuttosto, nei consumi e nei costi sostenuti per arrivare a confezionare il prodotto finito.

Questo studio si è proposto, pertanto, di analizzare gli aspetti energetici ed economici di tre fasi chiave

della catena di processo della produzione di calcare e olivina, ossia escavazione, lavorazione e trasporto, in modo da identificare processi e componenti che potrebbero ostacolare una capillare diffusione delle NET.

1.2. Le rocce nelle strategie climatiche e gli impatti ambientali

L'OA e l'EW consentono di ottenere da 1 a 3.3 Gt all'anno di assorbimenti di CO₂ atmosferica, per semplice potenziamento di meccanismi che avvengono già in natura ma ad una velocità di gran lunga più lento (Caserini et al., 2021a; Goll et al., 2021).

La prima tecnica consiste, in particolare, nello spargimento e dissoluzione di sostanze alcaline in acqua di mare; la seconda in una dissoluzione chimica potenziata di minerali, quali l'olivina, sul suolo. La prima, inoltre, induce un aumento dei livelli di pH marini, attualmente in diminuzione a causa dell'acidificazione del mare (Butenschön et al., 2021). Un'ulteriore azione a supporto della capacità tampone degli oceani potrebbe derivare dall'impiego di un'innovativa tecnica di stoccaggio della CO₂ nel fondo degli oceani sotto forma di bicarbonati (BAWL) come discusso in Caserini et al., (2021b).

In tutti i casi citati la disponibilità di minerali e/o rocce è indispensabile.

Nello studio pubblicato da Caserini et al., (2022), i principali minerali/rocce che contribuiscono alla rimozione di CO₂ atmosferica (*carbon dioxide removal, CDR*), ovvero calcare, olivina, magnesite e brucite, sono stati analizzati sulla base dei seguenti aspetti: disponibilità quantitativa della risorsa naturale a livello mondiale, prossimità dei depositi alle aree costie-

Tabella 1. Quantitativi di materie prime estratte nel 2017, di potenziale interesse per OA. Fonte: Caserini et al., (2022).

Materia prima sfruttabile per tecniche di CDR	Rateo di estrazione attuale (anno 2017) [Mt a ⁻¹]
Calcere	6593
Magnesite	29
Olivina	8.4
Brucite	1.5
Totale	6631

re, copertura del suolo in cui si collocano i depositi. Sebbene il focus dello studio verta sull'OA, le problematiche di fondo affrontate sono comuni a molte NET. In sintesi, le rocce carbonatiche sono maggiormente disponibili; ad esempio, entro i 10, 50 e oltre i 100 km dalla costa le riserve globali di carbonati puri al di sotto di aree senza vegetazione sono pari rispettivamente a 620 Gt, 5583 Gt e 6485 Gt. Sono stati inoltre ricavate le tonnellate all'anno estratte nel 2017, per ciascun tipo di roccia/minerale di interesse. Essi sono riportati in Tabella 1.

Per l'implementazione a larga scala delle NET la disponibilità di materie prime non costituirebbe pertanto, ad oggi, un problema. Queste risorse naturali, inoltre, non rientrano nella lista delle materie prime critiche (EU, 2020).

Le criticità maggiori da un'escavazione massiva sono:

- emissioni in atmosfera, suolo, sottosuolo, acque;

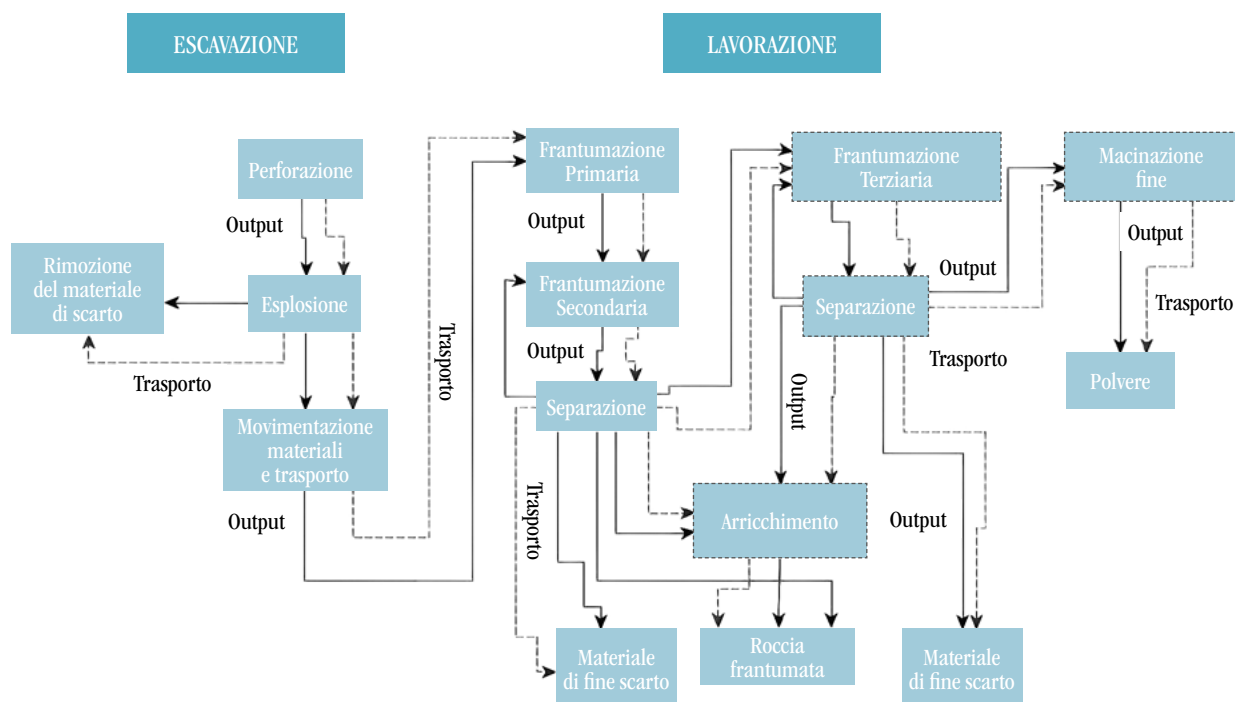
- rilascio e dispersione di metalli pesanti sotto forma di solfuri ed ossidi per opera delle acque meteoriche dilavanti o del vento;
- produzione di rifiuti di estrazione o di altro genere;
- emissione di rumore e vibrazioni;
- alterazione del paesaggio pre-esistente;
- interruzione di eventuali habitat naturali;
- modifiche all'assetto idrogeologico per interferenza delle attività estrattive con le acque di falda.

Un maggiore controllo dei processi e dei materiali in uscita, una gestione più efficiente delle risorse, la riduzione, il recupero, il riutilizzo e il riciclo dei materiali impiegati sono strategie di mitigazione prioritaria nel settore estrattivo.

2. Materiali e metodi

Lo studio è stato condotto ricercando costi e consumi energetici nelle fasi di escavazione, lavorazione e trasporto delle materie prime di interesse, calcare e olivina, suddivisi per attività generalmente previste o opzionali. In Figura 1 si mostra il diagramma di flusso delle operazioni.

In particolare il lavoro si è focalizzato sul calcare e sulle rocce ricche in olivina. Dati riguardanti rocce diverse, sono presenti nel Materiale Supplementare (Tabelle MS2, MS3 e MS4) poiché rappresentativi di processi eseguiti da una compagnia italiana operante nel settore (MIE, 2022) e utili per un confronto con rocce a diversa resistenza.

**Figura 1.** Diagramma di flusso delle principali fasi e sotto-fasi della catena di processo delle materie prime.

La freccia tratteggiata rappresenta il trasporto, quella continua il prodotto uscente. Il box tratteggiato è una fase opzionale, mentre quello a linee continue è una fase prevista nella generalità dei casi.

Per la raccolta di dati e informazioni, sono stati consultati libri, e-books, report e articoli scientifici, tramite database on-line a carattere prettamente scientifico come Scopus, Google Scholar, Web of science, siti gestiti da fornitori di prodotti e attrezzature, agenzie governative estere (es: US Geological Survey (USGS), US Department of Energy (USDOE), Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (OEERE)), istituti di ricerca (es: Institute of Quarrying), società private operanti nel settore (es: Holtec, Cemex).

Alcuni autori quali Strefler et al., (2018), fanno riferimento alla legge di Bond (Bond, 1961) per il calcolo del consumo energetico richiesto nella frammentazione del materiale:

$$W = 10 \cdot W_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

In questa equazione:

- W : work input o domanda energetica specifica, espresso in kWh t^{-1} , rappresenta una misura della resistenza opposta dal materiale ai processi di frammentazione;
- W_i : work index, espresso in kWh t^{-1} , è un indice di resistenza specifico che varia a seconda del tipo di roccia considerata; per il calcare è di $13 \pm 3 \text{ kWh t}^{-1}$; per una roccia contenente olivina come il basalto è $22 \pm 4 \text{ kWh t}^{-1}$ (Metso:Outotec, 2021);
- P_{80} : apertura del vaglio virtuale in μm attraverso il quale passerebbe l'80% del prodotto finale;
- F_{80} : apertura del vaglio virtuale in μm attraverso il quale passerebbe l'80% del materiale iniziale.

Una formula più recente è stata proposta dagli stessi Strefler et al., (2018):

$$ED = 6.62 \cdot GS^{-1.162}$$

nella quale:

- ED è la domanda energetica specifica valutata in GJ t^{-1} ;
- GS è la dimensione del grano del prodotto finale valutata in μm .

