



Università degli Studi di Cagliari

DOTTORATO DI RICERCA IN GEOINGEGNERIA E TECNOLOGIE AMBIENTALI

Ciclo XXVII

Metodi di ottimizzazione dei processi produttivi applicati al settore dei lapidei carbonatici

Settori scientifici disciplinari di afferenza

ING-IND/28 Ingegneria e Sicurezza degli Scavi

ING-IND/29 Ingegneria delle Materie Prime

Presentata da:

Dott. Ing. Pierpaolo Medda

Coordinatore Dottorato

Prof. Aldo Muntoni

Tutor

Dott. Ing. Nicola Careddu

Esame finale anno accademico 2014-2015

La presente pubblicazione/comunicazione/tesi/articolo ecc. è stata prodotta durante la frequenza del corso di dottorato in Geoingegneria e Tecnologie Ambientali dell'Università degli Studi di Cagliari, a.a. 2012/2013 - XXVII ciclo, con il supporto di una borsa di studio finanziata con le risorse del P.O.R. SARDEGNA F.S.E. 2007-2013 - Obiettivo competitività regionale e occupazione, Asse IV Capitale umano, Linea di Attività 1.3.1 "Finanziamento di corsi di dottorato finalizzati alla formazione di capitale umano altamente specializzato, in particolare per i settori dell'ICT, delle nanotecnologie e delle biotecnologie, dell'energia e dello sviluppo sostenibile, dell'agroalimentare e dei materiali tradizionali".

INDICE

CAPITOLO 1	7
Introduzione.....	7
1.1 Premessa.....	8
1.2 Stato dell'arte	8
1.3 Obiettivi della ricerca	9
CAPITOLO 2	11
Quadro generale dell'attività estrattiva.....	11
2.1 Caratteristiche generali dell'attività estrattiva	12
2.2 Distribuzione sul territorio	13
2.3 Ripartizione delle aziende sarde	14
2.4 Tendenze evolutive	15
CAPITOLO 3	18
Il materiale	18
3.1 Classificazione petrografica e commerciale	19
3.2 Caratteristiche fisiche e geomeccaniche	23
CAPITOLO 4	25
Caso studio	25
4.1 Premessa.....	26
4.2 Inquadramento generale del sito di studio.....	26
4.3 Il processo produttivo (dall'estrazione alla commercializzazione)	27
4.3.1 <i>Metodi di coltivazione</i>	27
4.3.2 <i>Impianti di trasformazione</i>	29
CAPITOLO 5	31
Teoria dei processi produttivi	31
5.1 Teoria della produzione.....	32
5.2 Fattori produttivi, prodotti, costi e ricavi.....	33
5.3 Definizioni in uso per l'analisi tecnico – produttiva dei processi industriali.....	35
CAPITOLO 6	40
Il ciclo produttivo	40
6.1 Diagramma di flusso generale (general flow sheet)	41
6.2 Diagrammi di Gantt.....	42
6.3 Organigrammi	43
6.4 Descrizione del ciclo produttivo della cava.....	44
6.4.1 <i>Produzione della bancata</i>	52
6.4.2 <i>Produzione della fetta (faldatura)</i>	57
6.4.3 <i>Produzione dei blocchi</i>	60
6.5 Descrizione del ciclo produttivo dello stabilimento	62

6.5.1	<i>Produzione delle lastre (segagione dei blocchi regolari)</i>	66
6.5.2	<i>Produzione delle pianelle (segagione dei blocchi informi)</i>	69
6.5.3	<i>Resinatura, retinatura e lucidatura delle lastre</i>	72
6.6	Macchine e installazioni tecniche	78
CAPITOLO 7		100
Dati rilevati		100
7.1	Dati della produzione in cava	101
7.2	Dati della produzione in stabilimento	103
<i>Produzione di lastre</i>		103
<i>Produzione di pianelle</i>		104
7.3	Diagrammi di Gantt	106
7.4	Il magazzino e le aree di deposito	111
CAPITOLO 8		112
Breve analisi delle componenti ambientali		112
8.1	Premessa	113
8.2	Le polveri	113
8.3	Il rumore	115
8.4	Le acque	117
CAPITOLO 9		120
Metodi di ottimizzazione delle reti per il trattamento dei processi		120
9.1	Premessa	121
9.2	Teoria dei grafi	127
<i>Definizioni e proprietà fondamentali dei grafi</i>		127
<i>Rappresentazione dei grafi</i>		128
9.3	Ottimizzazione su reti	129
<i>Determinazione del flusso di costo minimo</i>		129
<i>Ricerca del cammino minimo (shortest path problem)</i>		130
<i>Algoritmo di Dijkstra</i>		131
9.4	Tecniche reticolari di programmazione	132
<i>Diagramma reticolare</i>		132
<i>Percorso critico (Critical path)</i>		136
<i>Metodo del percorso critico (Critical Path Method/CPM)</i>		138
<i>Teoria della dualità</i>		138
<i>Costruzione del Modello Matematico</i>		140
9.5	Metodo del Max flow – min cut	143
<i>Reti di flusso</i>		143
<i>Funzione obiettivo</i>		144
<i>Taglio minimo</i>		145
<i>Cammino aumentante</i>		146
<i>Grafo residuale o residuo (grafo incrementale)</i>		147

<i>Teorema del maxflow – min cut</i>	147
<i>Teorema del cammino aumentante</i>	148
<i>Algoritmo di Folk – Fulkerson</i>	148
<i>Problema multi sorgenti e multi pozzi</i>	150
9.6 Scelta dei modelli	150
9.7 Il solver per la risoluzione numerica	153
CAPITOLO 10	156
Elaborazione dei dati	156
10.1 Creazione dei modelli matematici – Scenario “Stabilimento”	157
10.1.1 <i>Costruzione dei diagrammi reticolari</i>	157
<i>Grafo dei potenziali di task</i>	158
<i>Rete di flusso</i>	165
10.1.2 <i>Modelli matematici</i>	169
<i>Grafo $(A \cup B)$ – produzione delle lastre</i>	169
<i>Grafo C – produzione delle pianelle</i>	171
<i>Grafo $(A \cup B) \cup C$ – ciclo produttivo completo dello stabilimento</i>	174
<i>Maxflow – min cut method (sulla rete di flusso)</i>	177
10.2 Creazione dei modelli matematici – Scenario “Cava”	181
10.2.1 <i>Costruzione dei diagrammi reticolari</i>	181
<i>Grafo dei potenziali di task</i>	181
10.2.2 <i>Modelli matematici</i>	186
<i>Grafo A – configurazione a tre linee di taglio su tre bancate</i>	186
<i>Grafo B – configurazione a due linee di taglio su tre bancate</i>	188
<i>Grafo C – configurazione a una linea di taglio su tre bancate</i>	190
CAPITOLO 11	193
Conclusioni	193
<i>Risultati della ricerca</i>	194
<i>Vantaggi dell’approccio modellistico</i>	194
<i>Criticità emerse</i>	195
<i>Sviluppo della ricerca</i>	195
APPENDICI	196
Appendice.01.....	197
Teoria della Programmazione Lineare.....	197
Appendice.02.....	202
Analisi statistiche: richiami teorici	202
Appendice.03.....	208
IBM© ILOG Cplex	208
Elenco delle figure.....	213
Elenco delle tabelle.....	216
Bibliografia.....	218

Ringraziamenti 222

CAPITOLO 1

Introduzione

1.1 Premessa

L'industria estrattiva appartiene a quel complesso di attività economiche che rendono disponibili sul mercato le materie prime naturali. Le sostanze minerali derivanti dall'attività estrattiva costituiscono le materie prime di numerose tipologie di industrie e, per tale ragione, il criterio comunemente utilizzato per definire l'articolazione del comparto fa riferimento al tipo di materiale estratto ed alla sua destinazione d'uso. L'industria estrattiva viene ripartita in tre grandi sub-settori:

- le attività di estrazione di minerali energetici;
- le attività di estrazione di minerali non energetici;
- le attività di captazione delle acque minerali e delle acque termali.

Tra le categorie di materiali elencate nel sub-settore delle attività di estrazione di minerali non energetici, vi è quella delle pietre ornamentali. La menzionata categoria di attività, genera, a livello regionale e nazionale, un robusto contributo alla produzione industriale. Essa mantiene ancora, sebbene la recessione in atto non risparmi nemmeno il settore dell'estrazione e lavorazione dei materiali lapidei, una solidità dovuta alla specificità e all'elevata qualità dei prodotti finiti. E' dunque fondamentale, nell'ottica del miglioramento della produzione e conseguentemente della ricerca di sempre migliori risultati economici, cercare di individuare nuove tecniche che consentano l'individuazione di punti critici e l'ottimizzazione dei processi. Negli ultimi anni, la matematica applicata all'ingegneria e alla produzione industriale, ha svolto un ruolo decisivo e preponderante nella gestione e nell'analisi dei processi, consentendo la risoluzione di problemi complessi in tempi relativamente brevi, grazie alla implementazione di codici di calcolo e alla potenza di elaborazione elettronica ogni giorno più elevata.

1.2 Stato dell'arte

Il miglioramento della produzione attraverso l'impostazione sistemica e in riferimento alla teoria dei processi è stato studiato già dalla metà degli anni '80, in applicazione alla progettazione e alla gestione delle attività minerarie (Giuliani S., 1985, Atti Facoltà Ingegneria Università di Cagliari, anno XIII, no 1). L'analisi tecnico – economica è stata, sempre in quegli anni, applicata in forma critica e innovativa sul processo di

produzione in stabilimenti industriali in cui si praticavano i metodi di lavorazione per la segazione dei marmi (Bortolussi A., Giuliani S., Siotto G., 1986). Il modello impiegato per il raggiungimento degli obiettivi di miglioramento dei processi, era il modello della *matrice della tecnica*, la quale permetteva di determinare le efficienze tecniche nelle lavorazioni per la valorizzazione di blocchi regolari (Giuliani S., Siotto G., Tilocca M. C., 1990) ,e irregolari (Bortolussi A., Giuliani S., Siotto G., 1990). Si cominciano a trovare i primi studi di applicazione di metodi matematici derivanti dalla Ricerca Operativa, in particolare nei processi di lavorazione dei materiali lapidei, in anni più recenti (Karaca Z., Onargan T., 2007), dove si analizzano i percorsi critici negli stabilimenti di lavorazione del marmo attraverso il *Critical Path Method*.

Ad oggi risultano eseguiti diversi studi applicati al settore della estrazione e della lavorazione materiali lapidei, basati su modelli matematici di ottimizzazione delle reti, sia in relazione alle cave come miglioramento della produzione e minimizzazione degli scarti (Pizzadili A., 2012) sia agli stabilimenti di lavorazione in cui si ricercano metodi alternativi per il miglioramento della produzione (Ozfirat P.M., 2012).

1.3 Obiettivi della ricerca

Lo scopo del presente lavoro è stato la ricerca di strumenti e metodi per la gestione del processo produttivo associato all'industria estrattiva, al fine di valutare ed ottimizzare dal punto di vista tecnico, economico ed ambientale tale processo. Per il raggiungimento dell'obiettivo è stato studiato, in particolare, il comparto produttivo delle rocce ornamentali di natura carbonatica in Sardegna, nella fattispecie il bacino del marmo di Orosei. Lo studio è consistito innanzitutto nella dettagliata analisi del ciclo produttivo di una ditta presa in considerazione come caso studio, presso la quale viene svolta l'attività di cava per l'estrazione di blocchi di marmo e la lavorazione dei blocchi per ottenimento di prodotti finiti. Dopo aver ricostruito ogni fase lavorativa sono stati individuati e parametrizzati i fattori produttivi che partecipano al processo, secondo la teoria classica delle funzioni di produzione. Oltre alla classificazione qualitativa dei parametri di produzione, sono state rilevate anche le quantità medie consumate ed ottenute, necessarie al confronto finale tra i risultati produttivi reali e quelli previsti dalle simulazioni. Successivamente si è proceduto all'applicazione di metodi di ottimizzazione di reti basate sulla teoria dei grafi e i relativi algoritmi risolutivi.

E' noto infatti che negli ultimi decenni l'ottimizzazione su reti ha rappresentato e continua a rappresentare una tra le più efficienti tecniche applicabili alla risoluzione di problemi legati a sistemi della più svariata natura, sia in campo scientifico – tecnico che in campo sociale, e in generale ovunque si possa individuare una struttura rappresentabile con i grafi.

La struttura del lavoro di ricerca svolto è riassunta nello schema indicato in figura 1.

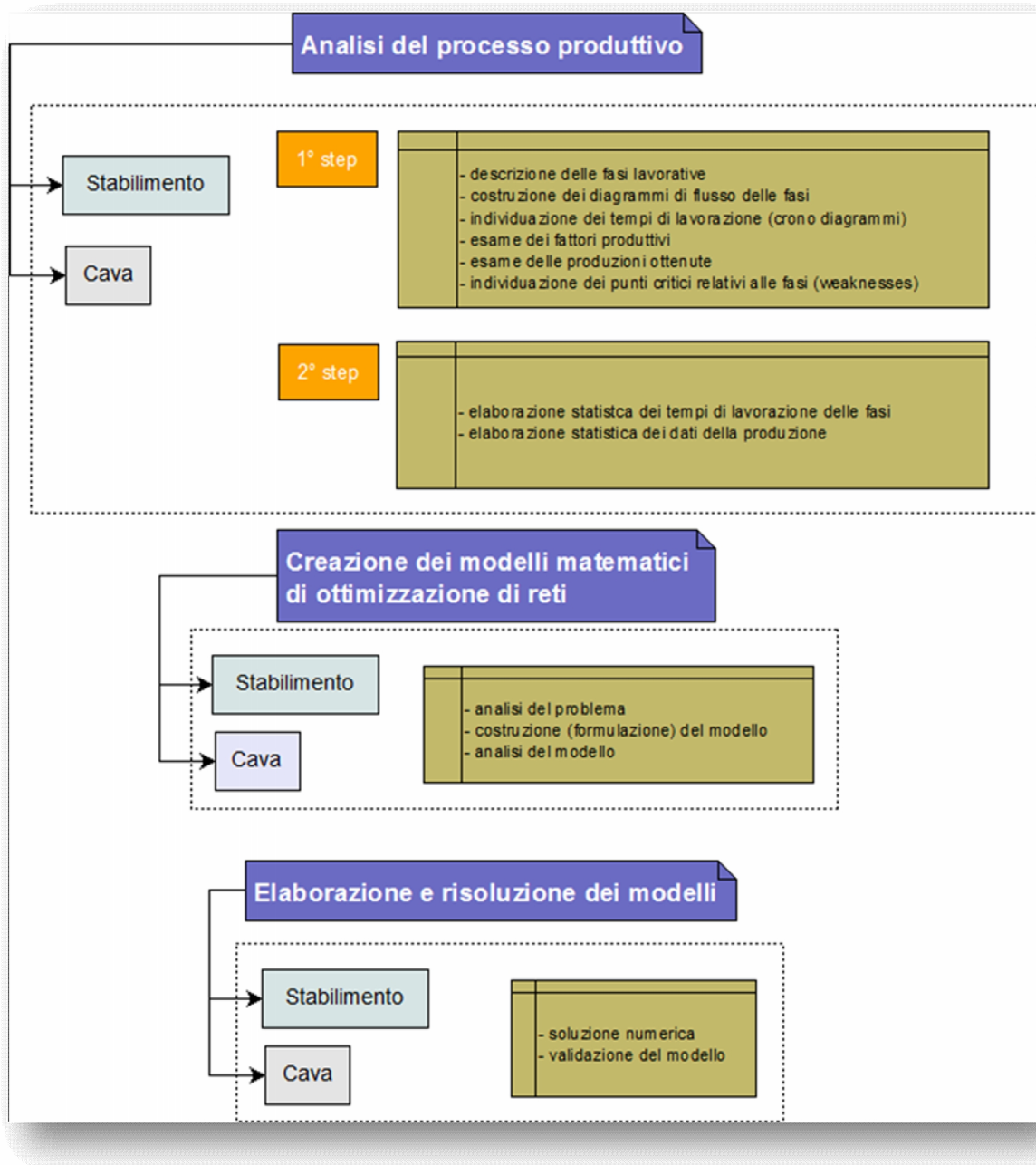


Figura 1 – Schema della ricerca

CAPITOLO 2

Quadro generale dell'attività estrattiva in Sardegna

2.1 Caratteristiche generali dell'attività estrattiva

Il settore dell'estrazione e della lavorazione dei lapidei ha subito, a partire dagli anni ottanta, un notevole sviluppo, con una produzione mondiale di lapidei che è passata da 20 a oltre 30 milioni di tonnellate annue per materiale in pezzature commerciabili. Tale incremento è dovuto principalmente all'ingresso nel mercato mondiale di nuovi produttori (Brasile, Cina) che si sono aggiunti ai maggiori produttori di lapidei (Italia, Spagna, Grecia, Portogallo, Francia, Corea del sud e Giappone). L'industria estrattiva sarda assume un peso rilevante nell'economia nazionale in quanto la Sardegna, rispetto alle altre regioni, possiede una specializzazione produttiva nel settore sia per addetti sia per imprese¹.

Il sistema delle imprese della Sardegna che si occupano della lavorazione dei materiali lapidei è costituito sia da aziende che utilizzano metodi e mezzi industriali sia da piccole realtà artigianali. Tale organizzazione della filiera lapidea consente di ottenere una gran varietà di prodotti standardizzati, ma anche personalizzati in conformità ad esigenze funzionali ed estetiche particolari. In Sardegna l'estrazione e la lavorazione dei lapidei riguarda essenzialmente due tipologie di rocce: il granito, in maggior misura, e il marmo. Il granito sardo, noto sin dall'antichità, è largamente diffuso sul mercato nazionale ed estero per le proprietà tecniche ed estetiche e per l'eccellente fattura dei lavorati. Molte sono state le opere realizzate con il granito grigio-rosa di La Maddalena fino agli anni '30, quando, dopo 60 anni di attività, venne abbandonata la cava di Cala Francese: il palazzo della Borsa di Milano, il Ponte Palatino a Roma, i bauletti e lo zoccolo del Lungo Tevere, diversi bacini di carenaggio (Venezia, Taranto, Malta), alcune pavimentazioni stradali in lastroni massello (Genova, Napoli, Roma, Milano). In termini di esportazioni, nella provincia di Sassari risulta come al 2007 i prodotti della lavorazione di minerali non metalliferi rappresentino il 30% delle esportazioni regionali andandosi a classificare al 5° posto della graduatoria delle merci più esportate dalla provincia². Nel lapideo, però, si accentuata una fase negativa che da alcuni anni interessa le aziende del comparto, dovuta alla debolezza degli ordini provenienti dai mercati di sbocco tradizionali (USA, Germania, Emirati arabi) e alla forte concorrenza delle imprese cinesi, indiane e spagnole, che provoca la sospensione dell'attività di numerose cave e aziende di trasformazione della materia prima.

¹ Osservatorio Economico della Sardegna - Le industrie estrattive in Sardegna, 2007

² Elaborazioni RTI su dati Commercio Estero - Sardegna Statistiche

2.2 Distribuzione sul territorio

Nelle attività di estrazione di pietre per l'edilizia (comprensiva di estrazione di pietre ornamentali e di altre pietre da costruzione) e taglio, modellatura e finitura della pietra (comprensiva della segazione e lavorazione delle pietre e del marmo e della lavorazione artistica del marmo e di altre pietre affini), la Sardegna rappresenta la decima regione italiana per numero di imprese e l'undicesima per numero di occupati. Veneto, Toscana e Lombardia sono le tre regioni più importanti a livello nazionale. Nel 2001, sulla base dei dati censuari, il 4,4% delle imprese italiane ed il 4,1% degli occupati di questo settore erano localizzati in Sardegna, con una concentrazione nelle province storiche di Sassari, Nuoro e Cagliari. L'indagine sul campo, estesa a tutto il territorio regionale, ha messo in evidenza nel settore dell'estrazione e lavorazione della pietra ornamentale la presenza di 412 imprese attive nel 2004, con una occupazione complessiva di 2.569 addetti e un fatturato di circa 144 milioni di euro³. Il settore dell'estrazione e lavorazione della pietra ornamentale in Sardegna è formato prevalentemente da imprese di micro e piccole dimensioni: l'84% ha meno di dieci addetti e il 15,7% ha un'occupazione compresa fra i 10 e i 49 occupati. Inoltre, le aziende con oltre 50 addetti sono rappresentate da pochissime unità: una sola impresa nel 2004 e due nel 2005, in quanto un'azienda della classe 10-49 addetti aumenta l'occupazione ed entra nel 2005 fra quelle che occupano più di cinquanta lavoratori³. La Sardegna si caratterizza, in particolare, per la presenza di due importanti distretti riconosciuti dalla Regione: il Granito della Gallura e il Marmo di Orosei, nei quali si concentrano le cave di estrazione e la maggior parte delle aziende di lavorazione delle pietre ornamentali. In particolare, il distretto industriale del Marmo è localizzato nei comuni di Orosei, Galtelli, Irigoli Loculi e Onifai⁴. Il Distretto, situato sulla costa orientale della Provincia di Nuoro, è uno dei poli estrattivi di pietre ornamentali dell'isola, assieme a quello del granito di Buddusò. E' situato in una vasta area pedemontana di circa 200 ettari, dove operano complessivamente 43 imprese. Le cave di marmo sono 15, a cui si sommano 11 stabilimenti industriali di trasformazione della materia prima. La dimensione aziendale è quella della piccola-media impresa. Gli occupati sono 400, e il fatturato del Distretto raggiunge i 22 milioni di Euro⁵.

Nella provincia di Olbia-Tempio così come in quelle di Ogliastra e Nuoro, la Regione Sardegna intende rafforzare la logica di filiera individuando il distretto del lapideo per

³ R&I s.r.l. - Analisi strutturale - estrazione e lavorazione lapidei, 2006

⁴ Distretti industriali individuati dalle Regioni dello studio dell'IPI: L'esperienza Italiana dei distretti industriali, 2006

⁵ Sviluppo Italia - Analisi dei sistemi produttivi territoriali - Sardegna Febbraio 2006

la trasformazione dei prodotti estrattivi (Deliberazione n.34/1 del 19 giugno 2008). Nella provincia di Olbia Tempio si localizzano circa il 38,6% delle imprese (sedi legali) e il 45,3% delle unità locali estrattive regionali. Qui si concentra soprattutto il sub-settore dell'estrazione delle pietre ornamentali regionali con il 73,8% delle imprese e l'83,5% delle unità locali⁶. Al 2005 risulta che le imprese estrattive iscritte sono pari al 50,6% nella provincia di Sassari, al 23,7% in quella di Cagliari, al 17,4% di Nuoro e all'8,3% ad Oristano. Anche il distretto del granito risulta essere abbastanza rilevante: si concentra nei comuni di Tempio Pausania, Arzachena, Buddusò, Olbia, Calangianus e Ala dei Sardi, con una presenza al 2003 di 90 imprese che si occupano dell'estrazione di ornamentali⁷. La dimensione aziendale è quella della piccola-media impresa che al massimo raggiunge i 25/30 addetti.

2.3 Ripartizione delle aziende sarde

Il maggior bacino produttivo marmifero della Sardegna (14 cave e 2 imprese di recupero e trasformazione in granulati degli sfridi di cava e di laboratorio) è in provincia di Nuoro, nel Golfo di Orosei che si estende su un'area di circa 3000 ettari ai piedi del Monte Tuttavista (850 m), per una profondità di circa 560 m con spesse sequenze di bancate calcaree e dolomitiche mesozoiche (giurassico e cretaceo). L'estrazione e la lavorazione nel bacino marmifero di Orosei è fiorita negli anni '60, e si è affermata come una significativa realtà industriale della Sardegna centro-orientale. La produzione annua è di circa 80.000 m³ di blocchi di marmo ed occupa circa 400 operai specializzati. Trent'anni di attività estrattiva hanno coinvolto solo il 6% delle attuali riserve in vista del giacimento di Orosei e solo una trentina di ettari sono interessati dalla coltivazione delle cave. Le imprese collegate (indotto) sono sia di tipo produttivo sia di tipo commerciale e, in un numero inferiore di casi, finanziarie o imprese di servizio. Le imprese di produzione, rappresentate spesso da aziende complementari fra loro e cioè da imprese proprietarie delle cave, da aziende di trasformazione/lavorazione della pietra e da imprese che svolgono lavorazioni per conto terzi, sono innanzitutto localizzate in Sardegna, ma sono presenti anche alcuni casi di produttive localizzate in altre regioni italiane. Nessuna impresa ha invece unità produttive all'estero. E' interessante rilevare che nelle aziende della classe 10-49 occupati, un numero significativo di imprese, pari al 40% del totale, ha relazioni proprietarie con altre imprese dello stesso settore. Le

⁶ Osservatorio Economico della Sardegna su Le industrie estrattive in Sardegna, 2007

⁷ Camera di Commercio Industria e Artigianato della Provincia di Sassari - Osservatorio sulle Piccole Medie Imprese della Provincia di Sassari, 2003

aziende commerciali collegate alle imprese dell'estrazione e lavorazione della pietra ornamentale sono, anch'esse, prevalentemente localizzate in Sardegna, seguite da un minor numero di imprese che ha commerciali in altre regioni italiane (e in particolare nei distretti lapidei più importanti come Verona e Massa Carrara). Una sola impresa, fra quelle di maggiori dimensioni, ha commerciali all'estero, sia in alcuni paesi europei che in paesi asiatici. Le aziende che hanno commerciali fuori della Sardegna sono quelle più strutturate del settore e al loro interno nessuna appartiene alle micro imprese. Fra le imprese della classe 10-49 addetti, quelle con relazioni proprietarie con aziende commerciali (compreso i consorzi) rappresentano oltre un terzo del totale⁸.

2.4 Tendenze evolutive

Nel corso degli ultimi anni il settore lapideo è notevolmente cresciuto. Sono in continuo aumento i consumi e le produzioni, soprattutto perché l'attività di escavazione è stata "scoperta" da moltissimi Paesi che si sono appropriati con facilità delle tecniche e del saper fare in estrazione e in prima lavorazione. E' un settore che parte dalla disponibilità di giacimenti che sono sparsi un po' ovunque nel mondo, sia pure con caratteristiche differenti e valore estetico, commerciale e tecnico delle pietre molto diverso da zona a zona. La tecnologia e le macchine di escavazione e trasformazione, di cui l'Italia è leader incontrastata, facilitano ulteriormente il moltiplicarsi di aree estrattive e trasformative del settore. Tali aree, che inizialmente producono materia prima per il mercato esterno e lavorati di livello contenuto o scarso per il mercato interno, iniziano, secondo un percorso che ormai costituisce un cliché ripetuto, a produrre lavorati finiti almeno per alcuni mercati di livello più vicino a quello loro nazionale e di geografia accessibile. I costi di trasporto, infatti, rimangono ancora relativamente elevati, per una merce che pesa molto e che quindi, per arrivare su mercati lontani, deve contenere un valore aggiunto proprio che meriti i sovraccarichi derivanti dalla lontananza. E' un processo di accorciamento delle catene produttive che tocca un po' tutti i prodotti ma che nel settore lapideo ha particolarmente influenza, portando ad una crescente regionalizzazione dei mercati per i prodotti di fascia corrente. Ha così inizio una sorta di sdoppiamento pronunciato del mercato lapideo: da un lato i prodotti di fascia alta e altissima, che mantengono caratteristiche elitarie e di alta specializzazione, all'interno del quale l'industria italiana rimane in posizione assolutamente dominante; dall'altro i prodotti cosiddetti "correnti", che solo recentemente, con l'ingresso di alcuni nuovi

⁸ R&I s.r.l. - Analisi strutturale - estrazione e lavorazione lapidei, 2006

protagonisti del settore e particolarmente della Cina con i suoi bassissimi costi di produzione e prezzi di vendita, si sono collocati su un circuito più ampio. Altri Paesi, che prima erano solo clienti dell'industria lapidea italiana - soprattutto carrarese e toscana - si rendono sempre più autonomi nelle produzioni per il mercato interno o regionale, come per esempio l'Arabia Saudita, mentre altri come la Turchia, il Brasile e l'India, diventano esportatori non più soltanto di materia prima, ma di tutte le tipologie di prodotto, dal blocco alla lastra, ai rivestimenti e alle pavimentazioni. Semplificando i termini del cambiamento sono due: da un lato l'integrazione della produzione iniziale di materia prima con il completamento del ciclo di prodotto, sia per il mercato domestico che per quello esterno; dall'altro la crescita del numero dei produttori, in termini assoluti, con l'affacciarsi di un numero crescente di nuovi soggetti che scoprono una ricchezza propria e facilmente sfruttabile. In Sardegna si è accentuata la fase negativa che da alcuni anni interessa le aziende del comparto lapideo, dovuta alla debolezza degli ordini provenienti dai mercati di sbocco tradizionali (USA, Germania, Emirati arabi) e alla forte concorrenza delle imprese cinesi, indiane e spagnole, che provoca la sospensione dell'attività di numerose cave e aziende della trasformazione della materia prima e la ricerca di nuove ed efficaci strategie di mercato.

A livello di occupazione, nel 2004 in Sardegna le imprese del settore lapideo di minori dimensioni (fino a 9 addetti) raccolgono il 51% dei lavoratori, e anche le aziende di dimensioni intermedie, fra i 10 e i 49 occupati, assumono un ruolo importante, con il 46,5% degli addetti. L'analisi dell'andamento dell'occupazione e del fatturato nell'anno 2005 evidenzia una sostanziale stabilità degli occupati e del fatturato, rispetto all'anno precedente, con una leggera crescita concentrata nelle imprese di più piccole dimensioni. Fra le imprese della classe intermedia (10-49 addetti) e quelle con 50 e più occupati si registra, come si è detto, lo spostamento di un'impresa che cresce di dimensioni. Il peso delle aziende con oltre 50 addetti aumenta, quindi, dal 2004 al 2005, e contemporaneamente diminuisce quello della classe 10-49 addetti. Malgrado l'aumento del numero di imprese con oltre 50 addetti, il peso da queste raggiunto nel 2005 rimane marginale, il 4,7% in termini di occupati e il 5,2% sul fatturato del settore. Nel 2005, l'occupazione nel settore dell'estrazione e lavorazione della pietra in Sardegna si attesta sulle 2.592 unità e il fatturato rimane sui 144 milioni di euro. Sempre a livello regionale, nel periodo 2005-2009, per il gruppo professionale "Artigiani e operai specializzati dell'industria estrattiva e dell'edilizia" si prevede un

incremento occupazionale del 4.1%, valore al di sopra di quello nazionale (0.6%)⁹. Tra le figure professionali richieste dalle province sarde vi sono l'Addetto alla lavorazione del marmo, lo Scalpellino per la lavorazione della pietra, l'Operatore di produzione ed estrazione (sughero lapideo) e il Tecnico del sistema di qualità (per il lapideo).¹⁰ La Sardegna, guidata dalla provincia di Nuoro, ha esportato prodotti lapidei finiti, nel 2013, per un controvalore di 4,5 milioni di euro contro 3,2 milioni di euro in crescita rispetto 2012.

⁹ Isfol-Irs su micro dati Istat RFLC 2004-2005 e previsioni Isfol-Ref

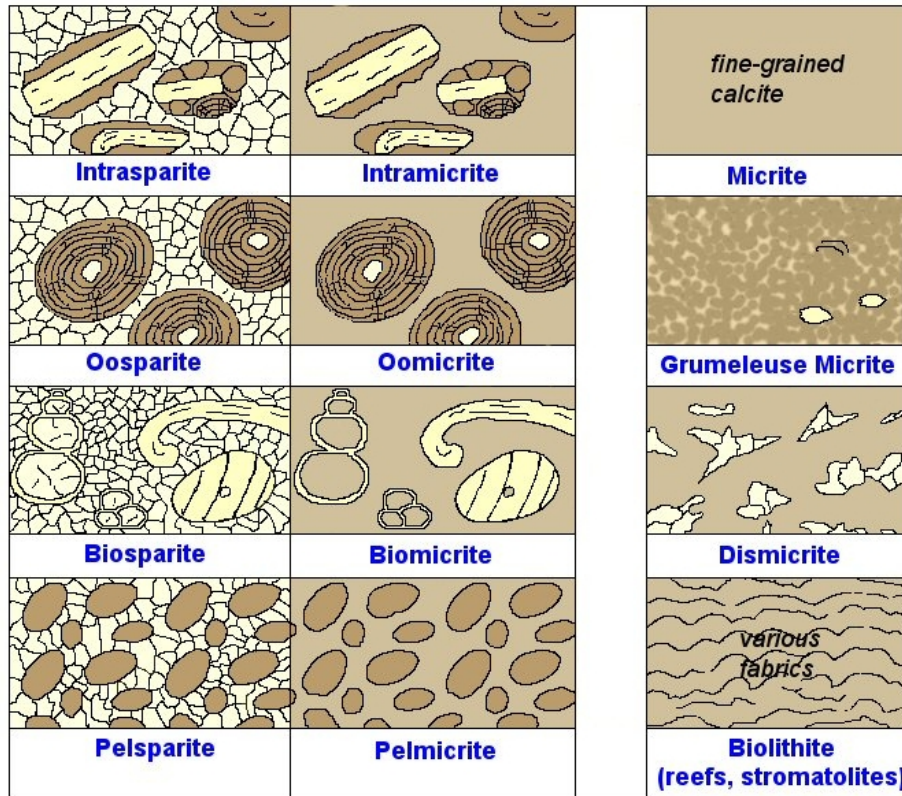
¹⁰ Assessorato all'Industria Regione Autonoma della Sardegna

CAPITOLO 3

Il materiale

3.1 Classificazione petrografica e commerciale

Il prodotto lapideo ornamentale in studio, impropriamente denominato “marmo di Orosei” è in realtà, dal punto di vista litologico, un calcare appartenente al sistema carbonatico giurassico della Sardegna orientale, in particolare dell’area geograficamente inquadrata come Golfo di Orosei. Studi precedenti al microscopio ottico hanno permesso di classificare il marmo di Orosei come *calcare giurassico* costituito da *calcite microcristallina*.



Folk's Classification of Limestones - a modified version based on Folk (1962). Coarser varieties can be classified with "rudite" endings. E.g. - biosparrudite, biomicrudite. Grumeleuse micrite is clotted micrite, common in lagoonal facies. Like pelmicrites and pelsparites it may have ostracod valves. Ian West & Tonya West (c) 2005.

Figura 2 - Classificazione dei calcari (Folks [1962])

Il sito di estrazione del materiale è il monte Tuttavista, il quale appartiene alla direttrice strutturale di calcari del mesozoico che si sviluppa lungo il versante orientale della Sardegna. I marmi di Orosei sono stati commercializzati, fino ad oggi, con diversi nomi. Sono stati distinti macroscopicamente tre tipi fondamentali di marmo, caratterizzati ognuno da tessitura e colore differenti: in base alla tonalità cromatica sono stati classificati nei tipi "Chiaro", "Venato medio" e "Venato scuro".

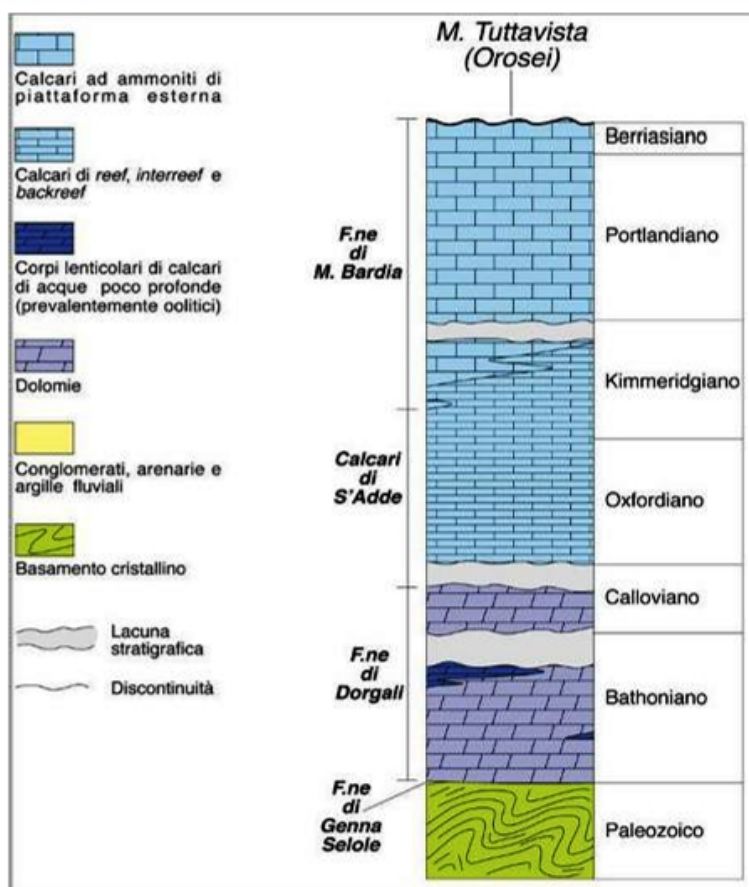
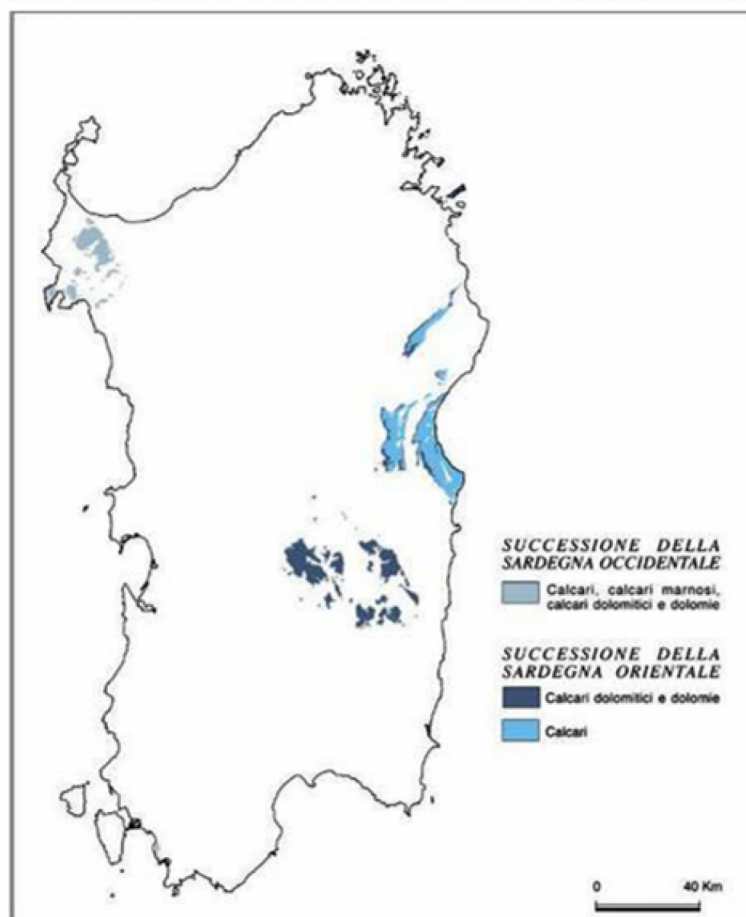


Figura 4 - Colonna stratigrafica delle giacimento di marmo di Orosei (Siotto, G., 2006).

Per ognuno di essi si sono riconosciute altre varietà con differenze, più o meno marcate, di tonalità cromatica e di venatura; le principali denominazioni commerciali, attribuite dai diversi produttori, sono:

- per i tipi "Chiari", Daino Perla, Biancone Tirreno, Bianco Luna, Bianco Bonaria;
- per i tipi "Venati medi", Perlato Olimpico, Daino Intermedio, Vena-tino, Venato Perla, Lingua di Passero, Nuvolato medio;
- per i tipi "Venati scuri", Venato rosa, Daino filettato, Nuvolato scuro, Daino reale, Daino venato, Venato verde, Venato tirreno, Daino Nuvolato, Arabescato, Rovere.

Anche il Comitato di normazione europea per le pietre naturali classifica, in modo incompleto anche se provvisorio, i marmi di Orosei con le seguenti denominazioni:

- Biancone Tirreno di Orosei;
- Daino Tirreno di Orosei;
- Perlato Tirreno di Orosei;
- Venato Tirreno di Orosei.

Il Consorzio Marmi e Graniti di Orosei¹¹ al fine di porre ordine tra le carte di identità delle diverse varietà merceologiche, identifica e riconosce, quali definitive denominazioni d'origine dei marmi di Orosei, le seguenti:

- Marmo Orosei Venato Scuro
- Marmo Orosei Venato Medio
- Marmo Orosei Nuvolato Scuro
- Marmo Orosei Nuvolato Medio
- Marmo Orosei Perlato
- Marmo Orosei Chiaro.