3. Risultati e discussione

3.1. Consumi energetici

3.1.1. Escavazione

L'escavazione di una qualsiasi materia prima avviene per costruzione di cave di superficie, in sotterraneo o per combinazione dei due (Ridley, 2013). La natura e la posizione geografica del deposito, la sua dimensione, la profondità, il grado di concentrazione del minerale da estrarre, la sua durezza sono alcuni dei parametri che influiscono nella scelta del metodo e delle attrezzature impiegate (USGS, 2021; OEERE, 2002b).

Il calcare e l'olivina vengono generalmente estratti con metodi di superficie (USDOE, 2007; IQ, 2021; ProjectVesta, 2021).

Le tre sotto-fasi principali sono la perforazione (*drilling*), l'esplosione (*blasting*), la movimentazione dei materiali e il trasporto a corto raggio (*material handling and hauling*) (CIPEC, 2005). Quest'ultima include operazioni di scavo, carico e scarico del materiale, trasporto all'interno della cava, stoccaggio del materiale nei silos.

Con l'esplosione si ottiene un primo livello di frammentazione consistente nella formazione di micro e macro-fratture nel corpo roccioso per effetto dell'energia rilasciata dagli esplosivi. Per l'esplosione del calcare viene utilizzato il nitrato di ammonio (Prya Cement, 2022).

Il grado di frantumazione raggiunto ha diretto impatto sulle operazioni di movimentazione dei materiali, poiché sia la produttività di un caricatore/scariatore che quella di un camion sono funzione della distribuzione delle dimensioni del materiale roccioso esploso; minore è la dimensione del materiale e maggiore sarà il rateo di produttività del camion (Ozdemir et al., 2018).

L'efficacia con la quale si frattura la roccia ha ripercussioni anche successivamente poiché la resistenza del materiale alla macinazione fine dipenderà da essa. Più la roccia risulta sciolta e ben frammentata e più la resistenza del materiale ad ulteriori impatti impressi da macchine frantumatrici e/o mulini diminuisce. Le prestazioni fornite dall'esplosione dipendono, a loro volta, dal diametro dei fori effettuati nella fase di perforazione.

Le fonti principali dai quali sono stati tratti i dati sono i lavori di CIPEC (2005), Hangx et al., (2009), Brown et al., (2010) per l'olivina e OEERE (2002a; b) per il calcare.

In Tabella 2 vengono riportati i valori massimi, minimi, medi dei consumi energetici suddivisi per attività e il consumo complessivo. Riguardo all'esplosione non si ha disponibilità di dati sul calcare o sull'olivina ma i contributi energetici sono paragonabili a

Tabella 2. Valori medi, minimi e massimi in kWh t^{-1} del consumo energetico attribuibile alla singola attività e all'escavazione totale di una tonnellata di calcare e/o olivina.

Attività (numero fonti)	Consumo Energetico kWh t^{-1}		
	Media	Minimo	Massimo
Perforazione (2)	0.5	0.3	0.6
Movimentazione materiali e trasporto (2)	3.9	2.9	4.8
Escavazione Totale (3)	4.7	3.5	5.6

quelli della perforazione; lo studio condotto da CIPEC (2005) riporta ad esempio un valore di 0.366 kWh t⁻¹ per la perforazione e 0.504 kWh t⁻¹ per l'esplosione. Si rimanda alla Tab MS1 del Materiale Supplementare (MS) per ulteriori dettagli.

In parentesi sono riportati il numero dei dati a disposizione.

La movimentazione dei materiali e il loro trasporto risultano pertanto più impattanti della perforazione ed esplosione. Per il trasporto possono essere utilizzati camion a motore diesel e/o nastri trasportatori elettrici se il materiale è secco, pompe e condotte se acquoso.

L'uso dei combustibili fossili risulta, tuttavia, ancora molto diffuso. Quasi il 50% dell'energia totale consumata per estrarre una tonnellata di roccia è causata dall'uso di mezzi di trasporto pesanti (OEERE, 2002b) e circa l'87% dei consumi sostenuti per movimentazione e trasporto materiali deriva dall'utilizzo di motori diesel (Norgate et al., 2010; Jeswiet et al., 2015; OEERE, 2002a).

3.1.2. Lavorazione

In questa seconda macro-fase vengono incluse tutte le operazioni necessarie a trasformare la roccia estratta in un prodotto finito che abbia del valore economico.

Le quattro sotto-fasi sono la frantumazione grossolana (*crushing*), la separazione, la macinazione a grana fine (*grinding*), la polverizzazione (*milling*), eventuali processi di arricchimento (*enrichment*) e miglioramento (*upgrading*).

Sono tutti processi standard che non hanno subito grossi cambiamenti nel tempo, se non nell'avanzamento tecnologico di alcune macchine e nell'implementazione di processi per i quali occorre ottenere un prodotto finito ad alto valore economico (Metso:Outotec, 2021). Possono inoltre essere eseguiti a secco o ad umido.

La frantumazione si suddivide tipicamente in primaria e secondaria. Un terzo ciclo in rocce diverse dal calcare non è raro e viene perlopiù utilizzato per raggiungere granulometrie molto fini senza per questo ricorrere a mulini. A questo livello, la riduzione in diametro che si ottiene si aggira tipicamente intorno ai 5-20 mm (Mitchell et al., 2008; Cemex, 2021). Le fratture vengono create per compressione, impatto, attrito o taglio (Metso:Outotec, 2021; Abadir, 2021).

Generalmente, per il *crushing* primario, vengono utilizzati frantoi a mascelle (*Jaw crusher*) o frantoi rotanti (*Gyratory crusher*); in questi casi il meccanismo di rottura è causato da compressione (Kleemann, 2022). Per il *crushing* secondario e terziario si usa invece prevalentemente il frantoio a cono (*Cone crusher*) o il frantoio ad urto ad asse verticale (*Vertical Shaft Impact, VSI, crusher*) (Mitchell et al., 2008).

Frantoi ad urto ad asse orizzontale (*Horizontal Shaft Impact, HSI, crusher*) sono utilizzati sia triturazione primaria che per secondaria.

Nel caso del calcare i frantoi a mascelle sono largamente utilizzati nel *crushing* primario (RM Group, 2022; Prya Cement, 2022; Sanme, 2022); se il prodotto finale necessita di avere una grana fine, buona cubicità e angolarità vengono utilizzati frantoi ad urto sia nel *crushing* primario che in quello secondario (Kleemann, 2022).

Al processo di frantumazione grossolana, segue, di norma, quello della separazione, in cui le particelle con diametri maggiori rispetto al diametro target o eventuali impurezze vengono opportunamente separate dal prodotto desiderato. Ci sono diversi metodi per eseguirlo: centrifugazione, flottazione, filtrazione, uso di cicloni, vagli oscillanti, separatori magnetici, metodi chimici (Metso:Outotec, 2021).

Si parla di macinazione a grana fine (*grinding*) quando la dimensione finale delle particelle deve essere al di sotto dei 100 µm circa e di polverizzazione (*milling*) quando si vuole portare la dimensione delle particelle allo stadio ultra-fine (< 10 µm). In entrambi i casi, l'obiettivo è la creazione di nuova area superficiale, grazie alla quale si incrementa la capacità di dissoluzione del materiale a contatto con l'acqua (Renforth, 2013a).

Le macchine con le quali viene eseguita la macinazione fine e/o polverizzazione sono mulini a tamburo, ad agitazione o a vibrazione. Esempi del primo tipo sono i mulini autogeni (*Autogenous, AG, mill*), semi-autogeni (*Semi – Autogenous, SAG, mill*), mulini a barre (*Rod mill*), mulini a palle (*Ball mill*). Esempi del secondo tipo sono i cosiddetti VERTIMILL® o mulini verticali ad agitazione (*Stirred Media Detritor, SMD*) mentre un esempio del terzo tipo è il mulino a palle vibranti (*Vibrating ball mill*) (Metso:Outotec, 2021). I mulini a rulli di macinazione ad alta pressione (*High Pressure Grinding Roll, HPGR*) sono invece utilizzati per il trattamento di rocce a diverso grado di resistenza come diamante, oro, rame, minerali industriali. Rispetto ai semi-autogeni e ai mulini a palle, l'efficienza dello sminuzzamento è più alta poiché le particelle sono costrette ad impattare in uno spazio più ristretto che le costringe ad avere meno possibilità di fuga (911Metallurgist, 2022).

Nel caso del calcare, mulini a palle, a rulli (*Raymond roller mill*), verticali (*Vertical mill*), sono alcuni tra i tipi più utilizzati (Alpa, 2022; FTM, 2022; Schenck Process, 2022).

In Figura 2 sono rappresentati i diametri ottenibili in funzione del tipo di macchina usata a seconda che si voglia eseguire della frantumazione o della macinazione fine.

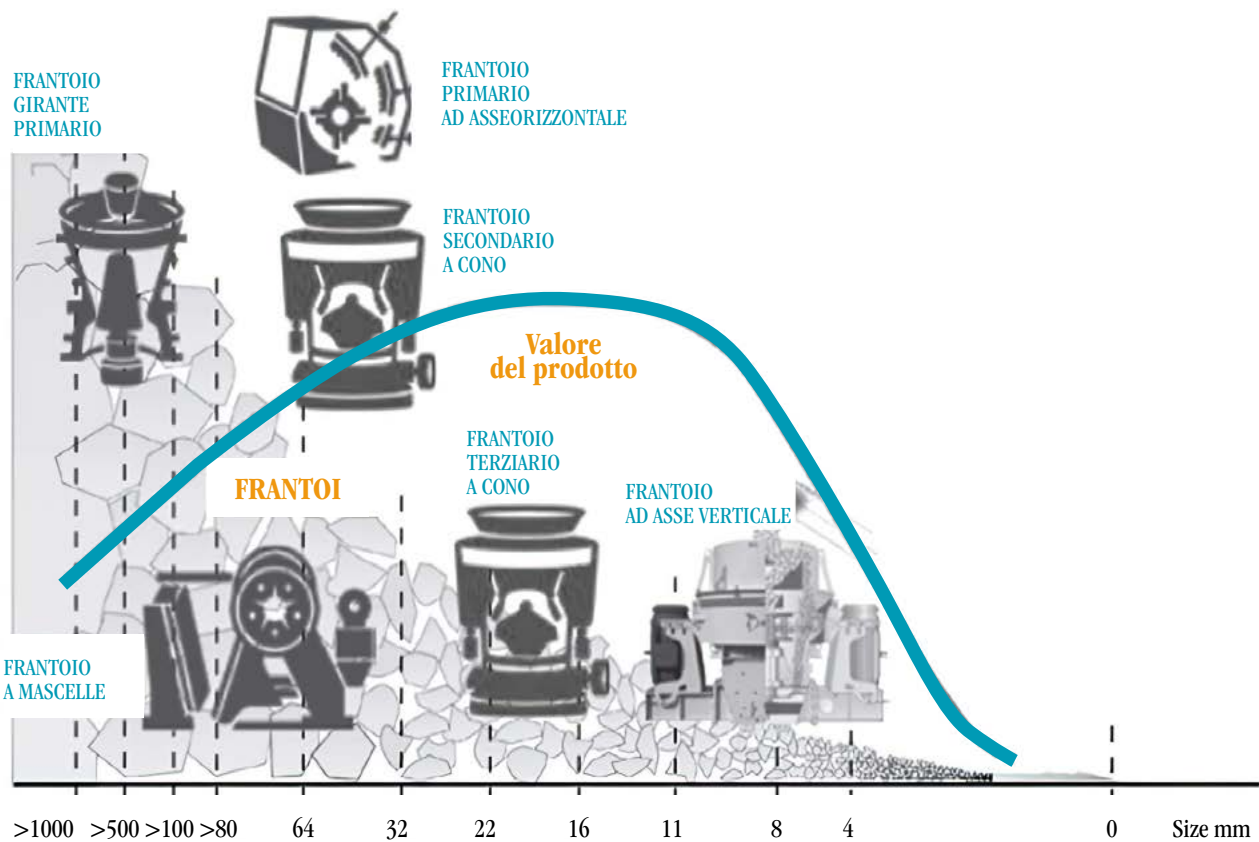
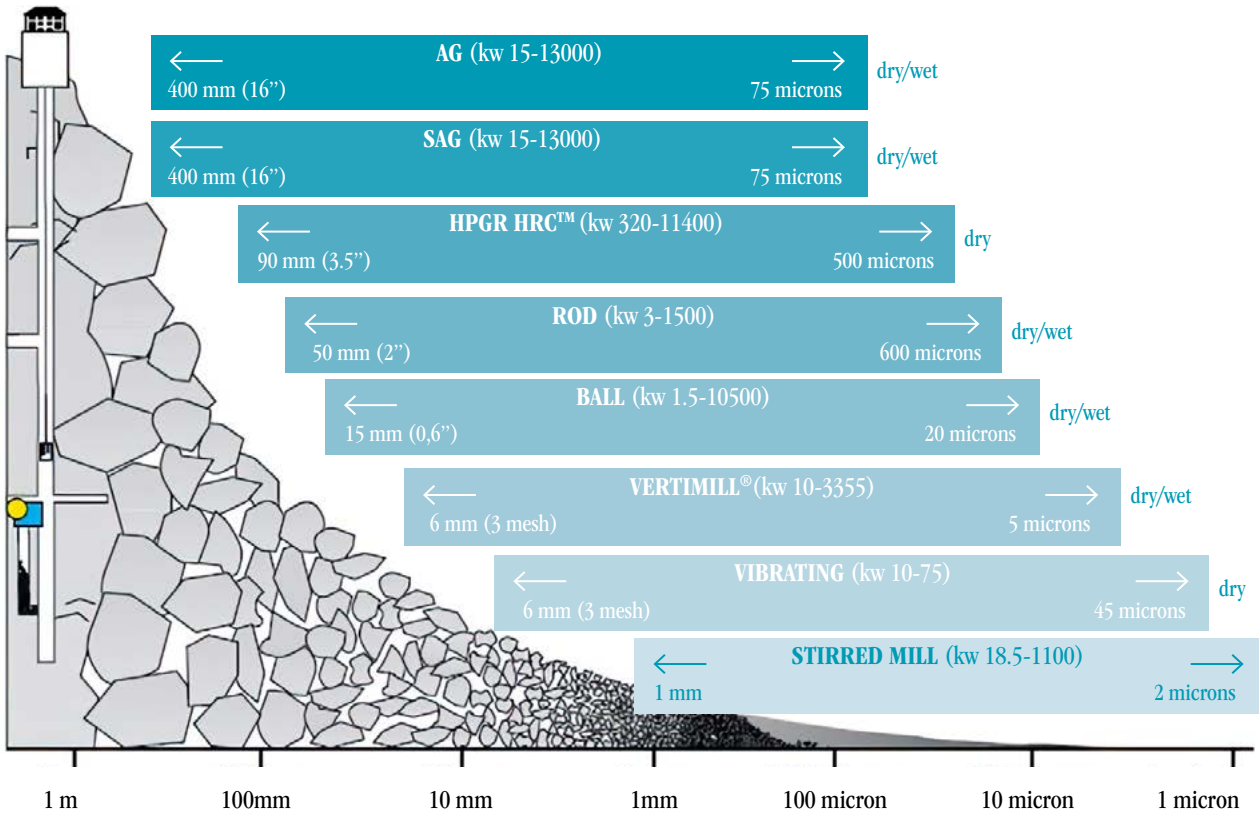


Figura 2. Impattatori. Tipo di macchine utilizzate nella macinazione (in alto) e nella frantumazione (in basso) in relazione al diametro finale (asse orizzontale).

Fonte: Metso:Outotec (2021).

In generale, la potenza di esercizio è almeno del 5-10% inferiore alla potenza teorica delle macchine (Renforth, 2012; Workman et al., 2003; Abadir, 2021). La conseguenza è che il processo completo non è in grado di assicurare la riduzione di diametro desiderato; ciò che si ottiene è una distribuzione di dimensioni piuttosto che un insieme di particelle dotate tutte di una singola dimensione (Renforth et al., 2013b; Renforth, 2012). Le macchine sono alimentate da energia elettrica.

In Tabella 3 si mostrano valori massimi, minimi e medi dei consumi energetici suddivisi per attività. Si riporta inoltre un valore indicativo del diametro in output e input associato generalmente a questi processi. Si rimanda alle Tabelle MS3-MS4 del MS per ulteriori dettagli.

In parentesi si riporta il numero di dati a disposizione. Si fa notare che non tutte le fonti consultate specificano dettagli quali la presenza di eventuali impurezze, la resistenza a rottura della roccia, il tipo di macchina utilizzato.

Dall'analisi dei dati si evince che la domanda energetica sia inversamente proporzionale alla dimensione del diametro delle particelle del prodotto finale e direttamente proporzionale alla resistenza allo sminuzzamento opposta dalla roccia, come indicato nell'Equazione [1].

Nel grafico di Figura 3 si mostra come al procedere della riduzione del diametro i consumi tendano ad aumentare in modo esponenziale.

Il motivo è che le particelle a diametro maggiore risultano più facilmente "catturabili" e quindi sminuzzabili rispetto a quelle di diametro inferiore. Queste ultime, al contrario, richiedono un numero maggiore di impatti e quindi maggiore energia per essere opportunamente intercettate e spezzettate (Wang et al., 2007). Si noti che i dati tratti da Strefler et al., (2018) sono stati ricavati applicando l'Equazione [2].

Ulteriori cause possono ricercarsi nella resistenza intrinseca del materiale, nella relazione tra la reattività del materiale e i meccanismi di rottura, nel tipo di macchina e nelle condizioni di esercizio, nelle dissipazioni di energia termica che si registrano nel passare

dalla semplice frantumazione alla macinazione fine o polverizzazione. In Tab. MS 4 nei Materiali Supplementari, si nota come pur ottenendo una riduzione di diametro minore (500 μm del quarzo rispetto a 45 μm del feldspato), il quarzo richiede circa il 20% di consumo energetico in più rispetto al feldspato.

Complessivamente, il consumo energetico dovuto alla triturazione grossolana e fine può raggiungere fino al 75% dell'energia totale richiesta nella sola macro-fase del trattamento (OEREE, 2002a).

L'arricchimento è infine una fase opzionale che risulta necessaria quando si vuole conferire al prodotto finale un miglioramento in valore economico. Ciò consiste in processi di lavaggio e/o separazione (Metso:Outotec, 2021).

Si possono prevedere ulteriori trattamenti qualora, come spesso accade nel caso del calcare, il prodotto lavorato debba trasformarsi in un prodotto commerciale finale con caratteristiche diverse da quello iniziale.