Nel Comune di Orosei si estrae anche una varietà esclusiva di conglomerato calcareo dell'Oligocene; trattasi di un conglomerato poligenico costituito dalla cementazione di detriti di antiche frane staccatesi nell'Oligocene dalle testate a reggipoggio delle bancate giuresi e cretacee del blocco tettonico di Monte Tuttavista (sul versante Nord-Est) in corrispondenza della zona di faglia che ha determinato la formazione della Valle del Fiume Cedrino. Il materiale estratto viene indicato come "conglomerato calcareo di Orosei" ed è costituito da elementi di calcare mesozoico, di colore tendente al giallo

¹¹ *Guida ai Marmi e Graniti di Orosei*, redatta dalla Mediterranea progetti e Finanza s.r.l., con la consulenza scientifica e testi del Prof. Dr. Ing. Giampaolo Siotto, realizzata nell'ambito del Progetto Imber Lapideus, P.O.P. Sardegna 1994-1999, Misura 223.1- Creazione e sviluppo di reti mono settoriali di imprese (Consorzio Marmi e Graniti Orosei- Sardegna Centrale)

paglierino, sub angolari e di dimensioni variabili da meno di 1 cm a 10÷20 cm, che sono cementati da calcite microcristallina rosso bruna. Tale materiale è di particolare pregio e può essere assimilato per aspetto cromatico e struttura petrografica al famosissimo “Giallo di Siena”, oramai quasi introvabile per la chiusura quasi totale delle poche cave esistenti.



Figura 5 – Tipologie commerciali del marmo di Orosei

I principali tipi di finitura superficiale dei segati di marmo e di granito consistono nella levigatura, lucidatura, scalpellatura, bocciardatura, martellinatura, spuntatura, fiammatura, sabbiatura, acidatura, graffiatura (o gradinatura), spazzolatura, stuccatura e resinatura che vengono applicate in funzione del tipo di materiale.

3.2 Caratteristiche fisiche e geomeccaniche

Le caratteristiche fisiche e geomeccaniche medie del prodotto sono riepilogate nella tabella che segue.

Tabella 1 - Caratteristiche tecnologiche e geomeccaniche

CARATTERISTICHE FISICO – MECCANICHE DEL MARMO DI OROSEI		
Descrizione Petrografica	EN 12407:2000	BIOPELSPARITE (Folk 1959, 1962)
Resistenza a flessione	EN 12372:1999	$R_{if} = 11,88 \text{ MPa}$
Resistenza a flessione dopo 48 cicli gelo/disgelo	EN 12371:2001	$R_{if} = 10,36 \text{ MPa}$
Resistenza a compressione semplice	EN 1926:1999	$R_m = 156 \text{ MPa}$
Resistenza a compressione semplice dopo 48 cicli gelo/disgelo	EN 12371:2001	$R_m = 151 \text{ MPa}$
Assorbimento di acqua a pressione atmosferica	EN 13755:2001	0,5%
Massa volumica apparente	EN 1936:1999	$\rho_b = 2646 \text{ Kg/m}^3$
Porosità aperta	EN 1936:1999	$p_o = 2,25\%$
Resistenza a SO ₂ in condizioni di umidità	EN 13919:2002	A solution $\Delta m = - 0,23 \%$ B solution $\Delta m = - 0,05 \%$
Assorbimento di acqua per capillarità	EN 1925:2000	$C_2 = 0,67 \text{ g/m}^2\text{s}^{0,5}$
Resistenza a shock termico	EN 14066:2002	$\Delta m = - 0,01 \%$
Resistenza ad abrasione	EN 14157:2001	18,02 mm

Al microscopio a luce polarizzata in sezione sottile, i campioni esaminati appaiono tutti costituiti da calcite microcristallina. In particolare il calcare "Chiaro" risulta costituito da micrite (calcite cripto cristallina) con interclasti (frammenti autoctoni, derivati da demolizione, ad opera delle onde, di calcari formati nello stesso bacino) e bioclasti, anch'essi di micrite, con vene di calcite microcristallina, che ha suturato in cemento finale lesioni di origine tettonica, con un miglioramento delle caratteristiche meccaniche del materiale; il calcare "Venato medio" consiste in granuli bioclastici, dati da foraminiferi e da frammenti di microfossili e alghe e interclasti di calcite microcristallina in un mosaico di calcite micritica parzialmente ricristallizzata; il calcare "Venato scuro" consta essenzialmente di bioclasti di foraminiferi e di frammenti di macro fossili in un mosaico di micrite calcitica, parzialmente ricristallizzata. Presso il Laboratorio Prove e Materiali dell'Istituto di Scienza delle Costruzioni dell'Università di Cagliari e presso il Laboratorio di Meccanica delle Rocce del Dipartimento di Ingegneria Mineraria e Mineralurgica della Facoltà di Ingegneria di Cagliari, sono state effettuate le prove per la determinazione delle caratteristiche indicate alla tabella 2, secondo le modalità standard di prova.

Tabella 2 - Confronto tra proprietà fisico-meccaniche del marmo di Orosei e dei principali marmi Apuani

PROPRIETA' FISICO-MECCANICHE		MARM DI OROSEI (Valori Medi)	MARM APUANI	
			BIANCHI	VENATI
Resistenza a compressione uniassiale				
- su provino secco	kg/cm ²	1.679 ± 271	1.332	1.286
- su provino imbibito	kg/cm ²	1.527 ± 285		
- dopo cicli di congelamento	kg/cm ²	1.631 ± 315	1.282	1.237
Resistenza a flessione semplice				
- su provino secco	kg/cm ²	150 ± 39	185	183
- su provino imbibito	kg/cm ²	135 ± 30		
- dopo cicli di congelamento	kg/cm ²	145 ± 22		
Resistenza all'urto				
- provino di 15 cm di spessore	cm	18 ± 6		
- provino di 20 cm di spessore	cm	20		
- provino di 30 cm di spessore	cm	30		
- provino di 50 cm di spessore	cm		57,80	53,41
Resistenza all'usura per attrito radente	mm	4,11±0,65	5,27	5,80
Resistenza all'usura al getto di sabbia	g	0,08 ± 0,01		
Modulo di elasticità longitudinale (statico)	kg/cm ²	778.254±77.930	713.687	642.090
Modulo di elasticità longitudinale (dinamico)	kg/cm ²	686.666±48.750		
Coefficiente di dilatazione termica lineare	mm/m°C	2,90	5,93	6,66
Coefficiente di imbibizione	%	5,13±2,47	1,31	1,49
Peso unità di volume	Kg/m ³	2.685±41	2.692	2.690
Peso specifico relativo	g/m ³	2,72		
Coefficiente di Poisson		0,26±0,03		

CAPITOLO 4

Caso studio

4.1 Premessa

Nel corso della ricerca, è stata presa in esame la realtà produttiva del comparto di estrazione delle rocce ornamentali carbonatiche del bacino di Orosei. Per analizzare il ciclo produttivo completo, dalla estrazione della roccia grezza, fino alla realizzazione del prodotto finito sotto forma di lastre e pianelle, si è proceduto alla raccolta dei dati presso l'azienda più grande e importante, (in termini di dimensioni aziendali e produzione) presente nell'area: la S.I.M.G. srl.



Figura 6 - Ingresso alla cava della ditta S.I.M.G. srl

L'azienda citata possiede sia la cava per l'estrazione del materiale che lo stabilimento di lavorazione della materia prima; in spazi ravvicinati è stato possibile analizzare ogni processo e formulare i modelli di calcolo di ottimizzazione obiettivo dello studio.

4.2 Inquadramento generale del sito di studio

L'area oggetto di questo studio è localizzata nella Sardegna nord orientale presso Orosei, tra il Monte Tuttavista e l'abitato, ed è compresa nelle seguenti cartografie topografiche:

<i>Documento</i>	<i>Scala</i>	<i>Identificativo</i>
Carta d'Italia	1:100.000	P195 - Orosei, I.G.M
Carta d'Italia	1:50.000	Foglio 500 - Galtelli, I.G.M.;
Carta d'Italia	1:25.000	Foglio 500 - Sez. I - Galtelli, I.G.M
Carta d'Italia	1:25.000	Foglio 501 - Sez. IV - Orosei, I.G.M
Carta d'Italia	1:25.000	Foglio 195 - Orosei, Monte Senes, Cantoniera Mutrucone
Carta Tecnica Regionale	1:10.000	Sez. 500040- Galtelli;
Carta Tecnica Regionale	1:10.000	Sez. 500080 - Cantoniera Mateotto
Carta Tecnica Regionale	1:10.000	Sez. 501010 – Orosei
Carta Tecnica Regionale	1:10.000	Sez. 501050 - Cala di Osalla

L'area è collegata con l'abitato di Orosei attraverso la Strada Statale 125 Orientale Sarda.

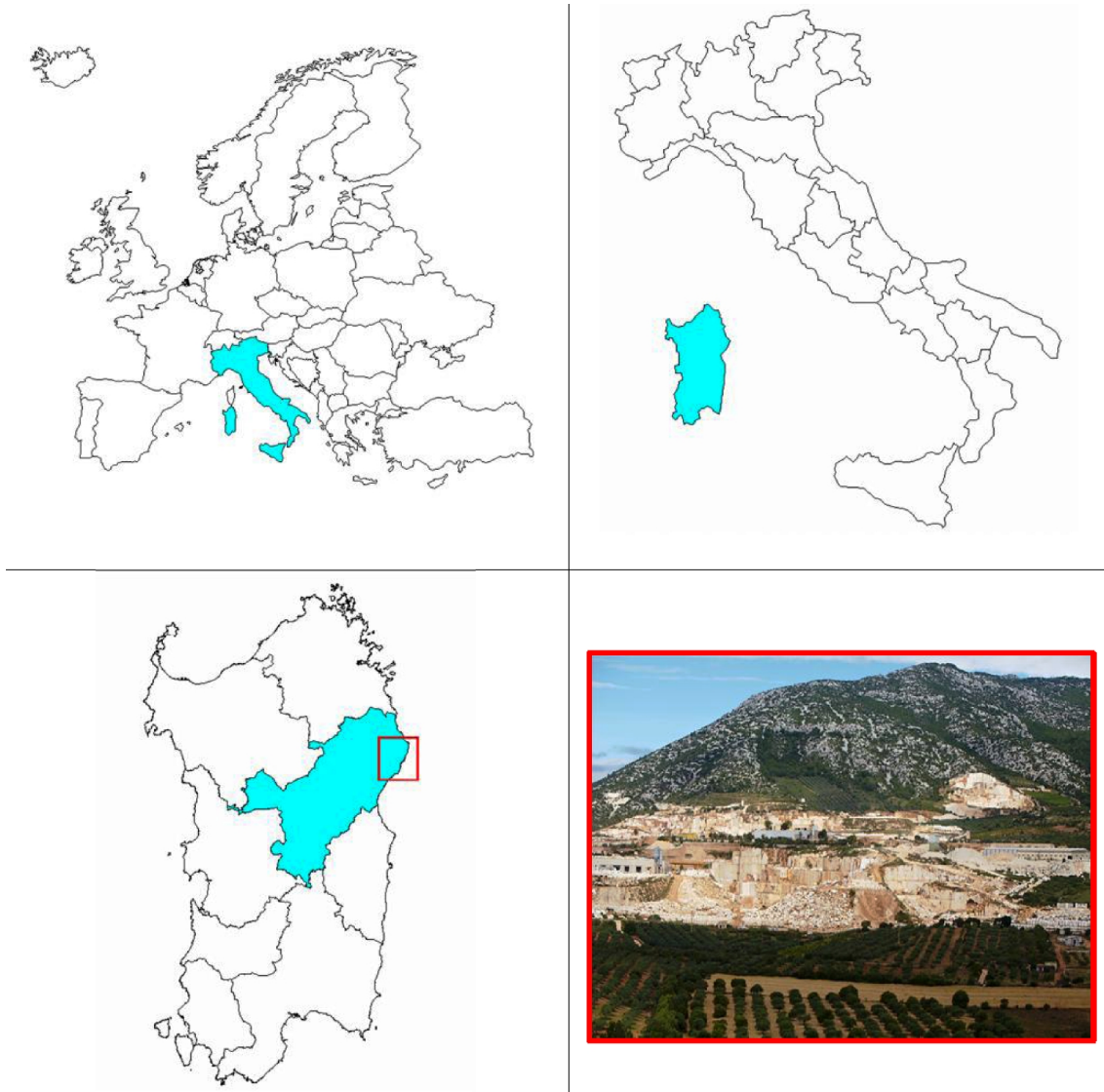


Figura 7 - Inquadramento geografico generale dell'area studiata

4.3 Il processo produttivo (dall'estrazione alla commercializzazione)

4.3.1 Metodi di coltivazione

I metodi di coltivazione praticati nelle cave di marmo sul versante est e sud est del Monte Tuttavista, in Comune di Orosei, sono il metodo a "gradini montanti diritti" con cava a mezza costa e il metodo "a fossa con gradini diritti discendenti" con cava in zona pianeggiante o sub pianeggiante.

Il primo metodo, detto a "gradini montanti diritti" con cava a mezza costa, consiste essenzialmente nelle seguenti fasi:

- preparazione della cava: durante la quale viene delimitata l'area di avanzamento delle coltivazioni, ripulendo la roccia sana dagli strati soprastanti di terreno vegetale e di "cappellaccio" (roccia superficiale intensamente alterata dagli agenti atmosferici e dal contatto con l'humus); detta operazione durante gli anni settanta veniva normalmente eseguita con l'impiego di martelli perforatori ad aria compressa, montati su carri ad avanzamento su slitta e miccia detonante di caricamento dei fori da mina ravvicinati; da molti anni tali operazioni sono cadute in disuso e si tende all'utilizzo, laddove possibile, del filo diamantato e della tagliatrice a catena anche per tale prima fase di preparazione della cava. Sulla roccia sana, messa in vista, si eseguono alcuni fori incrociati con le macchinette penetranti dell'impianto a filo, attraverso i quali viene inserito il filo diamantato; si è pronti, quindi, per la successiva fase;
- taglio al monte della bancata per il quale si utilizzano uno o più impianti a filo diamantato per i tagli verticali, mentre per il taglio orizzontale al piede si impiegano o martelli perforatori (ormai sempre meno frequentemente), o tagliatrice a braccio con catena ad inserti taglienti di widia, o più raramente-impianto a filo diamantato.
- abbattimento della bancata una volta effettuati i tagli verticali e quello orizzontale, viene inserito un cuscino divaricatore nel taglio verticale parallelo al fronte, che consente di distaccare la bancata dal monte di circa 30 cm, sufficienti per la installazione del martinetto idraulico, o del cuneo di roccia stessa, con cui si riesce ad abbattere la bancata, rovesciandola sul piazzale di cava, su cui è stato opportunamente predisposto un letto di materiale fine e polverulento per ammortizzare l'urto conseguente alla caduta della bancata stessa. L'operazione di ribaltamento della bancata viene aiutata mediante la spinta del braccio dell'escavatore, attrezzato con artiglio.

Una volta abbattuta la bancata, l'operazione di escavazione (o estrazione) è terminata, e inizia la fase di suddivisione della bancata, descritta più avanti.

Il secondo metodo di coltivazione, detto "a fossa", viene praticato nelle aree di cava già coltivate a gradini diritti montanti, in modo da poter interessare la parte di giacimento al di sotto del piano di piazzale: il sistema di abbattimento è simile al precedente e richiede

l'impiego delle stesse macchine e attrezzature sopra descritte; l'unica variante consiste nella direzione di avanzamento verso il basso dei fronti di coltivazione. Dopo l'abbattimento della bancata inizia la fase:

- suddivisione della bancata in blocchi di dimensione commerciale. Anche questa operazione avviene sul piazzale di cava e costituisce la prima fase della trasformazione industriale del marmo, alla quale seguiranno, in stabilimento, la segazione in masselli, in lastre, in strisce (o filagne) o in piastrelle ed eventualmente le altre operazioni di finitura, quali la levigatura e la lucidatura, la bocciardatura o la sabbiatura e, introdotta di recente, la resinatura. La riquadratura della bancata viene fatta sia praticando con martelli perforatori ad aria compressa fori verticali paralleli, nei quali vengono introdotti gli spacca roccia, sia utilizzando il filo diamantato;
- i blocchi ottenuti al fondo dell'area coltivata "a fossa" vengono sollevati mediante gru a derrick, che viene utilizzata anche per la movimentazione dei blocchi in piazzale e il loro carico sui mezzi di trasporto; in alcune cave il derrick è stato già da tempo sostituito con potenti pale meccaniche dotate di forche;
- riquadratura dei blocchi commerciali: i blocchi da inviare al telaio verranno squadriati mediante il telaio monolama o a filo diamantato mentre quelli informi saranno inviati direttamente alle tagliablocchi a dischi diamantati degli stabilimenti industriali.

Il trasporto dei blocchi in segheria avviene mediante dumper cassonati roccia, mentre quelli destinati alla vendita vengono caricati sugli auto-articolati e spediti alle ditte acquirenti.

4.3.2 Impianti di trasformazione

I blocchi estratti che devono subire il processo di lavorazione e la trasformazione in lastre, filagne o pannelle, vengono trasportati presso lo stabilimento e destinati a due linee di processo distinte:

- linea di segazione dei blocchi regolari: i blocchi vengono segati in lastre tramite i telai multilama, previa eventuale riprofilatura alla tagliablocchi a filo diamantato;
- linea di segazione dei blocchi informi: i blocchi vengono segati in filagne tramite tagliablocchi a disco.

Le due linee produttive descritte lavorano indipendentemente le une dalle altre, e si congiungono esclusivamente alla fine dei processi di lavorazione, ossia nel magazzino vendite.

Le lastre prodotte dal taglio dei blocchi regolari eseguito tramite i telai multilama possono essere vendute tal quale o subire un ulteriore processo di lavorazione detto lucidatura. Prima della fase di lucidatura, a seconda delle condizioni delle lastre, esse dovranno subire altri due processi denominati retinatura e resinatura, tramite i quali la lastra viene consolidata, garantendone l'integrità strutturale attraverso il riempimento di tutti quei difetti, piccole rotture e imperfezioni tipiche del materiale naturale. I due processi descritti conferiscono ai prodotti maggiore resistenza meccanica e rinforzo strutturale. La fase della lucidatura avviene su una linea automatizzata che permette di effettuare la finitura definitiva del prodotto secondo le esigenze della domanda di mercato. La lucidatrice è un macchinario funzionante per abrasione ed utilizza per lo scopo mole abrasive di granulometria variabile decrescente a scalare fino al raggiungimento della lucidatura desiderata. Alla fine del ciclo di lavorazione le lastre lucide vengono disposte presso il magazzino vendita e prelevate dai clienti.

Le filagne prodotte dal taglio dei blocchi informi vengono tagliate in pannelle secondo le misure richieste dalla domanda di mercato tramite la attestatrice e opportunamente pallettizzate e trasportate verso il magazzino vendite.

CAPITOLO 5

Teoria dei processi produttivi

5.1 Teoria della produzione

Il termine produzione assume necessariamente un significato fisico, in quanto essa stessa può essere definita qualsiasi trasformazione che veda in un certo rapporto beni in uscita in riferimento a grandezze in entrata. Il rapporto fra le grandezze in entrata (denominate fattori produttivi) e quelle in uscita (denominati prodotti o servizi) può essere espresso mediante relazioni qualitative e quantitative. Le relazioni quantitative sono dette funzioni di produzione. Ogni processo in cui certi beni in entrata (fattori produttivi) vengono trasformati in altri beni economici in uscita (prodotti) prende il nome di produzione tecnica. Tale trasformazione può essere di tipo materiale, spaziale, temporale, selettiva, come di seguito specificato:

- trasformazione materiale: se riguarda la forma e l'aspetto dei fattori produttivi;
- trasformazione spaziale: se il rapporto tra il prodotto e i fattori entranti nel processo è un trasferimento di luogo di certi beni prelevandoli da dove abbondano per portarli dove sono scarsi;
- trasformazione temporale: se il trasferimento di certi beni che abbondano in un determinato periodo in altro in cui scarseggiano;
- trasformazione selettiva: se si hanno diversi ordinamenti dei beni in entrata da quelli in uscita, classificazione per gradi, grandezze, efficienze e quant'altro.

Il processo di trasformazione può inoltre essere compiuto tramite una successione di stadi intermedi: il prodotto in uscita dal primo stadio costituisce il fattore di produzione in entrata allo stadio successivo e così via fino al prodotto finale. Le produzioni vengono denominate economiche quando vale la relazione:

$$EE = \frac{B}{C} \geq 1$$

dove EE = efficienza economica, B = benefici (valore dei prodotti) e C = costi (valore dei fattori produttivi). Ossia sono definite produzioni in senso economico solo le attività o processi in grado di trasformare i fattori in entrata in prodotti in uscita aventi utilità o valore complessivo maggiore dei primi. Tutte le operazioni economiche sono anche produzioni tecniche, ma solo le produzioni tecniche con efficienza economica maggiore di uno appartengono al sottoinsieme delle produzioni economiche. La tecnologia può essere definita come l'insieme delle conoscenze relative alle attività industriali e agrarie riguardanti i principi che regolano i fenomeni fisici e sociali e la loro utilizzazione nei processi produttivi. E' la tecnologia che pone il limite superiore ai processi di produzione: tanto più è evoluta, tanto sono superiori questi limiti. In una funzione di

produzione concorrono diversi agenti opportunamente combinati tra di loro: essi sono la natura, il lavoro e il capitale.

5.2 Fattori produttivi, prodotti, costi e ricavi

Nei modelli economici le grandezze in entrata sono chiamate fattori produttivi e le uscite prodotti. I fattori produttivi si possono distinguere diversamente a seconda da dove si osserva l'andamento del processo e in particolare la possibilità di variarne alcuni o tutti.

Nel breve periodo si ha la seguente distinzione:

- fattori produttivi circolanti (o di flusso): possono essere variati per incidere sul livello di produzione
- fattori produttivi di fondo (o fissi): non sono apparentemente modificabili nel breve periodo.

La distinzione suddetta nel lungo periodo perde il suo significato. Se si prende in considerazione il grafico in cui è riportata la quantità di domanda Q e l'offerta di un determinato bene o servizio prodotto P , l'offerta nel breve periodo varia lungo la curva, mentre nel lungo periodo si sposta la curva intera. Tra i fattori produttivi in molte produzioni esiste una certa possibilità di sostituzione (grado di sostituibilità), mentre per altri fattori si può avere una relazione di complementarità, fatta eccezione per situazioni di estremo in cui certi fattori possono addirittura apparire fungibili, e altre in cui i due fattori possono essere limitazionali. Lo studio del consumo è per certi aspetti utile a semplificare l'analisi della teoria della produzione. Alle grandezze economiche beni (consumo) si sostituiscono i fattori produttivi in cui l'impresa deve trovare le combinazioni ottimali (produzione). L'impresa è l'organo fondamentale della vita economica intesa come organizzazione dei capitali e del lavoro, diretta alla produzione di beni e servizi economici. Le modalità secondo cui è realizzato il processo produttivo possono essere espresse in termini analitici precisando la relazione esistente combinando le entrate e le uscite. Come anticipato in precedenza, è detta funzione di produzione la relazione che esiste in riferimento ad un intervallo Δt , fra le quantità dei fattori in entrata e la massima quantità di prodotto possibile in uscita, in riferimento alla migliore applicazione delle tecnologie note e presenti in quell'istante (i limiti ai risultati sono dati dalla tecnica dell'impresa). Una funzione di produzione può essere precisata mediante un solo punto oppure nel modo ordinario con una funzione continua o discontinua, oppure attraverso un sistema di equazioni e disequazioni ovvero in forma

tabulare o matriciale (matrice della tecnica). L'espressione più generale di una funzione di produzione di n prodotti ottenuti con la combinazione di m fattori produttivi in riferimento ad una tecnologia T è la seguente:

$$f(Q_1, Q_2, \dots, Q_n; F_1, F_2, \dots, F_m; T) = 0$$

Sono dette produzioni ordinarie semplici quelle che realizzano un solo prodotto. E' definita produzione totale la produttività Q riferita agli agenti produttivi. Il concetto di produttività marginale si esprime con la relazione $\frac{\partial Q}{\partial F_i}$, ossia derivando parzialmente la

funzione di produzione rispetto alle variabili fattori. Nella definizione marginalista invece si definiscono le differenze finite ossia l'incremento subito dalla produttività totale a seguito dell'incremento di quel fattore, tramite la relazione $\frac{\Delta Q}{\Delta F_i}$. Si definisce

produttività media il rapporto tra produttività totale e numero dei fattori che hanno dato luogo a quel prodotto: $Q_m = \frac{Q}{F_i}$. Il reciproco di Q_m è il cosiddetto impropriamente

impiego o consumo unitario di quei fattori, ossia il coefficiente di produzione del fattore: $a_{ik} = \frac{1}{Q_m} = \frac{F_i}{Q_k}$. Nella produzione può accadere che Q_m sia indipendente da Q,

in questo caso a_{ik} resta costante, oppure che sia variabile al variare di Q, in tal caso anche a_{ik} è variabile. Se a_{ik} rimane costante nel processo k per ogni valore di produzione, si dice che quel processo produttivo è caratterizzato da coefficienti di produzione fissi o costanti. Nel caso opposto il processo produttivo è definito a coefficienti di produzione flessibili. Nel primo caso se la funzione di produzione ha coefficiente costante è possibile ottenere quel prodotto attraverso le sole combinazioni utili di F_1 e F_2 . Se di vuole ottenere una unità di Q_k occorre impiegare la quantità a_{1k} del fattore F_1 e la quantità a_{2k} del fattore F_2 . In generale per $\overline{Q_k} = n \left[\frac{\text{unità}}{\text{giorno}} \right]$ occorrono

$n \cdot a_{1k}$ quantità del fattore F_1 e $n \cdot a_{2k}$ quantità del fattore F_2 , ossia i punti sulla semiretta uscente dall'origine degli assi a distanza n dall'origine.

5.3 Definizioni in uso per l'analisi tecnico – produttiva dei processi industriali

Nel presente paragrafo si illustrano le definizioni e le formule in uso nelle classiche analisi tecnico – produttive dei processi industriali.

Funzione di produzione: si definisce funzione di produzione la relazione implicita:

$$f(Q_1, Q_2, \dots, Q_n; F_1, F_2, \dots, F_m; T) = 0$$

dove

- Q_k = prodotti in uscita ($k = 1, 2, \dots, n$) ossia le quantità di beni prodotti nella trasformazione
- F_i = fattori produttivi ($i = 1, 2, \dots, m$) ossia le quantità dei fattori corrispondentemente entrati nel processo
- T = limitazione superiore che la tecnologia conosciuta e applicata pone alla quantità di prodotto conseguita nel processo di trasformazione che impiega i fattori produttivi F_i .

Nel caso di un solo prodotto in uscita si ha:

$$Q = f(F_1, F_2, \dots, F_m; T)$$

Produttività totale: è la quantità totale di prodotto che si ottiene impiegando una data quantità di un fattore o di più fattori in riferimento ad un determinato intervallo di tempo.

Produttività media di un fattore: è data dal rapporto fra la produttività e la quantità di quel fattore impiegata per ottenere tale produzione.

Produttività marginale di un fattore: è data dal rapporto tra l'incremento della quantità prodotta e l'incremento di un unità del fattore impiegato.

*Efficienza tecnica (fisica)
di un fattore produttivo*

F_i :

quantità di prodotto Q_k ottenibile da un'unità di fattore produttivo F_i

$$E_{T,ik} = \frac{Q_k}{F_i}$$

*Vettore colonna della
efficienza tecnica:*

$$\bar{E}_T = \frac{\bar{Q}_k}{\bar{F}_i}$$

*Efficienza economica
 EE_k del processo
produttivo Q_k :*

rapporto tra valore della produzione e valore dei fattori produttivi impiegati.

*Coefficiente tecnico (di
produzione del fattore
produttivo) a_{ik} del fattore
 F_i nel processo k -esimo
per il livello Q_k*

quantità media di fattore produttivo F_i necessaria alla produzione di un unità di prodotto

$$a_{ik} = \frac{F_i}{Q_k} = \frac{1}{ET}$$

*Vettore colonna dei
coefficienti di produzione*

$$a_{ik} = \frac{\bar{F}_i}{\bar{Q}_k}$$

$$\bar{a}_{ik} = \begin{bmatrix} a_{1k} \\ a_{2k} \\ a_{3k} \\ \dots \\ a_{ik} \\ \dots \\ a_{mk} \end{bmatrix}$$

*Matrice della tecnica
(MMT)*

dati k processi produttivi Q ed i fattori produttivi F , si costruisce la matrice della tecnica riportando nelle n colonne la quantità di fattori necessaria per produrre una unità di prodotto e nelle m righe la quantità di ciascun fattore impiegato i nei k processi produttivi. La dimensione dei vari processi considerati nella matrice della tecnica è sottoposta a vincoli che possono essere di massimo o minimo oppure di identità. I vincoli di

massimo esprimono la limitata disponibilità dei fattori produttivi. I vincoli di minimo impongono una certa attivazione di uno o più processi o un livello minimo di fattori produttivi. Quelli di identità danno la esatta dimensione del processo. Fra i diversi tipi di vincolo vanno ricordati quelli tecnici. Altri vincoli: istituzionali, contrattuali, altri tipo stabilità del reddito, sicurezza, qualità della vita, ambientale

F_i / Q_k	Q_1	Q_2	Q_3	..	Q_k	..	Q_n
F_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	..	a_{1k}	..	a_{1n}
F_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	..	a_{2k}	..	a_{2n}
F_3	a_{31}	a_{32}	a_{33}	..	a_{3k}	..	a_{3n}
..
F_i	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}	..	a_{ik}	..	a_{in}
..
F_m	a_{m1}	a_{m2}	a_{m3}	..	a_{mk}	..	a_{mn}

Costo medio unitario di produzione Cm_k :

sommatoria dei prodotti tra le quantità di fattori produttivi F_i per unità di prodotto impiegati, ossia i coefficienti tecnici a_{ik} , e i corrispondenti costi unitari, riferiti alla produzione Q_k

$$Cm_k = \sum_1^m a_{ik} \cdot V_i$$

$$\begin{bmatrix} a_{1k} \\ a_{2k} \\ a_{3k} \\ \dots \\ a_{ik} \\ \dots \\ a_{mk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \dots \\ V_i \\ \dots \\ V_m \end{bmatrix} = Cm_k$$

Prezzo di vendita unitario del prodotto P_k :

Vettore riga dei prezzi di vendita unitario del prodotto \bar{P}

Prezzo unitario del fattore produttivo V_i :

Vettore colonna dei prezzi dei fattori produttivi \bar{V}

$$\bar{V}_i = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \dots \\ V_i \\ \dots \\ V_m \end{bmatrix}$$

Utile unitario Um_k : (profitto conseguibile da ogni unità di prodotto Q_k)

$$Um_k = P_k - Cm_k$$

$$Um_k = P_k - \sum_1^m a_{ik} \cdot V_i$$

$$[Um_k] = [P_k] - \begin{bmatrix} a_{1k} \\ a_{2k} \\ a_{3k} \\ \dots \\ a_{ik} \\ \dots \\ a_{mk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \dots \\ V_i \\ \dots \\ V_m \end{bmatrix}$$

Risultato totale U per il livello di produzione \bar{Q} :

$$U = \bar{Q} \cdot Um_k = \bar{Q} \cdot \left(P_k - \sum_1^m a_{ik} \cdot V_i \right)$$

Utile lordo Ul_{pk} di ciascuna produzione Q_k :

$$Ul_{pk} = Ul_k \cdot ATL_k$$

Tabella 3 - Matrice della tecnica riassuntiva di tutti i parametri di calcolo

		Livelli di produzione Q_k						Vettore prezzi dei fattori F_i
		Q_1	Q_2	..	Q_k	..	Q_n	V_i
Fattori produttivi F_i	F_1	a_{11}	a_{12}	..	a_{1k}	..	a_{1n}	V_1
	F_2	a_{21}	a_{22}	..				V_2

	F_i	a_{i1}	a_{i2}	..	a_{ik}	..	..	..

	F_m	a_{m1}	a_{m2}	..	a_{mk}	..	a_{mn}	V_m
Vettore prezzi di vendita dei Q_k	P_k	P_1	P_2	..	P_k	..	P_n	
Costo medio Unitario di produzione dei Q_k	cm_k	$\sum_1^m a_{1k} \cdot V_i$	$\sum_1^m a_{2k} \cdot V_i$	..	$\sum_1^m a_{mk} \cdot V_i$	..	$\sum_1^m a_{nk} \cdot V_i$	
Vettore Utile Unitario per livelli di produzione Q_k	Um_k	$P_1 - \sum_1^m a_{1k} \cdot V_i$	$P_2 - \sum_1^m a_{2k} \cdot V_i$	..	$P_k - \sum_1^m a_{mk} \cdot V_i$	..	$P_n - \sum_1^m a_{nk} \cdot V_i$	
Vettore Utile Totale per livelli di produzione Q_k	U	$Q_1 \cdot Um_1$	$Q_2 \cdot Um_2$	..	$Q_k \cdot Um_k$	..	$Q_n \cdot Um_n$	
Vettore Utile Lordo Medio per livelli di produzione Q_k	Ul_k							
Vettore Utile Lordo Totale per livelli di produzione Q_k	Ul_p							
Vettore Utile Lordo per livelli di produzione Q_k	Ul_{pk}							

La matrice della tecnica rappresenta uno strumento utile per l'analisi dell'efficienza tecnico – economica dei processi di lavorazione e permette di individuare e quantificare i fattori produttivi da ottimizzare per la massimizzazione del profitto.

CAPITOLO 6

Il ciclo produttivo

6.1 Diagramma di flusso generale (general flow sheet)

Un qualsiasi processo aziendale è caratterizzato da un insieme di attività, collegate tra loro, per fornire un certo output a partire da input definiti. L'output può essere un prodotto o un servizio e viene utilizzato da determinati utenti. Il processo aziendale nella sua esecuzione può richiedere l'interazione con diverse fonti di informazioni, anche nel corso della sua esecuzione.

I processi vengono in generale descritti a diversi livelli di dettaglio. Si può parlare di macro processi quando si tratta di processi complessi che al loro interno possono essere scomposti in altri sotto processi e attività.

La rappresentazione dei cicli produttivi prendendo spunto dalla norma UNI EN ISO 10628, la quale stabilisce le regole generali per la preparazione di diagrammi di flusso per impianti di produzione.

Nel caso in esame si è scelto di optare per una rappresentazione a schema a blocchi. Lo schema a blocchi descrive un processo o impianto di produzione per mezzo di simboli grafici standard, i quali rappresentano:

- i processi di lavorazione (sequenze di operazioni chimiche, fisiche per conversione, il trasporto o l'immagazzinamento di materiale o di energia);
- le fasi del processo (parti di processo che è prevalentemente autosufficiente e consiste in una o più operazioni di base);
- le operazioni di base;
- gli impianti di produzione o gruppi di impianti di produzione (le aree e le strutture necessarie per l'esecuzione di un processo);
- le sezioni di impianto (parti di impianto di produzione che possono funzionare in modo indipendente);
- le unità (singole parti di impianto, materie prime, semilavorati/prodotti finiti).

I suddetti simboli sono collegati tra loro da connettori (freccie) detti linee di flusso, che rappresentano il corso dei materiali o i flussi di energia.

Lo schema a blocchi contiene le informazioni seguenti:

- denominazione dei riquadri;
- denominazione dei flussi principali da un riquadro all'altro;
- direzione dei flussi principali da un riquadro all'altro;
- le portate dei materiali in ingresso e in uscita;
- le portate di energia in ingresso e in uscita;
- le portate dei flussi principali da un riquadro all'altro;

- le condizioni d'esercizio caratteristiche.

Ad integrazione di quanto detto si è optato per la seguente simbologia grafica, tratta dalla consuetudine pratica nella rappresentazione a flow – chart dei processi produttivi:

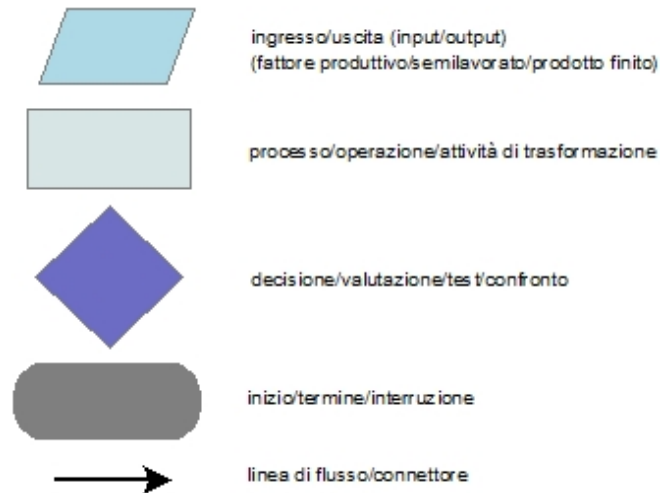


Figura 8 - Simbologia impiegata nei diagrammi di flusso

6.2 Diagrammi di Gantt

I diagrammi di Gantt sono strumenti impiegati principalmente nelle attività di project management, a rappresentazione delle mansioni o attività che costituiscono il progetto. Sono costruiti partendo da un asse orizzontale e da un asse verticale di riferimento, a rappresentazione dell'arco temporale totale della fase analizzata, suddiviso a sua volta in sotto fasi incrementali. Le barre orizzontali di lunghezza variabile rappresentano le sequenze, la durata e l'arco temporale di ogni singola attività. Queste barre possono sovrapporsi durante il medesimo arco temporale ad indicare la possibilità dello svolgimento in parallelo di alcune delle attività. Man mano che la fase progredisce, delle barre secondarie, delle frecce o delle barre colorate possono essere aggiunte al diagramma, per indicare le attività sottostanti completate o una porzione completata di queste. Una linea verticale è utilizzata per indicare il punto temporale di riferimento. La scala temporale è funzione della durata totale della fase e della risoluzione analitica descrittiva del processo di riferimento.

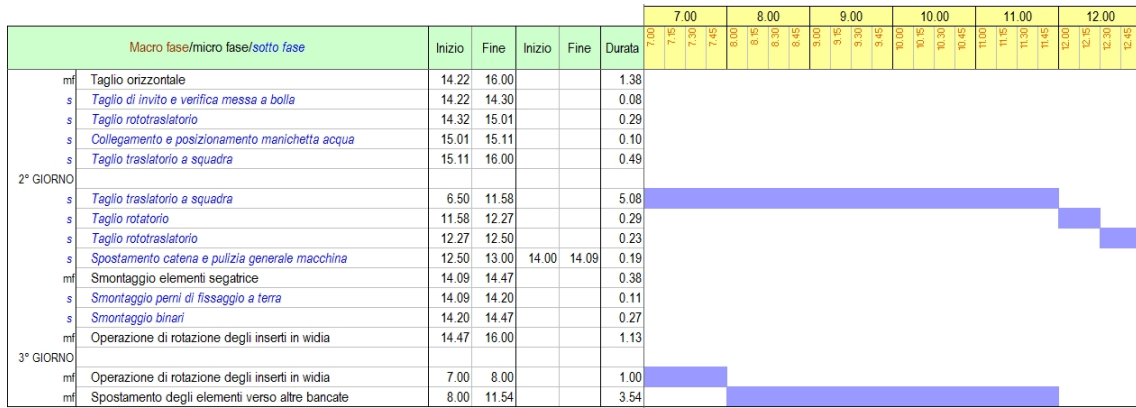


Figura 9 - Esempio di diagramma di Gantt utilizzato per l'analisi delle fasi lavorative

6.3 Organigrammi

Nell'ambito dell'attività dell'azienda esiste la figura del capo cava generale (la ditta possiede tre cave); in ogni cava vi è una sorta di capo cava (improprio) dedicato alla cava interessata. Le attività vengono svolte su due turni: dalle 05.00 alle 13.00 e dalle 13.00 alle 21.00, per garantire la continuità delle operazioni. Per ogni capo cava ci sono N squadre. Solitamente una squadra tipo è costituita dalle seguenti figure professionali, in numero variabile a seconda della dimensione della bancata e del conseguente livello di produzione:

- Capo turno;
- Addetto al filo;
- Addetto alla segatrice;
- Autista;
- Escavatorista;
- Palista.

Nelle operazioni ad esempio di ribaltamento del blocco, ogni figura professionale succitata partecipa alle operazioni.

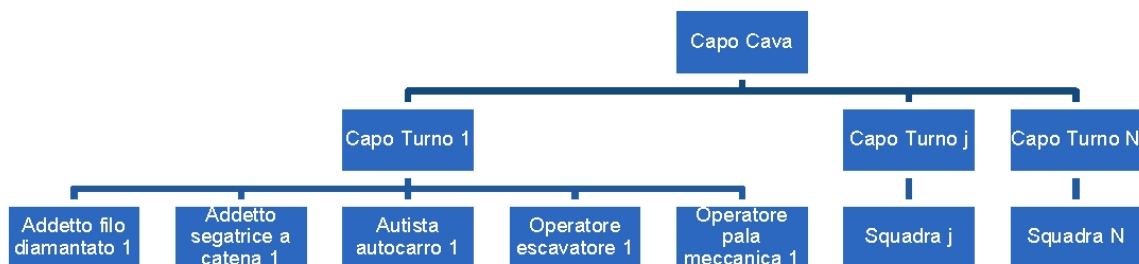


Figura 10 – Organigramma di cava

Per lo stabilimento si ha:

- Responsabile stabilimento;
- Capo turno;
- Addetto alla resinatura;
- Addetto alla lucidatura;
- Addetto al telaio multilama;
- Addetto alla tagliablocchi;
- Addetto all'intestatrice;
- Addetto al piazzale.