L'esempio tipico nell'industria delle costruzioni è la produzione di "calce viva" (*quicklime*, CaO), consistente in un trattamento termico chiamato calcinazione o *lime burning*. In questo processo, il calcare sottoforma di carbonato di calcio viene sottoposto a temperature molto elevate ($\sim 900\text{-}1200\text{ }^\circ\text{C}$) in forni dedicati (Eula, 2014).

Da un confronto tra macinazione fine e calcinazione, si nota come i consumi energetici di quest'ultima siano di gran lunga maggiori. Per effettuare la sola calcinazione, il consumo energetico può spaziare tra un valore minimo di circa $\sim 3\text{ GJ}$ per tonnellata di CaO ($\sim 842\text{ kWh tCaO}^{-1}$), equivalente a $\sim 472\text{ kWh}$ per tonnellata di CaCO_3 (Eula, 2014) e un massimo di $1764\text{ kWh tCaO}^{-1}$ equivalente a $988\text{ kWh tCaCO}_3^{-1}$ (Jenkins, 2003). Quest'ultimo valore si raggiunge solo per polverizzazioni ricadenti nel campo dell'ultra-fino ($<10\text{ }\mu\text{m}$).

3.1.3. Sintesi sui consumi energetici

Considerando l'intera catena di processo, lo studio condotto da USDOE (2007) conclude che le sotto-fasi di frantumazione e macinazione fine possono arrivare a rappresentare circa il 44% dell'energia totale, la separazione il 4%, la movimentazione dei materiali e il trasporto a corto raggio il 27%, la perforazione ed esplosione il 7%, processi aggiuntivi e rimanenti il 18%.

Tabella 3. Valori medi, minimi e massimi in kWh t^{-1} del consumo energetico attribuibile alla singola attività della lavorazione di una tonnellata di calcare e olivina.

Attività (numero fonti)	Consumo Energetico kWh t^{-1}			Range medio del diametro mm
	Media	Minimo	Massimo	Input-Output
Frantumazione (10)	3.2	0.8	9.0	$<500\text{-}<15$
Macinazione fine e ultrafine (24)	126	4	833	$<5\text{-}<0.002$

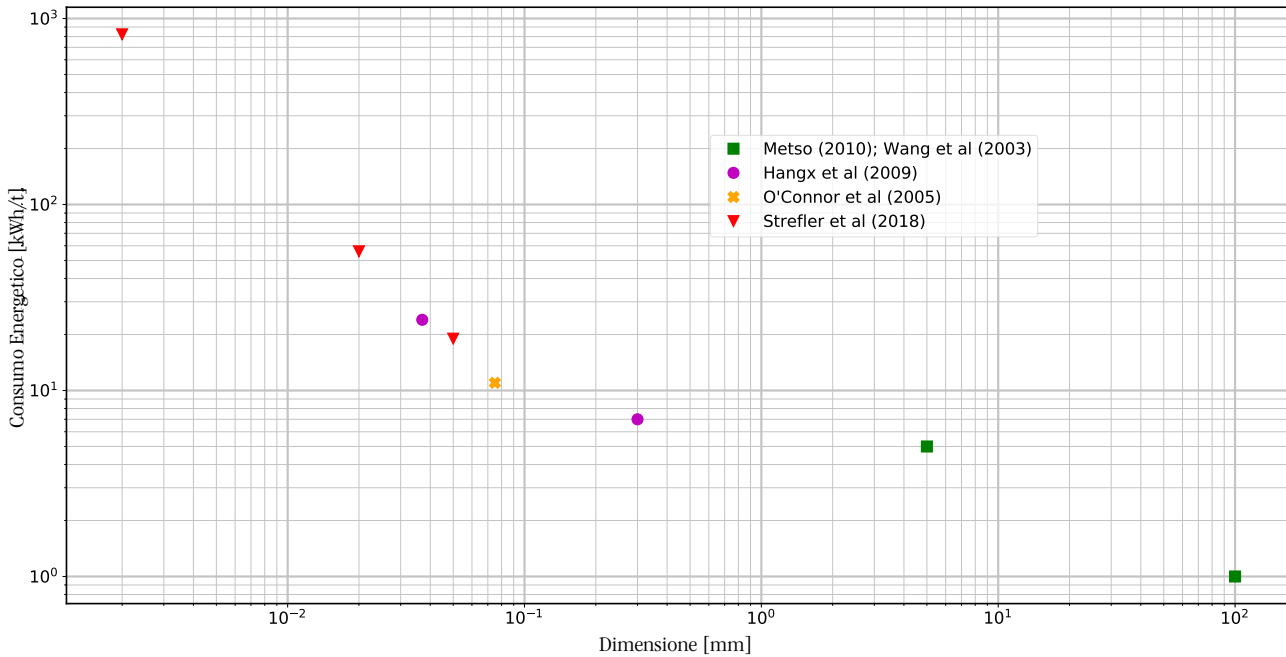


Figura 3. Andamento dei consumi energetici al variare della dimensione del diametro finale della particella.

Secondo lo studio condotto da OEREE (2002a) il trattamento occupa il 39% del totale, la movimentazione materiale il 42%, le restanti operazioni necessarie per estrarre la roccia dal sottosuolo il 19%. Per altri autori la sola macinazione fine potrebbe arrivare a raggiungere il 60-70% dell'energia necessaria alla manifattura del cemento (Holtec, 2019; Sayadi et al., 2014).

In Figura 4 è mostrato un grafico comparativo fra le fasi della catena di processo che possono essere me-

glio confrontate, ossia perforazione, movimentazione e trasporto materiali, frantumazione grossolana. La macinazione fine/polverizzazione è stata esclusa poiché i valori sono difficilmente sovrapponibili in quanto molto più alti. Le barre di errore (valore medio \pm deviazione standard) evidenziano inoltre come la dispersione nei dati a disposizione sia molto più alta nel caso della frantumazione. I dati sono visionabili nelle Tabelle MS1, MS3 e MS4 dei Materiali Supplementari.

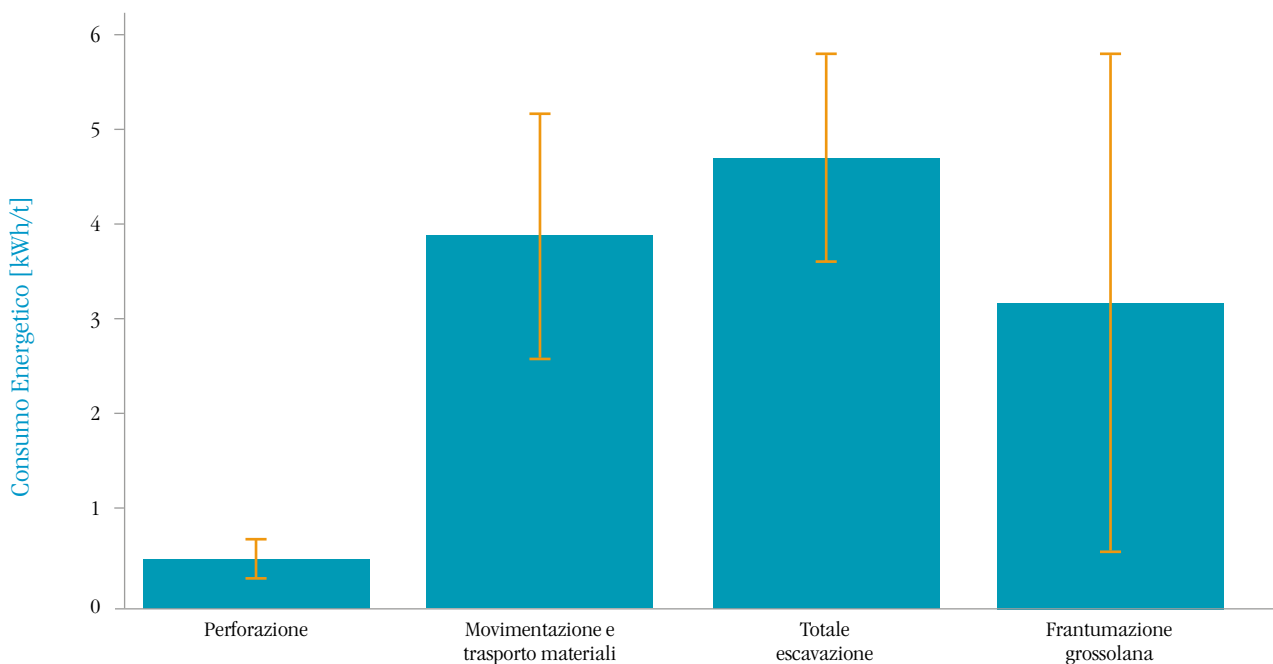


Figura 4. Confronto fra i consumi energetici medi dell'escavazione e della frantumazione grossolana ($P_{80} \geq 8\text{mm}$) con barre di errore.

3.1.4. Trasporto di lungo raggio

Lo spostamento dei materiali dalle cave agli impianti di trattamento e/o ai luoghi dove il prodotto finito è utilizzato avviene generalmente in due forme:

- via terra tramite camion o treni merci dedicati;
- via mare o corso d'acqua interno navigabile tramite imbarcazioni di piccola, media o grossa taglia.

Il consumo energetico varia notevolmente a seconda della distanza percorsa e dal mezzo di trasporto utilizzato. In Figura 5 si mostra un confronto fra i consumi energetici e i costi di trasporto al variare di questi due fattori.

I consumi energetici e i costi operativi unitari per chilometro e tonnellata di materiale trasportato sono riportati in Tab MS6-MS7 nei Materiali Supplementari. I diagrammi, in particolare, sono stati costruiti al variare della distanza in km e considerando i valori massimi tra consumi energetici e costi operativi nei dati a disposizione: $0.365 \text{ kWh t}^{-1} - 0.308 \text{ € t}^{-1}$ per il trasporto su strada tramite camion (Davis et al., 2011); Ko et al., 2018; Borjesson et al., 1996); $0.194 \text{ kWh t}^{-1} - 0.057 \text{ € t}^{-1}$ per il trasporto su ferrovia (West et al., 2002; Renforth, 2012); $0.111 \text{ kWh t}^{-1} - 0.023 \text{ € t}^{-1}$ per il trasporto su corso d'acqua navigabile (Renforth et al., 2013a; Ko et al., 2018; Borjesson et al., 1996); $0.017 \text{ kWh t}^{-1} - 0.002 \text{ € t}^{-1}$ per il trasporto marittimo (IMO, 2000; Renforth, 2012). I risultati sono presentati in Tab MS8 nei Materiali Supplementari.

Il trasporto ferroviario rappresenta una tra le opzioni più preferibile sia dal punto di vista logistico, che energetico che economico (BayRail Alliance, 2021). Nonostante ciò, il trasporto su strada continua a rappresentare circa il 94% del totale dell'energia consumata via terra nell'Unione Europea (EEA, 2018; Lindqvist et al., 2020).

Nel 2017, il 75% circa del trasporto merci nell'Unio-

ne Europea è stato condotto su strada, il 18% circa su ferrovia e solo il 7% tramite corsi d'acqua interni navigabili (Eurostat, 2019). La dipendenza dai combustibili fossili nel settore dei trasporti rappresenta inoltre una realtà ancora difficile da decarbonizzare (Wetzel, 2021).

3.2. Costi

Il costo di un processo o di un prodotto può essere influenzato e/o determinato da un insieme di fattori: il paese in cui l'energia è prodotta, il vettore energetico utilizzato per alimentare il processo, la tecnologia scelta, le fluttuazioni dei prezzi, le distanze, la modalità di trasporto, l'uso finale del prodotto.

3.2.1 Escavazione

Nelle attività estrattive, la domanda e il prezzo delle risorse naturali sono influenzate all'andamento dei mercati che, a loro volta, risentono di fenomeni come la volatilità dei prezzi e la ciclicità (Hojem, 2014). La geologia del corpo roccioso, il costo del lavoro e il grado di sviluppo socio-economico del paese che detiene il giacimento minerario sono ulteriori parametri incidenti sul prezzo finale della risorsa (Mohutsiwa et al., 2015).

Il grado di frammentazione della roccia e il diametro del foro da praticare sono i due parametri fondamentali nella pianificazione delle attività di perforazione ed esplosione. In termini economici, tanto migliore sarà il livello di frammentazione raggiunta, tanto maggiore saranno i costi.

Di questo aggravio ne beneficeranno tuttavia le attività successive – carico/scarico, trasporto e frantumazione – poiché al diminuire della pezzatura i prodotti diventano di più facile gestione.

Se i minerali risultano, inoltre, molto concentrati in rocce con alto livello di purezza i costi diminuiscono (Ridley, 2013).

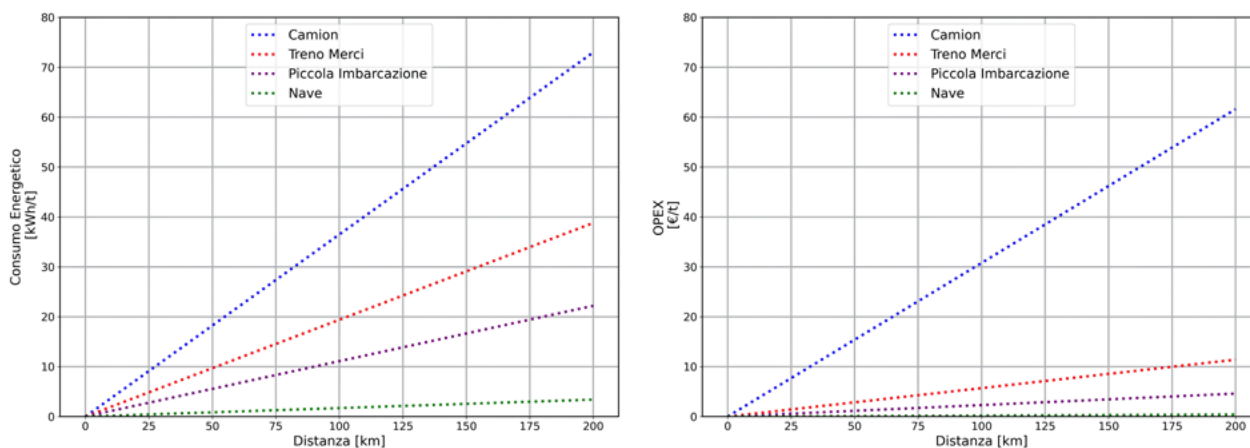


Figura 5. Andamento dei consumi energetici e dei costi operativi (OPEX) al variare della distanza percorsa e del mezzo di trasporto.

Il costo della perforazione, necessario per posizionare l'esplosivo utilizzato per frantumare la roccia dipende dalla lunghezza totale del foro che si deve praticare, dal numero di fori, dalla velocità di avanzamento della macchina perforatrice, dal costo orario della perforazione, dal tipo di roccia e dallo schema progettuale con cui si intende eseguire la fase di esplosione della roccia.

Il costo di esplosione, a sua volta, dipende dal tipo di esplosivo utilizzato, dal prezzo dell'esplosivo, dal numero di fori previsti, dal quantitativo di esplosivo che si intende inserire in ciascun foro, dalla dimensione di frammentazione della roccia che si vuole ottenere, dal volume di roccia da trattare e dal suo grado di resistenza. Il costo delle successive attività di carico e scarico del materiale estratto dipenderà dal costo orario, dalla capacità e dalle specifiche tecniche della macchina escavatrice utilizzata e dai volumi di roccia da movimentare (Ozdemir et al., 2018).

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva di valori massimi, minimi e medi dei costi operativi (OPEX) dell'estrazione suddivisi per tipologia di attività ed il totale. Ulteriori dettagli si trovano in Tabella MS2 nella sezione MS.

In parentesi si riporta il numero di dati a disposizione. Complessivamente in una cava a cielo aperto il costo del trasporto rappresenta il 70% del costo totale, il carico/scarico del materiale il 10%, l'esplosione il 12% e la perforazione l'8% (Mohutsiwa et al., 2015).

Le operazioni di escavazione generano inoltre significative economie di scala. Operazioni a larga scala implicano l'uso di grossi camion (~200 t) e sollevatori ma anche maggiori profitti e ciò causa una diminuzione di prezzi.

3.2.2. Lavorazione

I costi sono molto variabili a seconda della riduzione di diametro desiderata, del tipo di macchina utilizzata e sono perlopiù derivanti dal consumo elettrico.

Il range può andare da ~2 € t⁻¹ per 50 µm di diametro finale a ~80 € t⁻¹ per 2 µm di diametro finale (Strefler et al., 2018). Si veda Tab MS5 della Sezione MS per ulteriori dettagli.

Come discusso in precedenza, minore è il diametro dei grani del prodotto finale, maggiore è la domanda energetica e quindi il costo operativo legato al lavoro delle macchine.

La polverizzazione di un prodotto può richiedere fino al 90% dei costi operativi e al 60% dei costi investimento iniziale sostenuti da un impianto di frantumazione e macinazione (Sayadi et al., 2014).

L'elettricità inoltre è estremamente variabile a seconda del contesto geografico in cui si colloca il luogo di produzione.

3.2.3. Trasporto di lungo raggio

Materiali da costruzione come il calcare o la dolomite vengono valutati economicamente anche in base a delle caratteristiche fisiche e di processo. Il loro essere voluminosi, ingombranti, largamente diffusi, disponibili in natura e necessitanti di lavorazioni poco spinte li classificano come beni di largo consumo a basso valore economico.

Pertanto, risultano vendibili con profitto solo se i centri di produzione sono vicini ai mercati locali e/o ai luoghi di diretto consumo (MPRA, 2007).

In assenza di questa condizione, la voce di costo del trasporto a lungo raggio diventa preponderante rispetto ai costi di produzione.

Dalla Figura 5 si nota come, al pari del consumo energetico, i costi risultino maggiori se il trasporto è condotto su strada e inferiori per trasporti via mare tramite navi di grossa taglia.

3.3. Strategie per ottimizzare i consumi energetici

Pur se non sono disponibili sufficienti dati e informazioni per una stima affidabile del risparmio energetico conseguibile in ogni fase, sono riportate in seguito alcune indicazioni su alcuni tipi di interventi possibili.

3.3.1. Escavazione

L'efficientamento dei processi di escavazione si rifletterebbe in un aumento della longevità del deposito minerario, in un miglioramento della sua produttività, in minori costi di manutenzione, in un utilizzo

Tabella 4. Valori medi, minimi e massimi in € t⁻¹ del costo operativo attribuibile alla singola attività e all'escavazione totale di una tonnellata di calcare e riolite.