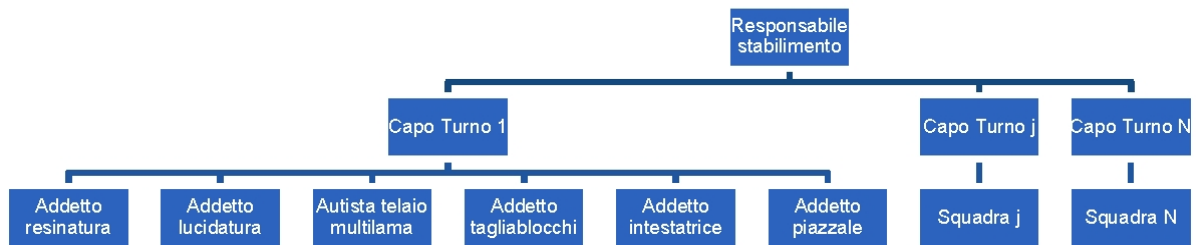


Figura 11 – Organigramma di stabilimento

6.4 Descrizione del ciclo produttivo della cava

Schematizzando e semplificando, inizialmente si può affermare che la macro fase produttiva nella cava di Orose è quella di isolamento e taglio delle bancate, ossia grandi porzioni di roccia ornamentale in posto preselezionate dalle quali successivamente si ottengono le fette e i blocchi, gli inforni (ulteriormente lavorati), e gli sfridi.



Figura 12 - Panoramica a 180° del piazzale di cava

Questi ultimi potrebbero essere immessi nuovamente nel ciclo produttivo per la produzione di materie prime secondarie da destinare a diversi scopi.

Riassumendo le produzioni in cava sono le seguenti:

- blocco di materiale regolare (blocco commerciale – prodotto finito);
- blocco di materiale informe (semilavorato);
- sfridi (materiale non idoneo alla segagione).

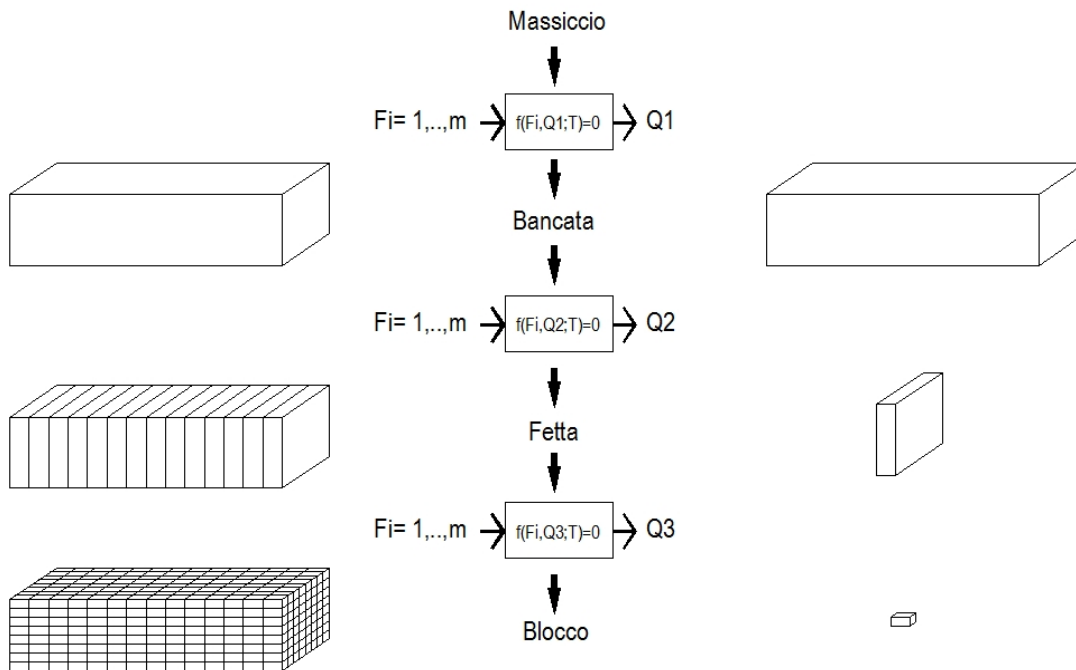


Figura 13 - Funzioni di produzione individuate nella cava

Si ricorda che il blocco rappresenta l'unità fisica di produzione, ovvero l'obiettivo primario delle operazioni eseguite nella cava.

La macro fase su descritta si compone di sotto fasi di lavorazione che, correlate tra di loro e concatenate temporalmente, concorrono al raggiungimento delle produzioni su elencate. L'isolamento e il distacco della bancata avvengono attraverso le tecniche di taglio a filo diamantato per quanto riguarda il taglio verticale necessario al distacco della bancata e tramite segatrice a catena per i tagli verticali laterali e orizzontali. La bancata, una volta isolata dal corpo della roccia madre, viene ribaltata tramite l'ausilio di martinetti idraulici ed escavatori muniti di benna ad artiglio, su un letto di sabbia che ne smorza l'impatto al suolo. La bancata viene a sua volta tagliata in fette tramite la segatrice a catena, le quali a loro volta sono ribaltate e segate ulteriormente fino a raggiungere la dimensione dei blocchi commerciali, i quali vengono caricati su autocarri tramite pala meccanica e trasportati verso gli stabilimenti di lavorazione o altre destinazioni.

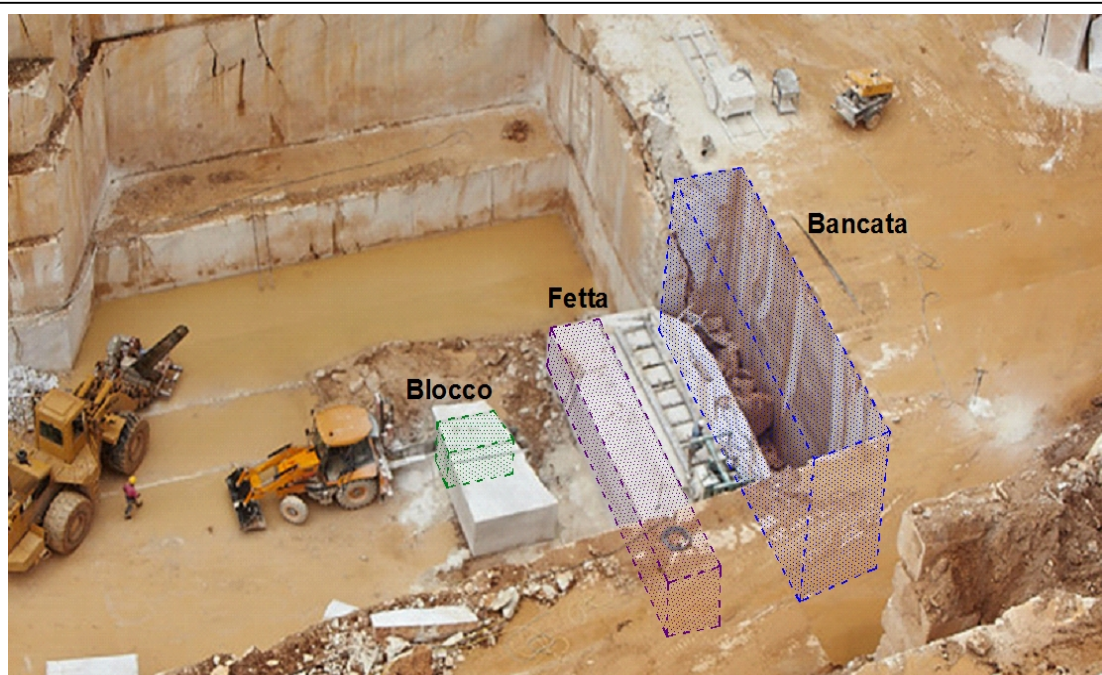


Figura 14 - Gerarchia della produzione: platee, bancate, fette e blocchi

Riepilogando, il distacco della bancata avviene nel seguente modo:

- taglio al monte della bancata; si utilizzano uno o più impianti a filo diamantato per i tagli verticali in accoppiamento alla tagliatrice a braccio con catena ad inserti di widia per il taglio orizzontale (al piede della bancata, come mostrato in figura) .
- ribaltamento della bancata: una volta effettuati i tagli verticali e quello orizzontale, si inserisce un cuscino divaricatore nel taglio verticale parallelo al fronte, per consentire il distacco, di circa 30 cm, della bancata dal monte, sufficienti per l'installazione del martinetto idraulico, o del cuneo di roccia stessa, con cui si riesce ad ribaltare il parallelepipedo, facendolo cadere su un letto di materiale formato dai terra e inerti per ammortizzare l'urto ed evitare la rottura della bancata. Tale letto di inerti è opportunamente predisposto nel piazzale ai piedi della bancata. L'operazione di ribaltamento della bancata è aiutata dalla spinta del braccio dell'escavatore, attrezzato con artiglio o tramite il citato martinetto idraulico.

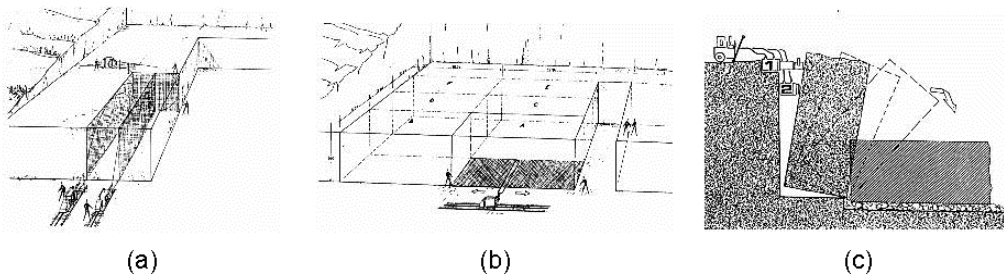


Figura 15 - Rappresentazione schematica del taglio verticale (a), taglio orizzontale (b) e distacco con ribaltamento della bancata (c)

Una volta abbattuta la bancata, inizia la fase di suddivisione dapprima in fette, sempre tramite segatrice a catena su binario fisso. Le fette sono successivamente divise in blocchi commerciali, mediante altre segatrici a catena montate su terne. Le operazioni avvengono sul piazzale di cava e costituiscono la prima fase della trasformazione industriale del marmo, alla quale seguiranno, nello stabilimento, la segazione e, eventualmente, altre operazioni di finitura, quali la levigatura e la lucidatura (previa resinatura), la bocciardatura o la sabbatura, il taglio. Qualora occorra, si esegue la riquadratura dei blocchi per portarli alle dimensioni commerciali: i blocchi da inviare al telaio vengono squadrati mediante il telaio monolama o a filo diamantato; i blocchi informi sono inviati direttamente alle tagliablocchi a dischi diamantati. Il trasporto dei blocchi verso la segheria avviene mediante dumper, mentre quelli destinati alla vendita vengono caricati sugli auto-articolati e spediti alle ditte acquirenti.

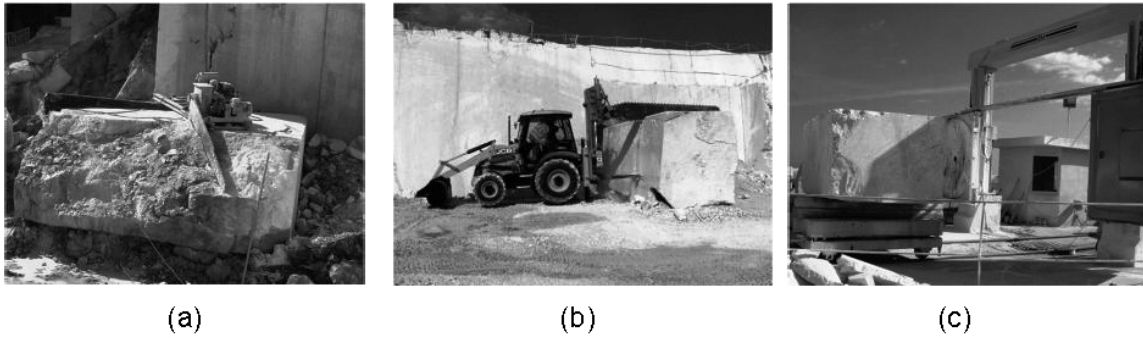


Figura 16 - Taglio della bancata in fette (a), taglio delle fette in blocchi (b), riquadratura (c)

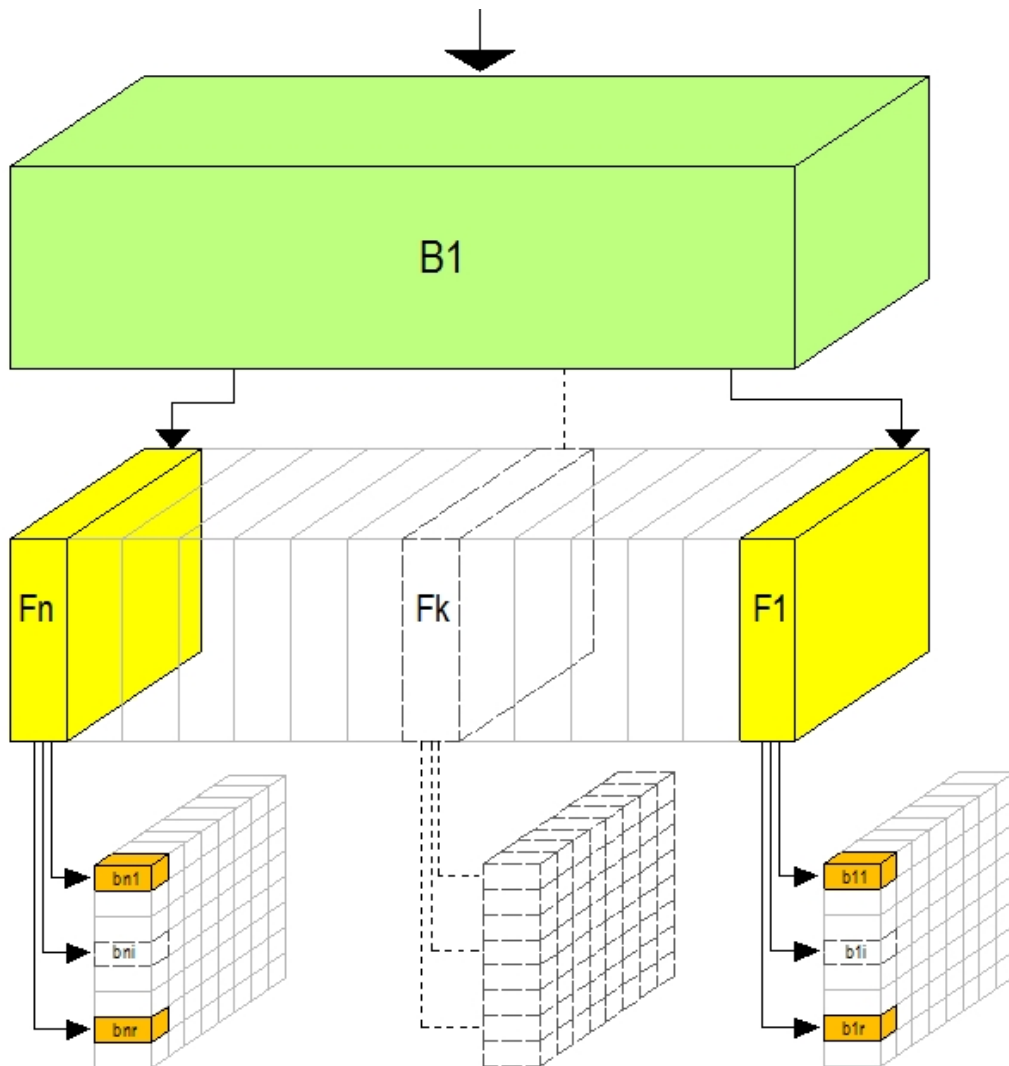


Figura 17 - Schema di suddivisione in volumi elementari di produzione

In riferimento allo schema in figura, supponendo che le dimensioni geometriche della singola bancata abbattuta $B1$ siano regolari, e che lo siano di conseguenza quelle delle fette e dei blocchi prodotti, i rapporti tra i volumi elementari prodotti sono i seguenti:

$$V_{B1} = \sum_{k=1}^n (V_{F_k} + L_{F_k}) \quad V_{F_k} = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^r (V_{b_{k,i}} + L_{b_{k,i}})$$

dove:

V_{B1} = volume totale della bancata abbattuta;

V_{F_k} = volume netto della k -esima fetta prodotta su n fette segate;

L_{F_k} = volume di materiale perso durante il taglio della k -esima fetta su n fette segate;

$V_{b_{k,i}}$ = volume netto del k,i -esimo blocco prodotto su r blocchi segati;

$L_{b_{k,i}}$ = volume di materiale perso durante il taglio k,i -esimo blocco su r blocchi segati.

Le operazioni di suddivisione della singola bancata in fette debbono avvenire necessariamente in serie così come il taglio di una singola fetta in blocchi, mentre in generale ogni fetta può essere lavorata indipendentemente dalle altre, sia in senso spaziale che temporale, quindi in parallelo. Per la lavorazione dell'intera bancata è necessaria dunque una configurazione di taglio necessaria al distacco della stessa dal livello, una configurazione di taglio per la suddivisione della bancata in fette e almeno k configurazione per il taglio dei blocchi da ogni fetta, con $k = 1, \dots, n$.



Figura 18 - Taglio della fetta in blocchi: esempio di lavorazioni in parallelo



Figura 19 - Taglio della bancata in fette e taglio di una fetta in blocchi: esempio di lavorazioni in serie (vincolo di sequenza)



(a)



(b)

Figura 20 - Taglio di isolamento della bancata: taglio verticale tramite filo diamantato (a) e taglio orizzontale tramite segatrice a catena (b). Esempio di lavorazioni in serie (vincolo di sequenza)

Più in generale, la configurazione di taglio può essere intesa come una *catena elementare di lavorazione* costituita da un insieme minimo di risorse, ossia macchine e attrezzature, definito con $\{M_{ij}\}$, $j = 1, \dots, p$ (p = numero di elementi della catena) che secondo opportune sequenze di lavoro realizzano un ciclo elementare di lavoro o di produzione C_i : ad ogni i -esimo ciclo sono assegnate p risorse totali. Nelle attività lavorative in studio, le configurazioni di taglio sono caratterizzate dalla ripetibilità della catena di lavorazione, quindi per ogni ciclo i si ha sempre lo stesso impiego p di risorse, ed esse sono considerate sempre disposte in serie, come indicato in figura:

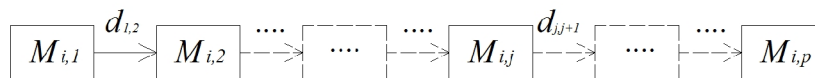


Figura 21 - Catena elementare di lavorazione

Ogni ciclo C_i determina la produzione di una quantità Q_i , per esista una corrispondenza univoca tra le due grandezze. Ogni ciclo è inoltre caratterizzato da una durata d_i intesa come sommatoria delle sotto fasi di lavoro in cui è sequenziato:

$$d_i = \sum_{j=1}^p d_{j,j+i}$$

dove $d_{j,j+1}$ sono le durate massime delle sotto lavorazioni computate dal termine della j -esima all'inizio della $(j+1)$ -esima.

La produttività della catena elementare di lavorazione impegnata in un ciclo C_i si può calcolare in generale come rapporto tra la quantità prodotta Q_i e il tempo impiegato per ottenerla. E' chiaro che se si considera la coltivazione del giacimento, occorre distinguere se le catene di lavorazione elementari sono disposte in *serie* o in *parallelo*.

Sono disposte in *serie* se i volumi elementari prodotti sono caratterizzate al vincolo di sequenziamento, ovvero la produzione di un volume non può iniziare prima che sia completata la produzione del volume precedente, a prescindere del numero di catene di lavorazione distinte operanti. In questo caso, supponendo un totale di n cicli, la determinazione della produttività totale P si determina come segue:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{\sum_{i=1}^n d_i}$$

dove Q_i e d_i sono le quantità di prodotto e le durate di lavorazione di ogni i -esimo ciclo.

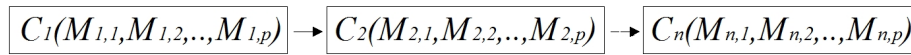


Figura 22 - Catena di lavorazione ripetuta con disposizione in serie

Se si è in presenza di più catene di lavorazione distinte, esse si considerano configurate in parallelo se ad ognuna compete un ciclo ben definito e sono indipendenti le une dalle altre. Non esistono vincoli di sequenza e la produttività totale è determinata come segue:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{\max\{d_i\}}$$

dove Q_i e d_i sono le quantità di prodotto e le durate di lavorazione per ogni i -esimo ciclo.

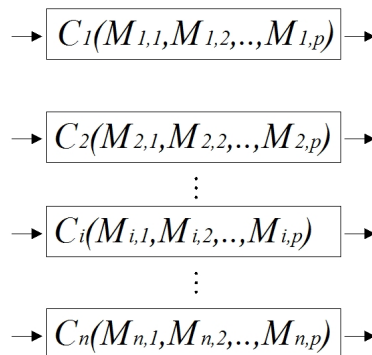


Figura 23 - Catene di lavorazione distinte disposte in parallelo

Se si è in presenza di una sola catena di lavorazione, esse sono configurate in parallelo se ogni j risorsa di M_{ij} una volta eseguita la propria fase prevista dalla catena per un ciclo, ne inizia immediatamente un'altra relativa ad un nuovo ciclo, e così via per ogni ciclo i considerato e per tutti $j = 1, \dots, p$.

In questo caso la produttività totale P si determina come segue:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{T_f}$$

dove T_f rappresenta il tempo massimo di esecuzione degli n cicli che intercorre a partire dall'istante iniziale di impiego della risorsa $M_{1,1}$ fino all'istante finale in cui conclude l'attività la risorsa $M_{n,p}$.

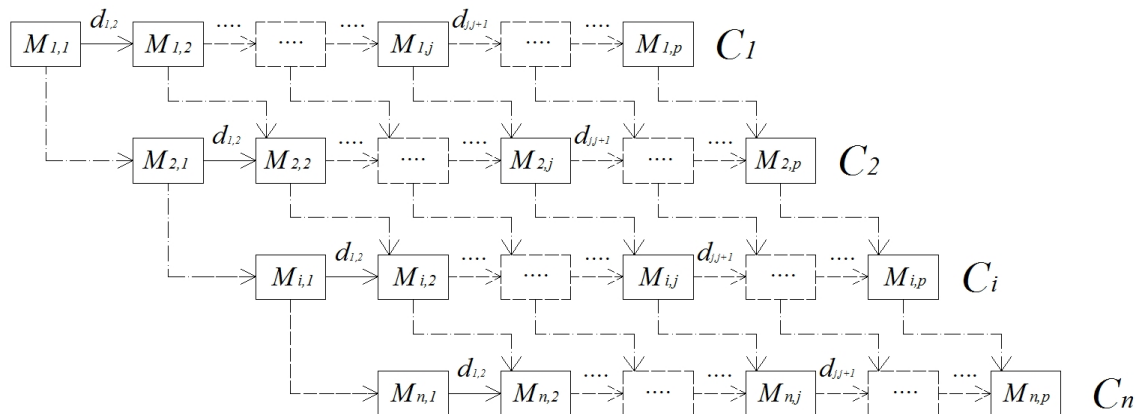


Figura 24 - Catena di lavorazione ripetuta con disposizione in parallelo

6.4.1 Produzione della bancata

La bancata viene isolata dal monte tramite due tagli verticali effettuati con filo diamantato raffreddato ad acqua e un taglio orizzontale con segatrice a catena montata su binario. Operazioni propedeutiche alle suddette sono la messa in sicurezza della parte superiore della bancata e la pulizia al piede della stessa.

La bancata viene ribaltata sul letto di terra/sabbia (letto di caduta) tramite escavatore con ripper. La bancata viene lavata con idropulitrice e tracciata per il successivo taglio delle fette a cura del capo cava generale. La resa media di una bancata è pari al 30 %. La dimensione del lato nel senso della profondità della bancata è dettata dalla profondità di taglio della segatrice a catena, ossia mediamente pari a 3 metri. L'altezza della bancata è pari a circa 9 metri.

Preparazione dei piani di lavoro

La fase suddetta viene eseguita in successione, dalle parti alte alle parti basse della bancata. Si effettua dapprima il disgiungimento degli elementi instabili sulla parte superiore del fronte, in modo da garantire condizioni di sicurezza alla base durante il taglio orizzontale. L'operazione viene eseguita con ausilio di escavatore attrezzato con artiglio. Successivamente si opera lo sgombero dei detriti al piede del fronte tramite pala meccanica e autocarro.

Taglio orizzontale con segatrice a catena

Il taglio orizzontale alla base della parete è eseguito tramite segatrice a catena montata su binario fisso, secondo le seguenti sotto fasi:

- ✓ montaggio della macchina da taglio, caricamento degli elementi e posizionamento, montaggio degli elementi tramite fissaggio del bullone di aggancio e messa in bolla tramite livella manuale e regolazione piedini meccanici, verifica della distanza dal fronte della bancata, fissaggio dei binari al suolo tramite perni a tassello inseriti tramite perforatore pneumatico;
- ✓ spostamento del gruppo motore verso il punto di attacco, spostamento rotazionale del braccio della sega verso il punto d'attacco e verifica dell'orizzontalità, serraggi finali e inizio del taglio di invito con rototraslazione del braccio fino al raggiungimento della posizione a squadra;
- ✓ taglio a squadra con spostamento del gruppo motore in direzione parallela al fronte della parete;
- ✓ taglio finale con rototraslazione del braccio fino al termine delle operazioni;
- ✓ operazioni di pulizia, smontaggio perni di fissaggio al suolo e scollegamento dei binari tramite manovre effettuate tramite i pistoni stabilizzatori del gruppo, verifica dello stato di usura degli inserti;
- ✓ se necessario si procede all'operazione di rotazione degli spigoli degli inserti in widia. Ogni inserto ha due facce a disposizione e un totale di 8 spigoli ruotabili. Per ogni faccia rimangono 3 spigoli a disposizione (eccetto quello appena usurato). L'operazione di rotazione è a discrezione dell'operatore. Prima vengono ruotati gli inserti nella parte superiore della catena poi quelli inferiori (facendo ruotare la catena si porta la parte inferiore in posizione superiore);
- ✓ smontaggio dell'impianto e spostamento verso nuove zone di lavoro.

Taglio verticale con filo diamantato

Il taglio verticale lungo la direzione parallela alla parete della bancata e lungo la direzione ortogonale è eseguito tramite macchina a filo diamantato, secondo le seguenti sotto fasi:

- ✓ perforazione del foro guida di passaggio del cavo tramite martello perforatore e fioretto con spurgo ad aria, nel caso in cui si supponga continuità e compattezza di massa nel materiale (con beneficio di elevate velocità di avanzamento), e tramite perforatrice idraulica in caso ci si trovi in presenza di fratture con intercalazioni argillose di alterazione, in cui non si possa operare con spurgo pneumatico (con velocità di avanzamento inferiori al caso precedente). La lunghezza del foro è pari a 9 metri e il diametro è pari a 80 mm nel caso di

utilizzo di perforatrice idraulica e pari a 70 mm se si utilizza la perforatrice pneumatica. L'aria compressa è generata da una stazione situata nei pressi del piazzale stoccaggio blocchi e distribuita da una rete di tubazioni presso i punti principali dei cantieri. In caso di zone difficilmente raggiungibili dalla rete si utilizza un compressore portatile;

- ✓ allestimento dell'impianto del filo e dell'impianto di raffreddamento ad acqua. I componenti della macchina vengono trasportati tramite la pala gommata, scaricati al suolo e assemblati dagli operatori. Vengono montati i binari di scorrimento della macchina e inghisato a terra il tubo in acciaio di supporto per le pulegge di rinvio. Viene inoltre calato il filo all'interno del foro e "catturato" a fondo foro tramite un'asta metallica munita di gancio fatto scorrere all'interno del taglio orizzontale. Tramite una funicella viene poi issato sulla parte alta della bancata fino all'altro capo a cui verrà congiunto.
- ✓ inizio del taglio: la lunghezza del filo dipende dal numero di spezzoni collegati tra di loro tramite giunti a pressione metallici, serrati manualmente a pinza. Al procedere del taglio, e dunque al diminuire della superficie da tagliare, si estraggono progressivamente gli spezzoni e si ricongiunge il filo allo stesso modo descritto in precedenza, fino al termine dell'operazione;
- ✓ al termine del taglio di parete viene calato il filo per il taglio di "testa" all'interno del foro e "catturato" con le medesime modalità precedenti; si predispose il sistema di rinvio a 90° dalla direzione precedente, si monta il filo sul volano e sulle pulegge e si dà inizio al taglio della nuova superficie estraendo progressivamente gli spezzoni e si ricongiungendo il filo allo stesso modo descritto in precedenza, fino al termine dell'operazione;
- ✓ smontaggio dell'impianto e spostamento verso nuove zone di lavoro.

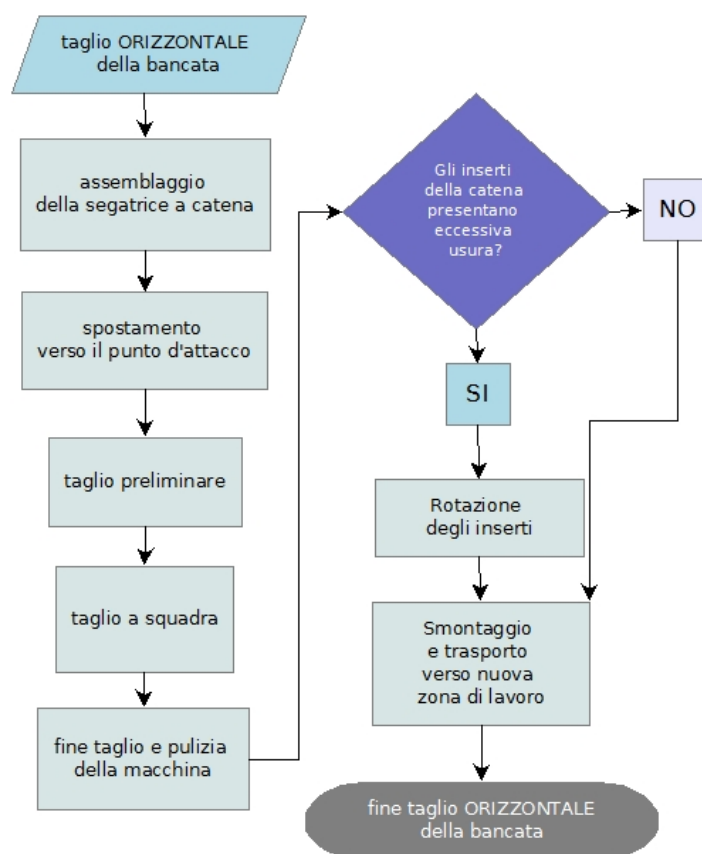


Figura 25 – Diagramma di flusso della fase di taglio orizzontale della bancata

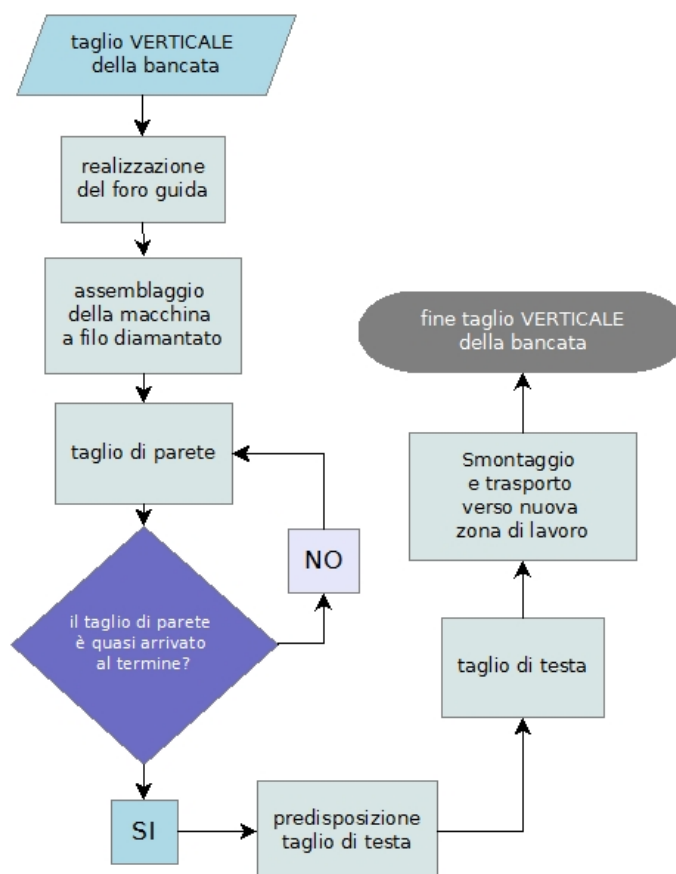


Figura 26 – Diagramma di flusso della fase di taglio verticale della bancata

Predisposizione del letto di caduta

Viene effettuata tramite il carico, trasporto e scarico di materiale inerte costituito da sfridi di lavorazione provenienti dalla segheria o detriti di lavorazione dalle altre bancate.

Distacco e rovesciamento

Viene effettuato tramite l'escavatore dotato di artiglio o ripper, ci si posiziona nella parte superiore della bancata e si fa leva sulla superficie di taglio, preventivamente allargata tramite cuscini idraulici o martinetti fino alla larghezza dell'artiglio, facendo in modo che il baricentro della bancata ruoti fino a che si attivi il momento ribaltante: durante l'operazione di ribaltamento tutte le fasi di lavoro vengono interrotte per motivi di sicurezza, in quanto durante la caduta della bancata potrebbero essere proiettati detriti anche a lunga distanza.

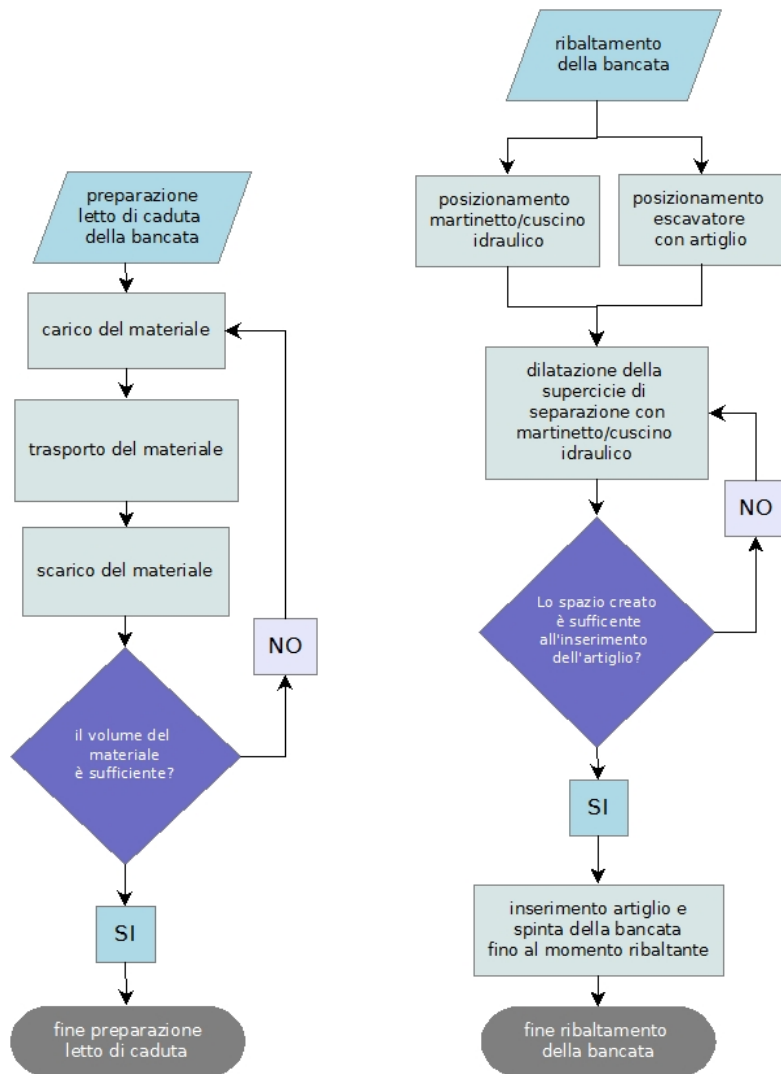


Figura 27 – Diagramma di flusso delle fasi di preparazione del letto di caduta e distacco e rovesciamento della bancata

6.4.2 Produzione della fetta (faldatura)

La bancata viene segata per fette (faldature) di larghezza pari a 1,5 metri tramite segatrici a catena montate su terna. Le fette vengono ribaltate su letto di sabbia/terra (letto di caduta) tramite terna con ripper. Le fette vengono tracciate dal capo cava per il taglio dei blocchi.

Taglio verticale con segatrice a catena

Il taglio verticale è eseguito tramite segatrice a catena montata su binario fisso, secondo le seguenti sotto fasi:

- ✓ montaggio della macchina da taglio, caricamento degli elementi e posizionamento, montaggio degli elementi tramite fissaggio del bullone di aggancio e messa in bolla tramite livella manuale e regolazione piedini meccanici, verifica della distanza dal fronte della bancata, fissaggio dei binari al suolo tramite perni a tassello inseriti tramite perforatore pneumatico;
- ✓ spostamento del gruppo motore verso il punto di attacco, spostamento rotazionale del braccio della sega verso il punto d'attacco e verifica dell'orizzontalità, serraggi finali e inizio del taglio di invito con rototraslazione del braccio fino al raggiungimento della posizione a squadra;
- ✓ taglio a squadra con spostamento del gruppo motore in direzione parallela al fronte della parete;
- ✓ taglio finale con rototraslazione del braccio fino al termine delle operazioni;
- ✓ operazioni di pulizia, smontaggio perni di fissaggio al suolo e scollegamento dei binari tramite manovre effettuate tramite i pistoni stabilizzatori del gruppo, verifica dello stato di usura degli inserti;
- ✓ se necessario si procede all'operazione di rotazione degli spigoli degli inserti in widia. Ogni inserto ha due facce a disposizione e un totale di 8 spigoli ruotabili. Per ogni faccia rimangono 3 spigoli a disposizione (eccetto quello appena usurato). L'operazione di rotazione è a discrezione dell'operatore. Prima vengono ruotati gli inserti nella parte superiore della catena poi quelli inferiori (facendo ruotare la catena si porta la parte inferiore in posizione superiore).
- ✓ smontaggio dell'impianto e spostamento verso nuove zone di lavoro.

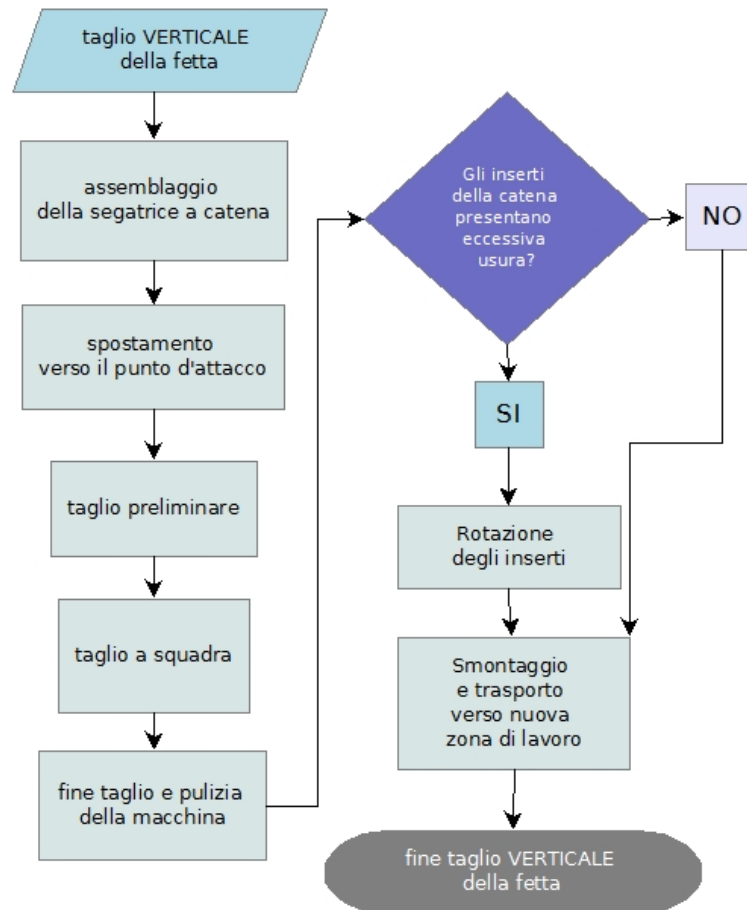


Figura 28 – Diagramma di flusso della fase di taglio verticale della fetta

Predisposizione del letto di caduta

Viene effettuata tramite il carico, trasporto e scarico di materiale inerte costituito da sfridi di lavorazione provenienti dalla segheria o detriti di lavorazione dalle altre bancate

Distacco e rovesciamento

Viene effettuato tramite l'escavatore dotato di artiglio o ripper, ci si posiziona nella parte superiore della bancata e si fa leva sulla superficie di taglio, preventivamente allargata tramite cuscini idraulici o martinetti fino alla larghezza dell'artiglio, facendo in modo che il baricentro della bancata ruoti fino a che si attivi il momento ribaltante: durante l'operazione di ribaltamento tutte le fasi di lavoro vengono interrotte per motivi di sicurezza, in quanto durante la caduta della bancata potrebbero essere proiettati detriti anche a lunga distanza.

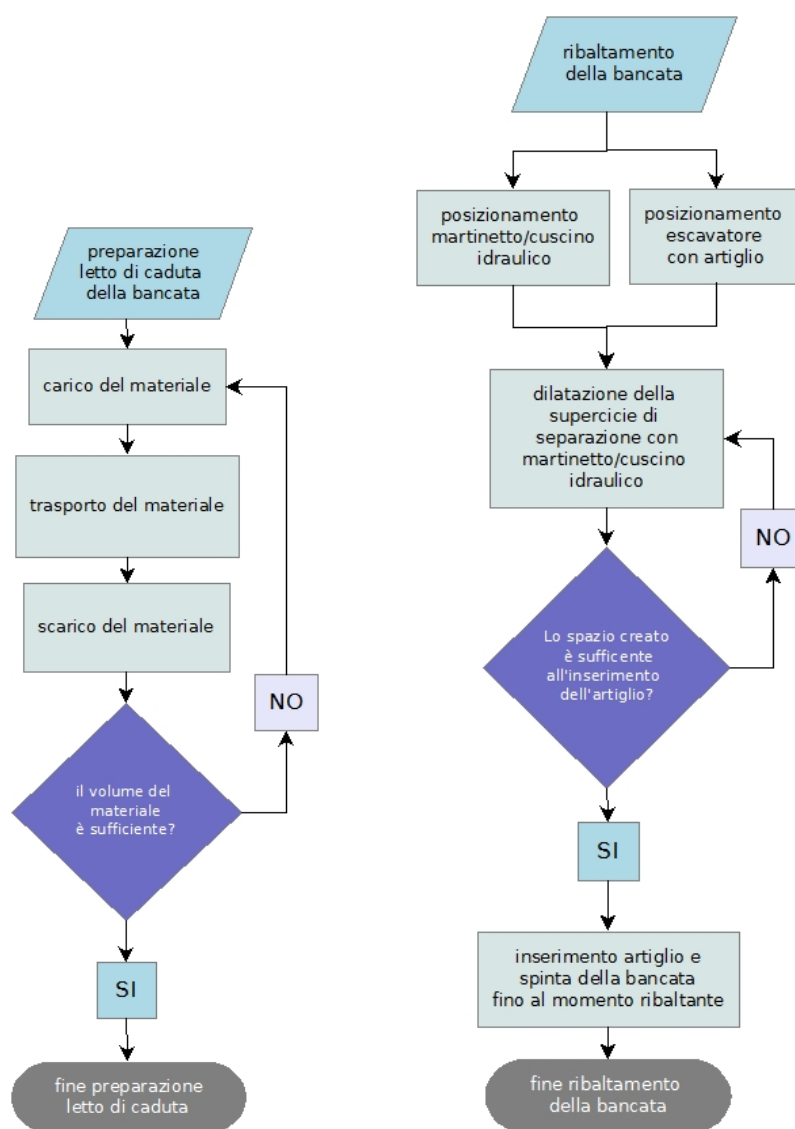


Figura 29 – Diagramma di flusso delle fasi di preparazione del letto di caduta e distacco e rovesciamento della fetta

6.4.3 Produzione dei blocchi

I blocchi vengono segati fino a dimensioni di circa 1,5 x 1,5 x 3,0 metri tramite segatrici a catena montate su terna. I blocchi così tagliati possono essere finiti o informi. Se sono finiti vengono caricati dalle pale e portati presso il piazzale stoccaggio in cui vengono lavati e, se necessario, riquadrati alla taglia blocchi. Se sono informi vengono anch'essi trasportati al piazzale stoccaggio e sottoposti a riquadratura o ulteriore taglio tramite segatrice a catena su terna. I blocchi in coda al processo di estrazione/semi lavorazione sono posizionati sui piazzali di stoccaggio. Esistono 2 piazzali di stoccaggio in ognuno dei quali è presente un carro ponte per la movimentazione e il carico dei blocchi sugli autocarri per la distribuzione, una pesa, una taglia blocchi a filo diamantato per la eventuale riquadratura del blocco, una idropulitrice per la pulizia dalla terra e dal fango. Sul ogni blocco viene apposto un contrassegno tipico della ditta, un codice numerico di natura fiscale, un codice numerico prodotto aziendale, il peso del blocco in tonnellate e le dimensioni lineari. In caso di spedizione dei blocchi in container, il peso medio ottimo è pari a 26 tonnellate. Una piccola percentuale dei blocchi (circa il 2-3 %) viene tagliata per ridurne la dimensione e dunque il peso, e va a sommarsi con altri blocchi in modo da raggiungere le dimensioni ottime per i containers. In caso di stivaggio non è necessaria tale operazione.

Taglio verticale tramite segatrice a catena montata su terna

Il taglio verticale è eseguito tramite segatrice a catena montata su terna, secondo le seguenti sotto fasi:

- ✓ sollevamento braccio;
- ✓ sollevamento stabilizzatori;
- ✓ manovra spostamento terna verso nuovo taglio;
- ✓ abbassamento stabilizzatori;
- ✓ distanziamento dal blocco;
- ✓ misura e messa a livello del braccio per la verticalità del taglio;
- ✓ rotazione del braccio fino al punto d'attacco;
- ✓ inizio dell'operazione di taglio;
- ✓ termine del taglio;
- ✓ operazioni di pulizia, smontaggio perni di fissaggio al suolo e scollegamento dei binari tramite manovre effettuate tramite i pistoni stabilizzatori del gruppo, verifica dello stato di usura degli inserti;

- ✓ se necessario si procede all'operazione di rotazione degli spigoli degli inserti in widia (procedura del tutto analoga a quella effettuata per la segatrice a catena a binario fisso);
- ✓ smontaggio dell'impianto e spostamento verso nuove zone di lavoro.

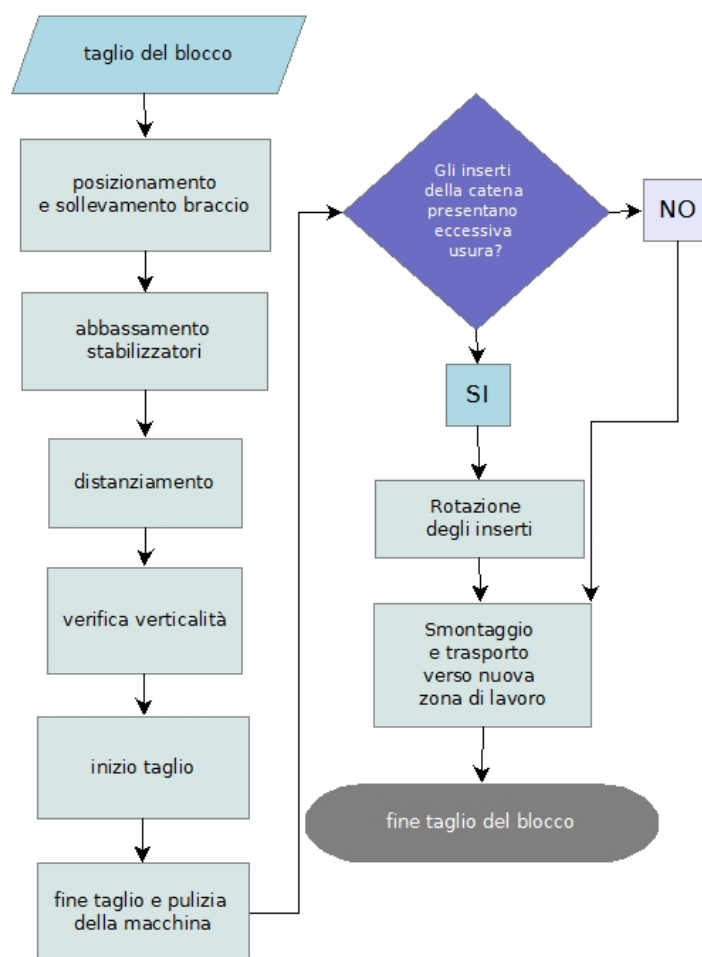


Figura 30 – Diagramma di flusso della fase di taglio verticale del blocco

6.5 Descrizione del ciclo produttivo dello stabilimento

Lo stabilimento è situato nelle immediate vicinanze della cava. Esso è strutturalmente costituito da un capannone in cemento armato precompresso prefabbricato, avente forma in pianta a T, circondato da piazzali di lavorazione, movimentazione e stoccaggio materiali. Per effettuare la produzione sono presenti una serie di macchine e di impianti descritti meglio in seguito.



Figura 31 – Ripresa aerea dello stabilimento

L’approvvigionamento energetico è di tipo elettrico ed avviene tramite una linea industriale a 400 V della potenza fornita pari a 962 kW (che supplisce alle richieste energetiche dello stabilimento e di parte della cava). L’approvvigionamento idrico è garantito da un anello alimentato dal serbatoio di raccolta principale.

E’ presente inoltre un impianto di distribuzione di aria compressa per l’alimentazione delle utenze pneumatiche delle macchine e per le manutenzioni in officina.

Nello stabilimento è possibile individuare le seguenti linee/aree di produzione:

- ✓ deposito esterno blocchi in ingresso alla linea taglio informi (movimentati tramite gru a ponte e carrelli a binario);

- ✓ linea taglio blocchi informi per produzione di pianelle per pavimenti (n. 8 seghe circolari);
- ✓ linea taglio blocchi – lastre (n. 3 telai multilama);
- ✓ deposito esterno blocchi in ingresso ai telai multilama (movimentati tramite gru a ponte e carrelli a binario);
- ✓ linea impianto resinatura;
- ✓ linea impianto lucidatura;
- ✓ deposito interno lastre lucide;
- ✓ deposito interno lastre grezze;
- ✓ zona di carico interna (2 ingressi).

Come appena accennato, per la movimentazione dei materiali sono presenti:

- ✓ gru a cavalletto esterna da 35 tonnellate dedicata alla movimentazione dei blocchi dal piazzale di stoccaggio alla pesa e ai carrelli per l'ingresso ai telai multilama, previo eventuale taglio al telaio tagliablocchi nel caso fosse necessario modificarne le misure;
- ✓ gira blocchi idraulica per effettuare rotazioni dei blocchi di 90°;
- ✓ gru a cavalletto esterna da 35 tonnellate dedicata movimentazione dei blocchi informi dal piazzale di stoccaggio all'ingresso della linea di taglio per la produzione di pianelle per pavimenti;
- ✓ gru a ponte interna da 6 tonnellate, dedicata alla movimentazione delle lastre all'interno del capannone;
- ✓ carrello elevatore diesel;
- ✓ carrelli elettrici su binario per lo spostamento dei blocchi dall'esterno ai telai multilama;
- ✓ carrelli elettrici su binario per lo spostamento dei blocchi dall'esterno alle seghe circolari.

Per la lavorazione dei blocchi vengono impiegati:

- ✓ telai multilama (n. 3) di due tipologie differenti;
- ✓ squadra blocchi a filo diamantato impiegate sul piazzale esterno pesa e sul piazzale informi.

Per la lavorazione delle lastre si utilizza:

- ✓ impianto di lucidatura automatico;
- ✓ impianto di resinatura.

Per la produzione delle pianelle si utilizza:

- ✓ taglia blocchi a sega circolare diamantata con sistema di carico automatico a vuoto d'aria e troncatrice;
- ✓ taglia blocchi a sega circolare diamantata con sistema di carico manuale e troncatrice;
- ✓ carrello elevatore per lo spostamento dei materiali lavorati

La produzione risulta distinta per prodotto finito in:

- ✓ lastre;
- ✓ pannelle.

Le lastre a loro volta possono essere distinte in:

- ✓ lastre grezze;
- ✓ lastre con rete in fibra di vetro e resinatura da un lato e resinatura e lucidatura al piano;
- ✓ lastre con rete in fibra di vetro e resinatura da un lato e resinatura all'altro.

E' possibile suddividere il ciclo produttivo dello stabilimento nelle seguenti fasi, a seconda della funzione di produzione considerata:

- a) fase di segagione dei blocchi regolari per la produzione di lastre;
- b) fase di resinatura e lucidatura delle lastre;
- c) fase di segagione dei blocchi informi per la produzione di pannelle.

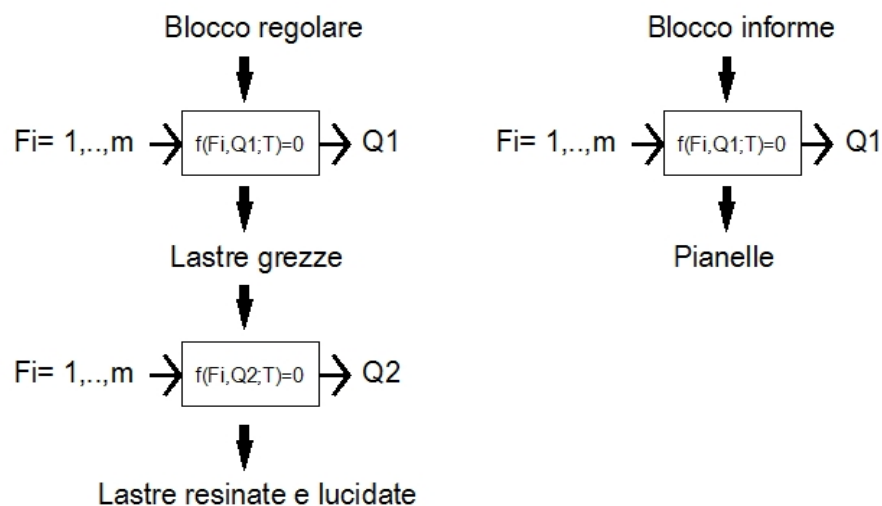


Figura 32 – Funzioni di produzione individuate in stabilimento

Le prime due fasi sono concatenate: la prima è propedeutica alla seconda. La terza fase è indipendente dalle due precedenti. Affinché si possa ottenere la maggior quantità di superficie di lastre regolari possibile, si dà priorità alla lavorazione di blocchi il più

regolari possibile. La produzione delle piastrelle nasce dall'esigenza di ottimizzare la quantità di blocchi estratti in cava da lavorare, in quanto gli informi possono prestarsi alla produzione di elementi piccoli e relativamente eterogenei quali piastrelle da pavimentazione, le quali pur avendo differenze di tessitura e cromatismo possono essere assemblate in corso d'opera realizzando prodotti di un certo interesse.

I blocchi che arrivano nel piazzale pesa vengono distinti in base alla destinazione in:

- blocchi da vendere: essi arrivano direttamente dalla cava trasportati tramite pala o dumper, sono siglati, misurati e pesati (previo lavaggio con idropulitrice), ed eventualmente segati alla tagliablocchi esterna in caso occorrono mezze misure per ottimizzare la containerizzazione, oppure per essere squadrate in caso di eccessiva irregolarità o presenza di parti ammalorate; in questa fase è anche effettuato il precollaudo da parte dei tecnici della ditta, che precede il collaudo vero e proprio effettuato dal cliente nel piazzale di stoccaggio finale; terminato il precollaudo il blocco viene posto in stoccaggio o caricato direttamente su autocarro per il cliente tramite il carro ponte esterno;
- blocchi per lastre (spessore 2 cm o 3 cm): essi subiscono le fasi medesime fasi descritte pocanzi, eccezion fatta per il carico, che viene effettuato sui carrelli elettrici su binario. Il blocco interessato viene calato tramite gru a cavalletto sul carrello e poggiato sopra due listelli di legno e fissato e messo a livello tramite malta gessosa: questa fase comprende anche lo sgancio delle funi.

I blocchi che arrivano nel piazzale deposito informi vengono movimentati tramite la gru a cavalletto, e posizionati sui carrelli elettrici su binario, pronti all'ingresso della sezione di produzione delle piastrelle.

6.5.1 Produzione delle lastre (segazione dei blocchi regolari)

Posizionamento del blocco

I blocchi destinati al taglio in lastre, posizionati sugli appositi carrelli elettrici su binario, vengono posti di fronte ad ognuno degli ingressi per i rispettivi tagli ai telai multilama. La velocità di spostamento dei carrelli si può ricavare dalle tabelle di calcolo ed è variabile a seconda della direzione di spostamento (laterale o frontale).

Fase di preparazione al taglio

Una volta che il blocco è posizionato all'interno del telaio avviene quanto segue:

- ✓ messa in quota del blocco a contatto con le lame sollevando il carrello in caso di telaio fisso o abbassando il telaio nel caso sia mobile;
- ✓ fissaggio del blocco al carrello con cunei lignei;
- ✓ ingrassaggio delle guide di scorrimento;
- ✓ chiusura teli laterali anti schizzo;
- ✓ misura della quota di cala;
- ✓ posizionamento della corda di arresto di sicurezza;
- ✓ programmazione dei parametri di taglio dei telai.

Terminate tali operazioni il blocco è pronto per la segazione.

Avvio del taglio

Prima di avviare il taglio viene aperto il circuito idrico dell'acqua di raffreddamento e lubrificazione. Il taglio parte sempre a fine turno e prosegue automaticamente fino ad una cala di arresto intermedia programmata al fine di interrompere l'operazione di taglio la notte e poter procedere al turno della giornata seguente. La velocità di taglio parte da un valore minimo per raggiungere la velocità di regime successivamente.

Ripresa del taglio

All'inizio del turno seguente il blocco, parzialmente segato, va "armato", ossia le lastre vengono separate da spessori metallici larghi quanto lo spessore del taglio, in modo da garantire l'integrità delle stesse una volta ripreso il taglio e ancorate al carrello. Una volta verificata la corretta "armatura" il taglio riprende e prosegue fino alla segazione completa.

Fine del taglio

Quando le lame raggiungono la quota di fondo, o meglio pochi millimetri prima, il taglio giunge alla fine. Si procede al “disarmo”, allo scarto della prima e dell’ultima lastra che solitamente si deteriorano durante il taglio e devono essere scartate; le lastre vengono tenute assieme tramite l’inserimento di cunei lignei tra le sponde del carrello e la superficie delle stesse.

Spostamento del blocco

Il blocco segato in lastre viene spostato tramite il carrello verso il reparto di lucidatura/resinatura/stoccaggio. Lo spostamento avviene secondo le medesime modalità riportate nella fase di posizionamento del blocco.

Identificazione lastre

Questa fase consiste nella numerazione da parte del tecnico responsabile delle lastre e nella eventuale eliminazione di parti ammalorate o deteriorate. Le lastre vengono poi suddivise tramite i distanziatori in pacchi di 10-11, al fine di poter essere movimentate dal carrello alla zona di stoccaggio. In questa fase il blocco iniziale viene registrato con i dati di input (peso, dimensioni, codice identificativo, telaio multilama impiegato per il taglio) e di output (dimensioni e numero di lastre, spessore, scarti, data di arrivo).

Movimentazione lastre verso stoccaggio pre lucidatura/resinatura

Tramite carro ponte interno i pacchi di lastre vengono posizionate su appositi supporti fissi in attesa di ulteriore trattamento o direttamente in vendita.

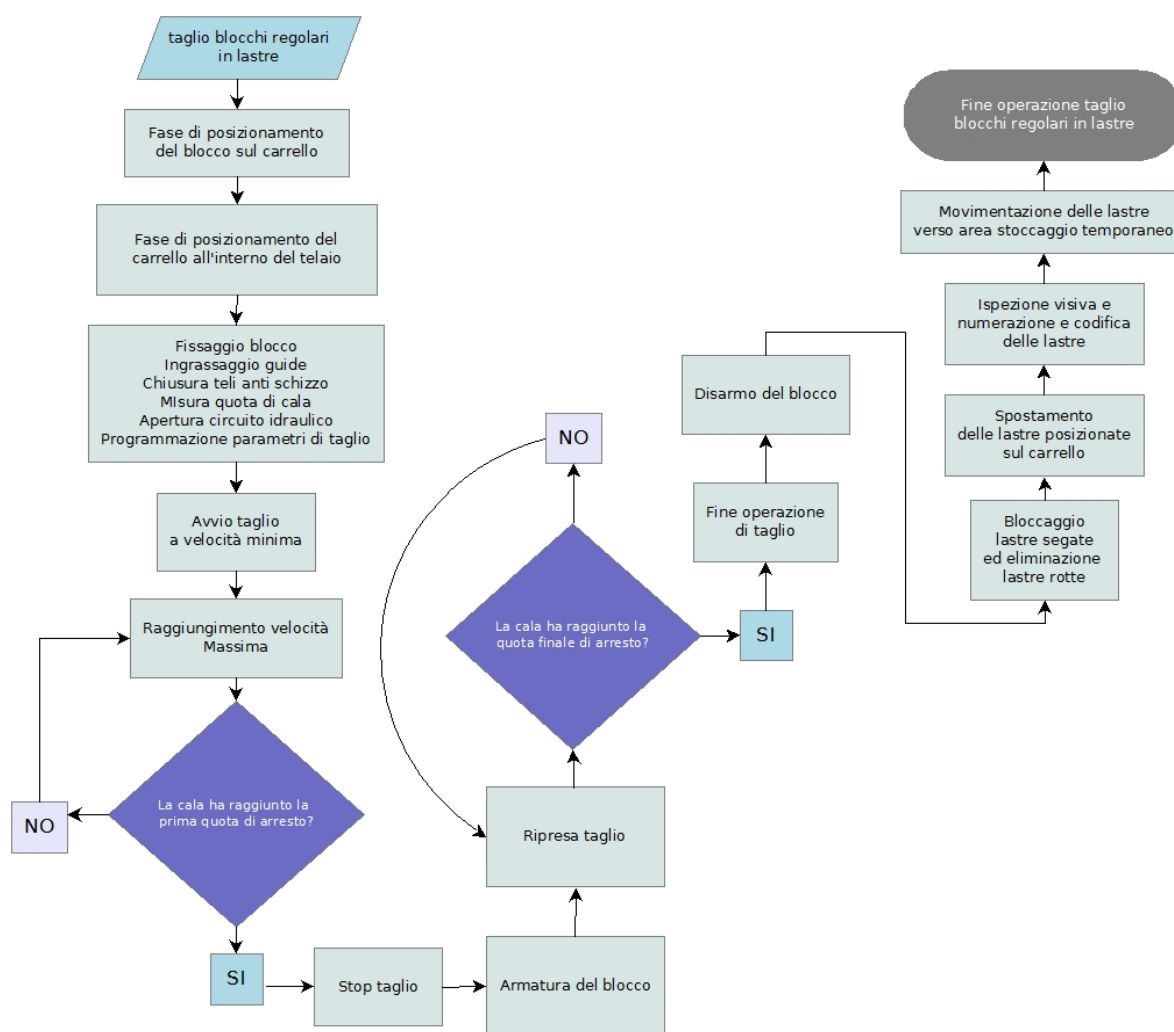


Figura 33 – Diagramma di flusso della fase di segazione dei blocchi regolari

6.5.2 Produzione delle pianelle (segazione dei blocchi informi)

Il taglio dei blocchi, prevalentemente informi, per la realizzazione di pianelle, viene eseguito nell'apposita sezione del capannone. I blocchi arrivano nel piazzale informi, trasportati dalla cava a mezzo pala o dumper, e vengono movimentati tramite apposita gru a ponte esterna da 35 tonnellate. Il blocco viene posizionato sull'apposito carrello che scorre dall'ingresso del reparto verso la tagliablocchi a disco. All'interno del reparto si hanno un totale di 8 macchine per il taglio suddivise in due categorie:

- n. 6 seghe circolari per taglio verticale e orizzontale (lastre da 30 cm di larghezza e spessore variabile) e n. 6 attestatrici per il taglio a misura delle pianelle dalle lastre ricavate; lo spostamento delle lastre dalla sega circolare alla troncatrice avviene manualmente, dato il peso contenuto delle stesse;
- n. 2 seghe circolari per taglio verticale e orizzontale (lastre da 30 cm di larghezza e spessore variabile) e n. 2 attestatrici per il taglio a misura delle pianelle dalle lastre ricavate con spostamento automatico tramite sistema di caricamento a vuoto.

Le pianelle ricavate vengono disposte su pallets in pile a seconda delle misure ricavate e movimentate verso la zona periferica del capannone tramite carrello elevatore e da là, caricate su autocarro o spostate nel piazzale esterno.

La produzione avviene su due turni da 8 ore ciascuno: dalle 05.00 alle 13.00 e dalle 13.00 alle 21.00.

Fase di posizionamento del blocco

I blocchi informi destinati al taglio, posizionati tramite gru a cavalletto sugli appositi carrelli elettrici su binario, vengono posti di fronte ad ognuno degli ingressi per i rispettivi tagli alle tagliablocchi.

Fase di preparazione al primo taglio (tagliablocchi)

Il carrello con il blocco viene traslato verso il piano della tagliablocchi e posizionato alla corretta quota di taglio. Si effettua la misura della lunghezza longitudinale di taglio per il disco verticale e si imposta l'altezza del taglio di base per il disco orizzontale. I parametri geometrici e cinematici vengono inseriti nella consolle di programmazione della macchina.

Avvio del primo taglio

- ✓ taglio verticale: il taglio verticale viene avviato e avanza in maniera automatica da sinistra verso destra;
- ✓ taglio orizzontale: non appena il disco verticale raggiunge la fine corsa, viene avviato il disco orizzontale secondo la direzione inversa a quella del taglio precedente

Fine del primo taglio e fase di carico per il secondo taglio (attestatrice o intestatrice)

Le macchine sono distinte in due tipologie per cui la fase si differenzia come segue:

- ✓ carico automatico: non appena il disco orizzontale si appresta a terminare il taglio, una postazione robotizzata costituita da un braccio di carico munito di ventose si posiziona sulla lastra e la fissa, poi il braccio ruota e posa la lastra appena segata sul nastro della intestatrice;
- ✓ carico manuale: non appena il disco orizzontale si appresta a terminare il taglio, l'operatore prende manualmente la lastra appena segata e la posiziona sul nastro a rulli della intestatrice.

Fase di preparazione al secondo taglio

La lastra, sia che venga caricata in modo automatico, che in modo manuale, viene misurata nuovamente e, stabilite le dimensioni delle pianelle finite, posizionata immediatamente sotto il disco di taglio.

Avvio del secondo taglio

Il taglio verticale viene avviato e la lastra viene segata con la azione dell'operatore secondo le misure prefissate.

Fine del secondo taglio e movimentazione del prodotto

Le pianelle vengono disposte manualmente su pallet in legno, siglate e nastrate.

Spostamento del prodotto finito

I pallets vengono trasportati tramite carrello elevatore verso le apposite zone di stoccaggio.

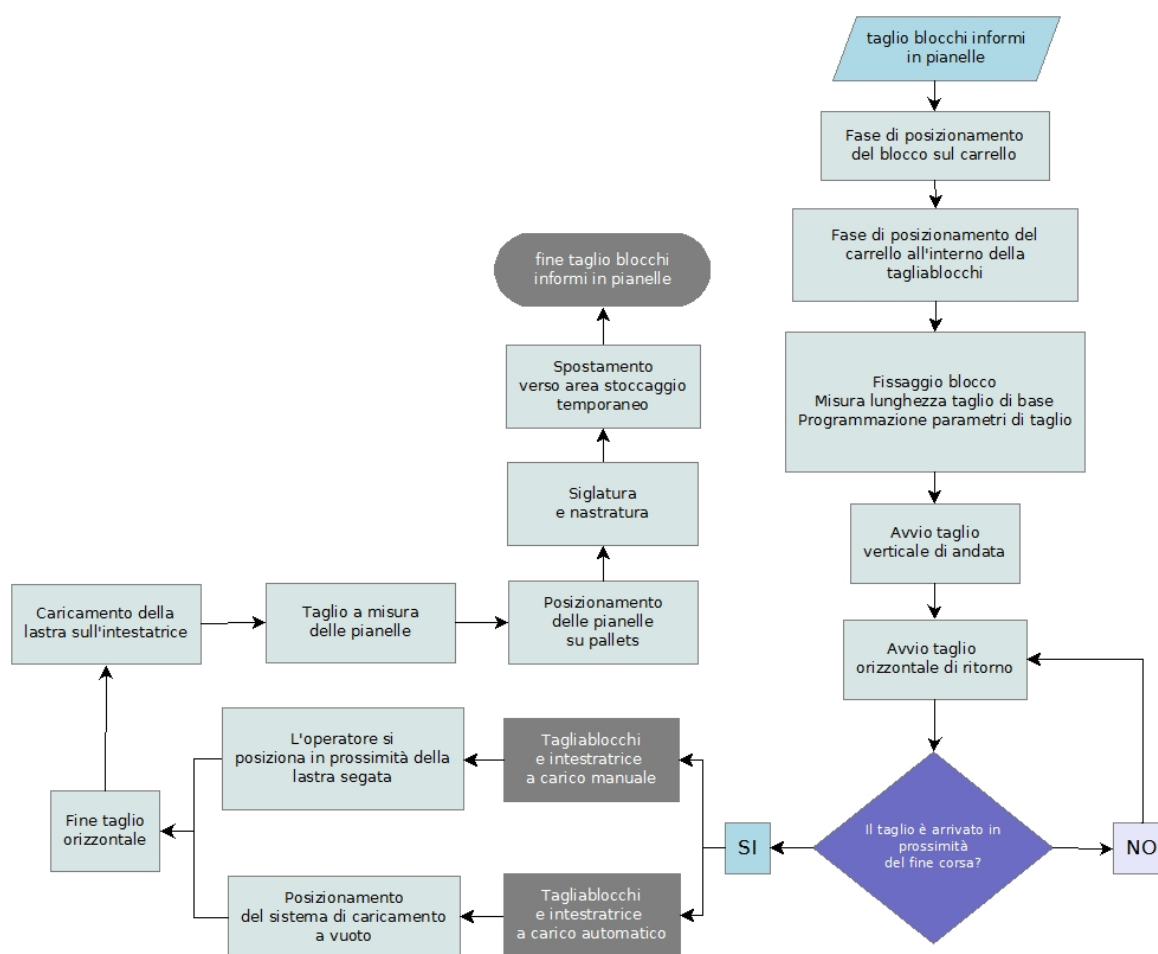


Figura 34 – Diagramma di flusso della fase di segazione dei blocchi informi

6.5.3 Resinatura, retinatura e lucidatura delle lastre

La resinatura viene eseguita allo scopo di conferire alle lastre segate rinforzo meccanico e strutturale, in quanto a causa del ridotto spessore esse potrebbero spezzarsi e necessitano di un trattamento che conferisca loro maggior resistenza. La resinatura viene eseguita anche a scopo di riparazione su lastre già compromesse ma recuperabili. Il trattamento è eseguito con applicazione di rete rinforzante in fibra di vetro e resina epossidica bicomponente. L'operazione avviene manualmente, utilizzando una pistola ricaricabile con cartucce che contengono la resina. Lo spessore dato dalla resinatura contribuisce a creare l'effetto tridimensionale, esaltando la brillantezza e il cromatismo dei colori. La resinatura aumenta la resistenza alle intemperie e ai raggi UV e aumenta la capacità degli adesivi all'abrasione. Nel caso in oggetto la resina è bicomponente: prodotto in senso stretto e indurente. Per l'asciugatura statica a circolazione di aria calda con deumidificazione dell'aria, vengono impiegati forni verticali a piani che assicurano una omogenea essiccazione di tutte le lastre inserite nel forno. Per la catalisi statica delle lastre resinate, vengono impiegati speciali forni verticali a piani, a circolazione di aria calda, che assicurano una ottimale catalisi delle lastre inserite nel forno. Le lastre molto fessurate, specialmente di marmo, possono venire retinate su una faccia, utilizzando un'apposita rete in fibra di vetro. L'operazione viene effettuata su un'apposita stazione della linea di resinatura. La lucidatrice è costituita da una macchina monoblocco costituita da un bancale in acciaio su cui scorre il nastro trasportatore e da un ponte portateste mobile su guide che sposta le teste operatrici sulla lastra nel senso della larghezza. Il carico del materiale è effettuato da un caricatore automatico costituito da un banco ribaltabile a funzionamento idraulico, dalla posizione orizzontale a quella verticale. La lastra è presa attraverso una pinza a pressione fissata al gancio della gru a bandiera e posizionata sul carrello ribaltatore. Lo scarico del materiale è altresì effettuato in maniera automatica con un altro banco ribaltabile identico a quello di carico ma situato in uscita alla lucidatrice. L'impianto di resinatura e retinatura è costituito da una linea composta dalle seguenti parti:

- impianto di caricamento automatico costituito da un robot che permette alle lastre di essere prelevate alla sezione di segazione, capovolte e ruotate di 360° tramite piattaforma girevole automatica;
- forno automatico multipiano dedicato alla disidratazione preliminare (pre resinatura e applicazione rete di rinforzo) e finale;

- banco di pulizia costituente il piano di lavoro sul quale la superficie delle lastre viene dapprima pulita dalle impurità di polvere e detriti tramite spazzola rotante automatica;
- postazione di resinatura sulla quale l'operatore manualmente effettua il fissaggio della rete e l'applicazione della resina;
- banco di retinatura e resinatura costituente il piano di lavoro per le citate operazioni;
- sistema di aspirazione e filtrazione fumi;
- impianto di scaricamento automatico costituito da un robot che permette alle lastre di essere prelevate alla sezione di segazione, capovolgere e ruotare di 360°.

Il processo di lucidatura delle lastre avviene tramite l'azione di 16 teste, ognuna della quali monta 7 utensili abrasivi di natura e grana diversa a seconda della fase. I parametri di funzionamento della macchina sono i seguenti:

- velocità del nastro (cm/min);
- velocità del ponte (% rispetto alla v. max);
- lunghezza della passata (cm);
- pressione di azione delle teste (bar).

Gli utensili montati sulle teste comprendono le seguenti tipologie:

- pietre abrasive: caratterizzate da sfere di materiale abrasivo concentrate in una matrice sintetica e devono essere disposte per dimensione dei grani decrescente, ovvero per numero di sfere per pollice quadrato crescente;
- diamanti: PCD (policristallino, grani di dimensioni micrometriche dispersi in matrice metallica, solitamente cobalto);
- lucidi: abrasivi impiegati per la finitura, contraddistinti da tre tipologie differenti ossia duro, medio e tenero;
- pulitore: costituito da una pietra morbida destinata a rendere la superficie della lastra specchiabile.

La fase di resinatura viene svolta sui 3 turni giornalieri che vanno dalle 5.00 alle 13.00, dalle 13.00 alle 21.00 e dalle 21.00 alle 5.00, mentre per la fase di lucidatura si utilizza il turno giornaliero che va dalle 7.00 alle 13.00 e dalle 14.00 alle 16.00. La differenza è data dal fatto che la resinatura è un processo molto più lento rispetto alla lucidatura (per una lastra intera la fase di resinatura richiede circa 8 ore, mentre la fase di lucidatura

solo 30 minuti) in quanto il processo di disidratazione e asciugatura effettuato presso il forno possiede tempi di lavorazione relativamente lunghi rispetto alle altre fasi.

Prima lavorazione: fase di pre – disidratazione:

La lastra viene inserita all'interno della camera di stoccaggio e polimerizzazione alla temperatura massima 45° C seguendo le seguenti operazioni:

- tramite carro ponte interno i pacchi di lastre vengono portati in posizione sul ponte girevole pronto per iniziare la lavorazione;
- il ponte girevole dopo aver effettuato una rotazione di 180 gradi è pronto per fornire le lastre grezze al robot, che preleva una lastra alla volta tramite una serie di ventose e la posiziona su un nastro trasportatore;
- una volta che la lastra grezza è stata posta sul nastro trasportatore in maniera automatica entra nel forno per il preriscaldamento al fine che la fase successiva, ovvero la posa della resina, sia maggiormente scorrevole.

Prima lavorazione: posa della rete e resinatura

Una volta uscita dal forno preriscaldata, la lastra è resinata manualmente da un operatore che taglia a misura la rete rinforzante in fibra di vetro tramite taglierino e sparge tramite una spatola la resina epossidica bicomponente su una faccia della lastra.

Prima lavorazione: processo di asciugatura

Terminata la posa della resina sulla faccia della lastra essa è pronta per entrare nel forno per l'asciugatura e attraversare i primi 9 piani.

Prima lavorazione: processo di catalisi

Il procedimento è analogo all'asciugatura a differenza che in questo caso la lastra deve attraversare 31 piani.

Movimentazione della lastra e preparazione alla seconda lavorazione

Una volta terminata la catalisi la lastra abbandona il forno e tramite il nastro trasportatore ritorna al robot. Successivamente la lastra lavorata su una faccia, dal nastro trasportatore vengono prese dal robot tramite le ventose e riposizionate sul ponte girevole.

Seconda lavorazione: ripetizione delle fasi

Una volta posizionate nel ponte girevole le lastre vengono movimentate manualmente dall'operatore tramite l'ausilio del carro ponte interno e vengono sistemate in modo che possa essere resinata l'altra faccia della lastra ancora grezza. Questa seconda lavorazione viene detta "in piano". La lavorazione e il procedimento risulta precisa identica alla prima se non per il fatto che nella faccia grezza della lastra in questo caso viene resinata senza la posa della rete.

Movimentazione della lastra e stagionatura

Una volta terminata la catalisi la lastra nuovamente abbandona il forno e tramite il nastro trasportatore ritorna al robot e da qui nuovamente al ponte girevole.

Dal ponte girevole le lastre vengono movimentate tramite carro ponte interno e posizionate sui cavalletti fissi. Il pacco di lastre dai cavalletti fissi vengono movimentate sempre tramite carro ponte interno sui cavalletti mobili. Ricordo che il pacco di lastre è formato solitamente da 10/11 lastre nel caso di spessori di 2 cm, mentre se lo spessore è di 3 cm il pacco sarà formato da 6/7 lastre. Tramite carrello elevatore vengono prelevati i cavalletti mobili e trasportati in prossimità dell'area di lucidatura. Successivamente la movimentazione del pacco di lastre viene eseguita tramite carro ponte interno dai cavalletti mobili a quelli fissi. Qui le lastre devono stazionare almeno per 24 ore per fare in modo che la resina si solidifichi del tutto prima di procedere con la lucidatura. Dopo tale intervallo di tempo le lastre sono pronte per essere lucidate

Fase di lucidatura

Si distinguono in questa fase le seguenti operazioni descritte di seguito:

- ✓ Movimentazione delle lastre: le lastre vengono movimentate tramite carro ponte interno dai cavalletti fissi al ponte girevole simile a quello utilizzato prima per la fase della resinatura.
- ✓ Permanenza della lastra su nastro trasportatore: in questa fase la lastra viene trasportata fino all'ingresso della macchina lucidatrice.
- ✓ Lucidatura della lastra (un pezzo alla volta). La lastra, dall'ingresso della macchina all'uscita, attraversa 16 step operativi oltre all'operazione di spazzolatura finale organizzati di norma come indicato nella tabella che segue.

Tabella 4 - Configurazione tipica operativa della lucidatrice

<i>Step</i>	<i>N° pietre per testa</i>	<i>Descrizione</i>
1	7	Pietra abrasivo a dimensione della grana grossa
2	7	Pietre diamantate dimensione della grana decrescente
3	7	
4	7	
5	7	
6	7		Pietre abrasive a dimensione della grana decrescente
7	7	
8	7	
9	7	
10	7	
11	7	
12	7	
13	7	Abrasivo lucidante duro
14	7	Abrasivo lucidante medio
15	7	Abrasivo lucidante tenero
16	7	Pulitore morbido (saponetta)
Spazzolatura	0	Abrasivi flessibili

La sequenza degli step operativi descritti varia a seconda delle esigenze di mercato e della sensibilità dell'esperto operatore; la macchina lucidatrice accetta lastre con spessori che vanno da un minimo di 1 cm a un massimo di 10 cm.

- ✓ Movimentazione lastra su nastro trasportatore: terminata la lucidatura la lastra viene trasportata tramite nastro trasportatore dall' uscita della lucidatrice al robot.
- ✓ Movimentazione della lastra dal ponte girevole al nastro trasportatore: dal ponte girevole una lastra per volta viene acchiappata dal robot tramite le solite ventose e posta sul nastro trasportatore.
- ✓ Movimentazione della lastra dal robot al cavalletto fisso: dal nastro trasportatore la lastra viene prelevata dal robot sempre con l'ausilio delle ventose e posizionata sul cavalletto fisso.

Imballaggio

Sistemata sul cavalletto fisso la lastra viene ricoperta con uno strato di cellophane dall'operatore dalla parte del piano in modo che durante il trasporto questa non subisca alcun danno di tipo strutturale o estetico.

Magazzino finale

Terminate le operazioni precedenti avviene il caricamento delle lastre sui mezzi di trasporto tramite il carro ponte interno.