Attività (numero fonti)	OPEX € t ⁻¹		
	Media	Minimo	Massimo
Perforazione (2)	0.2	0.06	0.4
Esplosione (2)	0.2	0.07	0.3
Movimentazione materiali e trasporto (2)	1.1	0.3	1.9
Totale escavazione (2)	1.6	0.5	2.6

più oculato della manodopera, in una riduzione complessiva delle spese (Holtec, 2011). Come già spiegato, una migliore pianificazione delle attività di esplosione comporta una migliore produttività del *crushing* e del *grinding* poiché particelle di minori dimensioni potrebbero by-passare fasi non necessarie con un conseguente alleggerimento del carico in ingresso per alcune operazioni; nelle attività di carico e scarico materiale si registrerebbero inoltre minori consumi.

Secondo Gorman et al., (2018), l'ottimizzazione dell'esplosione condurrebbe a un 21% di risparmio energetico di cava. Tuttavia, un aggravio in quantitativo e in costo dell'esplosivo per l'efficientamento di questa attività andrebbe valutato con attenzione poiché rimane dubbia l'efficacia garantita da questa fase nel creare il sistema di microfratture che più impatta sul rendimento della macinazione fine (Workman et al., 2009).

L'utilizzo di sistemi di rilevamento satellitari per agevolare la localizzazione dei minerali di scarto (anche detti di ganga), l'introduzione di sistemi automatici per l'espletamento di alcune operazioni come l'utilizzo di macchine perforatrici semi-automatiche o completamente automatiche con reperimento e analisi dei campioni porterebbero a migliorare la frammentazione della roccia e a ridurre la produzione di materiali di scarto (Curry et al., 2014; Holtec, 2019).

Nella movimentazione e trasporto dei materiali di cava l'uso di nastri trasportatori elettrici in connessione automatica con le attività di *crushing* permetterebbe di diminuire il consumo dei combustibili fossili che alimentano la maggior parte delle attrezzature. Sistemi di questo genere sono chiamati *in-pit crushing and conveying*. Un ulteriore esempio è l'impiego di trolley-assist dove il trasporto del materiale avviene su camion alimentati ad elettricità e inseriti in un sistema di viabilità anch'esso elettrico (Jeswiet et al., 2015). Un sistema implementato da Doppelmayer (2021) è chiamato RopeCon® e consiste nel trasporto del calcare frantumato tramite convogliatori tubolari.

3.3.2. Lavorazione

Gli studi condotti da Norgate et al., (2010) e USDOE (2007) indicano che sia la fase di frantumazione grossolana che quella fine hanno la potenzialità di ridurre i consumi energetici.

Un concetto-chiave è che i processi che portano alla riduzione di diametro delle particelle non dovrebbero essere il risultato di un unico passaggio ma di una catena di step successivi e separati (Wang et al., 2007).

I materiali di ganga ovvero di scarto, in particolare, non dovrebbero essere trattati insieme al materiale utile ma dovrebbero essere catturati e trattati separatamente. Ciò principalmente per limitare al minimo l'u-

tilizzo delle macchine adibite alla macinazione fine. L'uso di opportuni classificatori garantisce il raggiungimento di tali obiettivi.

In queste fasi, inoltre, la spinta verso l'utilizzo di tecnologie sempre più avanzate è cruciale.

Secondo diversi autori, *High-pressure roller mills (HPRMs)*, *High-pressure grinding rolls (HPGRs)*, *Stirred Media Mills* sono esempi di macchine tecnologicamente avanzate (Norgate et al., 2010; Curry et al., 2014; Wang et al., 2007; Gorman et al., 2018).

Lo studio di Daniel et al., (2010) ha mostrato come la sostituzione di un SAG mill con un HPGR in un tradizionale circuito SAG-Ball porterebbe a percentuali di risparmio del 15-20% in termini di energia, del 23-25% in termini di costo e del 26-39% in emissioni carboniche.

L'utilizzo di mulini a sfere a carica controllata è una soluzione alla sovrapproduzione di ultrafini e alla riduzione dei tempi di macinazione.

Benefici potrebbero inoltre derivare dall'uso combinato di tecnologie diverse. Un esempio è l'applicazione di energia ultrasonica a mulini di tipo *High pressure roller mill*. Hielscher (2021) utilizza macinazione ad umido ad ultrasuoni per il trattamento di carbonati di calcio e di ossidi di metalli. Additivi chimici possono contribuire al miglioramento della reologia del materiale poiché prevengono agglomerazioni di particelle (Wang et al., 2007).

Secondo lo studio condotto da USDOE (2007) almeno un 37% di risparmio energetico potrebbe essere raggiunto se anche il *grinding* e la movimentazione dei materiali fossero ottimizzati in modo da raggiungere il loro minimo pratico, ossia l'energia totale consumata che si otterrebbe se un'attività fosse eseguita applicando le *best practices* ed i miglioramenti derivanti dalle scoperte della ricerca scientifica.

3.3.3. Trasporto di lungo raggio

L'ottimizzazione energetica del sistema trasporti a lungo raggio passa inevitabilmente dallo stanziamento di incentivi miranti a far cessare la loro stretta dipendenza dall'uso di combustibili fossili.

Il passaggio all'utilizzo dell'energia elettrica come vettore energetico primario richiede investimenti in infrastrutture adibite alla ricarica e la progettazione di motori che garantiscano tassi di efficienza e competitività più alti rispetto ai tradizionali motori diesel.

Cummins e Tesla sono esempi di industrie attualmente coinvolte nella produzione di veicoli pesanti completamente o in parte elettrici (Hodgkinson et al., 2018).

ABB (2021) invece è un esempio di industria specializzata nella progettazione di sistemi elettrici di movimentazione e trasporto materiali chiamati *electric trolley truck system*.

3.3.4. Sostenibilità, gestione dei rifiuti e analisi del ciclo di vita

Da sempre, il massiccio sfruttamento delle risorse naturali e il tipo di operazioni connesse all'industria estrattiva sono stati considerati ambiti di difficile applicabilità delle pratiche sostenibilità (Hojem, 2014; Gorman et al., 2018). Una gestione più pianificata e una migliore organizzazione delle attività risultano elementi indispensabili al cambiamento di passo.

Nello specifico, il concetto di sostenibilità in questo ambito (ODPM, 2005) implica:

- pianificazione delle attività estrattive in un'ottica di circolarità;
- gestione più efficiente del materiale di scarto;
- uso e/o potenziamento delle tecnologie "verdi";
- massimizzazione del riciclo e del riutilizzo di sostanze (es: acqua) utilizzate in alcuni processi;
- transizione dal concetto di ciclo di vita della cava a quello di ciclo di vita del materiale estratto (Gorman et al., 2018);
- collocazione degli impianti di frantumazione nelle vicinanze delle cave in modo da ridurre le distanze;
- utilizzo di sensori per le attività di scavo e di perforazione (Norgate et al., 2010);
- valutazioni e controlli più accurati delle perdite energetiche, specialmente nelle attività di frantumazione e macinazione;
- valutazione più dettagliata sui tassi di efficienza e di riciclo realizzabili nelle varie operazioni;
- impiego di tecniche più precise e avanzate nell'estrazione.

Le cave posizionate in aree remote, potrebbero beneficiare in maniera particolare dell'utilizzo e/o potenziamento del solare e dell'eolico (Hodgkinson et al., 2018). Esiste inoltre un legame di interdipendenza tra le fonti di energia rinnovabile e l'industria estrattiva. Le prime necessitano delle ultime per essere realizzate e queste ultime dipendono dalle prime per far fronte alle fluttuazioni continue nei prezzi dei combustibili fossili dal cui utilizzo risultano dipendenti (Mellman et al., 2020).

3.4. Strategie per ottimizzare i costi

Un più diffuso utilizzo di tecnologie avanzate permetterebbe di ridurre in maniera drastica i costi operativi a carico dell'intera catena di processo, ma richiede maggiori costi di investimento.

Nello specifico, l'automatizzazione di una cava così come l'utilizzo di macchine del tipo *HPGR* nella macinazione fine rappresenterebbero dei passaggi chiave nell'abbandono delle strategie tradizionali.

Un approccio di sistema risulta inoltre cruciale. Ottimizzare una singola operazione potrebbe non avere ripercussioni sull'ampia scala. Capire invece le rela-



zioni esistenti tra le varie parti della catena di processo e procedere per ottimizzazioni di sistema permette di massimizzare le riduzioni dei consumi (Ozdemir et al., 2018). La cessazione di sussidi a favore dei combustibili fossili accelererebbe la transizione energetica anche nel settore dell'escavazione (Hodgkinson et al., 2018; IRENA, 2021).

4. Conclusioni

Il contrasto al cambiamento climatico impone l'attuazione sia di interventi di decarbonizzazione totale sia di rimozione della CO_2 atmosferica. Per il raggiungimento di quest'ultimo obiettivo, si dovranno utilizzare e trattare ingenti quantitativi (miliardi di tonnellate) di materie prime perlopiù costituite da calcare e rocce ricche in olivina.

I problemi principali derivanti dal loro utilizzo sono la domanda energetica, i costi operativi e di investimento necessari per l'estrazione e la lavorazione e gli impatti ambientali provocati. In fase di escavazione le attività a maggior dispendio energetico e impatto ambientale sono la movimentazione e il trasporto dei materiali all'interno della cava. Il consumo energetico di questa attività è di $\sim 4 \text{ kWh t}^{-1}$ e rappresenta almeno il 60% del consumo energetico totale di escavazione, che include anche le attività di esplosione e perforazione. I motori a diesel inoltre risultano ad oggi le tecnologie più utilizzate per il trasporto di corto e lungo raggio dei materiali di cava trattati e non (Norgate et al., 2010).