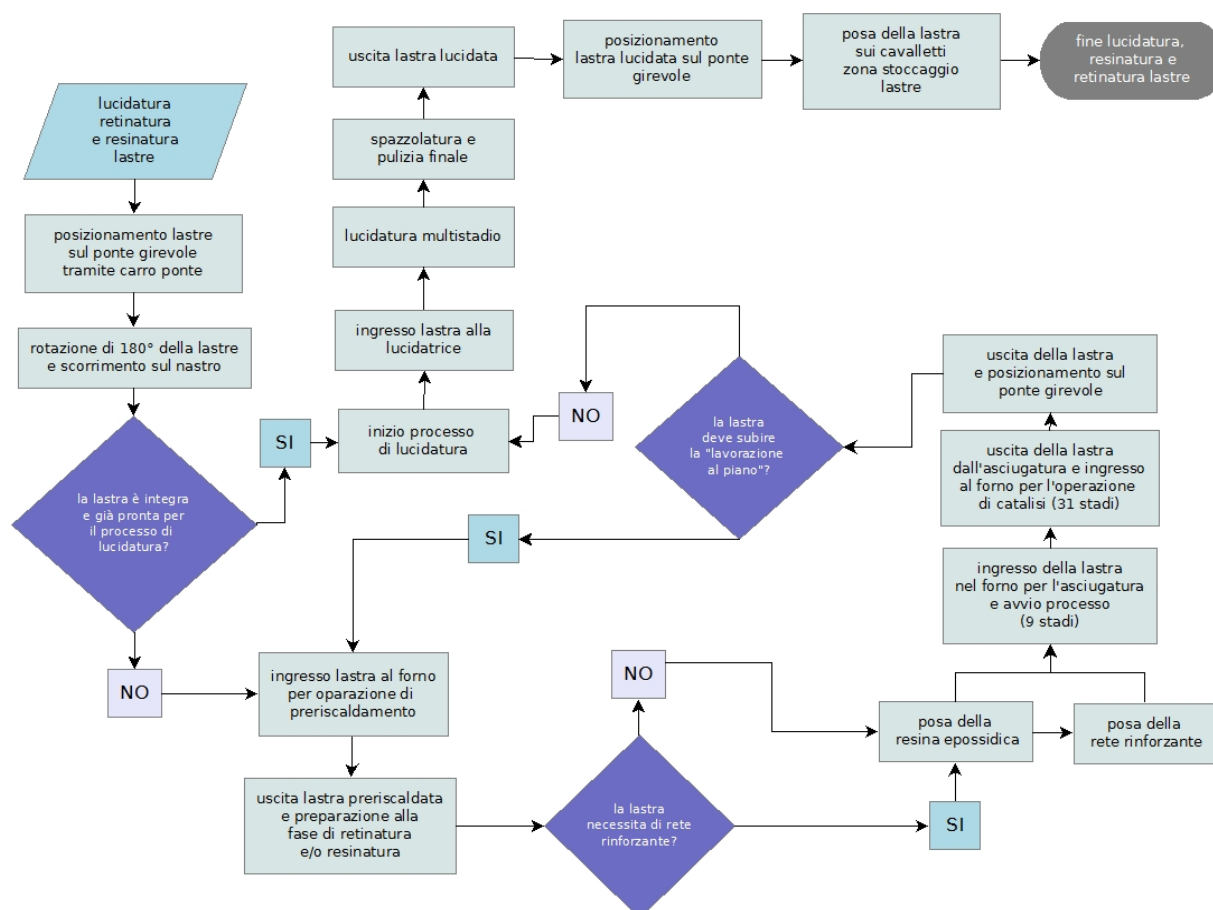


Figura 35 – Diagramma di flusso della fase di retinatura, resinatura e lucidatura

6.6 Macchine e installazioni tecniche

Nel presente paragrafo si effettua la descrizione tecnica di tutte le macchine e le installazioni coinvolte nei processi produttivi precedentemente descritti, riferita ai fattori produttivi consumati.

Segatrice a catena

Viene utilizzata per i tagli orizzontali, durante la fase di distacco della bancata (fase 1), e sia per tagli verticali che orizzontali per il taglio delle fette (fase 2) e dei blocchi (fase 3). Viene montata sulla terna o su binario fisso.



(a)



(b)

Figura 36 – La segatrice a catena durante il taglio su terna (a) e su binario fisso (b)



Figura 37 – La segatrice a catena durante le fasi iniziali del taglio

Il principio di funzionamento che regola il taglio della roccia eseguito con la segatrice è quello dell'asportazione del truciolo. La citata asportazione avviene per azione combinata di utensili disposti con geometrie e successioni ben definite, lungo il perimetro di una catena posta in rotazione da un apparato meccanico. Come illustrato in figura 3b, considerando una sezione nel piano bidimensionale ortogonale alla direzione di avanzamento, l'utensile è caratterizzato da tre angoli caratteristici denominati α , β e

γ . L'angolo β è detto angolo di attacco o di spoglia (rake angle) e dipende dalle caratteristiche della roccia da sottoporre al processo di taglio. Esso assume valori solitamente compresi tra 15° e 20° . L'angolo γ formato dalle due facce di affilatura del tagliente è detto angolo di taglio (wedge angle) e da esso dipende la resistenza meccanica dell'utensile. Assume solitamente valori compresi tra 30° e 45° . L'angolo α infine, è detto angolo di spoglia anteriore, o angolo di rilievo (back clearance angle). Esso assume importanza al fine di ridurre l'energia dispersa sotto di attrito tra la faccia di taglio inferiore e la superficie di roccia scoperta dal taglio. Nello spazio tridimensionale l'utensile deve assumere una forma affusolata nella parte posteriore, al fine di ridurre il più possibile l'attrito generato dallo strisciamento sul solco aperto dalla punta. L'angolo di profilatura prende il nome di angolo di spoglia laterale (side clearance angle) e solitamente assume valori compresi tra 6° e 8° .

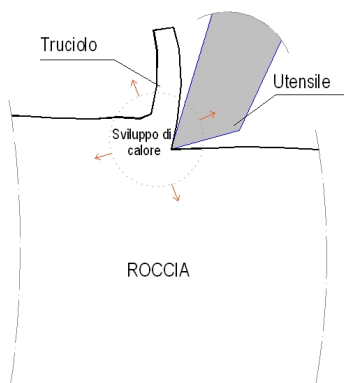


Figura 38 – Principio di asportazione del truciolo

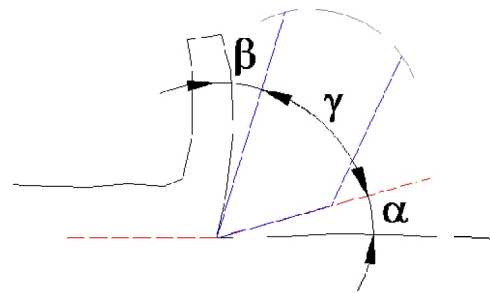


Figura 39 – Rappresentazione geometrica degli angoli caratteristici

Nella segatrice a catena gli inserti impiegati hanno forma parallelepipedica, a sezione rettangolare. Sono vincolati ad un porta inserto mediante bullone, a sua volta collegato tramite viti alle maglie della catena. Ogni inserto possiede 8 spigoli taglienti, i quali possono essere far ruotati periodicamente realizzando così economie di esercizio. Nella figura sottostante è illustrata la sezione trasversale del taglio. Come si può osservare, la sommatoria degli attacchi degli 8 inserti da come risultante un solco dal profilo illustrato.

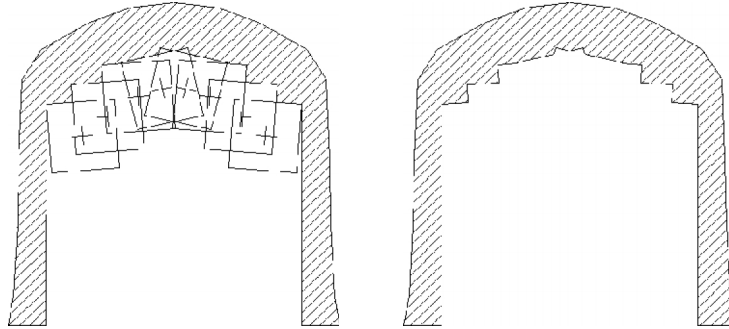
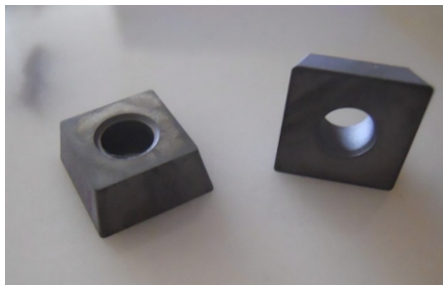


Figura 40 – Sezione trasversale di taglio risultante dall'azione in successione degli inserti

Gli inserti utilizzati (mostrati nelle figure 5) normalmente sono realizzati in carburo di Tungsteno (Widia); in caso di matrici particolarmente dure e abrasive, si possono impiegare quelli a diamante policristallino (PDC – Polycrystalline Diamond Compact).



(a)



(b)

Figura 41 – Inserti in widia (a) e loro disposizione sulla catena (b)

La tagliatrice può effettuare tagli sia verticali sia orizzontali per una profondità massima di 4,20 metri. La macchina è composta da un blocco scorrevole posizionato su di un binario componibile di lunghezza totale variabile a seconda del numero di elementi montati, ognuno lungo 3 metri. Sul blocco scorrevole è posizionato un gruppo ingranaggi a bagno d'olio sul quale è montato il braccio e la catena per effettuare il taglio. Entrambi hanno la possibilità di ruotare di 360° e sono lubrificati tramite un sistema multi-linee alimentato da una pompa per grasso. La catena, costruita in acciaio speciale ad alta resistenza, è azionata da una pompa idraulica con portata variabile, in modo da cambiare la velocità di traslazione in base alla resistenza meccanica del materiale da tagliare.

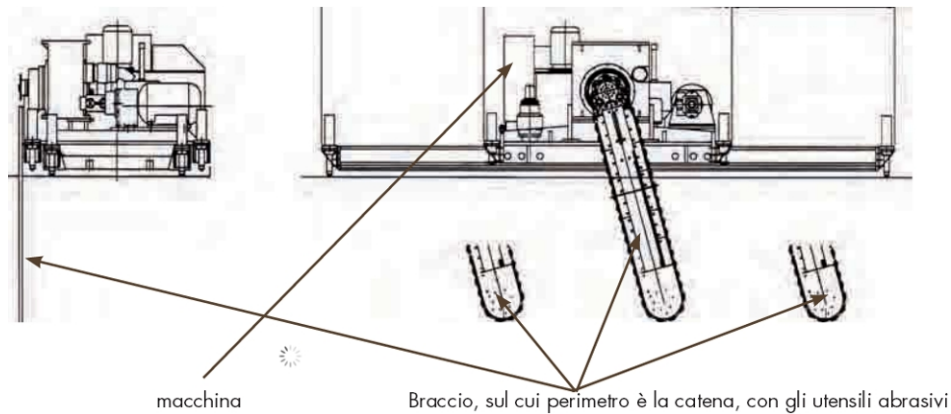


Figura 42 – Schema della segatrice a catena

La catena scorre lungo una guida anch'essa realizzata in acciaio speciale ad alta resistenza. Gli avanzamenti di taglio sono regolabili allo stesso modo tramite un circuito idraulico indipendente. Alle estremità del blocco scorrevole sono posizionati quattro cilindri idraulici stabilizzatori che consentono il livellamento della macchina e permettono di effettuare la traslazione del binario senza l'ausilio di mezzi di sollevamento. L'impianto è dotato di uno scambiatore di calore aria/olio automatico che permette alla macchina di tagliare sia con acqua che a secco. La catena utilizzata per il taglio è in grado di montare inserti di diversa tipologia a seconda della resistenza meccanica del materiale da tagliare. La lama di taglio è composta da un supporto in lega d'acciaio ad alta resistenza. Nella tabella seguente sono indicate le caratteristiche tecniche di progetto della macchina e i fattori produttivi coinvolti.

Tabella 5 – Caratteristiche tecniche della tagliatrice a catena usata in cava su binario fisso

PARAMETRO	MISURA	Unità di misura
Tensione di alimentazione	400	[V]
Corrente assorbita	132,5	[A]
Potenza totale	53	[kW]
Potenza motore elettrico azionamento catena	45	[kW]
Frequenza motore elettrico azionamento catena	50	[Hz]
Potenza motore elettrico centralina impianto idraulico	7,5	[kW]
Frequenza motore elettrico centralina impianto idraulico	50	[Hz]
Potenza motore elettrico pompa del grasso	0,37	[kW]
Frequenza motore elettrico pompa del grasso	50	[Hz]
Capacità serbatoio impianto idraulico	220	[litri]
Capacità serbatoio grasso	18	[kg]
Velocità minima avanzamento catena	0	[m/sec]
Velocità massima avanzamento catena	1,8	[m/sec]
Velocità minima avanzamento taglio	0	[cm/min]
Velocità massima avanzamento taglio	20	[cm/min]
Profondità utile di taglio	4,2	[m]
Larghezza di taglio	0,042	[cm]
Rotazione braccio di taglio	360	[°]
Peso totale macchina (un binario da 3 metri più braccio e catena)	6500	[kg]

Tabella 6 - Parti funzionali e fattori produttivi della tagliatrice a catena su binario fisso

PARTE FUNZIONALE	FATTORE PRODUTTIVO	Unità di misura
Sega	Placchette in widia con bullone	[n]
Sega	Porta inserti con bullone	[n]
Sega	Maglia interna della catena	[n]
Sega	Maglia esterna della catena	[n]
Sega	Bussoletti e chiodino di giunzione delle maglie	[n]
Sega	Guida esterna della lama	[n]
Sega	Guida interna della lama	[n]
Sega	Spessori distanziatori in alluminio della lama	[n]
Sega	Cuscinetti della punta	[n]
Sega	Guide della punta	[n]
Sega	Lubrificante (grasso) della catena	[kg]
Corpo macchina	Olio del riduttore della catena	[litri]
Corpo macchina	Olio del riduttore della pompa	[litri]
Corpo macchina	Olio del riduttore del carrello	[litri]
Corpo macchina	Olio del circuito idraulico	[litri]
Corpo macchina	Filtro olio circuito idraulico	[n]
Corpo macchina	Filtro di recupero olio	[n]
Macchina intera	Potenza elettrica assorbita	[kWh]
Macchina intera	Acqua per la lubrificazione	[m ³]
Macchina intera	Grasso per lubrificazione generale	[kg]

Nel caso della segatrice montata su terna, il gruppo di taglio, concettualmente identico a quello della macchina precedente, è montato su una macchina trattore, in questo caso una terna, la quale può operare in maniera autonoma con l'ausilio di un singolo operatore e può spostarsi su tratti impervi e zone difficilmente raggiungibili. Il gruppo di taglio è in grado di operare a secco, senza ausilio di liquidi di raffreddamento, in modo da poter raggiungere agevolmente zone del cantiere non servite da reti idriche. Le caratteristiche tecniche principale del mezzo sono le seguenti:

Tabella 7 – Caratteristiche tecniche della tagliatrice a catena usata in cava su terna

PARAMETRO	MISURA	Unità di misura
Capacità serbatoio grasso	4,5	[kg]
Velocità del pignone della catena	36	[giri/min]
Consumo teorico di grasso	7,8	[cc/min]
Consumo teorico di carburante (su 8 h/lavorative)	30 – 35	[litri/gg]
Velocità minima avanzamento taglio	5	[cm/min]
Velocità massima avanzamento taglio	20	[cm/min]
Corsa verticale testa porta braccio	2117	[mm]
Corsa orizzontale testa porta braccio	2113	[mm]
Profondità utile di taglio	3,4	[m]
Larghezza di taglio	0,038	[cm]
Rotazione braccio di taglio	90	[°]
Peso totale macchina (un binario da 3 metri più braccio e catena)	2500	[kg]
Dimensione massima del blocco da tagliare (h)	2	[m]
Dimensione massima del blocco da tagliare (L)	3,4	[m]

Tabella 8 – Parti funzionali e fattori produttivi della tagliatrice a catena su terna

PARTE FUNZIONALE	FATTORE PRODUTTIVO	Unità di misura
Sega	Placchette in widia con bullone	[nr]
Sega	Porta inserti con bullone	[nr]
Sega	Maglia interna della catena	[nr]
Sega	Maglia esterna della catena	[nr]
Sega	Bussoletti e chiodino di giunzione delle maglie	[nr]
Sega	Guida esterna della lama	[nr]
Sega	Guida interna della lama	[nr]
Sega	Spessori distanziatori in alluminio della lama	[nr]
Sega	Cuscinetti della punta	[nr]
Sega	Guide della punta	[nr]
Sega	Lubrificante (grasso) della catena	[kg]
Corpo macchina	Olio del riduttore della testa	[litri]
Corpo macchina	Olio del riduttore del gruppo di traslazione	[litri]
Corpo macchina	Olio del circuito idraulico	[litri]
Corpo macchina	Filtro olio circuito idraulico	[nr]
Corpo macchina	Filtro di recupero olio	[nr]
Terna	Acqua per la lubrificazione	[litri]
Terna	Grasso per lubrificazione generale	[kg]
Terna	Gasolio	[litri]
Terna	Olio ponti ruote	[litri]
Terna	Olio circuito idraulico terna	[litri]
Terna	Filtro aria condizionata	[nr]
Terna	Filtri aria (nr. 2)	[nr]
Terna	Olio motore terna	[litri]
Terna	Filtro olio motore terna	[nr]
Terna	Filtro gasolio	[nr]
Terna	Filtro separatore acqua/grasso	[nr]
Terna	Pneumatici	[nr]

Macchina a filo diamantato

Nella configurazione di coltivazione esaminata, la tecnologia di taglio tramite filo diamantato viene utilizzata per effettuare il taglio verticale necessario al distacco della bancata.

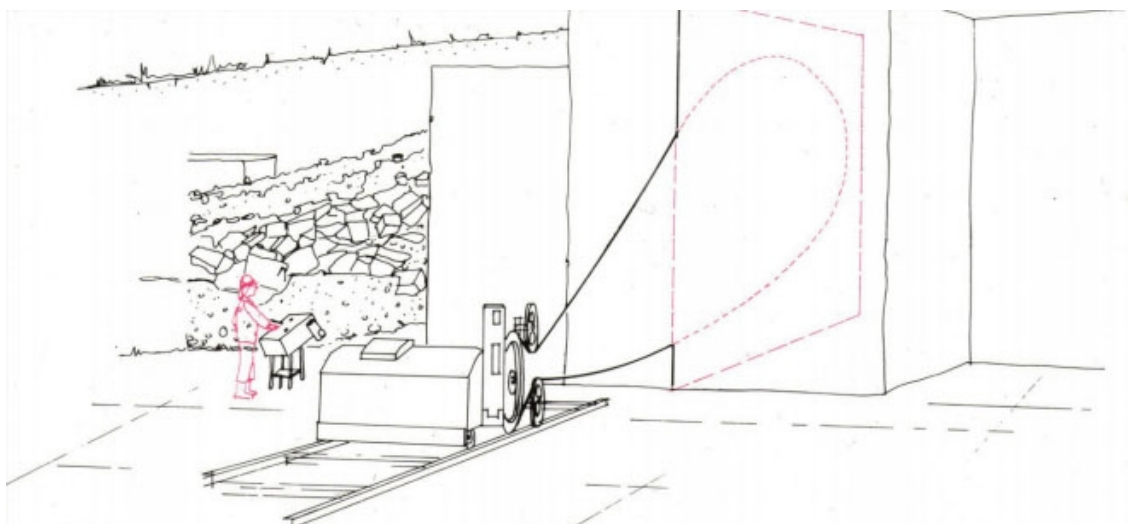


Figura 43 – Configurazione di taglio al piede della bancata

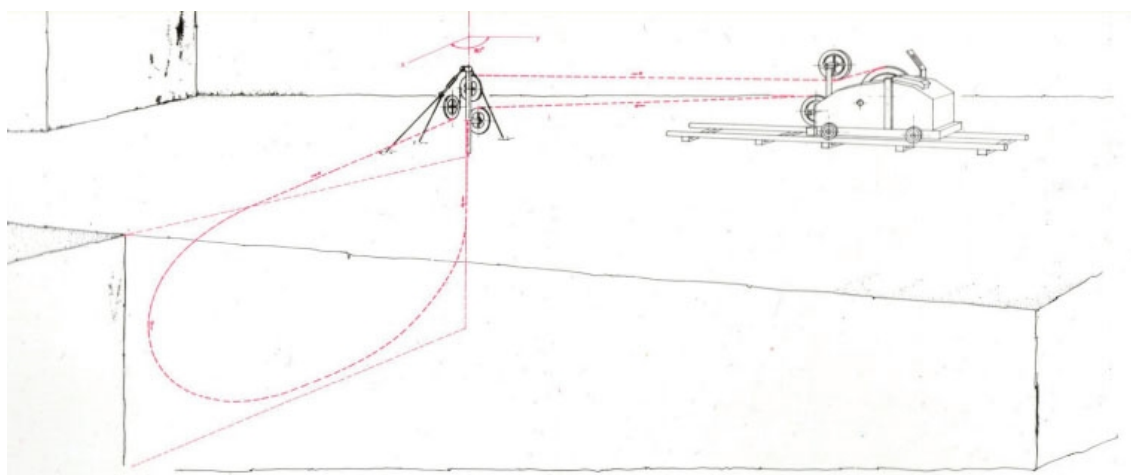


Figura 44 – Configurazione di taglio superiore

Il taglio avviene ad opera delle perline di diamante sintetico inserite in un filo di acciaio. Il filo diamantato è avvolto ad anello chiuso tra due pulegge di rinvio, le quali sono montate su una colonna fissa in acciaio, e il volano del gruppo motore. La rotazione del volano e delle pulegge e la traslazione lungo il binario di scorrimento del gruppo motore, consente il taglio del blocco da parte del filo diamantato.



(a)



(b)

Figura 45 – (a) Operazione di taglio verticale; (b) particolare della puleggia di rinvio

L'efficienza dell'operazione di taglio è condizionata dai parametri velocità e tensione del filo. Il motore volano principale è regolato da un sistema ad inverter che permette di regolare la velocità e la tensione del filo diamantato, consentendo di ridurre i picchi di assorbimento elettrico, il consumo del filo e ottimizzare la velocità areale di taglio. Le perline utilizzate per il taglio sono del tipo impregnato e presentano geometria specifica per ottimizzare l'efficienza del processo.



Figura 46 – Filo diamantato per marmo (Testa M., 2002)

I parametri geometrici del filo sono il diametro esterno delle perline, la spaziatura (numero di perline/metro lineare) e il numero di inserti per superficie. Le perline sono montate sul cavetto e ripartite tramite distanziali a molla. Il cavetto è flessibile a trefoli, solitamente in spezzoni da 5 metri. Le giunzioni sono effettuate tramite giunti a pressione in ferro o rame.

Tabella 9 – Caratteristiche tecniche della macchina a filo diamantato

PARAMETRO	MISURA	Unità di misura
Sistema di posizionamento	manuale	-
Sistema di avanzamento	cremagliera	-
Sistema di rotazione volano	elettromagnetica	-
Sistema di posizionamento volano	idraulico	-
Sistema di traslazione	idraulico	-
Tensione di alimentazione	380	[V]
Corrente assorbita	118,42105	[A]
Potenza motore elettrico testa	45	[kW]
Frequenza motore elettrico testa	50	[Hz]
Potenza motore elettrico traino/tensionamento	0,6	[kW]
Frequenza motore elettrico traino/tensionamento	50	[Hz]
Potenza motore elettrico rivoluzione puleggia	0,55	[kW]
Frequenza motore elettrico rivoluzione puleggia	50	[Hz]
Potenza motore elettrico traslazione puleggia	0,55	[kW]
Frequenza motore elettrico traslazione puleggia	50	[Hz]
Diametro puleggia	0,8	[m]
Diametro volanetti guida	0,35	[m]
Velocità del filo	40	[m/sec]
Velocità di posizionamento della macchina	0,9	[m/sec]
Consumo d'acqua teorico per il taglio	0,4	[litri/sec]

Tabella 10 – Parti funzionali e fattori produttivi della macchina a filo diamantato

PARTE FUNZIONALE	FATTORE PRODUTTIVO	Unità di misura
Filo di taglio	Filo	[m]
Filo di taglio	Perline	[nr]
Filo di taglio	Acqua per lubrificazione	[litri]
Gruppo macchina	Olio del circuito idraulico di frizione	[litri]
Gruppo macchina	Grasso per lubrificazione generale	[kg]
Gruppo macchina	Corrente elettrica assorbita	[A]
Gruppo macchina	Tensione elettrica utilizzata	[V]
Gruppo macchina	Potenza elettrica assorbita	[W]

Perforatrice

Le perforatrici vengono impiegate per la realizzazione dei fori guida per il filo diamantato. Le tipologie attualmente in uso sono due, differenziate in base al principio di funzionamento descritto di seguito.

1. Colonna
2. Testa di rotazione
3. Gruppo comandi
4. Centralina oleodinamica
5. Carrello di traino
6. Controvento
7. Stabilizzatori
8. Asola di ancoraggio
9. Timone guida

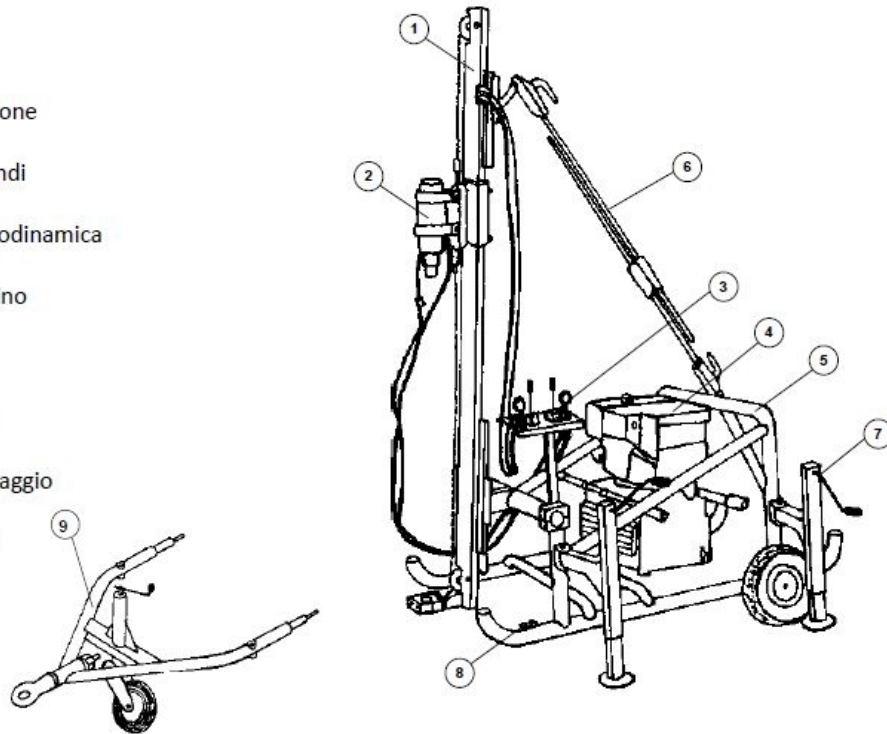


Figura 47 – Schema guida della perforatrice (a funzionamento idraulico o elettrico)

✓ *Perforatrice idraulica*

Questa perforatrice, a funzionamento idraulico, è equipaggiata da un motore a scoppio a 22 Hp. L'avanzamento durante la perforazione avviene tramite un pistone idraulico con velocità regolabile, che assicura un avanzamento costante e senza perdite di potenza. Una doppia guida cilindrica assicura il mantenimento della direzione durante la fase di perforazione, annullando qualsiasi errore di deviazione. La rotazione della testa avviene tramite motore idraulico comandato dalla centralina idraulica. Possono essere eseguite perforazioni da 90 – 105 mm per una profondità massima di 40 metri con martello a fondo foro. E' possibile montare un martello idraulico per fioretti. Il sistema di perforazione è montato su un mini trasportatore a cingoli avente le seguenti caratteristiche tecniche:

Tabella 11 – Caratteristiche tecniche della perforatrice e del mini trasportatore

PARAMETRO	MISURA	Unità di misura
Peso a vuoto	420	[kg]
Peso totale	480	[kg]
Peso massimo	550	[kg]
Portata	700	[kg]
Potenza motore Honda GX 270	9	[hp]
Velocità massima	2,3 – 3,2	[km/h]
Pendenza massima superabile	46	[%]

Tabella 12 – Parti funzionali e fattori produttivi della perforatrice e del mini trasportatore

PARTE FUNZIONALE	FATTORE PRODUTTIVO	Unità di misura
Motore mini trasportatore	Olio motore	[litri]
Motore mini trasportatore	Carburante	[litri]
Circuito idraulico	Olio idraulico	[litri]
Motore mini trasportatore	Filtro olio	[nr]
Circuito idraulico	Filtro olio	[nr]

✓ *Perforatrice elettrica*

Questa perforatrice sfrutta la rotazione elettrica e l'avanzamento idraulico mediante guide in acciaio. Il modello in oggetto, con capacità di perforazione da 90 a 205 mm, può essere dotata di utensile cavo speciale per l'estrazione di carote e campioni di roccia.

Tabella 13 – Caratteristiche tecniche della perforatrice elettrica

PARAMETRO	MISURA	Unità di misura
Potenza motore elettrico	7,5	[kW]
Diametro utensili	90 – 150 – 205	[mm]
Diametro aste	80	[mm]
Aste di perforazione	1.250	[mm]

Taglia blocchi

Viene utilizzata per la riquadratura dei blocchi. E' costituita da un telaio monofilo per la squadratura dei blocchi ed il taglio di lastre, caratterizzato da due volani principali di grande diametro (2,5 m oppure 2 m, a seconda dell'altezza massima di taglio desiderata) per massimizzare la resa e la durata del filo diamantato. Il tensionamento del filo diamantato è realizzato con opportuno sistema idraulico.

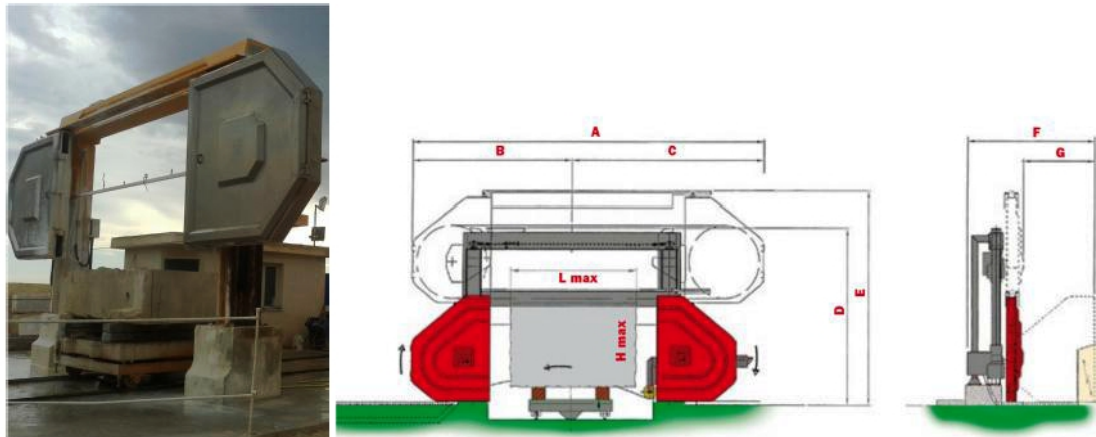


Figura 48 – Immagine e schema della macchina taglia blocchi a filo diamantato

Tabella 14 – Caratteristiche tecniche della taglia blocchi a filo diamantato

PARAMETRO	MISURA	Unità di misura
Tensione di alimentazione	380	[V]
Corrente assorbita	118,4	[A]
Potenza motore elettrico testa	45	[kW]
Frequenza motore elettrico testa	50	[Hz]
Potenza motore elettrico traino/tensionamento	0,6	[kW]
Frequenza motore elettrico traino/tensionamento	50	[Hz]
Potenza motore elettrico rivoluzione puleggia	0,55	[kW]
Frequenza motore elettrico rivoluzione puleggia	50	[Hz]
Potenza motore elettrico traslazione puleggia	0,55	[kW]
Frequenza motore elettrico traslazione puleggia	50	[Hz]
Diametro volano	1,8	[m]
Velocità del filo	40	[m/sec]
Consumo d'acqua teorico per il taglio	0,4	[litri/sec]

Tabella 15 – Parti funzionali e fattori produttivi della macchina a filo diamantato

PARTE FUNZIONALE	FATTORE PRODUTTIVO	Unità di misura
Filo di taglio	Filo	[m]
Filo di taglio	Perline	[nr]
Filo di taglio	Acqua per lubrificazione	[litri]
Gruppo macchina	Olio del circuito idraulico	[litri]
Gruppo macchina	Grasso per lubrificazione generale	[kg]
Gruppo macchina	Corrente elettrica assorbita	[A]
Gruppo macchina	Tensione elettrica utilizzata	[V]
Gruppo macchina	Potenza elettrica assorbita	[W]

Escavatore

Viene utilizzato per lo spostamento dei materiali in cantiere e il caricamento degli autocarri, se attrezzato con benna a cucchiaio, e per il distacco e ribaltamento della bancata se attrezzato con artiglio o ripper.



Figura 49 – Escavatore impegnato in operazioni di carico (a) e spostamento dei blocchi (b)

Tabella 16 – Caratteristiche tecniche degli escavatori

PARAMETRO	MISURA	Unità di misura
Potenza netta al volante	175	[kW]
Cilindrata	7	[litri]
Alesaggio	105	[mm]
Corsa	135	[mm]
Peso operativo	29.753	[kg]
Massimo sforzo alla sbarra	247	[kN]
Velocità massima	5,1	[km/h]
Pendenza massima superabile	30 / 70	[°]/[%]

Tabella 17 – Parti funzionali e fattori produttivi degli escavatori

PARTE FUNZIONALE	FATTORE PRODUTTIVO	Unità di misura
Corpo macchina	Acqua per la lubrificazione	[litri]
Corpo macchina	Grasso per lubrificazione generale	[kg]
Corpo macchina	Gasolio	[litri]
Corpo macchina	Olio circuito idraulico	[litri]
Corpo macchina	Filtro aria condizionata	[nr]
Corpo macchina	Filtri aria	[nr]
Corpo macchina	Olio motore	[litri]
Corpo macchina	Filtro olio motore	[nr]
Corpo macchina	Filtro gasolio	[nr]
Corpo macchina	Filtro separatore acqua/grasso	[nr]
Corpo macchina	Pattini	[nr]
Corpo macchina	Rulli	[nr]

Pala meccanica

Viene utilizzata per effettuare lo spostamento dei blocchi allo stabilimento per la lavorazione, il caricamento del materiale sugli autocarri e la preparazione del letto di materiale sciolto per lo smorzamento dell'effetto di caduta delle fette.



(a)



(b)

Figura 50 – Pala gommata impegnata nella movimentazione dei blocchi (a) e nello sgombero sfridi (b)

Tabella 18 – Caratteristiche tecniche della pala meccanica

PARAMETRO	MISURA	Unità di misura
Potenza netta nominale	126	[kW]
Alesaggio	105	[mm]
Corsa	127	[mm]
Cilindrata	6,6	[litri]
Coppia netta	802	[N·m]
Carico statico di ribaltamento	9.527	[kg]
Angolo di articolazione	40	[°]
Velocità massima	40	[km/h]

Tabella 19 – Parti funzionali e fattori produttivi della pala meccanica

PARTE FUNZIONALE	FATTORE PRODUTTIVO	Unità di misura
Corpo macchina	Acqua per la lubrificazione	[litri]
Corpo macchina	Grasso per lubrificazione generale	[kg]
Corpo macchina	Gasolio	[litri]
Corpo macchina	Olio ponti ruote	[litri]
Corpo macchina	Olio circuito idraulico	[litri]
Corpo macchina	Filtro aria condizionata	[nr]
Corpo macchina	Filtri aria	[nr]
Corpo macchina	Olio motore	[litri]
Corpo macchina	Filtro olio motore	[nr]
Corpo macchina	Filtro gasolio	[nr]
Corpo macchina	Filtro separatore acqua/grasso	[nr]
Corpo macchina	Pneumatici	[nr]

Dumper e autocarro

Viene utilizzato per lo spostamento dei materiali, dai blocchi trasportati allo stabilimento per la lavorazione, fino agli sfridi di lavorazione necessari alla formazione del letto di caduta.



Figura 51 – Dumper in fase di trasporto (a) e autocarro in fase di preparazione del letto di caduta (b)

Tabella 20 – Caratteristiche tecniche del dumper/autocarro

PARAMETRO	MISURA	Unità di misura
Potenza massima	252	[kW]
Cilindrata	9,4	[litri]
Velocità massima	53	[km/h]
Capacità di carico	28.000	[kg]
Volume del cassone (a raso)	14	[m ³]
Volume del cassone (colmo)	18,1	[m ³]
Peso netto	23.060	[kg]
Angolo di ribaltamento	70	[°]

Tabella 21 – Parti funzionali e fattori produttivi del dumper/autocarro

PARTE FUNZIONALE	FATTORE PRODUTTIVO	Unità di misura
Corpo macchina	Acqua per la lubrificazione	[litri]
Corpo macchina	Grasso per lubrificazione generale	[kg]
Corpo macchina	Gasolio	[litri]
Corpo macchina	Olio ponti ruote	[litri]
Corpo macchina	Olio circuito idraulico	[litri]
Corpo macchina	Filtro aria condizionata	[nr]
Corpo macchina	Filtri aria	[nr]
Corpo macchina	Olio motore	[litri]
Corpo macchina	Filtro olio motore	[nr]
Corpo macchina	Filtro gasolio	[nr]
Corpo macchina	Filtro separatore acqua/grasso	[nr]
Corpo macchina	Pneumatici	[nr]

Compressore

Il compressore provvede a fornire aria compressa per le utenze mobili in cantiere, principalmente gli avvitatori pneumatici impiegati per il serraggio dei bulloni dei sistemi di avanzamento delle segatrici e delle perforatrici pneumatiche.



Figura 52 – Compressore e tubazione di collegamento alle utenze

Tabella 22 – Caratteristiche tecniche del compressore

PARAMETRO	MISURA	Unità di misura
Pressione di esercizio	7	[bar]
Potenza motore	19,4	[kW]
Potenza elettrica fornita trifase	16	[kW]

Tabella 23 – Parti funzionali e fattori produttivo del compressore


PARTE FUNZIONALE	FATTORE PRODUTTIVO	Unità di misura
Compressore	Olio	[litri]
Motore diesel	Gasolio	[litri]
Motore diesel	Filtro gasolio	[n]
Motore diesel	Filtro olio	[n]
Motore diesel	Olio motore	[litri]
Linea aria compressa	Lubrificante	[litri]

Gru a ponte

MARCA OFFICINE MECCANICHE VENTURINI			Impiegato per la movimentazione dei materiali all'interno del capannone dello stabilimento.	
MODELLO	6 TON			
COMPONENTI	CARROPONTE BITRAVE			
CARATTERISTICHE	Portata	6.000	[kg]	
	Scartamento	19,15	[m]	
	Corsa verticale del gancio	7	[m]	
	Diametro ruote ponte	200	[mm]	
	Larghezza rotaia	40	[mm]	
	Interasse travi	1.740	[mm]	
	Larghezza ala	400	[mm]	
	Tensione di alimentazione	380	[V]	
	Tensione comandi	48	[V]	
COMPONENTI	PARANCO			
	Diametro primitivo tamburo	260	[mm]	
	Diametro fune	10	[mm]	
	Tipo di fune	AZN 625 AC AR	-	
	Carico di rottura	8.200	[daN]	
	Numero tiri fune	4	-	
COMPONENTI	CARRELLO DI SOLLEVAMENTO			
	Diametro ruote carrello	160	[mm]	


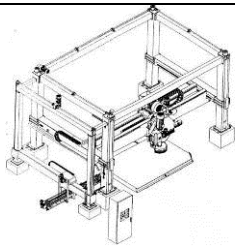
PARAMETRO		SOLLEVAMENTO		TRASLAZIONE CARRELLO		SCORRIMENTO PONTE	
		Principale	Ausiliario	Principale	Ausiliario	Principale	Ausiliario
Velocità	[m/min]	6	1	18	-	20	40
Potenza	[kW]	7,5	1	0,55	-	0,37	0,55
Intermittenza	[R.I.%]	40	10	40	-	40	10

Gru a cavalletto


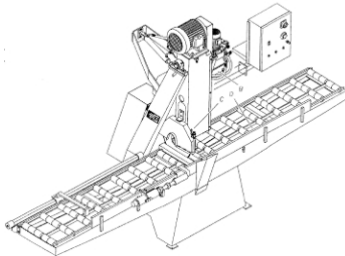
MARCA OFFICINE MECCANICHE VENTURINI			
MODELLO	35 TON		
COMPONENTI	CAVALLETTO BITRAVE		
CARATTERISTICHE	Portata	35.000/5.000 [kg]	
	Scartamento	30 [m]	
	Corsa verticale del gancio	8 [m]	
	Diametro ruote ponte	410 [mm]	
	Larghezza rotaia	50 [mm]	
	Interasse travi	2.410 [mm]	
	Larghezza ala	500 [mm]	
	Tensione di alimentazione	380 [V]	
	Tensione comandi	48 [V]	
COMPONENTI	ARGANO/PARANCO		
	Diametro primitivo tamburo	350/322 [mm]	
	Diametro fune	14/13 [mm]	
	Tipo di fune	AL RES 200 DY FORM/AZN - 825 ACS	
	Carico di rottura	17.200/13.200 [daN]	
	Numero tiri fune	12/2 -	
COMPONENTI	CARRELLO DI SOLLEVAMENTO		
	Diametro ruote carrello	300 [mm]	

PARAMETRO	FUNZIONE	SOLLEVAMENTO		TRASLAZIONE CARRELLO		SCORRIMENTO PONTE		
		Principale	Ausiliario	Principale	Ausiliario	Principale	Ausiliario	
Velocità	[m/min]	Argano	2,6	-	-	-	-	
		Paranco	8	2	15	-	10	40
Potenza	[kW]	Argano	19,5	-	-	-	-	
		Paranco	8	1,7	1,1	-	1,1	4,5
Intermittenza	[R.I.%]	-	40	10	40	-	40	10

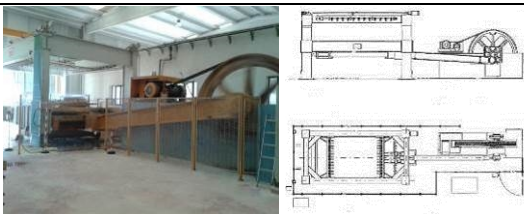
Tagliablocchi

MARCA BOMBIERI VENTURI	&	 
MODELLO	TBV 1600 M/1200M	
CARATTERISTICHE	Potenza motore disco	75 [kW]
	Potenza motore disco orizzontale	15 [kW]
	Potenza motore spostamento trasversale	0,35 [kW]
	Potenza motore spostamento verticale	1,8 [kW]
	Potenza motore avanzamento disco	1,5 [kW]
	Tensione di alimentazione	380 [V]
	Taglio utile	3.500x2.300x2.000 [mm]
	Taglio utile per piano	420 [mm]
	Diametro disco	750x1.300 [mm]
	Consumo acqua corrente	140 [litri/min]
	Consumo aria a 6 bar	15 [litri/min]
	Potenza max installata	94 [kW]

Intestatrice


MARCA BOMBIERI & VENTURI	 	
MODELLO	IBV 600/500	
CARATTERISTICHE	Potenza motore disco	7,5 [kW]
	Potenza motore pompa olio	0,35 [kW]
	Tensione di alimentazione	380 [V]
	Taglio utile	510/610 [mm]
	Diametro disco	400 [mm]
	Consumo acqua corrente	30 [litri/min]
	Potenza max installata	8 [kW]

Telaio multilama

MARCA DIABRETON	
MODELLO	HSB 30/30/120
CARATTERISTICHE	
	Potenza motore elettrico portalame 120 [kW]
	Potenza motore elettrico cala portalame 8 [kW]
	Tensione elettrica 380 [V]
	Dimensione massima dei blocchi 3.300x2.000x2.000 [mm]
	Tensione di funzionamento 380 [V]
	Tipo di utensile Lame diamantate
	Lunghezza lama 4.550 [mm]
	Massimo tiraggio lama 2.200 [kg/m]
	Velocità di cala 8 – 12 [cm/h]
	Capacità vasca olio slitta 25 [litri]
	N° vasche olio slitta 4 [nr]

MARCA FMECCANICA TEMA&FRUGOLI	
MODELLO	FTM 80 C100
CARATTERISTICHE	
	Potenza motore elettrico portalame 90 [kW]
	Potenza motore elettrico cala portalame 8 [kW]
	Tensione elettrica 380 [V]
	Dimensione massima dei blocchi 3.300x2.000x2.000 [mm]
	Tensione di funzionamento 380 [V]
	Tipo di utensile Lame diamantate
	Lunghezza lama 4.550 [mm]
	Massimo tiraggio lama 2.200 [kg/m]
	Velocità di cala 10 – 18 [cm/h]
	Capacità vasca olio slitta 25 [litri]
	N° vasche olio slitta 4 [nr]

Lucidatrice

MARCA FMECCANICA TEMA&FRUGOLI		
MODELLO	FLGM RIVER 15T	
COMPONENTI	Bancale trasporto lastre, struttura sostegno ponte, ponte portateste, trasmissione ponte, testa lucidante, testa porta settori abrasivi, gruppo automazione rilevamento profilo piastre e fine abrasivi	
CARATTERISTICHE	Larghezza massima lastra	2.150 [mm]
	Larghezza minima lastra	700 [mm]
	Lunghezza massima lastra	3.500 [mm]
	Lunghezza minima lastra	1.000 [mm]
	Spessore massimo lastra	100 [mm]
	Spessore minimo lastra	10 [mm]
	Distanza minima fra due lastre in lavorazione	400 [mm]
	Potenza massima motore spostamento trave	11 [kW]
	Potenza motore traslazione nastro	2,2 [kW]
	Potenza motore traslazione barra usura abrasivo	0,37 [kW]
	Potenza motore testa lucidante	11 [kW]
	Potenza motore gruppo ventilatore	3 [kW]
	Motore tende mobili	0,76 [kW]
	Quantità d'acqua depurata necessaria per testa	15 [m ³ /min]
	Pressione impianto pneumatico	4 – 6 [bar]
	Quantità d'aria richiesta per testa	41 [Nlitri/min]
	Tensione di alimentazione	380 [V]
	Numero totale teste	16 -
	Numero di inserti per testa	7 -
	Numero teste diamante	4 -
	Numero teste pietra	8 -
	Numero teste lucido	3 -
	Numero teste pulitore	1 -
	Numero totale spazzole	1 -
	Lubrificazione	Semiautomatica

Linea di resinatura

MARCA SEI srl			
MODELLO	RES 90 LUX CS		
COMPONENTI	Postazione automatica di carico e scarico, , piattaforma girevole, ascensore di carico, rulliera e pianali trasportatori , forno multipiano, banco di pulizia e spazzola rotante, banco di resinatura e retinatura e porta rete di rinforzo, banco di ritocco e finitura, sistema di aspirazione e filtrazione.		
CARATTERISTICHE	Dimensioni totali	60x5,5x2,5	[m]
	Dimensioni pianali trasportatori	350x210	[cm]
	Larghezza postazione retinatura/resinatura	2,20	[m]
	Larghezza massima area di carico/scarico	12	[m]
	Massimo spessore delle lastre	5	[cm]
	Tempo di asciugatura minimo per lastra	60	[min]
	Tempo di polimerizzazione minimo per lastra	120	[min]
	Potenza massima	150	[kW]
	Consumo medio estivo	70	[kWh]
	Consumo medio invernale	100	[kWh]
	Alimentazione impianto	Elettrica/gas	-
	Capacità produttiva nominale	0,2	[lastra/min]
	Temperatura operativa forno	45	[°C]

CAPITOLO 7

Dati rilevati

7.1 Dati della produzione in cava

La raccolta dei dati è consistita nel rilievo dei parametri relativi ai fattori produttivi e alle produzioni ottenute. I dati raccolti sono stati raccolti nell'arco temporale di diversi mesi nel corso dei quali i valori hanno subito fluttuazioni legate a diversi motivi quali fermate tecniche, manutenzioni ordinarie e straordinarie, variazioni delle richieste di mercato e quant'altro riferito alla variabilità legata alla gestione di qualsiasi azienda.

Per tale motivo è sorta la necessità di determinare delle quantità medie da inserire successivamente nei modelli di calcolo per l'ottimizzazione del processo.

Durante l'anno di produzione in cui è stata eseguita la raccolta dei dati sono risultate abbattute un totale di 217 bancate, per un totale di circa 77.000 mc di blocchi, tra regolari e informi. I blocchi regolari sono stati immessi direttamente sul mercato per una percentuale pari all'80%, mentre il restante 20% è stato destinato alla ulteriore lavorazione in stabilimento. Al fine di classificare i blocchi prodotti in funzione delle dimensioni geometriche e commerciali, è stato preso in esame un intervallo temporale di produzione pari a 15 settimane lavorative in stabilimento, durante le quali sono stati rilevati tutti i parametri che hanno consentito di ricostruire la distribuzione in classi dimensionali dei blocchi estratti dalla cava e destinati alla lavorazione.

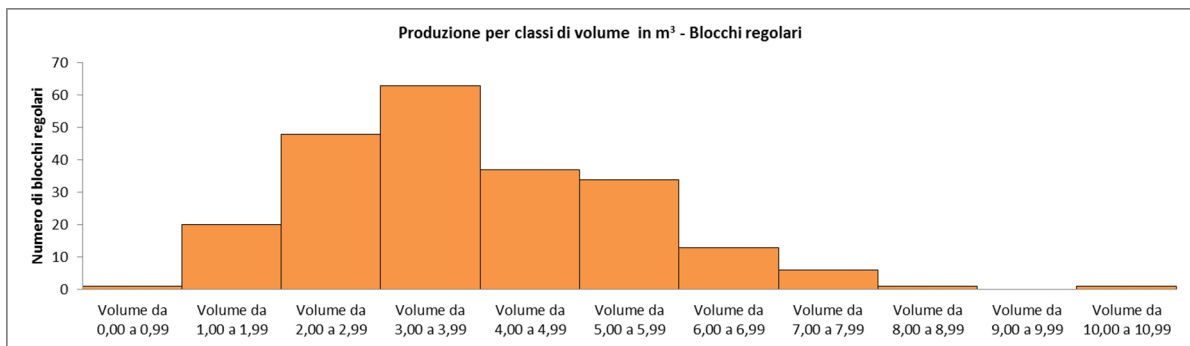


Figura 53 - Distribuzione dei blocchi regolari estratti elaborata per classi di volume

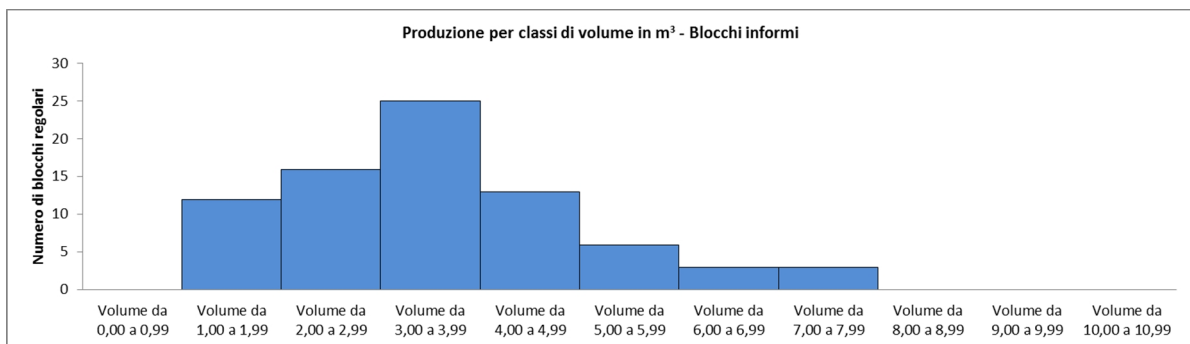


Figura 54 - Distribuzione dei blocchi informi estratti elaborata per classi di volume

Le tabelle seguenti indicano i dati citati relativi sia al volume dei blocchi in m³ che al peso in tonnellate.

Tabella 24 – Distribuzione in classe di volume e peso dei blocchi regolari e informi

Blocchi regolari

Volume	da	0,00	a	0,99	[m ³]	1
Volume	da	1,00	a	1,99	[m ³]	20
Volume	da	2,00	a	2,99	[m ³]	48
Volume	da	3,00	a	3,99	[m ³]	63
Volume	da	4,00	a	4,99	[m ³]	37
Volume	da	5,00	a	5,99	[m ³]	34
Volume	da	6,00	a	6,99	[m ³]	13
Volume	da	7,00	a	7,99	[m ³]	6
Volume	da	8,00	a	8,99	[m ³]	1
Volume	da	9,00	a	9,99	[m ³]	0
Volume	da	10,00	a	10,99	[m ³]	1
Totale blocchi						224

Blocchi informi

Volume	da	0,00	a	0,99	[m ³]	0
Volume	da	1,00	a	1,99	[m ³]	12
Volume	da	2,00	a	2,99	[m ³]	16
Volume	da	3,00	a	3,99	[m ³]	25
Volume	da	4,00	a	4,99	[m ³]	13
Volume	da	5,00	a	5,99	[m ³]	6
Volume	da	6,00	a	6,99	[m ³]	3
Volume	da	7,00	a	7,99	[m ³]	3
Volume	da	8,00	a	8,99	[m ³]	0
Volume	da	9,00	a	9,99	[m ³]	0
Volume	da	10,00	a	10,99	[m ³]	0
Totale blocchi						78

Peso	da	0,0	a	2,7	[ton]	1
Peso	da	2,7	a	5,4	[ton]	20
Peso	da	5,4	a	8,1	[ton]	48
Peso	da	8,1	a	10,8	[ton]	63
Peso	da	10,8	a	13,5	[ton]	37
Peso	da	13,5	a	16,2	[ton]	34
Peso	da	16,2	a	18,9	[ton]	13
Peso	da	18,9	a	21,6	[ton]	6
Peso	da	21,6	a	24,3	[ton]	1
Peso	da	24,3	a	27,0	[ton]	0
Peso	da	27,0	a	29,7	[ton]	1
Totale blocchi						224

Peso	da	0,0	a	2,7	[ton]	0
Peso	da	2,7	a	5,4	[ton]	12
Peso	da	5,4	a	8,1	[ton]	16
Peso	da	8,1	a	10,8	[ton]	25
Peso	da	10,8	a	13,5	[ton]	13
Peso	da	13,5	a	16,2	[ton]	6
Peso	da	16,2	a	18,9	[ton]	3
Peso	da	18,9	a	21,6	[ton]	3
Peso	da	21,6	a	24,3	[ton]	0
Peso	da	24,3	a	27,0	[ton]	0
Peso	da	27,0	a	29,7	[ton]	0
Totale blocchi						78

7.2 Dati della produzione in stabilimento

Produzione di lastre

Sono stati analizzati un totale di 433,7 m³ (1.170 tonnellate) in blocchi regolari, segati in lastre tramite tre telai multilama indipendenti. Il semilavorato ottenuto si distingue in funzione dello spessore in due tipologie: lastre grezze aventi spessore pari a 2 cm e 3 cm. Le produzioni ottenute sono state le seguenti:

- volume totale di lastre da 2 cm prodotte: 233,7 m³;
- volume totale di lastre da 3 cm prodotte: 104,3 m³.

Il volume totale del semilavorato è pari a 338 m³, per cui la perdita di materiale durante la lavorazione è stata pari a 95,6 m³. Nei grafici seguenti sono mostrati i dati percentuali delle produzioni ottenute e della perdita materica conseguente la lavorazione (fig. 43), e le percentuali di prodotto ottenuto relative alle tipologie di spessore prese in considerazione (fig. 44).

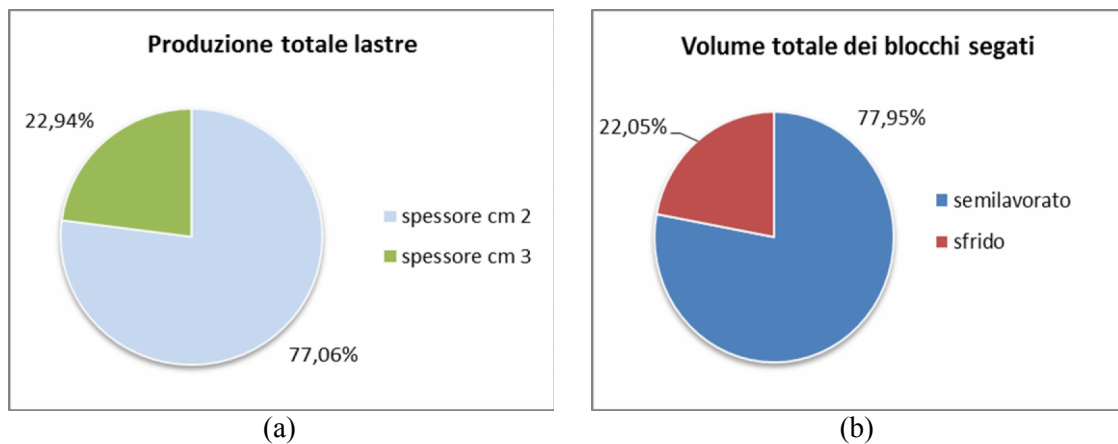


Figura 55 – grafici mostranti le percentuali di semilavorato ottenuto in base alle due tipologie prodotte (a) e la perdita di materiale subita durante la lavorazione (b)

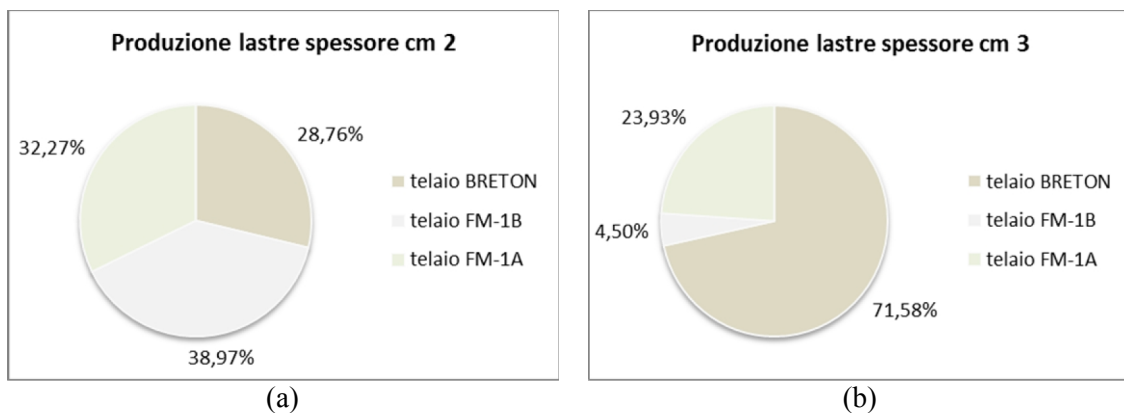


Figura 56 – grafici mostranti le produzioni di semilavorato in percentuale rispetto ai tre telai multilama distinte per tipologia a spessore pari a 2 cm (a) e a 3 cm (b)

La produzione di lastre espressa in superficie è stata pari a 15.164,1 m², di cui 11.685,8 m² aventi spessore pari a 2 cm (541,2 m²/giorno) e 3.478,3 m² aventi spessore pari a 3 cm (158,1 m²/giorno). Elaborando i dati secondo la superficie di lastre prodotte in uscita dai rispettivi telai multilama, si sono ottenuti i valori indicati nella tabella seguente.

Tabella 25 - Produzioni specifiche riferite ai telai multilama.

<i>Telaio BRETON</i>		<i>Telaio FM-1B</i>		<i>Telaio FM-1°</i>	
Superficie totale		Superficie totale		Superficie totale	
lastre s = cm 2	lastre s = cm 3	lastre s = cm 2	lastre s = cm 3	lastre s = cm 2	lastre s = cm 3
[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m ²]
3360,73	2489,63	4553,89	156,46	3771,17	832,25
28,76%	71,58%	38,97%	4,50%	32,27%	23,93%
22,16%	16,42%	30,03%	1,03%	24,87%	5,49%

Produzione di pianelle

I dati di produzione delle pianelle sono stati elaborati su un campione statistico relativo a 10 mesi di lavorazione. Le tabelle che seguono mostrano i risultati riepilogativi espressi su base mensile, per tipologie di prodotto differenziate in funzione dello spessore delle pianelle. A seguire vengono mostrati i grafici relativi alla distribuzione percentuale annuale di produzione in termini di superficie equivalente prodotta (fig. 45) e numero di pezzi (fig. 46), relativamente ad ogni tipologia di prodotto.

Tabella 26 – Dati di produzione relativi al pentamestre giugno – novembre

	<i>GIU</i>		<i>LUG</i>		<i>SET</i>		<i>OTT</i>		<i>NOV</i>	
	[nr]	[m ²]	[nr]	[m ²]	[nr]	[m ²]	[nr]	[m ²]	[nr]	[m ²]
<i>Totale</i>	20.091	5.437,3	49.337	11.301,9	17.089	3.329,2	56.675	11.578,7	51.085	10.208,6
<i>1,1 cm</i>	544	75,2	0	0	1.676	292,2	3.922	680,4	1.824	374,4
<i>1,6 cm</i>	13.836	4.263,7	40.949	9.073,9	14.830	2.911,5	49.285	9.975,6	46.669	9.142,4
<i>2,0 cm</i>	1.792	322,6	2.462	489,1	573	120,6	1.412	262,9	2.592	691,8
<i>3,0 cm</i>	3.919	775,9	5.926	1.738,9	0	0	1.273	307,5	0	0,00
<i>5,0 cm</i>	0	0	0	0	10	5	783	352,3	0	0,00

Tabella 27 – Dati di produzione relativi al pentamestre dicembre – gennaio

	<i>DIC</i>		<i>GEN</i>		<i>FEB</i>		<i>MAR</i>		<i>APR</i>	
	[nr]	[m ²]	[nr]	[m ²]	[nr]	[m ²]	[nr]	[m ²]	[nr]	[m ²]
<i>Totale</i>	36.701	7.216,7	42.680	9.141,9	43.041	9.434,3	43.100	9.842,1	31.683	7.327,9
<i>1,1 cm</i>	2.844	497,7	3.487	684	1.736	299,2	0	0	740	122,2
<i>1,6 cm</i>	30.289	6.098,4	37.553	8.156,5	37.536	8.240,6	37.802	8.577,1	28.466	6.604,7
<i>2,0 cm</i>	3.568	620,6	1.520	252	3.027	641,1	4.822	1.039,6	2.098	393,3
<i>3,0 cm</i>	0	0	120	49,5	742	253,3	476	225,4	379	207,8
<i>5,0 cm</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Riepilogando, su base annua si sono rilevate le seguenti superfici equivalenti prodotte:

- produzione di pianelle a spessore pari a 1,1 cm: 3.025,3 m²;

- produzione di piastrelle a spessore pari a 1,6 cm: 73.044,3 m²;
- produzione di piastrelle a spessore pari a 2 cm: 4.833,5 m²;
- produzione di piastrelle a spessore pari a 3 cm: 3.558,2 m²;
- produzione di piastrelle a spessore pari a 5 cm: 357,3 m².

In termini di volume e peso, globalmente si sono rilevati 1.423,3 m³ di prodotto per un peso totale di 3.842,8 tonnellate.

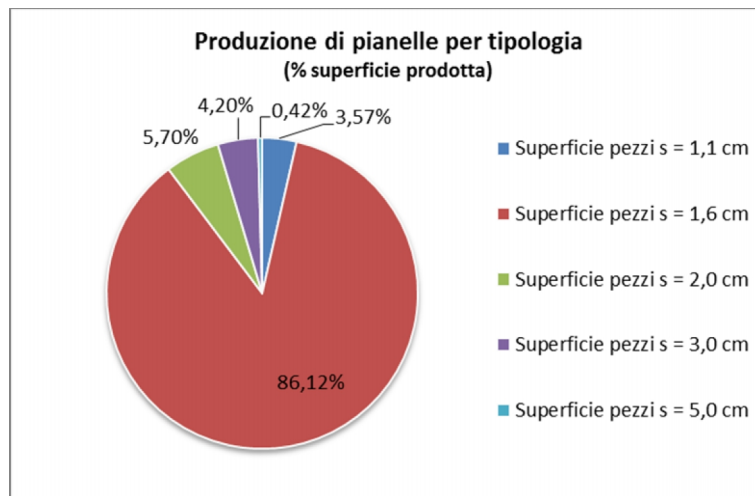


Figura 57 – Produzione di piastrelle: ripartizione percentuale per tipologia di spessore espressa in superficie prodotta

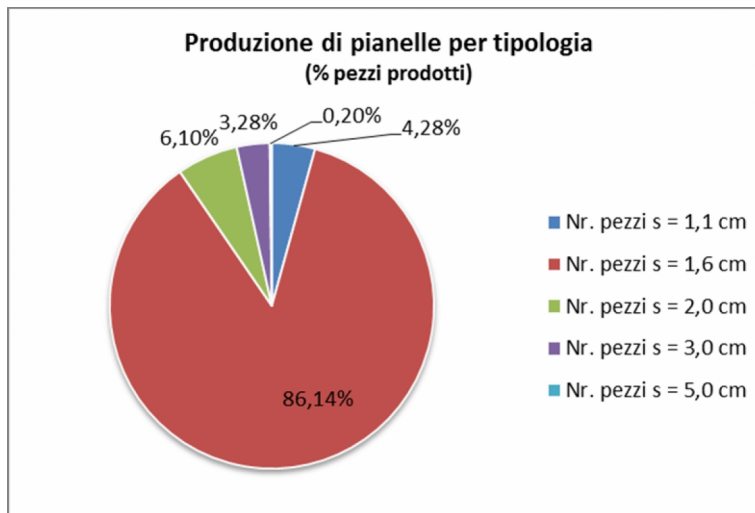


Figura 58 – Produzione di piastrelle: ripartizione percentuale per tipologia di spessore espressa in numero di pezzi prodotti

7.3 Diagrammi di Gantt

I diagrammi di Gantt che vengono di seguito mostrati, sono stati realizzati sulla base di osservazioni effettuate in sito, e rappresentano la base per la costruzione dei diagrammi reticolari necessari all'impostazione dei modelli di ottimizzazione per la ricerca dei percorsi critici. Essi sono suddivisi in base alla fase lavorative di isolamento della bancata, taglio della bancata in fette e taglio delle fette in blocchi.

I tempi rilevati sono relativi al ciclo produttivo completo a partire una bancata ben definita, fino ad arrivare al volume elementare prodotto, ossia il blocco. Tali tempi sono stati presi in considerazione per la modellizzazione e sono relativi ad un volume abbattuto ben definito. Essi sono inoltre rappresentativi di una ben determinata configurazione di lavoro, la quale verrà descritta ai capitoli successivi.

I diagrammi di Gantt sono stati realizzati per la rappresentazione delle fasi lavorative in cava, mentre in stabilimento sono stati presi in considerazione tempi medi riportati in apposite tabelle adeguate alla entità temporale delle sotto fasi esaminate.

Figura 59 – Diagramma di Gantt relativo al taglio orizzontale di isolamento della bancata

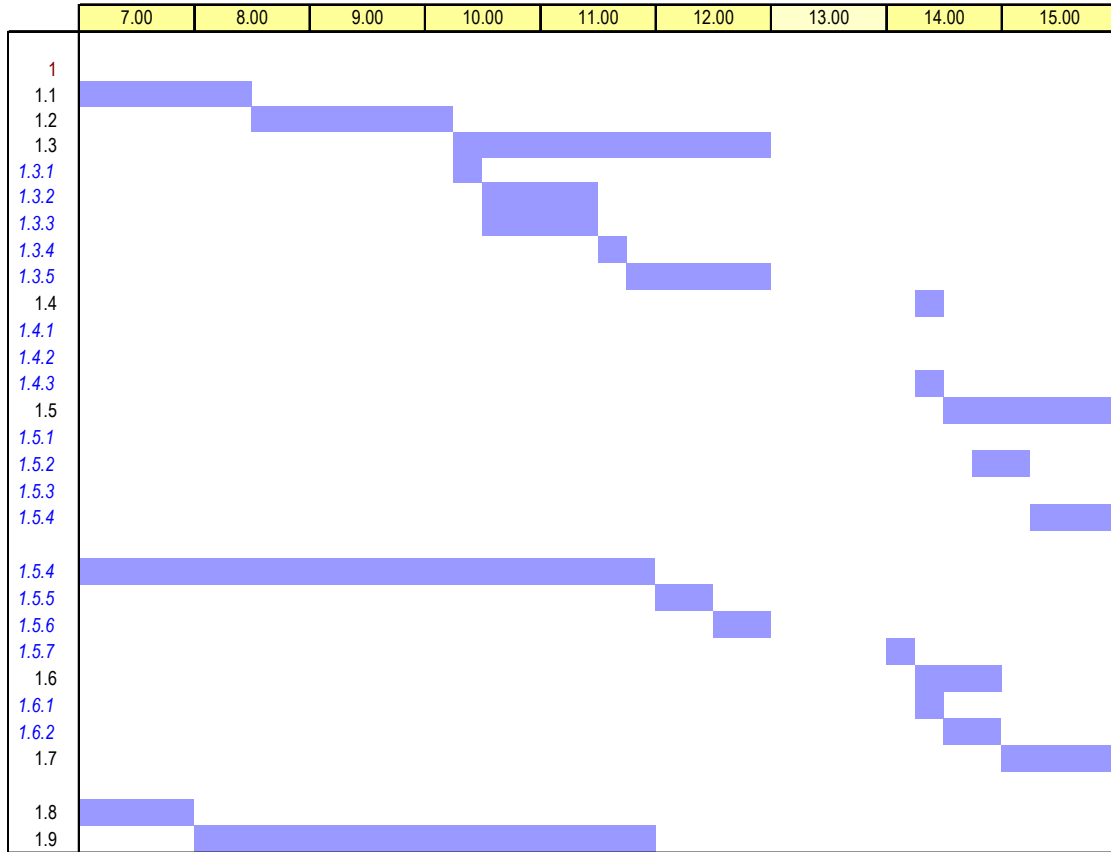


Tabella 28 – Dati relativi al diagramma della figura superiore

		Macro fase/micro fase/sotto fase	Inizio	Fine	Inizio	Fine	Durata
1° GIORNO							
M	1	TAGLIO ORIZZONTALE DI PARETE					
mf	1.1	Messa in sicurezza parte superiore	7.00	8.30			1.30
mf	1.2	Preparazione e pulizia alla base	8.30	10.14			1.44
mf	1.3	Montaggio elementi della segatrice a catena	10.14	13.00			2.46
s	1.3.1	Carico, spostamento e scarico degli elementi	10.14	10.25			0.11
s	1.3.2	Montaggio binari e messa in livello	10.25	11.25			1.00
s	1.3.3	Scarico e collegamento compressore e martello perforatore	10.27	11.18			0.51
s	1.3.4	Fissaggio a terra (perforazione e inghisaggio pemi)	11.25	11.41			0.16
s	1.3.5	Tempi morti	11.41	13.00			1.19
mf	1.4	Posizionamento braccio catena al punto di attacco	14.03	14.22			0.19
s	1.4.1	Traslazione gruppo motore	14.03	14.10			0.07
s	1.4.2	Rotazione braccio catena	14.10	14.15			0.05
s	1.4.3	Serraggi e verifiche messa a bolla	14.15	14.22			0.07
mf	1.5	Taglio orizzontale	14.22	16.00			1.38
s	1.5.1	Taglio di invito e verifica messa a bolla	14.22	14.30			0.08
s	1.5.2	Taglio rototraslatorio	14.32	15.01			0.29
s	1.5.3	Collegamento e posizionamento manichetta acqua	15.01	15.11			0.10
s	1.5.4	Taglio traslatorio a squadra	15.11	16.00			0.49
2° GIORNO							
s	1.5.4	Taglio traslatorio a squadra	6.50	11.58			5.08
s	1.5.5	Taglio rotatorio	11.58	12.27			0.29
s	1.5.6	Taglio rototraslatorio	12.27	12.50			0.23
s	1.5.7	Spostamento catena e pulizia generale macchina	12.50	13.00	14.00	14.09	0.19
mf	1.6	Smontaggio elementi segatrice	14.09	14.47			0.38
s	1.6.1	Smontaggio pemi di fissaggio a terra	14.09	14.20			0.11
s	1.6.2	Smontaggio binari	14.20	14.47			0.27
mf	1.7	Operazione di rotazione degli inserti in widia	14.47	16.00			1.13
3° GIORNO							
mf	1.8	Operazione di rotazione degli inserti in widia	7.00	8.00			1.00
mf	1.9	Spostamento degli elementi verso altre bancate	8.00	11.54			3.54

Figura 60 – Diagramma di Gantt relativo al taglio verticale di isolamento della bancata

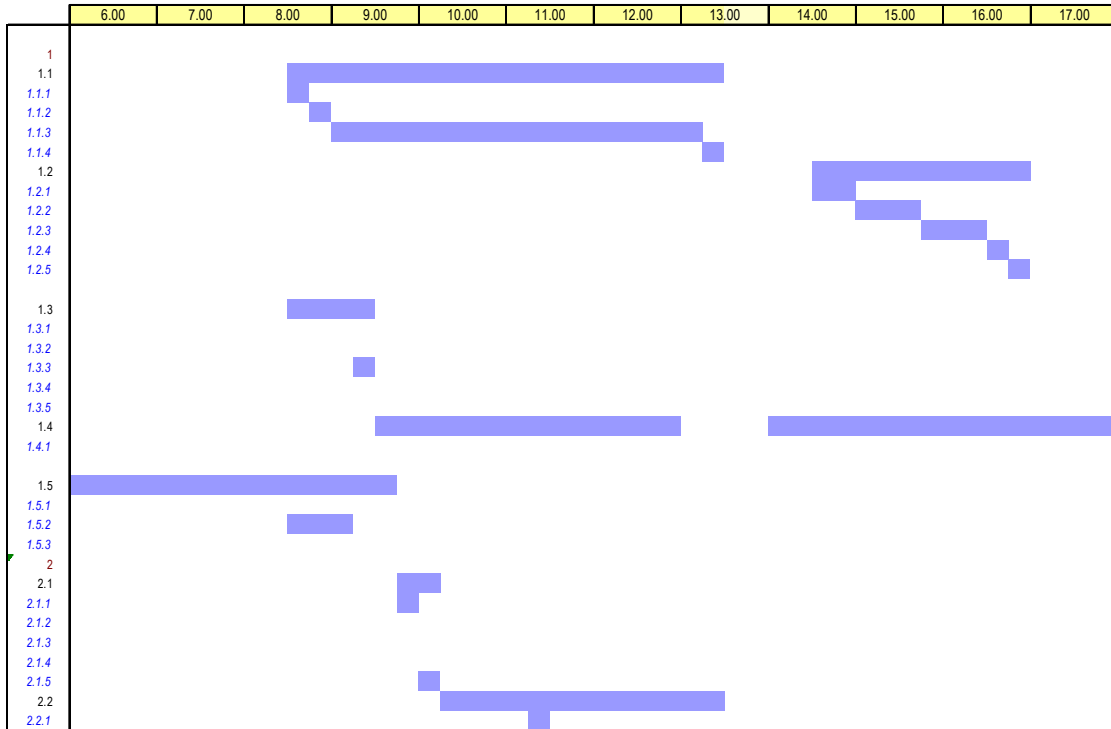


Tabella 29 – Dati relativi al diagramma della figura superiore

Macro fase/micro fase/sotto fase			Inizio	Fine	Inizio	Fine	Durata
1° GIORNO							
M	1	TAGLIO VERTICALE DI PARETE					
mf	1.1	Realizzazione foro guida	8.30	13.30			5.00
s	1.1.1	Scarico e collegamento compressore e linea idrica	8.30	8.45			0.15
s	1.1.2	Posizionamento della perforatrice	8.45	8.55			0.10
s	1.1.3	Perforazione	8.55	13.05			4.10
s	1.1.4	Smontaggio compressore e linea idrica	13.05	13.30			0.25
mf	1.2	Montaggio elementi della macchina a filo diamantato	14.30	17.00			2.30
s	1.2.1	Carico, spostamento e scarico degli elementi	14.30	14.52			0.22
s	1.2.2	Montaggio binari e messa in livello	14.52	15.40			0.48
s	1.2.3	Fissaggio a terra (perforazione e inghisaggio perni)	15.40	16.20			0.40
s	1.2.4	Fissaggio braccio di supporto pulegge	16.20	16.45			0.25
s	1.2.5	Tempi morti	16.45	17.00			0.15
2° GIORNO							
mf	1.3	Predisposizione taglio di parete	8.30	9.30			1.00
s	1.3.1	Inserimento filo per taglio di parete nel foro guida	9.06	9.13			0.07
s	1.3.2	Collegamento consolle di comando	9.13	9.15			0.02
s	1.3.3	Spostamento carrello di avanzamento	9.15	9.18			0.03
s	1.3.4	Inserimento filo di parete sulle pulegge	9.18	9.25			0.07
s	1.3.5	Posizionamento manichetta dell'acqua	9.25	9.30			0.05
mf	1.4	Taglio di parete	9.30	13.00	14.00	18.00	7.30
s	1.4.1	Verifica usura filo	12.35	12.40			0.05
3° GIORNO							
mf	1.5	Taglio di parete	6.00	9.45			3.45
s	1.5.1	Taglio spezzone filo	8.16	8.30			0.14
s	1.5.2	Preparazione filo per taglio di testa	8.30	9.02			0.32
s	1.5.3	Inserimento filo per taglio di testa nel foro guida	9.02	9.10			0.08
M	2	TAGLIO VERTICALE DI TESTA					
mf	2.1	Predisposizione taglio di testa	9.45	10.01			0.16
s	2.1.1	Rotazione pulegge a 90°	9.45	9.48			0.03
s	2.1.2	Rimozione filo di parete	9.48	9.55			0.07
s	2.1.3	Spostamento carrello di avanzamento	9.55	9.58			0.03
s	2.1.4	Inserimento filo di testa sulle pulegge	9.58	10.00			0.02
s	2.1.5	Posizionamento manichetta dell'acqua	10.00	10.01			0.01
mf	2.2	Taglio di testa	10.01	13.30			3.29
s	2.2.1	Taglio spezzone filo	11.05	11.16			0.11

Figura 61 – Diagramma di Gantt relativo al ribaltamento della bancata

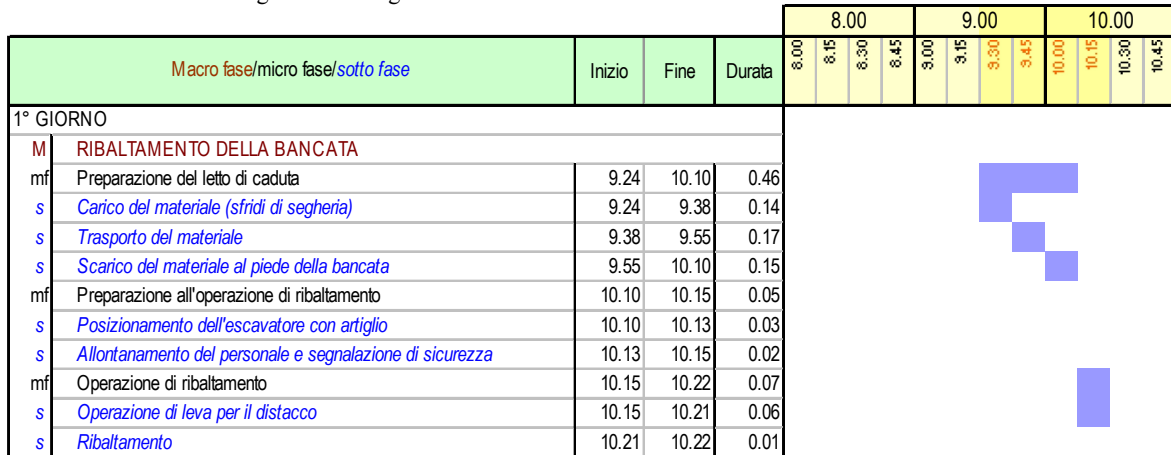


Figura 62 – Diagramma di Gantt relativo al taglio della bancata in fette (ciclo relativo ad 1 fetta)

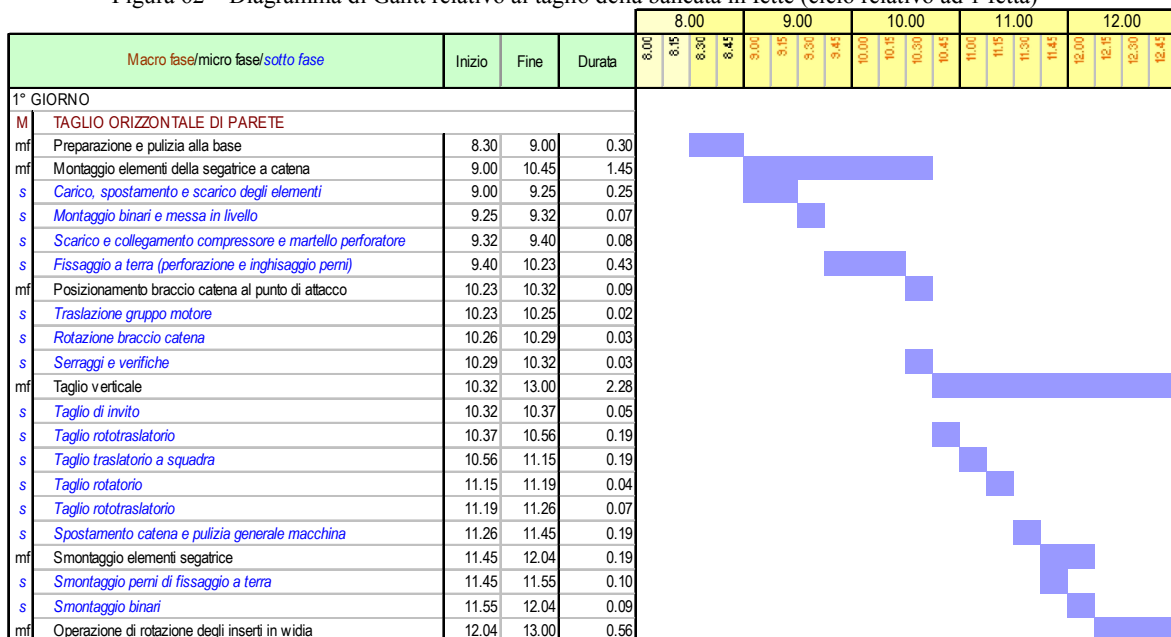
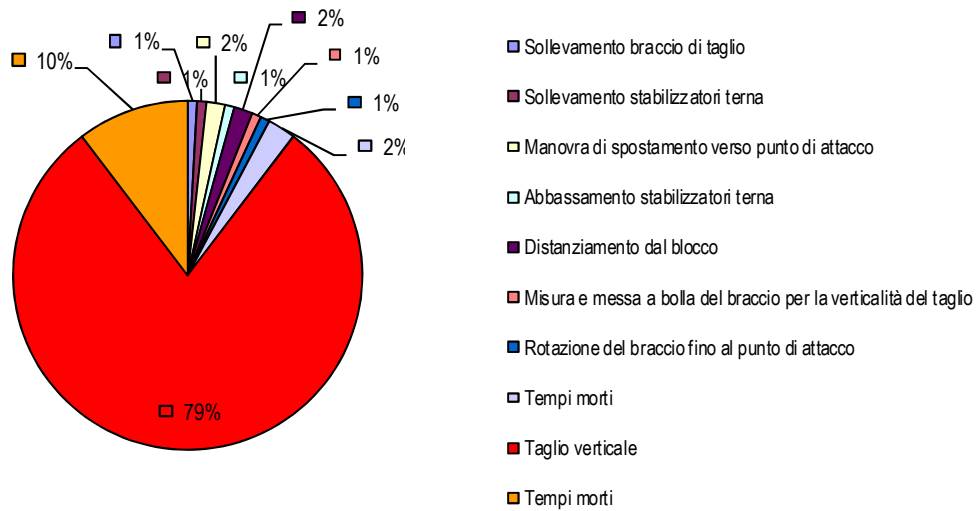


Figura 63 – Diagramma di Gantt relativo al ribaltamento della fetta (ciclo relativo ad 1 fetta)



Figura 64 – Diagramma di Gantt relativo al taglio della fetta in blocchi (ciclo relativo ad 1 blocco)

Macro fase/micro fase/sotto fase	Inizio	Fine	Durata	%
TAGLIO VERTICALE DEL BLOCCO				
Operazioni preliminari				
<i>Sollevamento braccio di taglio</i>	8.26	8.27	0.01	1%
<i>Sollevamento stabilizzatori terna</i>	8.30	8.31	0.01	1%
<i>Manovra di spostamento verso punto di attacco</i>	8.31	8.33	0.02	2%
<i>Abbassamento stabilizzatori terna</i>	8.33	8.34	0.01	1%
<i>Distanziamento dal blocco</i>	8.34	8.36	0.02	2%
<i>Misura e messa a bolla del braccio per la verticalità del taglio</i>	8.36	8.37	0.01	1%
<i>Rotazione del braccio fino al punto di attacco</i>	8.37	8.38	0.01	1%
<i>Tempi morti</i>	8.27	8.30	0.03	3%
Taglio verticale	8.38	10.10	1.32	19.02
<i>Tempi morti</i>	9.00	9.12	0.12	10%
			1.56	100%



7.4 Il magazzino e le aree di deposito

I dati relativi alle aree di magazzino sono direttamente legati alle capacità fisiche delle stesse. All'esterno si individuano fundamentalmente le seguenti zone adibite allo stoccaggio dei materiali:

Tabella 30 – Superfici di lavoro delle aree di magazzino

<i>Tipologia</i>	<i>Destinazione</i>	<i>Area di lavoro</i>
		<i>[m²]</i>
<i>Piazzale esterno</i>	blocchi regolari da destinare alla produzione delle lastre	1.800
<i>Piazzale esterno</i>	blocchi informi da destinare alla produzione di pianelle	2.000
<i>Piazzale esterno</i>	lastre finite e pianelle	1.000
<i>Reparto resinatura/lucidatura</i>	deposito lastre grezze	460
<i>Reparto resinatura/lucidatura</i>	deposito lastre lucide	300
<i>Reparto produzione pianelle</i>	deposito pianelle	200

Dalle superfici di lavoro appena descritte, conoscendo le dimensioni volumetriche medie dei materiali, è possibile stimare le quantità massime stoccabili all'interno delle stesse (esprimibili in metri cubi o in tonnellate). A tal fine si può moltiplicare alla superficie l'altezza teorica massima di impilamento e un coefficiente di riduzione che tiene conto degli spazi di manovra di sicurezza necessari alle operazioni di carico e scarico:

Tabella 31 – Capacità massime delle aree di magazzino

<i>Tipologia</i>	<i>Destinazione</i>	<i>Capacità massima</i>	
		<i>[m³]</i>	<i>[ton]</i>
<i>Piazzale esterno</i>	blocchi regolari da destinare alla produzione delle lastre	2.160	5.832
<i>Piazzale esterno</i>	blocchi informi da destinare alla produzione di pianelle	2.400	6.480
<i>Piazzale esterno</i>	lastre finite e pianelle	800	2.160
<i>Reparto resinatura/lucidatura</i>	deposito lastre grezze	368	993.6
<i>Reparto resinatura/lucidatura</i>	deposito lastre lucide	240	648
<i>Reparto produzione pianelle</i>	deposito pianelle	160	432

CAPITOLO 8

Breve analisi delle componenti ambientali

8.1 Premessa

Per completezza di studio, si da ora una breve descrizione delle componenti ambientali coinvolte nel processo produttivo. A seconda della natura dell'interferenza si vedrà di seguito se questi fattori sono suscettibili di ottimizzazione, visti all'interno dell'ottica del processo produttivo.