Le fasi di macinazione fine e polverizzazione comportano consumi superiori all'escavazione, qualora

il prodotto finito debba avere granulometrie dell'ordine del micrometro. Tanto maggiore è la riduzione di diametro richiesta, tanto maggiori saranno i consumi energetici prodotti. I consumi energetici medi si aggirano intorno ai 3 kWh t⁻¹ nella frantumazione grossolana a fronte di una riduzione di diametro di ~1 mm e 126 kWh t⁻¹ per la macinazione fine con diametri finali di ~20 µm. Un'ulteriore attività ad alto impatto energetico è la calcinazione. I consumi massimi sono in tal caso comparabili a quelli raggiunti nella polverizzazione ultra-fine, ~988 kWh tCaCO₃⁻¹ (Jenkins, 2003).

Il trasporto di lungo raggio costituisce un ulteriore aggravio di costi e consumi qualora le distanze tra i luoghi di estrazione e i luoghi di trattamento della materia prima o i luoghi di trattamento e di consumo ultimo superino i 100 km e siano effettuati tramite camion alimentati a combustibili fossili. Il consumo per 100 km può raggiungere i 40 kWh t⁻¹.

Nonostante ciò, l'utilizzo di tecnologie avanzate sia in fase di escavazione, in particolare nella perforazione, sia in fase di macinazione fine e/o polverizzazione, hanno la potenzialità di imprimere miglioramenti alle prestazioni energetiche e riduzione dei costi operativi di gestione. Lo studio condotto da USDOE (2007)

stima che almeno un 37% di risparmio energetico potrebbe essere raggiunto nella macinazione fine e nella movimentazione dei materiali se ciascuna di queste attività fosse condotta in maniera tale da raggiungere il loro minimo pratico. Il minimo pratico consiste nell'energia totale consumata che si otterrebbe se un'attività fosse eseguita applicando best practices ed i risultati della ricerca scientifica.

Ulteriori strategie consistono nello stanziamento di incentivi a favore dell'elettrificazione, soprattutto nei trasporti, l'utilizzo di fonti rinnovabili in buona sostituzione dei combustibili fossili e una significativa e rapida riduzione dei sussidi a favori di questi ultimi (IRENA, 2021).

Infine, la minimizzazione degli impatti ambientali, la riduzione dei consumi energetici e dei costi produrrebbero risultati limitati se non si intervenisse con un approccio di sistema (Ozdemir, 2018). Ottimizzare una singola operazione comporterebbe infatti scarsi benefici sull'intera catena. Individuare e capire le relazioni esistenti tra le varie parti della catena di processo e lavorare affinché la fase precedente riduca gli oneri energetici della fase successiva sono cruciali per ottenere vantaggi diffusi e di lungo termine. ■

Riferimenti bibliografici

- 911Metallurgist (2022) High Pressure Grinding Roll, HPGR. Disponibile a: <https://www.911metallurgist.com/equipment/high-pressure-grinding-rolls/>. Consultato in Luglio 2022.
- Abadir M. (2021) CHE 301(A): Unit Operations Chapter 4: Size reduction. Available at: <https://scholar.cu.edu.eg/?q=magdi/classes/che-301a-unit-operations-chapter-4-size-reduction>. Consultato in Agosto 2021.
- ABB (2021) Trolley assist for diesel-electric trucks in mining: 3 reasons why it is taking off. Disponibile a: <https://new.abb.com/mining/mineoptimize/systems-solutions/mining-electrification/trolley-assist-for-diesel-electric-trucks>. Consultato in Settembre 2021.
- Alpa (2022) Expert in high-value treatment of calcium carbonate. Disponibile a: https://caco3.alpapowder.com/?search_calcium&campaignid=11874937330&adgroupid=117067011084&feeditemid&targetid=kwd-17543339979&device=c&reative=587782534944&keyword=limestone%20grinding%20mill&gclid=Cj0KCQjw54iXBhCXARIsADWpsG-lPrZTGeuMHI4-ioxaKF9LpptUpmINwAp-CnHUV0VBbPfrhF98UqwaAuP1EALw_wcB. Consultato in Luglio 2022.
- BayRail Alliance (2021) "Why trains?" Disponibile a: https://www.bayrailalliance.org/why_trains/. Consultato in Ottobre 2021.
- Beerling D.J., Kantzas E.P., Lomas M.R. et al (2020) Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature*, 583. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>
- Bond F. (1961) Crushing and Grinding Calculations, Part I – Part II. *British Chemical Engineering*, 6(6): 378-385; 543-548. Disponibile a: <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2015/11/Bond-F-C-1961-Crushing-and-Grinding-Calculations.pdf>. Consultato in Luglio 2021.
- Borjesson P. e Gustavsson L. (1996). Biomass transportation. *Renewable Energy* 9(1-4): 1033–10336. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88456-4](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88456-4)
- Brown T., Coggan J., Evans J. et al. (2010). Underground Mining of Aggregates. Mineral Industries Research Organization. Disponibile a: <http://core.kmi.open.ac.uk/download/pdf/56411.pdf>.
- Butenschön M., Lovato T., Masina S. et al. (2021) Alkalinization Scenarios in the Mediterranean Sea for Efficient Removal of Atmospheric CO₂ and the Mitigation of Ocean Acidification. *Frontiers in Climate*,

- Sec. Negative Emission Technologies, 3, 614537
<https://doi.org/10.3389/fclim.2021.614537>
- Caserini S., Storni N. e Grosso M. (2022) The Availability of Limestone and Other Raw Materials for Ocean Alkalinity Enhancement. *Global Biogeochemical Cycles*, 35 (5).
<https://doi.org/10.1029/2021GB007246>
 - Caserini S., Cappello G., Righi D., Raos G. et al (2021b) Buffered accelerated weathering of limestone for storing CO₂: Chemical background. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 112, 103517.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103517>
 - Caserini S., Pagano D., Campo F. et al (2021a) Potential of Maritime Transport for Ocean Liming and Atmospheric CO₂ Removal. *Frontiers in Climate*, Sec. Negative Emission Technologies, 22, 575900.
<https://doi.org/10.3389/fclim.2021.575900>
 - Cemex (2021). How Cement is Made. Disponibile a: <https://www.cemex.co.uk/cement-production-process.aspx>. Consultato in Agosto 2021.
 - CIPEC (2005). Benchmarking the energy consumption of Canadian open-pit mines. Canadian Industry Program for Energy Conservation, Mining Association of Canada, Natural Resources, Canada. Disponibile a: <https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oeef/pdf/publications/industrial/mining/open-pit/Open-Pit-Mines-1939B-Eng.pdf>. Consultato in Luglio 2021.
 - Curry J., Ismay M. e Jameson G. (2014). Mine operating costs and the potential impacts of energy and grinding. *Minerals Engineering* 56: 70-80.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.10.02>
 - Daniel M., Lane G. and McLean E. (2010). Efficiency, economics, energy and emissions-emerging criteria for comminution circuit decision making. XXV International Mineral Processing Congress 2010. Brisbane, Australia, 6-10 September 2010.
 - Darton R.C. e Yang A. (2018) Removing Carbon Dioxide from the Atmosphere – Assessing the Technologies. *Chemical Engineering Transactions*, 69: 91-96. <https://doi.org/10.3303/CET1869016>
 - Davis S., Diegel S., Boundy R. (2011). Transportation Energy Data Book. Edition 31. Center for Transportation Analysis: Energy and Transportation Science Division. https://tedb.ornl.gov/wp-content/uploads/2019/03/Edition31_Full_Doc.pdf
 - Doppelmayr (2021) An innovative conveying system for difficult terrain. Doppelmayr Transport Technology. Disponibile a: <https://www.doppelmayr.com/products/ropecon/>. Consultato in Agosto 2021.
 - EEA (2018) Sectoral Profile – Transport. Disponibile a: <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/transport/>. Consultato in Settembre 2021.
 - EU (2020) Study on the EU's list of Critical Raw Materials – Final Report (2020). European Commission. Disponibile a: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en. Consultato in Luglio 2022.
 - Eula (2014) A competitive and efficient lime industry. Cornerstone for a Sustainable Europe. Technical Report. European Lime Association. Disponibile a: https://www.eula.eu/wp-content/uploads/2019/02/A-Competitive-and-Efficient-Lime-Industry-Technical-report-by-Ecofys_0.pdf. Consultato in Luglio 2022.
 - Eurostat (2019) Energy, transport and environment statistics. 2019 edition. Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/10165279/KS-DK-19-001-EN-N.pdf/76651a29-b817-eed4-f9f2-92bf692e1ed9>. Consultato in Novembre 2021.
 - FTM (2022) Limestone Grinding Mill. Fote Heavy Machinery. Disponibile a: <https://www.environmental-expert.com/products/ftm-limestone-grinding-mill-681626> Consultato in Luglio 2022.
 - Goll D.S., Ciais P., Amann T., Buermann W et al. (2021) Potential CO₂ removal from enhanced weathering by ecosystem responses to powdered rock. *Nature Geoscience*, 14: 545–549. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00798-x>
 - Gorman M. e Dzombak D. (2018). A review of sustainable mining and resource management: Transitioning from the life cycle of the mine to the life cycle of the mineral. *Resources, Conservation and Recycling* 137: 281-291. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.06.001>
 - Hangx S. e Spiers J. (2009). Coastal spreading of olivine to control atmospheric CO₂ concentrations: A critical analysis of viability. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 3: 757–767. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.07.001>
 - Hielscher (2021). Ultrasonic Wet-Milling and Micro-Grinding. Hielscher Ultrasound Technology. Disponibile a: https://www.hielscher.com/mill_01.htm.
 - Hodgkinson J. e Smith M. (2018). Climate change and sustainability as drivers for the next mining and metals boom: The need for climate-smart mining and recycling. *Resources Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.05.01>
 - Hojem, P. (2014). Making Mining sustainable: overview of private and public responses. Report