Tabella 32 – Quadro sinottico con i parametri ambientali significativi delle tipiche attività di cava presi in considerazione e atti a subire processi di ottimizzazione numerica

Descrizione azione perturbativa	Ruolo all'interno del ciclo produttivo	Attitudine a subire processi di ottimizzazione
Alterazione della destinazione d'uso e delle potenziali risorse del sito	Azione intrinseca dell'attività produttiva	Non ottimizzabile
Alterazione della morfologia	Azione intrinseca dell'attività produttiva	Non ottimizzabile
Interferenza con il sistema idrico sotterraneo e superficiale	Azione intrinseca dell'attività produttiva. Utilizzo di risorse idriche per raffreddamento e lubrificazione in cava di impianti a filo diamantato, perforatrici, segatrici a catena.	Da determinare
Aumento del traffico sulla rete viaria afferente	Azione intrinseca dell'attività produttiva	Non ottimizzabile
Emissioni solide e gassose in atmosfera	Azione intrinseca dell'attività produttiva. Produzione di polveri diffuse generate da traffico di mezzi su strade sterrate non pavimentate e movimentazione di materiale dai fronti di cava alle discariche	Da determinare
Lancio di materiale abbattuto	Azione intrinseca dell'attività produttiva	Non ottimizzabile
Emissioni sonore	Azione intrinseca dell'attività produttiva. Onde di sovrappressione aerea per le macchine operatrici, per il traffico veicolare pesante, per gli impianti	Da determinare
Produzione di rifiuti	Azione intrinseca dell'attività produttiva. Produzione di sfridi	Da determinare
Interferenza chimica con suolo e sottosuolo	Azione non intrinseca dell'attività produttiva	Assente
Vibrazioni	Azione non intrinseca dell'attività produttiva	Assente
Visibilità della cava	Azione intrinseca dell'attività produttiva	Non ottimizzabile

Ai paragrafi successivi verranno presi in esame i parametri indicati come “da determinare” e, per ognuno di essi, ne verrà valutata l'eventuale possibilità di ottimizzazione (ricerca della funzione obiettivo).

8.2 Le polveri

Si parla di inquinamento atmosferico quando lo stato della qualità dell'aria subisce dei mutamenti a causa dell'immissione nella stessa di sostanze, di qualsiasi natura e in misura e condizioni tali da alterarne la salubrità e da costituire pregiudizio diretto o indiretto per la salute delle persone o danno dei beni pubblici e/o privati.

Per una valutazione della qualità dell'aria è fondamentale il suo controllo e la sua influenza diretta ed indiretta sulla salute umana.

Ogni composto emesso in atmosfera, per effetto di reazioni chimiche, fisiche e biologiche, può essere trasformato, distrutto, disperso, accumulato e trasportato. Il tempo di permanenza dell'inquinante in atmosfera varia da sostanza a sostanza ed è in funzione di fattori ambientali, climatici, meteorologici, geografici, etc. I principali meccanismi di rimozione degli inquinanti atmosferici sono: l'assorbimento in sistemi idrici, l'adsorbimento su solidi o nel terreno, il dilavamento dell'atmosfera a seguito delle piogge. Analizzando le tipologie di lavorazioni effettuate nel caso in studio, si può ritenere che gli inquinanti prodotti, principalmente dalle attività di cava, in riferimento al DECRETO LEGISLATIVO 13 agosto 2010, n. 155 "Attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa", sono le polveri (PM10). Le sorgenti emissive diffuse sono modellizzabili assimilandole a sorgenti circolari aventi superficie equivalente e baricentro coincidente con le stesse, e le emissioni vengono schematizzate come emesse in maniera uniforme all'interno di tale area, in modo da mediare i diversi effetti degli spostamenti dei mezzi nei periodi di lavoro.

La stima delle emissioni di PM10, relative alle sorgenti emissive diffuse, può essere eseguita attraverso la metodica fornita dell'E.P.A. (Environmental Protection Agency), che attribuisce le emissioni alle seguenti attività:

- deposito degli inerti;
- movimentazione macchinari nell'area di stoccaggio;
- erosione del vento sulle superfici dei cumuli e delle aree intorno ad essi;
- spostamento degli inerti dai cumuli;
- movimentazione dei mezzi su piste sterrate (non pavimentate).

Relativamente al particolato generato dal transito dei mezzi di trasporto su piste non pavimentate, si può far riferimento al EPA Capitolo 13.2.2, il quale propone il calcolo di un fattore di emissione nel seguente modo:

$$E = k \cdot \left(\frac{S}{12}\right)^a \cdot \left(\frac{W}{3}\right)^b \quad \text{fattore di emissione [g/sec]}$$

$$E_{ext} = E \cdot \left[\frac{(365 - P)}{365}\right] \quad \text{fattore di emissione specifico corretto al numero P di giorni di piovosità in un anno, aventi precipitazione superiore a 0,254 mm}$$

in cui:

k = costante adimensionale

s = contenuto in silt della superficie stradale (%)

W = peso medio dei veicoli (ton)

a = coefficiente adimensionale

b = coefficiente adimensionale

N° veicoli/h (andate e ritorni)

Lunghezza percorso veicoli (m)

Ore di lavoro (h)

N° giorni di pioggia

Relativamente al particolato generato dai cumuli di materiale stoccato, si può far riferimento al EPA Capitolo 13.2.4, il quale propone il calcolo di una fattore di emissione nel seguente modo:

$$E = k \cdot \frac{\left(\frac{U}{2,2}\right)^{1,3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1,4}} \quad \text{fattore di emissione [g/sec]}$$

$$E_{ext} = E \cdot \left[\frac{(365 - P)}{365} \right] \quad \text{fattore di emissione specifico corretto al numero P di giorni di piovosità in un anno, aventi precipitazione superiore a 0,254 mm}$$

in cui:

k = costante adimensionale

s = contenuto in silt della superficie stradale (%)

k = dimensione delle particella (adimensionale)

U = velocità media del vento (m/sec)

M = contenuto di umidità del materiale (%)

Stoccaggio massimo di materiale (ton/g)

8.3 Il rumore

Il fattore di disturbo causato dalle emissioni sonore generate dalle attività, è correlato al ciclo produttivo e tecnologico, agli impianti, alle attrezzature e macchinari,

all'ubicazione dell'insediamento e del contesto di inserimento. Per la sua quantificazione occorre conoscere:

la descrizione delle caratteristiche costruttive dei locali con particolare riferimento alle caratteristiche acustiche dei materiali utilizzati;

la descrizione delle sorgenti rumorose connesse all'opera o attività;

l'indicazione degli orari di attività e di quelli di funzionamento degli impianti principali e sussidiari ;

l'indicazione della classe acustica di pertinenza dell'area;

l'identificazione e descrizione dei ricettori presenti nell'area di studio;

l'individuazione delle principali sorgenti sonore già presenti nell'area di studio e indicazione dei livelli di rumore preesistenti in prossimità dei ricettori.

Si ricordano di seguito alcune importanti definizioni:

- *livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata "A"*: Valore del livello di pressione sonora ponderata "A" di un suono costante che, nel corso di un periodo specificato T, ha la medesima pressione quadratica media di un suono considerato, il cui livello varia in funzione del tempo:

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \text{Log} \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right]$$

in dB(A) dove L_{Aeq} e' il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata "A" considerato in un intervallo di tempo che inizia all'istante t_1 e termina all'istante t_2 ; $p_A(t)$ è il valore istantaneo della pressione sonora ponderata "A" del segnale acustico in Pascal (Pa); $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ è la pressione sonora di riferimento.

- *livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata "A" relativo al tempo a lungo termine T_L (L_{Aeq,T_L})*: Il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata "A" relativo al tempo a lungo termine (L_{Aeq,T_L}) può essere riferito:

26) al valore medio su tutto il periodo, con riferimento al livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata "A" relativo a tutto il tempo T_L , espresso dalla relazione:

$$L_{Aeq,T_L} = 10 \cdot \text{Log} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1 \cdot (L_{Aeq})_i} \right]$$

in dB(A), essendo N i tempi di riferimento considerati;

b) al singolo intervallo orario nei T_R . In questo caso si individua un T_M di 1 ora all'interno del T_O nel quale si svolge il fenomeno in esame. ($L_{Aeq,TL}$) rappresenta il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata "A" risultante dalla somma degli M tempi di misura T_M , espresso dalla seguente relazione:

$$L_{Aeq,TL} = 10 \cdot \text{Log} \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 10^{0,1(L_{Aeq})_i} \right]$$

dove i è il singolo intervallo di 1 ora nell'iesimo T_R .

- *livello sonoro di un singolo evento LAE, (SEL):* è dato dalla formula:

$$SEL = L_{AE} = 10 \cdot \text{Log} \left[\frac{1}{t_0} \cdot \int_0^T \frac{p_{A^2}(t)}{p_0^2} dt \right]$$

dB(A) dove $t_2 - t_1$ è un intervallo di tempo sufficientemente lungo da comprendere l'evento; t_0 è la durata di riferimento.

Se si osservano i parametri delle formule di calcolo citate sopra, si confrontano con i parametri operativi sia in cava, sia in stabilimento, si deduce che non è possibile operare sul fattore rumore per eventuali processi di ottimizzazione, nel caso considerato minimizzazione, in quanto essi sono esclusivamente legati alle condizioni di operatività standard delle macchine e delle installazioni, delle quali non è possibile ridurre le emissioni sonore alla sorgente. D'altro canto, data la morfologia della cava (sviluppo futuro in fossa) e dato il contesto esclusivamente industriale di inserimento dell'insediamento produttivo, e considerando inoltre la distanza elevata dei recettori più sensibili, non si ritiene necessario inserire la valutazione di questo fattore nel processo di ottimizzazione produttivo, economico ed ambientale relativo al caso in studio.

8.4 Le acque

Il ciclo produttivo della cava prevede l'utilizzo di acqua per il raffreddamento degli utensili da taglio delle macchine a filo diamantato e delle segatrici a catena, nonché per la lubrificazione durante le operazioni di perforazione dei fori guida, la quale non necessita di particolari requisiti chimico - fisici. Queste acque non possono essere recuperate durante i processi suddetti e, a fine ciclo lavorativo, non essendo contaminate da parametri chimici particolari, non necessitano di processi di trattamento particolari.

Tramite pompe di eduazione situate nella zona topograficamente più depressa della cava esse vengono rilanciate verso un serbatoio di raccolta situato a quota più elevata, da cui riprendono il percorso verso le successive fasi lavorative. Nel ciclo produttivo dello stabilimento invece, le acque di risulta dalle operazioni di taglio dei blocchi, sia regolari per la produzione di lastre, sia informi per la produzione di piastrelle, debbono subire processi di trattamento al fine di essere riutilizzate, in quanto alla fine del ciclo di lavorazione possiedono un carico di solidi sospesi che inficerebbe il riutilizzo. Il processo di purificazione del ciclo è possibile grazie all'utilizzo di un impianto di depurazione fisico – chimico. Le acque reflue sono raccolte da un sistema di canalette che le drenano e le convogliano alla vasca principale di raccolta e accumulo. Tramite una pompa l'acqua viene inviata ad un decantatore della capacità proporzionale alla portata di alimentazione dell'impianto. Lungo il tragitto dalla vasca di raccolta al decantatore, attraverso una pompa dosatrice automatica viene somministrato un additivo flocculante direttamente in linea, il quale forma una soluzione con l'acqua reflua che consente la formazione di un fango. Per azione gravitativa il fango sedimenta e scivola lungo le pareti coniche sul fondo del decantatore, mentre allo sfioro superiore si ottiene l'uscita in over-flow dell'acqua chiarificata verso un serbatoio di stoccaggio adiacente al decantatore. Da tale serbatoio l'acqua viene immessa nuovamente nell'anello di distribuzione idrica, a chiudere così il ciclo di depurazione. Il fango depositato in under-flow viene convogliato (raggiunto il livello massimo del serbatoio di raccolta) tramite una pompa verso la filtro pressa formata da 30 – 50 camere, e subisce il processo di disidratazione fino all'80% a formare pannelli compatti adatti all'impilamento in appositi contenitori speciali da destinare ai camion per lo smaltimento. L'acqua di recupero della filtro pressa viene convogliata nuovamente alla vasca principale di raccolta, ove riprende il consueto e pocanzi descritto ciclo. L'intero sistema è automatizzato e calibrato in funzione della portata di alimentazione e dei livelli dei serbatoi e vasche, ognuno munito di apposita sonda. Le aperture delle condutture, ingressi e uscite dai serbatoi sono consentite grazie a valvole a funzionamento elettropneumatico. Il sistema, alimentato ad energia elettrica, è gestito da un quadro di comando e controllo a PLC.

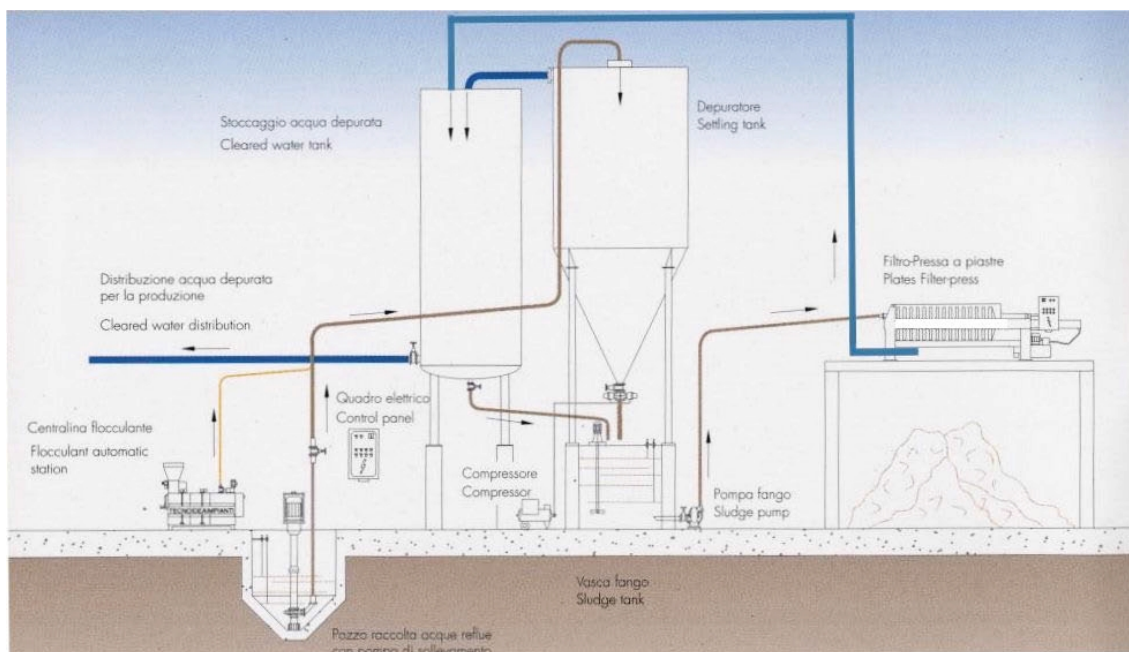


Figura 65 – Schema impianto di trattamento e riciclo acque (Marras G., 2007)

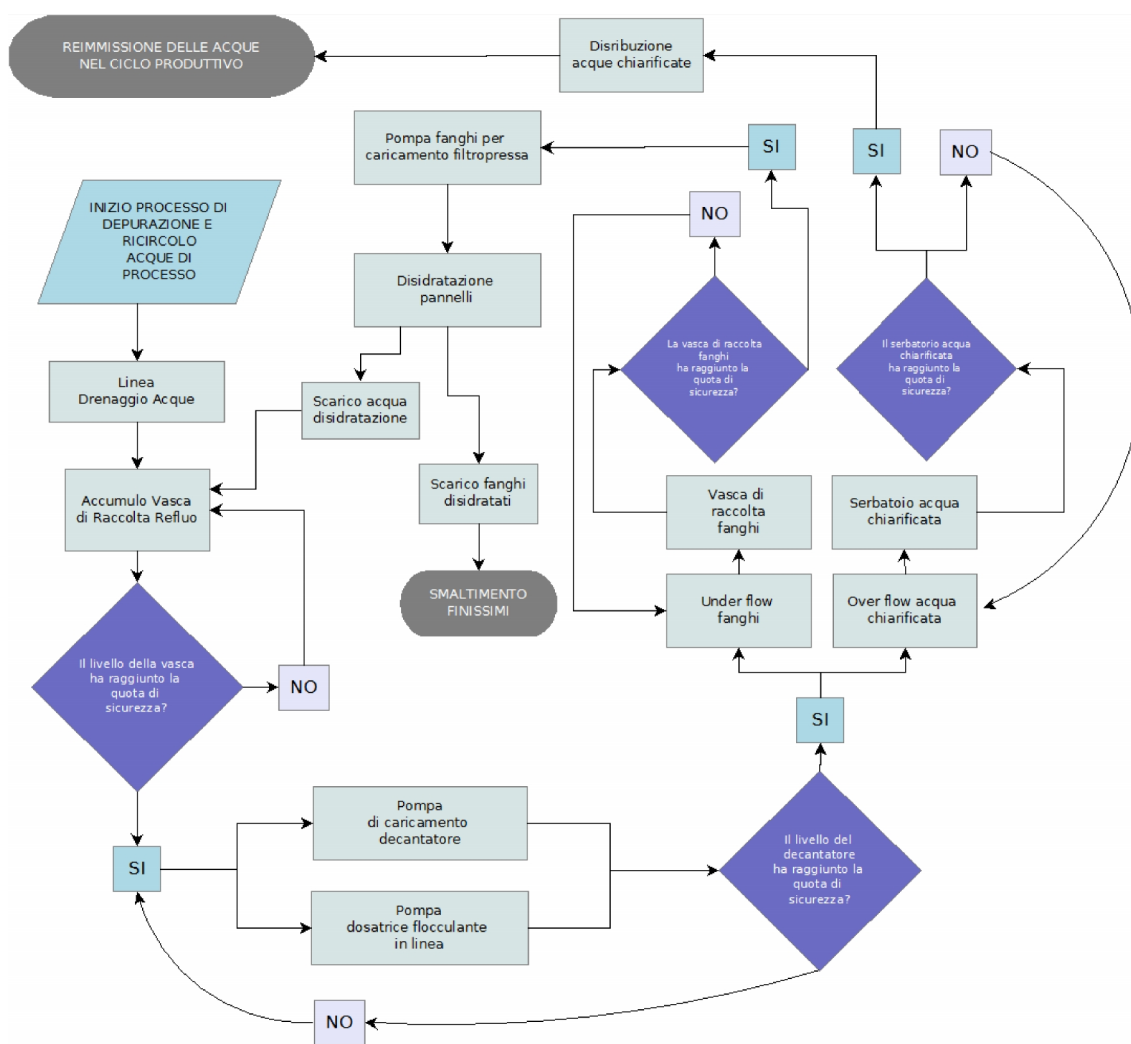


Figura 66 – Diagramma di flusso del processo di chiarificazione delle acque

CAPITOLO 9

Metodi di ottimizzazione delle reti per il trattamento dei processi

9.1 Premessa

La Teoria delle Decisioni è un ramo della matematica che si occupa dello sviluppo e dell'applicazione di metodi quantitativi per la soluzione di problemi di decisione complessi, in particolare di *ottimo* (*what-is-best*). In ambito industriale, questa disciplina è riconosciuta e apprezzata per la sua rilevanza applicativa. Trovare la *soluzione* di un problema di ottimo consiste nel determinare l'alternativa che conduce (in relazione ad un determinato obiettivo), all'esito più favorevole per il decisore. Spesso il modello deve tenere conto di restrizioni imposte dalle condizioni iniziali del problema: in tal caso il problema è detto di ottimo vincolato. L'approccio modellistico per risolvere un problema di decisione o, più in generale, l'impiego di metodi matematici per la soluzione di problemi applicativi, viene di solito realizzato attraverso diverse fasi. Tali fasi possono essere riassunte nel seguente modo:

1. analisi del problema;
2. costruzione (formulazione) del modello;
3. analisi del modello;
4. soluzione numerica;
5. validazione del modello.

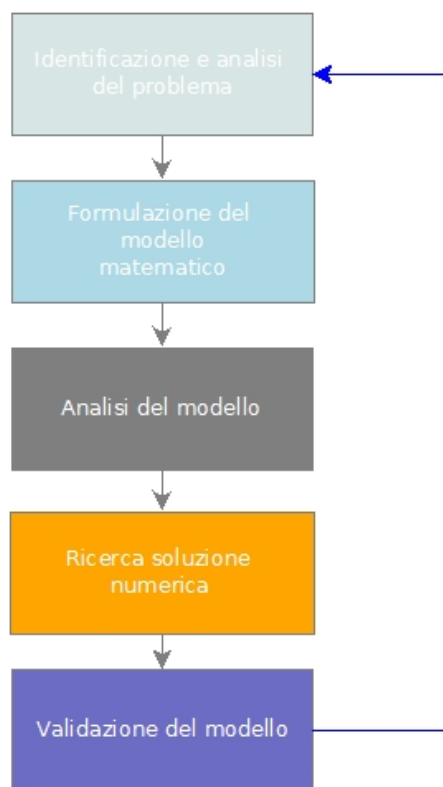


Figura 67 – diagramma di flusso risoluzione problema matematico

La prima fase consiste nell'*analisi della struttura del problema* e nell'*individuazione dei dati necessari* per una descrizione e per una corretta definizione del problema. Si tratta cioè di individuare i parametri di controllo e di individuare i legami logico-funzionali che definiscono il problema e lo/gli obiettivi.

Nella fase di costruzione del modello matematico si deve fornire una descrizione formalizzata del problema di decisione facendo uso del linguaggio della matematica. Si dovrà cercare, quindi, una corrispondenza tra relazioni del mondo reale (relazioni tecnologiche, leggi fisiche, vincoli di mercato, etc.) e relazioni matematiche (equazioni, disequazioni, dipendenze logiche, etc.). La costruzione di un modello richiede valutazioni e scelte non facilmente codificabili in un procedimento standard. In particolare, per la costruzione di modelli soddisfacenti è necessaria una conoscenza approfondita dell'applicazione d'interesse e dei metodi matematici di soluzione.

La conoscenza dell'applicazione assicura che il modello sia soddisfacente e risponda alle domande concrete che l'utilizzatore gli porrà. La conoscenza dei metodi permette la definizione di modelli "risolvibili", per i quali è possibile (al termine del processo di modellazione) la determinazione di soluzioni di buona "qualità".

È importante ribadire che un modello è definito per mezzo delle relazioni che lo costituiscono ed è quindi necessario che tali relazioni siano il più possibile indipendenti dai dati introdotti nel modello; questo perché uno stesso modello possa essere usato in differenti occasioni con dati diversi (cioè costi, disponibilità di risorse, limiti tecnologici, etc.). Lo studio di questo aspetto, come già detto, rientra nella fase di analisi del modello sotto il nome di analisi della stabilità del modello rispetto ai dati introdotti.

In generale, la costruzione formale di un modello di Programmazione Matematica si può sintetizzare come segue:

- associare opportune variabili di decisione alle grandezze reali. Tali variabili costituiscono le incognite del problema;
- esprimere quantitativamente i legami esistenti tra le variabili e le limitazioni derivanti da considerazioni di carattere fisico, economico, etc. Tali legami e limitazioni definiscono i vincoli. L'insieme dei valori delle variabili per cui i vincoli sono soddisfatti costituisce l'insieme ammissibile;
- esprimere formalmente l'obiettivo che si intende minimizzare o massimizzare.

Segue l'analisi del modello che prevede, in riferimento a determinate classi di problemi,

la deduzione per via analitica di alcune importanti proprietà; le principali sono:

- esistenza della soluzione ottima;
- condizioni di ottimalità, cioè una caratterizzazione analitica della soluzione ottima;
- stabilità delle soluzioni al variare dei dati o di eventuali parametri presenti.

Lo studio delle condizioni di ottimalità ha motivazioni di natura teorica e di natura algoritmica. Dal punto di vista teorico, una condizione di ottimalità può servire a caratterizzare analiticamente le soluzioni di un problema di ottimo e quindi consentire di svolgere analisi qualitative, anche in assenza di soluzioni numeriche esplicite; un esempio è l'analisi della sensibilità delle soluzioni di un problema di ottimo rispetto a variazioni parametriche.

La successiva fase di selezione di una buona soluzione corrisponde alla possibilità di determinare, tra tutte le scelte possibili costituite dalle soluzioni ammissibili, quella ottima o una sua buona approssimazione. I problemi di ottimizzazione che si presentano nella pratica sono di solito così complessi che non è possibile determinarne una soluzione per via analitica. La complessità è determinata innanzi tutto dal numero di variabili e di vincoli che definiscono la dimensione del problema; ed, ancora, dalla eventuale presenza di funzioni non lineari tra le funzioni che definiscono l'obiettivo e/o i vincoli. Se il modello è molto semplice può essere possibile risolvere le relazioni e utilizzare i dati a disposizione per determinare una soluzione analitica. La soluzione analitica è possibile solo nel caso di poche variabili e di funzioni estremamente semplici. Molto spesso, anche se esiste una soluzione analitica, essa è estremamente complessa e la sua determinazione richiede molte risorse di calcolo; invertire una matrice per la quale esiste una formula analitica è un banale esempio, ma che può dal punto di vista numerico, per certe istanze, non essere affatto banale. Quindi, nella pratica, per determinare una "buona" soluzione di un problema di ottimizzazione occorre fare ricorso all'uso del calcolatore. I due aspetti più importanti e in qualche modo complementari nella Teoria delle Decisioni dell'uso del calcolatore per la soluzione di un modello matematico sono la simulazione e l'ottimizzazione. Il processo di simulazione utilizza un modello matematico che consente di visualizzare l'effetto di alcune decisioni sul sistema in esame senza che queste debbano essere realizzate effettivamente sul processo reale. La simulazione consiste quindi nella valutazione numerica delle funzioni che definiscono il modello per alcuni valori delle variabili di

interesse, allo scopo di verificare come influenzino alcune misure di performance dell'uscita. Molto spesso, i modelli per i quali si utilizza la simulazione includono qualche aspetto di natura stocastica e anche dinamica (di evoluzione nel tempo). La simulazione può essere usata come strumento per l'ottimizzazione nel senso che colui che prende le decisioni può procedere per tentativi e scegliere la "migliore" tra varie alternative possibili. Il modello matematico implementato nel simulatore consente di valutare l'effetto delle sue decisioni sul sistema nel suo complesso. Questo tipo di approccio è detto analisi di scenari. L'analisi di scenari è particolarmente utile nel caso di sistemi estremamente complessi e per i quali una rappresentazione analitica di tutti i legami logico-funzionali può non essere possibile. La soluzione determinata tramite l'analisi di scenari possibili non ha però alcuna garanzia di essere quella ottima o una sua approssimazione. L'uso della simulazione come strumento di ottimizzazione può essere poco significativo sebbene estremamente flessibile; viceversa può avere un ruolo più importante nella successiva fase di validazione del modello in quanto consente di individuare imprecisioni e/o errori nel modello stesso. Non si deve confondere quindi il ruolo di ottimizzazione con quello di simulazione. Dato un modello, il processo di ottimizzazione consiste nella determinazione della soluzione ottima, se esiste, o almeno di una sua buona approssimazione. Nella pratica, per risolvere un problema di ottimizzazione occorre fare ricorso ad un algoritmo iterativo, cioè ad un programma di calcolo che, a partire da una approssimazione iniziale x_0 della soluzione, determina, con una appropriata sequenza di operazioni che definiscono una successione di valori $\{x_k\}$, una nuova approssimazione x^* . La possibilità di realizzazione di algoritmi è legata alla capacità di definire condizioni di ottimalità che caratterizzano la soluzione ottima di un certo modello. L'analisi del modello matematico e la definizione di un algoritmo per la sua soluzione sono aspetti fortemente legati tra di loro.

Ottenuta, la soluzione numerica dovrà poi essere valutata praticamente. Questa fase di costruzione del modello non deve essere sottovalutata. I motivi di inattendibilità di un modello possono essere molti; in particolare, la maggior difficoltà consiste nell'ottenere dati e/o informazioni validi. Spesso la difficoltà è legata al diverso linguaggio utilizzato dagli esperti del problema reale e dagli esperti di ottimizzazione. Informazioni essenziali sono spesso trascurate perché talmente scontate per l'esperto del problema da non dover essere raccontate. O viceversa modelli matematici troppo dettagliati possono produrre soluzioni incomprensibili. La validazione del modello può avvenire attraverso

una verifica sperimentale oppure con metodi di simulazione, allo scopo di ottenere, in questa fase di interazione con l'esperto, un modello matematico sempre più attendibile

I problemi di ricerca di soluzione ottima in campo produttivo, vengono affrontati fissando una funzione obiettivo, determinando i vincoli di produzione e andando a ricercare le soluzioni che soddisfano le condizioni iniziali imposte. In generale, la maggior parte dei problemi di ottimizzazione, dal punto di vista matematico corrispondono a sistemi di equazioni lineari a più variabili, da cui deriva la denominazione di programmazione lineare (PL). Un modello di programmazione matematica (PM) è utilizzato per descrivere le caratteristiche della soluzione ottima di un problema di ottimizzazione attraverso relazioni matematiche.

Gli elementi che costituiscono un PM sono i seguenti:

- Insiemi ($I = \{n_1, n_2, \dots, n_N\}$): raggruppano gli elementi del sistema.
- Parametri: sono i dati del problema e rappresentano delle quantità fissate che dipendono dai diversi elementi del sistema.
- Variabili decisionali o di controllo ($\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$): sono le grandezze del sistema di cui non conosciamo il valore (assimilabili a delle incognite) e sulle quali possiamo agire per determinare diverse soluzioni alternative del problema.
- Vincoli: sono delle relazioni matematiche che descrivono le condizioni di ammissibilità delle soluzioni. Servono quindi per discriminare le combinazioni di valori delle variabili decisionali che rappresentano soluzioni accettabili al problema, da quelle che non lo sono.
- Funzione obiettivo: è la quantità da massimizzare o minimizzare, espressa come funzione delle variabili decisionali.

La soluzione di un problema di ottimizzazione formulato con un modello di programmazione matematica consiste nella determinazione dei valori delle variabili che soddisfano tutti i vincoli e massimizzano o minimizzano il valore della funzione obiettivo.

Affinché il modello possa essere definito di programmazione lineare è necessario che la funzione obiettivo sia espressione lineare delle variabili decisionali e che i vincoli siano determinati da un sistema di equazioni e/o disequazioni lineari.

In base alla natura o dominio delle variabili decisionali, si parla di:

- modelli di Programmazione Lineare (in senso stretto, PL) se tutte le variabili possono assumere valori reali;

- modelli di Programmazione Lineare Intera (PLI) se tutte le variabili possono assumere valori interi;
- modelli di Programmazione Lineare Intera Mista (PLIM) se alcune variabili possono assumere valori reali e altre valori interi.

Risolvere un problema di programmazione lineare significa individuare una soluzione ammissibile, ossia un vettore che soddisfi tutti i vincoli. L'insieme di tutte le soluzioni ammissibili è detta regione ammissibile. La soluzione ottima è una soluzione ammissibile che ottimizza (minimizza o massimizza) il valore della funzione obiettivo tra tutte le soluzioni ammissibili. I casi che si possono affrontare in tali problemi sono i seguenti:

- il problema è ammissibile: l'insieme delle soluzioni ammissibili è vuoto;
- il problema è illimitato: è possibile trovare delle soluzioni ammissibili che fanno diminuire per i problemi di minimo o aumentare per i problemi di massimo, il valore della funzione obiettivo a piacere;
- il problema ammette soluzione ottima: esiste almeno una soluzione ammissibile che ottimizza la funzione obiettivo (e il valore ottimo della funzione obiettivo è limitato).

9.2 Teoria dei grafi

In luogo dell'approccio classico alla risoluzione dei problemi di programmazione lineare, come il metodo del simplesso e tutte le sue rielaborazioni, negli ultimi decenni hanno preso notevole importanza le tecniche di ottimizzazione basate sulla teoria dei grafi. La teoria dei grafi possiede come caratteristica principale l'interdisciplinarietà del processo modellistico, da attribuire al fatto che molte strutture fisiche reali possono essere schematizzate utilizzando i grafi (rete stradale, strutture di dati, rete di trasporti, telecomunicazioni, ingegneria dell'informazione, gestione aziendale, etc.). Inoltre la rappresentazione tramite grafi consente l'utilizzo di strutture di dati e la loro gestione in modo estremamente efficiente, consentendo l'impiego di tali tecniche anche ai non specialisti della materia. I problemi di determinazione di percorsi e di flusso ottimi sono tra i più noti problemi di ottimizzazione su rete e rientrano nel presente caso in studio.

Definizioni e proprietà fondamentali dei grafi

- Un grafo non orientato $G = (N, A)$ è definito da un insieme finito $N(G) = \{v_1, \dots, v_n\}$ di elementi detti nodi (vertici) e da un insieme $A(G) = \{a_1, \dots, a_m\} \subseteq N \times N$ di coppie non ordinate di nodi dette archi (spigoli).
- Un grafo orientato $G = (N, A)$ definito da un insieme finito $N(G) = \{v_1, \dots, v_n\}$ di elementi detti nodi (vertici) e da un insieme $A(G) = \{a_1, \dots, a_m\} \subseteq N \times N$ di coppie ordinate di nodi dette archi (spigoli).
- Dato un arco $a = (v, u)$ il primo nodo della coppia (v) è detto coda, e si dice che l'arco è uscente da v , il secondo nodo della coppia (u) è detto testa, e si dice che l'arco è entrante in u . L'arco si dice orientato dal nodo v al nodo u . I nodi v e u sono detti estremi di a e si dice che l'arco a incide su v e u . Vale la proprietà $(v, u) \neq (u, v)$.
- Dato un nodo v , i suoi predecessori, indicati con $P(v)$, sono tutti i nodi u tali che $(u, v) \in A$, ovvero $P(v) = \{u : (u, v) \in A\}$.
- Dato un nodo u , i suoi successori, indicati con $S(u)$, sono tutti i nodi v tali che $(u, v) \in A$, ovvero $S(u) = \{v : (u, v) \in A\}$.
- Si definisce catena tra i e j la sequenza di archi che collega i a j : $(i, k_1), (k_1, k_2), \dots, (k_m, j)$ con $k_i \in N, i = 1, \dots, |N|$.
- Si definisce cammino una catena orientata tra i e j .

- E' detto cammino un insieme di archi (sottoinsieme di A) in cui ogni coppia contiene un nodo della coppia precedente.
- Un cammino si dice orientato quando la coda di ogni sua coppia coincide con la testa della coppia precedente.
- Un grafo si dice connesso se esiste sempre un cammino fra qualsiasi coppia di nodi, mentre è fortemente connesso se esiste sempre un cammino orientato fra qualsiasi coppia di nodi.
- Un cammino chiuso si dice ciclo. Se il cammino è orientato il ciclo si dice anch'esso orientato. In un ciclo orientato la testa dell'ultima coppia è uguale alla coda della prima coppia.
- Un grafo che non contiene cicli (orientati o non orientati) viene detto aciclico.
- Un albero è un grafo connesso aciclico, mentre per foglia si intende un nodo che è elemento di testa o di coda di un solo arco. Gli archi di un albero sono detti rami.
- Un albero ha almeno due foglie, e se si estrae un qualsiasi arco da un albero esso viene suddiviso in due sottoalberi distinti.
- Ogni grafo aciclico è in generale l'unione di alberi e viene detto foresta; gli elementi della foresta sono detti cespugli.
- Si consideri un grafo $G = (N, A)$ con n nodi e m archi. Un albero che si può estrarre dal grafo avente come nodi tutti i nodi del grafo è detto albero ricoprente il grafo.
- Si osserva che affinché un albero possa ricoprire un grafo con n nodi deve avere un numero di archi pari a $n - 1$.

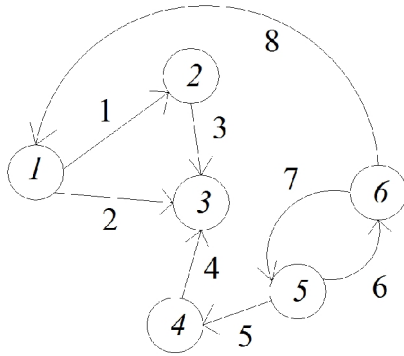
Rappresentazione dei grafi

Matrice di adiacenza

Tale rappresentazione è basata su una matrice rettangolare B di dimensione $n \times n$, dove n è il numero dei nodi, tale che:

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{se } (i, j) \in A \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Segue un esempio di costruzione di una matrice di adiacenza del generico grafo orientato indicato in figura:



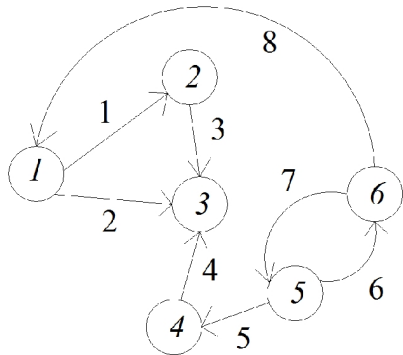
$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Matrice di incidenza

E' una matrice rettangolare B di dimensione $n \times m$, dove ciascuna riga rappresenta un nodo e ciascuna colonna un arco, tale che:

$$a_{i,j} = \begin{cases} -1 & \text{se arco } j\text{-esimo} \\ & \text{entra nel nodo } i \\ 1 & \text{se arco } j\text{-esimo} \\ & \text{esce dal nodo } i \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Segue un esempio di costruzione di una matrice di incidenza del generico grafo orientato indicato in figura:



$$\begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

E' la rappresentazione più ampiamente utilizzata nella stesura di algoritmi che operano su grafi.

9.3 Ottimizzazione su reti

Determinazione del flusso di costo minimo

Si consideri un grafo orientato $G=(N,A)$ definito dall'insieme finito N di nodi e dall'insieme A di archi (i,j) e si supponga di poter definire un certo flusso per ogni arco del grafo, il quale in queste condizioni viene detto rete. Il nodo di partenza viene

chiamato *nodo sorgente*, mentre il nodo di arrivo viene denominato *nodo pozzo*.

Per ogni nodo di transito, ossia né pozzo, né sorgente, per il principio di conservazione del flusso la somma dei flussi degli archi entranti è pari alla somma degli archi uscenti:

$$\sum_{j \in \omega^+(i)} x_{ij} = \sum_{j \in \omega^-(i)} x_{ij} \quad \text{nodo di transito, } \forall i \neq s, p$$

Inoltre per ogni nodo pozzo la somma dei flussi degli archi entranti meno la somma dei flussi degli archi uscenti è uguale alla *domanda del nodo*:

$$\sum_{j \in \omega^+(i)} x_{ij} - \sum_{j \in \omega^-(i)} x_{ij} = b_i \quad \rightarrow \text{domanda del nodo}$$

$$D = \{i \in N : b_i > 0\} \quad \rightarrow \text{insieme dei nodi di domanda}$$

e per ogni nodo sorgente la somma dei flussi degli archi uscenti meno la somma dei flussi degli archi entranti è uguale alla *disponibilità (offerta) del nodo*:

$$\sum_{j \in \omega^+(i)} x_{ij} - \sum_{j \in \omega^-(i)} x_{ij} = b_i \quad \rightarrow \text{offerta del nodo}$$

$$O = \{i \in N : b_i < 0\} \quad \rightarrow \text{insieme dei nodi di offerta}$$

In termini di programmazione lineare, il problema della ricerca di un cammino a costo minimo si esprime nel modo seguente:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} \cdot x_{ij} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j \in S(i)} x_{i,j} - \sum_{k \in P(i)} x_{k,i} = b_i \\ & i \in N \\ & \bar{x} \geq 0 \\ & (i,j) \in A \end{aligned}$$

La matrice A dei coefficienti del sistema è la matrice di incidenza (nodi/archi).

Ricerca del cammino minimo (shortest path problem)

Si consideri un grafo $G=(N,A)$ con n nodi e m archi. Il problema shortest path consiste nel trovare il cammino minimo tra due nodi dati. Ad ogni arco viene associato un peso $c_{i,j}$ che sarà la base discriminante su cui verrà scelto il cammino minimo.

Lo shortest path può essere ricondotto a un problema di minimo costo. La funzione

obbiettivo è definita come $\sum_{(i,j) \in A} c_{ij} \cdot x_{ij}$, dove $c_{i,j}$ è il costo (peso) di ciascun arco e $x_{i,j}$

è una variabile booleana che indica se l'arco (i,j) fa parte o meno del cammino

minimo. Per quanto riguarda i vincoli, per ogni nodo facente parte della soluzione ottimale, si avrà un solo arco entrante con valore 1 e un solo arco uscente con valore 1. Fanno eccezione il nodo di partenza, che avrà solo l'arco uscente uguale a 1 e il nodo destinazione che avrà solo l'arco entrante uguale a 1.

Algoritmo di Dijkstra

La ricerca del cammino minimo (shortest path) può essere effettuata tramite questo algoritmo, per il quale si utilizzeranno le seguenti notazioni:

$P(i)$ = predecessore del nodo i nel cammino minimo da 1 a j , dove 1 è il nodo iniziale;

$\Pi(i)$ = lunghezza del cammino più corto da i al nodo del grafo considerato;

l_{ij} = lunghezza dell'arco da i a j ;

Γ_i = insieme dei successori di i nel grafo;

Γ_i^{-1} = insieme dei predecessori di i nel grafo;

Γ_S = insieme dei successori dei nodi appartenenti a S nel grafo.

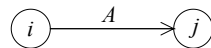
I passi dell'algoritmo sono i seguenti:

- 1)
 - porre $\bar{S} = \{2, \dots, n\}$;
 - $\Pi(1) = 0$
 - $\Pi(i) = \begin{cases} l_{1i} & \text{se } i \in \Gamma_1 \\ \infty & \text{altrimenti} \end{cases}$
 - $P(i) = 1, \forall i \in \Gamma_1$
- 2)
 - trovare $j \in \bar{S}$ tale che:
 - $\Pi(j) = \min_{i \in \bar{S}} \Pi(i)$
 - porre $\bar{S} = \bar{S} - \{j\}$
 - se $|\bar{S}| = 0$ stop, altrimenti proseguire;
- 3)
 - $\forall i \in \Gamma_j \cap \bar{S}$ porre
 - $\Pi(i) = \min[\Pi(i), \Pi(j) + l_{ji}]$
 - $P(i) = j$ se $\Pi(i) = \Pi(j) + l_{ji}$
 - Tornare al passo 2)

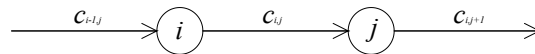
9.4 Tecniche reticolari di programmazione

Diagramma reticolare

Si consideri un grafo orientato $G=(N,A)$ definito dall'insieme finito N di nodi e dall'insieme A di archi (i,j) , dotato di nodo sorgente e di nodo pozzo. Ad ogni processo di produzione può essere associato un diagramma reticolare, ossia un grafo orientato che rappresenta la successione temporale e la reciproca dipendenza delle varie attività che concorrono all'esecuzione del processo stesso. Occorre innanzitutto individuare ed elencare tutte le attività coinvolte nell'esecuzione e distinte le une dalle altre. A seguire dovrà essere rappresentato il grafo orientato, in cui ogni fase lavorativa/attività è rappresentata da un arco o ramo A , i cui nodi estremi i e j rappresentano, a seconda dell'orientazione del ramo, l'inizio e il termine della fase in questione.



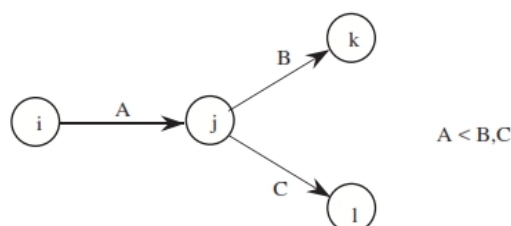
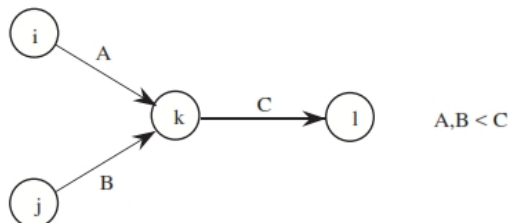
Le diverse fasi costituenti il generico processo produttivo sono caratterizzate da precedenze che ne vincolano l'inizio e la fine. Ad esempio la fase $c_{i-1,j}$ vincola l'inizio della fase $c_{i,j}$, la quale a sua volta vincola l'inizio della fase $c_{i,j+1}$.



Tali vincoli di precedenza vengono espressi tramite le seguenti notazioni:

$$c_{i-1,j} < c_{i,j} < c_{i,j+1}$$

Di seguito vengono illustrati alcuni esempi di diagrammi reticolari con vincoli di precedenza.



La rappresentazione viene solitamente eseguita preliminarmente anche in forma tabellare, per agevolare la costruzione del grafo stesso.

In definitiva, ai fini della costruzione del grafo, occorre seguire le seguenti regole fondamentali:

1. le attività sono rappresentate dai rami del grafo;
2. l'inizio di un'attività è subordinato al completamento di tutte quelle che la precedono: in termini di diagramma reticolare ciò significa che rami diretti verso un nodo rappresentano attività da completare prima che abbiano inizio le attività rappresentate da rami aventi origine nel nodo stesso;
3. la lunghezza dei rami o la loro forma non hanno significato;
4. due nodi non possono essere collegati da più di un ramo;
5. l'inizio del processo è rappresentato da un nodo contrassegnato con zero;
6. tutti i nodi sono numerati in modo che, se esiste un ramo diretto dal nodo i al nodo j risulta $i < j$;
7. il grafo può avere un solo nodo iniziale e un solo nodo finale.

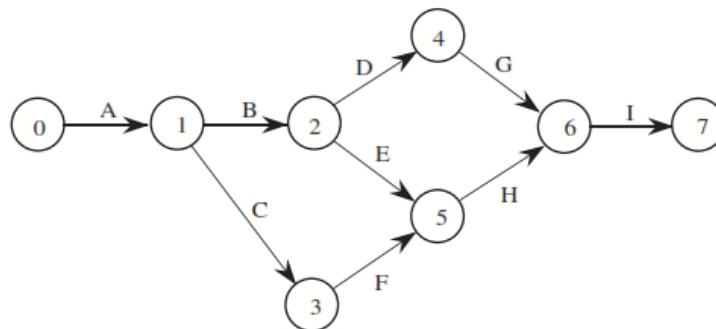


Figura 68 – Esempio di diagramma reticolare in cui i nodi rappresentano fasi di lavoro con i rispettivi tempi di esecuzione e gli archi le connessioni direzionali delle fasi stesse

Talvolta due nodi possono essere collegati da più di un ramo, andando a contrasto della regola indicata in precedenza al punto 4. In tale caso occorre ricorrere ad un artificio che consiste nell'introdurre un *attività fittizia* (*dummy activity*), cui va associato un tempo di esecuzione nullo. Nel caso indicato in figura, introducendo l'attività fittizia X si ottiene il grafo che rispetta la regola menzionata. Con l'introduzione di attività fittizie è quindi possibile individuare ogni attività mediante la coppia ordinata dei nodi estremi.

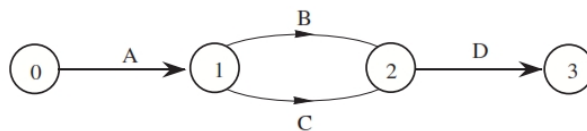


Figura 69 – Collegamento di nodi in contrasto con la regola 4

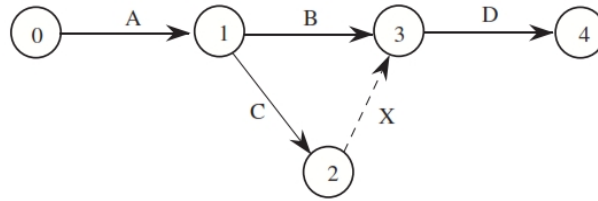


Figura 70 – Risoluzione del contrasto con la regola 4 tramite l'utilizzo di un arco fittizio (X)

Quanto detto sino ad ora rientra nella cosiddetta *analisi qualitativa* delle precedenze. Per applicare le tecniche reticolari di programmazione occorre affiancare all'analisi qualitativa una *analisi quantitativa* dei tempi di esecuzione delle varie fasi concorrenti alla produzione, le quali a loro volta condizionano la durata complessiva del processo. Ad ogni ramo va associato il valore temporale che corrisponde alla durata totale dell'evento $d_{i,j} = t_j - t_i$ in cui t_i è il tempo del nodo che rappresenta l'evento inizio della attività (i, j) individuata, t_j rappresenta il tempo necessario affinché sia terminata l'esecuzione dell'attività precedente, e $d_{i,j}$ indica la durata dell'attività intermedia che congiunge i due vertici i e j presi in analisi.

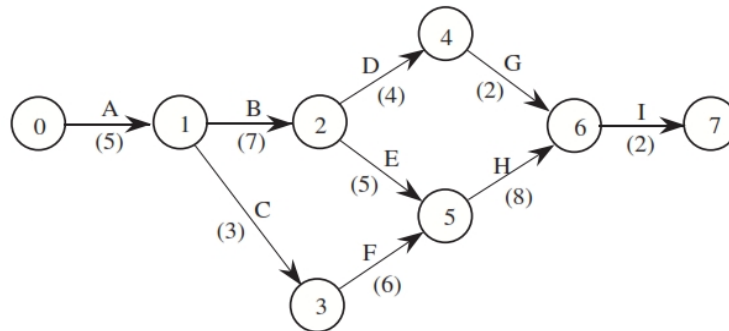


Figura 71 – Esempio di diagramma reticolare: i numeri tra parentesi rappresentano le durate tra le attività descritte da due nodi attigui

La rappresentazione grafica può anche essere effettuata come in figura:

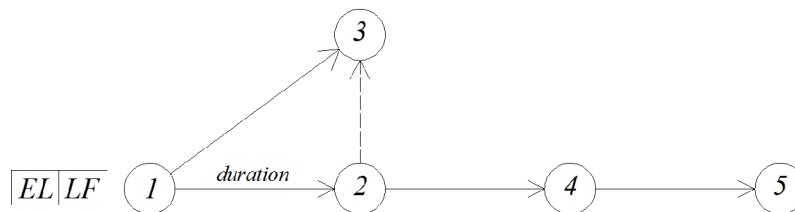


Figura 72 – Rappresentazione alternativa di diagramma reticolare

Per utilizzare la rappresentazione grafica sopra illustrata, occorre considerare i seguenti parametri, diversi a seconda del senso di percorrenza del processo:

- partendo dall'inizio del processo:

- *ES: Earliest Start time* = il minimo tempo al quale l'attività può partire a patto che le precedenti attività siano completate (primo tempo possibile di partenza);
- *LS: Latest Start time* = il minimo tempo necessario all'attività per poter essere completata (ultimo tempo possibile di inizio);
- partendo dalla fine del processo:
 - *EF: Earliest Finish time* = il minimo tempo per il quale l'attività può essere completata sommata all'istante di inizio (primo tempo possibile di fine);
 - *LF: Latest Finish time* = il massimo tempo per il quale l'attività può essere completata senza generare ritardi al processo (ultimo tempo di fine possibile);
 - *Duration*: durata che intercorre tra due nodi contigui.

Spesso si ha la necessità di trovare, dato un progetto costituito da più fasi distinte di cui si conoscono le singole durate e caratterizzate da vincoli di sequenziamento (vincoli tecnologici), l'ordine ottimo delle fasi necessario alla minimizzazione del tempo totale di esecuzione del progetto. Si osservi che:

- nessuna fase i di durata t_i , definito come tempo di inizio al più presto di i , può partire prima che siano terminate tutte le fasi che lo precedono, ossia:

$$t_i = \max(t_h + d_{i,h}), \text{ dove } h \in \Gamma^{-1} \text{ insieme dei predecessori di } i \text{ nel grafo;}$$
- il tempo di inizio al più tardi (tempo massimo di raggiungimento) T_i della fase i è

$$T_i = \min(T_j - d_{i,j}) \text{ dove } j \in \Gamma \text{ insieme dei successori di } i \text{ nel grafo.}$$

Si definisce m la variabile scarto della fase i la quantità $m = T_i - t_i$. Se una fase i è tale per cui $m = T_i - t_i = 0$, essa è definita come fase critica, ossia vale:

$$T_i = \min(T_j - d_{i,j}) = \max(t_h + d_{i,h}) = t_i$$

dove $h \in \Gamma^{-1}$ insieme dei predecessori di i nel grafo, $j \in \Gamma$ insieme dei successori di i nel grafo.

E' definito come il tempo minimo di completamento dell'intero progetto T come il tempo minimo di raggiungimento del nodo finale: $T = t_f$

Questo significa che la durata minima del progetto coincide con la lunghezza del cammino massimo, detto anche *cammino critico*.

In base alle regole di costruzione del diagramma reticolare il tempo minimo di raggiungimento di un nodo i coincide con il peso del cammino massimo dal nodo

iniziale al nodo i , dove i pesi degli archi sono dati dalle durate $t_{i,j}$ delle attività che essi rappresentano. Poiché il diagramma reticolare è aciclico e i nodi sono già numerati in modo topologico, è immediato applicare l'algoritmo per i cammini massimi su grafi aciclici al fine di calcolare i tempi di raggiungimento minimi.

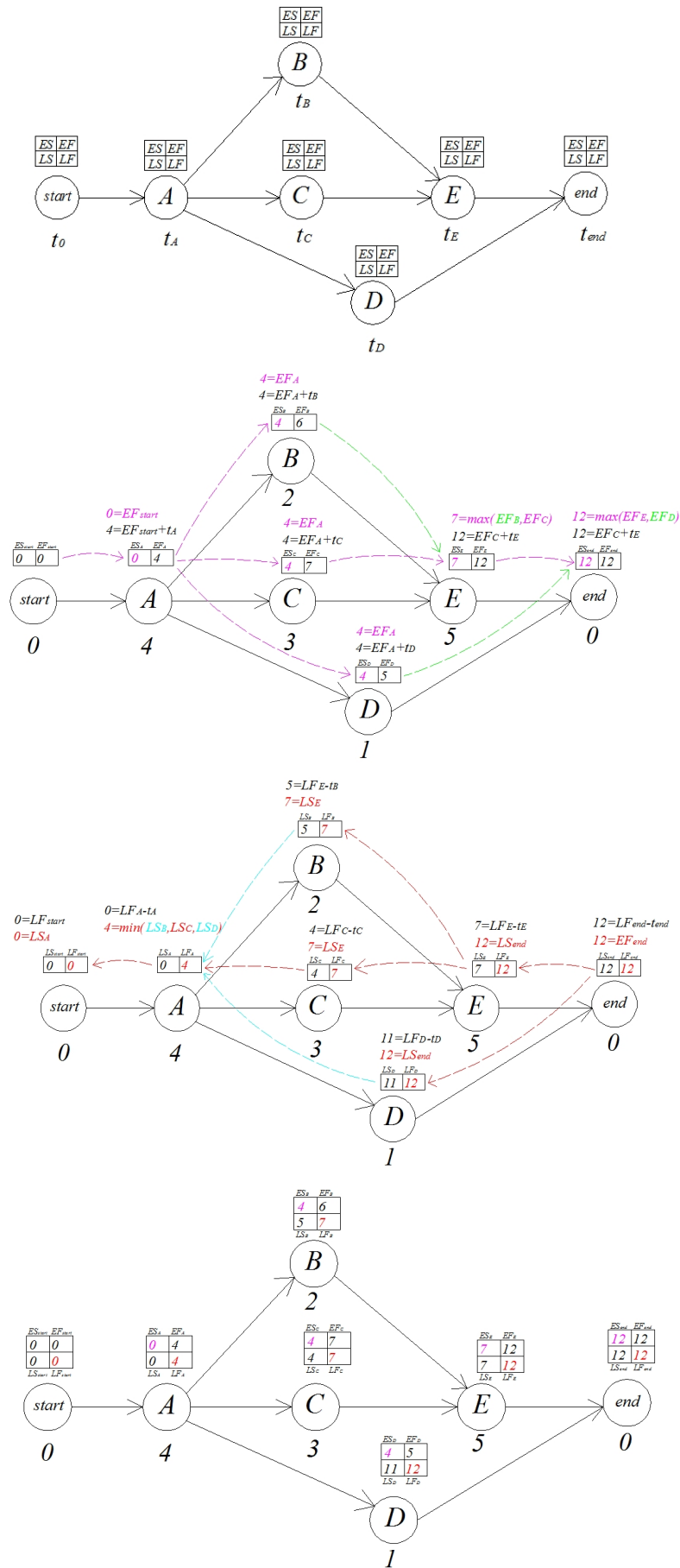
Percorso critico (Critical path)

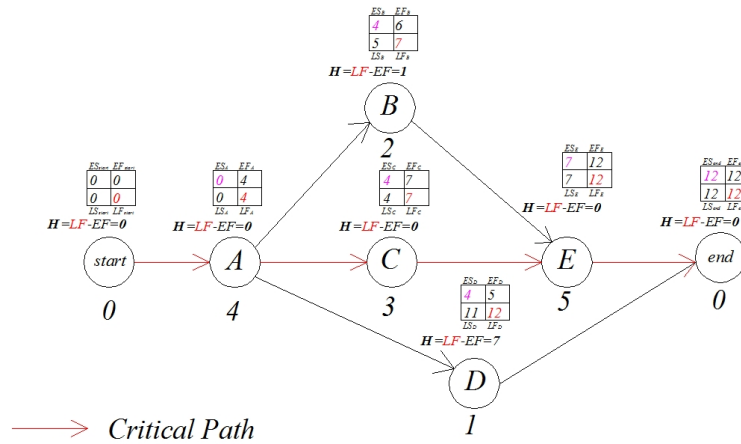
Trovare il percorso critico significa individuare la sequenza di attività che ne determina la durata complessiva dell'intero processo. Possiamo definire questo percorso anche come la sequenza delle attività che devono essere completate nei tempi previsti affinché si eviti uno slittamento della data di fine progetto. Ogni attività che fa parte del percorso critico è definita come attività critica. I nodi critici, ossia i nodi che appartengono al sotto grafo critico, sono tutti quei nodi in cui il tempo massimo di esecuzione coincide con il tempo minimo. Risulta quindi necessario determinare entrambi i tempi di esecuzione per ogni nodo. Lo *scheduling* è l'operazione che determina l'istante in cui parte l'esecuzione delle attività in un dato grafo diretto. Più formalmente, dato il grafo orientato $G=(N,A)$ la soluzione del problema richiede che il tempo d'inizio di un'operazione t_i sia almeno lungo quanto il tempo di inizio t_j di ognuno dei suoi predecessori diretti, più il suo ritardo di esecuzione, così come mostra la seguente relazione:

$$t_i - t_j + d_{i,j}, \forall i, j : (n_i, n_j) \in N$$

Sia $T = t_f$ il tempo minimo di completamento di un progetto, corrispondente a un insieme $\{t_{i,j}\}$ di valori prefissati dei tempi di esecuzione delle singole attività. Un'attività (h,k) viene detta *attività critica* se una variazione positiva comunque piccola ma non nulla del suo tempo di esecuzione comporta una variazione della stessa entità nel tempo minimo di completamento del progetto; ossia, un'attività (h,k) è critica se, sostituito $t_{h,k}$ con $t_{h,k} + \Delta t$ con $\Delta t \neq 0$ il tempo minimo di completamento del progetto diventa $T + \Delta t$, per qualunque valore positivo di Δt .

A titolo di esempio nelle figure che seguono è illustrata l'applicazione del metodo appena descritto, su un progetto costituito dalle fasi A, B, C, D, E rappresentate del diagramma reticolare indicato e caratterizzato dalle durate delle fasi indicate in ogni nodo.





Metodo del percorso critico (Critical Path Method/CPM)

Il CPM è una tecnica che tiene conto, oltre che del tempo di esecuzione delle attività di un progetto, anche del loro costo in funzione del tempo di esecuzione e consente di pianificare la riduzione del tempo di completamento di un progetto con il minimo aumento di costo. Nel CPM si assume che il tempo elettivamente richiesto per l'esecuzione di ogni attività coincida sempre con certezza con quello programmato, per cui si escludono le aleatorietà. Alla base del CPM c'è l'osservazione che, nella gran parte dei casi, il costo di un attività dipende fortemente dal tempo impiegato per la sua esecuzione. Data un'attività (i, j) nel CPM si assume che il costo di esecuzione $c_{i,j}$ sia legato al tempo di esecuzione $t_{i,j}$ da una relazione lineare del tipo:

$$c_{i,j} = k_{i,j} - t_{i,j} \cdot h_{i,j}$$

$$a_{i,j} \leq t_{i,j} \leq b_{i,j}$$

ove $k_{i,j}$ e $h_{i,j}$ sono opportune costanti positive e $a_{i,j}$ e $b_{i,j}$ rappresentano rispettivamente il valore minimo e il valore massimo ammissibili del tempo di esecuzione $t_{i,j}$.

Teoria della dualità

Ogni problema di programmazione lineare, detto *primale*, ammette un corrispondente problema detto *duale*. Si può dimostrare che la soluzione ad entrambi i problemi è la stessa. Se ad esempio nel problema primario si ricercasse la massimizzazione dei profitti, l'obiettivo del corrispondente problema duale sarebbe la minimizzazione dei costi, e la soluzione z del primale corrisponderebbe a quella del duale, ossia lo stesso valore ottimo delle due funzioni obiettivo.

Tabella 33 – Costruzione del Duale di un problema in forma standard

Primale		Duale	
maximize	$z = \bar{c} \cdot \bar{x}$	minimize	$w = \bar{b} \cdot \bar{y}$
subject to	$A \cdot \bar{x} \leq \bar{b}$	subject to	$\bar{y} \cdot A \geq \bar{c}$
	$\bar{x} \geq 0$		$\bar{y} \geq 0$

Esprimendo in forma esplicita quanto indicato in tabella si ottiene:

Primale: maximize $z = c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + \dots + c_n \cdot x_n$
 subject to $a_{1,1} \cdot x_1 + a_{1,2} \cdot x_2 + \dots + a_{1,n} \cdot x_n \leq b_1$
 $a_{2,1} \cdot x_1 + a_{2,2} \cdot x_2 + \dots + a_{2,n} \cdot x_n \leq b_2$
 ...
 $a_{m,1} \cdot x_1 + a_{m,2} \cdot x_2 + \dots + a_{m,n} \cdot x_n \leq b_m$
 $x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$

Duale: minimize $w = b_1 \cdot y_1 + b_2 \cdot y_2 + \dots + b_m \cdot y_m$
 subject to $a_{1,1} \cdot y_1 + a_{2,1} \cdot y_2 + \dots + a_{m,1} \cdot y_m \geq c_1$
 $a_{1,2} \cdot y_1 + a_{2,2} \cdot y_2 + \dots + a_{m,2} \cdot y_m \geq c_2$
 ...
 $a_{i,m} \cdot y_1 + a_{2,m} \cdot y_2 + \dots + a_{m,n} \cdot y_m \geq c_n$
 $y_1, y_2, \dots, y_m \geq 0$

Tabella 34 – Corrispondenza tra problema Primale e Duale

Primale	Duale
massimizzazione	minimizzazione
m vincoli	m variabili
n variabili	n vincoli
coefficienti funzione obiettivo	termini noti
termini noti	coefficienti funzione obiettivo
matrice A	matrice A^T
vincoli di uguaglianza	variabili libere
variabili libere	vincoli di uguaglianza
vincoli di disuguaglianza	variabili non negative
variabili non negative	vincoli di disuguaglianza

Costruzione del Modello Matematico

Il percorso critico, è l'insieme dei nodi critici (cioè quei nodi che vincolano il tempo di esecuzione che costituiscono uno dei possibili percorsi di un grafo. Per determinarlo è possibile impostare il modello matematico del tipo *longest path*, il quale è la versione inversa dello *shortest path* già descritto ai paragrafi precedenti. In questo caso il *longest path* è il problema *primale*: si ha una rete in cui si invia una quantità unitaria di flusso dal nodo sorgente al nodo pozzo. Per definizione, il costo complessivo del flusso all'interno della rete è pari al costo del percorso critico, determinato come somma dei singoli costi degli archi che lo compongono. Viene imposta la binarietà delle variabili di flusso, ossia ciascun arco può appartenere o meno al percorso critico. La matrice di incidenza (matrice A) associata alle equazioni di conservazione di flusso è di tipo unimodulare (ogni elemento può assumere il valore 0, +1 e -1). Il problema *duale* permette invece di identificare gli istanti di partenza di ciascuna singola attività.

In termini di programmazione lineare il problema si traduce come segue:

$$\begin{aligned} \max \quad & z = \sum_i \sum_j c_{i,j} \cdot x_{i,j} && \text{con } (i, j) \in A \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j \in S(i)} x_{i,j} - \sum_{k \in P(i)} x_{k,j} = && \begin{array}{ll} 1 & i = 0 \quad (\text{nodo sorgente}) \\ 0 & i \neq 0, n \quad (\text{nodo di transito}) \\ -1 & i = n \quad (\text{nodo pozzo}) \end{array} \\ & && x_{i,j} \geq 0, \forall (i, j) \in A \end{aligned}$$

in cui:

- $P(i)$ = insieme dei “predecessori”
- $P(i) = \{j : (i, j) \in A\}$
- $S(i)$ = insieme dei “successori”
- $S(i) = \{k : (i, k) \in A\}$

Il modello è esprimibile in forma matriciale come:

$$\begin{aligned} \max \quad & z = c^T \cdot \bar{x} \\ \text{s.t.} \quad & A \cdot \bar{x} = b \\ & \bar{x} \geq 0 \end{aligned} \quad (*)$$

oppure

$$\begin{aligned} \min \quad & z = -c^T \cdot \bar{x} \\ \text{s.t.} \quad & A \cdot \bar{x} = b \\ & \bar{x} \geq 0 \end{aligned} \quad (*)$$

Per la conservazione del flusso si può affermare la relazione:

$$\sum_{j \in S(i)} x_{i,j} - \sum_{k \in P(i)} x_{k,i} = \begin{cases} 1 & \text{se } i = 0 \text{ (nodo sorgente)} \\ 0 & \text{se } i \neq 0, n \text{ (nodo di transito)} \\ -1 & \text{se } i = n \text{ (nodo pozzo)} \end{cases}$$

riscrivibile come:

$$\sum_{j \in S(i)} x_{i,j} - \sum_{k \in P(i)} x_{k,i} = b$$

La relazione matriciale (*) è equivalente alla seguente relazione:

$$\begin{aligned} \max \quad & z = c^T \cdot \bar{x} \\ \text{s.t.} \quad & A \cdot \bar{x} = b \\ & \bar{x} \geq 0 \end{aligned}$$

dove b rappresenta il vettore del bilancio dei nodi (per ogni nodo il bilancio è la differenza fra il flusso uscente e il flusso entrante) e A è la matrice di incidenza.

Imporre la conservazione di flusso, e quindi, il bilancio ai nodi, significa imporre che il flusso non può essere né creato né distrutto, tramite l'impiego di variabili booleane. Il bilancio vale:

- 1 nel nodo sorgente ($i = 0$)
- 0 nel nodo di transito ($i \neq 0, n$)
- -1 nel nodo pozzo ($i = n$)

Possiamo scrivere il generico b come:

$$b = c_i - c_j$$

dove c_i e c_j sono i versori della base canonica associati al nodo i e j .

Concludendo il problema primale che vogliamo risolvere, assume la forma matriciale:

$$\begin{aligned} \max \quad & z = c^T \cdot \bar{x} \\ \text{s.t.} \quad & A \cdot \bar{x} = c_1 - c_n \\ & \bar{x} \geq 0 \end{aligned} \quad (*)$$

in cui:

c^T = vettore dei costi

x = vettore delle variabili

$A =$ matrice di incidenza

$c_1 - c_n = b$ termine noto del sistema di equazioni dei vincoli

Il problema duale si determina dal primale, secondo le regole sulla teoria della dualità, dovendo essere espresso come problema di minimo.

Esprimendo in formule si ha:

$$\begin{aligned} \max \quad & b^T \cdot t \\ \text{s.t.} \quad & t^T \cdot A \leq -c^T \quad \forall t \end{aligned}$$

e generalizzando:

$$\begin{array}{l|l} \text{maximize} & \sum_i b_i \cdot t_i \\ \text{subject to} & t_i - t_j \leq -c_{i,j} \\ & \forall (i,j) \in N \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{l} \text{maximize} \quad t_1 - t_n \\ \text{subject to} \quad t_i - t_j \leq -c_{i,j} \\ \quad \quad \quad \forall (i,j) \in N \end{array} \right.$$

Per dare un significato fisico al modello, inserendo il percorso di rete dal nodo 0 al nodo n , e apportando una trasformazione di segno, si ottiene:

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & Z = t_n - t_1 \\ \text{subject to} \quad & t_i - t_j \geq -c_{i,j} \\ & \forall (i,j) \in N \\ & 1 \quad \text{se } i = 0 \quad (\text{nodo sorgente}) \\ & 0 \quad \text{se } i \neq 0, n \quad (\text{nodo di transito}) \\ & -1 \quad \text{se } i = n \quad (\text{nodo pozzo}) \end{aligned}$$

In conclusione e riepilogando, il processo di costruzione e soluzione del modello segue i seguenti passi:

- realizzazione del diagramma reticolare nel modo descritto ai paragrafi precedenti;
- costruzione della matrice di adiacenza;
- inserimento dei parametri della matrice nel blocco di equazioni del sistema relativo al problema Primale;
- eventuale trasformazione del problema Primale nel Duale;
- elaborazione tramite calcolatore e ricerca della soluzione.

9.5 Metodo del Max flow – min cut

Questo metodo consente di determinare il valore massimo del flusso entrante trasferibile in una rete dal nodo di origine al nodo terminale. In riferimento al caso in esame i nodi sono assimilabili alle distinte fasi di processo di un ciclo produttivo, e gli archi sono assimilabili a percorsi di flusso dotati di capacità limitata inferiormente e superiormente determinata dalla tecnologia del processo produttivo. Come si vedrà nei prossimi sotto paragrafi, si dimostra che se esiste un certo flusso il cui valore totale è uguale alla capacità di una certa sezione, allora tale flusso ha un valore totale massimo e quella sezione una capacità minima.

Reti di flusso

Un grafo orientato $G=(N,A)$ è definito dall'insieme finito N di elementi detti nodi e dall'insieme A di coppie ordinate di nodi dette archi (i,j) , dove il nodo di partenza viene chiamato nodo sorgente, mentre il nodo di arrivo viene denominato nodo pozzo.

Si definisce flusso sulla rete o sul grafo la funzione $x : A \rightarrow \mathfrak{R}^+_0$ in cui x_{ij} è detto flusso sull'arco (i,j) e sono soddisfatti i vincoli di capacità degli archi e i vincoli di bilanciamento ai nodi (*legge di Kirchoff*). Si definisce capacità dell'arco la funzione $c : A \rightarrow \mathfrak{R}^+_0$ in cui c_{ij} è detto capacità dell'arco (i,j) .

L'arco (i,j) è detto saturo se vale $x_{ij} = c_{ij}$.

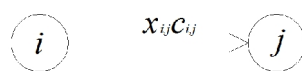


Figura 73 – Coppia di nodi legati da un arco attraverso il quale passa un flusso

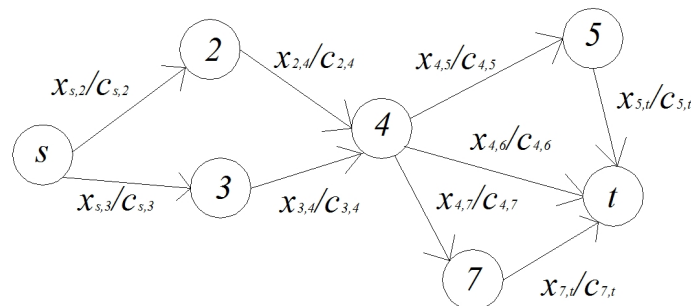


Figura 74 – Esempio di rete di flusso

Valgono le seguenti definizioni e regole:

- vincoli di capacità degli archi: $x_{ij} \leq c_{ij} \quad \forall (i, j) \in A$
- vincoli di bilanciamento ai nodi: $\sum_{j \in \omega^+(i)} x_{ij} - \sum_{j \in \omega^-(i)} x_{ij} = 0$
- è detto pozzo il nodo in cui non escono archi;
- è detto sorgente il nodo in cui non entrano archi;
- per ogni nodo di transito la somma dei flussi degli archi entranti è pari alla somma

degli archi uscenti: $\sum_{j \in \omega^+(i)} x_{ij} = \sum_{j \in \omega^-(i)} x_{ij}$

- per ogni nodo pozzo la somma dei flussi degli archi entranti meno la somma dei flussi degli archi uscenti è uguale alla domanda del nodo:

$$\sum_{j \in \omega^+(i)} x_{ij} - \sum_{j \in \omega^-(i)} x_{ij} = b_i \quad \rightarrow \text{domanda del nodo}$$

$$D = \{i \in N : b_i > 0\} \quad \rightarrow \text{insieme dei nodi di domanda}$$

- per ogni nodo sorgente la somma dei flussi degli archi uscenti meno la somma dei flussi degli archi entranti è uguale alla disponibilità (offerta) del nodo:

$$\sum_{j \in \omega^+(i)} x_{ij} - \sum_{j \in \omega^-(i)} x_{ij} = b_i \quad \rightarrow \text{offerta del nodo}$$

$$O = \{i \in N : b_i < 0\} \quad \rightarrow \text{insieme dei nodi di offerta}$$

- tutti i flussi degli archi sono non negativi: $x_{ij} \geq 0$.

Funzione obiettivo

Il problema è quello di determinare l'ammontare massimo di flusso che può essere inviato dal nodo sorgente al nodo pozzo rispettando i vincoli di capacità degli archi e le leggi di Kirchoff (bilanciamento ai nodi):

$$\text{maximize } z = \sum_i \sum_j c_{i,j} \cdot x_{i,j} \quad \forall (i, j) \in A$$

$$\text{subject to } \begin{array}{ll} z & i = 0 \text{ (nodo sorgente)} \\ 0 & i \neq 0, n \text{ (nodo di transito)} \\ -z & i = n \text{ (nodo pozzo)} \end{array}$$

$$x_{i,j} \geq 0, \forall (i,j) \in A$$

Taglio minimo

Sia $G = (N, A)$ un grafo e S un sottoinsieme di N tale che $s \in S \wedge t \notin S$ (s nodo sorgente e t nodo pozzo). L'insieme di archi H_S di archi di G aventi un estremo in S e l'altro estremo in $T = N \setminus S$ viene chiamato *taglio*. Si definiscono le seguenti partizioni di H_S :

- F_S : insieme degli archi in avanti al taglio, ossia gli archi diretti da S a T (archi forward);
- B_S : insieme degli archi indietro al taglio, ossia gli archi diretti da T a S (archi backward).

La capacità del taglio si definisce come:

$$c(H_S) = \sum_{(i,j) \in F_S} c_{i,j}$$

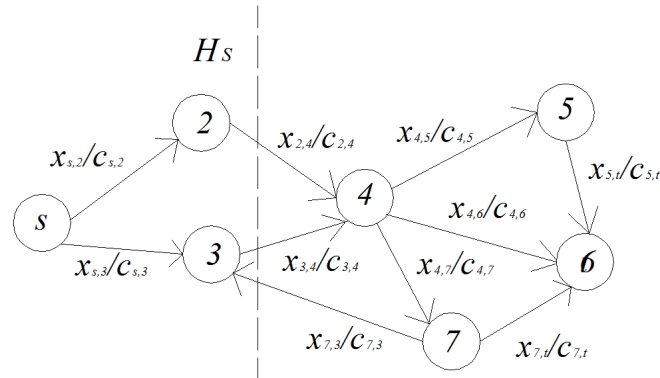


Figura 75 – Esempio di rete di flusso con taglio H_S

Nel caso in figura si ha:

$$H_S = \{(2,4), (3,4), (7,3)\};$$

$$F_S = \{(2,4), (3,4)\};$$

$$B_S = \{7,3\}.$$

Per ogni taglio, il valore del flusso massimo nella rete non può superare quello del costo del taglio:

$$v = \sum_{(i,j) \in F_S} x_{ij} - \sum_{(i,j) \in B_S} x_{ij} \leq c(H_S)$$

Se la diseuguaglianza precedente diventa un'uguaglianza, allora v è massimo e H_S è un taglio a capacità minima.

Il problema del taglio a costo minimo consiste nel determinare, tra tutti i tagli possibili all'interno di una rete quello il cui costo sia il più piccolo possibile, ovvero

$$\min c(H_S) = \sum_{(i,j) \in F_S} c_