- published by Luleå University of Technology.
Disponibile a: https://www.ltu.se/cms_fs/1.124549!/file/rapport%20making%20mining%20sustainable%20low.pdf. Consultato in Agosto 2021.
- Holtec (2011). Quarry Optimisation. Holtec Consulting India. Disponibile a: <http://www.holtecnnet.com/index.php?id=73>. Consultato in Agosto 2021.
 - Holtec (2019). The changes in production technology, and what comes next? Holtec Consulting India. A collection of essays and recollections on the occasion of INTERCEM 100. Disponibile a: <http://www.holtecnnet.com/index.php?id=73>. Consultato in Agosto 2021.
 - IPCC (2022) IPCC's Sixth Assessment Report (AR6), Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, Working Group III contribution: Technical Summary. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponibile a: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>. Consultato in Luglio 2022.
 - IQ (2021). What is the Quarrying Process? The Institute of Quarrying. Disponibile a: <https://www.quarrying.org/about-quarrying/quarrying-explained>. Accesso nel Luglio 2021.
 - IRENA (2021) World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Disponibile a: www.irena.org/publications. Consultato in Settembre 2021.
 - Jenkins (2003) What are shaft kilns for lime manufacture. IFRF Online Combustion Handbook. International Flame Research Foundation.
 - Jeswiet J., Archibald J., Thorley, U. et al (2015) Energy Use in Premanufacture (Mining). Procedia CIRP 29: 816 – 821 The 22nd CIRP conference on Life Cycle Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.071>
 - Kleemann (2022) Tecnica di frantumazione. Disponibile a: <https://www.wirtgen-group.com/it-it/prodotti/kleemann/tecnologie/tecnica-di-frantumazione/>. Consultato in Luglio 2022.
 - Ko S., Lautala P. e Handler R. (2018) Securing the feedstock procurement for bioenergy products: a literature review on the biomass transportation and logistics. Journal of Cleaner Production 200:205–18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.241>
 - Lindqvist D., Salman M. e Bergqvist R. (2020). A cost benefit model for high-capacity transport in a comprehensive line-haul network. European Transport Research Review 12(60). <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00451-5>
 - Mellman, J., East, D., e Knight, A. (2020) Mining and Renewable energy -- a greener way forward. Disponibile a: <https://renewablesnow.com/news/mining-renewable-energy-a-greener-way-forward-721937/>. Consultato in Agosto 2021.
 - Metso (2010) Basics in Mineral Processing, 7th Edition. Metso Corporation.
 - Metso: Outotec (2021). Basics in Minerals Processing. 12th edition. Metso Outotec Corporation. Disponibile a: <https://www.mogroup.com/insights/e-books/basics-in-minerals-processing-handbook/> Consultato in Agosto 2022.
 - MIE (2022) Personal Communication. Minerali Industriali Engineering. www.mineraliengineering.it
 - Mitchell C., Mitchell P. and Pascoe R. (2008). Quarry fine minimisation: can we really have 10 mm aggregate with no fines? Walton, G. (Ed.) Proceedings of the 14th Extractive Industry Geology Conference (p. 37-44). EIG Conferences, 109p.
 - Mohutsiwa M. e Musingwini C. (2015). Parametric estimation of capital costs for establishing a coal mine: South Africa case study. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 115(8):789-797. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2015/V115N8A17>
 - MPRA (2007). The Economic Value of Industrial Minerals and Rocks for Developing Countries: A Discussion of Key Issues. MPRA Paper N. 2214. Munich Personal RePEc Archive. Disponibile a: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/2214>. Consultato in Luglio 2021.
 - Norgate T. e Haque N. (2010) Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. Journal of Cleaner Production 18(3): 266-274. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.020>
 - O'Connor W., Dahlin D., Rush G. et al (2005). Aqueous mineral carbonation: mineral availability, pretreatment, reaction parameters, and process studies. DOE/ARC-TR-04-002, 2005. doi:10.13140/RG.2.2.23658.31684
 - ODPM (2005) Future issues for sustainable mineral extraction. Minerals Matters – 12. Office of the Deputy Prime Minister. Disponibile a: <https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/mineralsYou/mineralsEnvironment.html>. Consultato in Luglio 2022.
 - OEERE (2002a) ITP Mining: Energy and Environmental Profile of the U.S. Mining Industry. Chapter 1 – Mining Overview. Industrial Technology Program. US Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Disponibile a: <https://www.energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy>. Consultato in Luglio 2021.

- OEERE (2002b) ITP Mining: Energy and Environmental Profile of the U.S. Mining Industry. Chapter 9 – Limestone and Crushed Rock. Industrial Technology Program. US Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Disponibile a: <https://www.energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy>. Consultato in Luglio 2021.
- Ozdemir B. e Kumral M. (2018). A system-wide approach to minimize the operational cost of bench production in open-cast mining operations. *International Journal of Coal Science and Technology* 6: 84–94. <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0234-1>
- ProjectVesta (2021) Olivine and Dunite Reserves and their position in ophiolites. Disponibile a: <https://legacy.projectvesta.org/wiki/olivine-and-dunite-reserves-and-their-position-in-ophiolites/>. Consultato in Dicembre 2021.
- Prya Cement (2022) Limestone crushing. Disponibile a: <https://www.priyacement.com/products/processes2.html>. Consultato in Luglio 2022.
- Renforth P. (2012) The potential of enhanced weathering in the UK. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 10: 229-243. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.06.011>
- Renforth P, e Kruger T (2013b). Coupling Mineral Carbonation and Ocean Liming. *Energy and Fuel*, 47: 4199-4207. <https://doi.org/10.1021/ef302030w>
- Renforth P, Jenkins B. e Kruger T. (2013a). Engineering challenges of ocean liming. *Energy*, 60: 442-452. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.08.006>
- Ridley J. (2013) *Ore Deposit Geology*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139135528>
- Rinder T. e von Hagke C. (2021). The influence of particle size on the potential of enhanced basalt weathering for carbon dioxide removal – Insights from a regional assessment. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128178. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128178>
- RM Group (2022) Dominate Your Jobsite With a RUBBLE MASTER Limestone Crusher. Mobile Jaw and Impact Crusher. Disponibile a: <https://www.rubblemaster.com/us/materials/natural-rock/limestone>. Consultato in Luglio 2022.
- Sanme (2022) Do You Know the Use of Limestone Crusher? Disponibile a: <http://sanmechina.com/Do-You-Know-the-Use-of-Limestone-Crusher.html>. Consultato in Luglio 2022.
- Sayadi A., Khalesi M. e Borji, M. (2014). A parametric cost model for mineral grinding mills. *Minerals Engineering* 55: 96-102. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.09.013>
- Schenck Process (2022) Raymond® Roller Mill. Disponibile a: <https://www.schenckprocess.com/technologies/milling-grinding/mills/Raymond-Roller-Mill>. Consultato in Luglio 2022
- Strefler J., Amann T., Bauer N. et al. (2018). Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks. *Environmental Research Letter* 13 (3): 034010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c4>
- USDOE (2007) Mining Industry Energy Bandwidth Study. Technical Report. US Department of Energy. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), Energy Efficiency Office, Advanced Manufacturing Office. United States. Disponibile a: <https://doi.org/10.2172/1218653>. Consultato in Luglio 2022.
- USGS (2021) How do we extract minerals? US Geological Survey. Disponibile a: https://www.usgs.gov/faqs/how-do-we-extract-minerals?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products. Consultato in Dicembre 2021.
- Wang Y. e Forssberg E. (2007) Enhancement of energy efficiency for mechanical production of fine and ultra-fine particles in comminution. *China Particology*, 5, 3, 193-201. <https://doi.org/10.1016/j.cpart.2007.04.003>
- Wang Y. e Forssberg E. (2003). International Overview and Outlook on Comminution Technology. Luleå Universitet: Department of Chemical Engineering and Geosciences. Report pubblicato da Swedish Mineral Processing Research Association, Stoccolma. Disponibile a: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:997848/FULLTEXT01.pdf> Consultato in Ottobre 2022.
- West T. e Marland G. (2002) A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States. *Agriculture Ecosystems and Environment* 91(1-3):217-232. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00233-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00233-X)
- Wetzel B. (2021) Key Challenges of Alternative Energy Use in Transportation. Disponibile a: <https://www.breakthroughfuel.com/blog/challenges-of-alternative-energy-in-transportation>. Consultato in Novembre 2021.
- Workman L., e Eloranta J. (2003). The Effects of Blasting on Crushing and Grinding Efficiency and Energy Consumption. *Proceedings of the Annual Conference on Explosives and Blasting Technique.*

Materiale supplementare è disponibile gratuitamente all'indirizzo www.ingegneriadellambiente.net



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2022 è sostenuta da:

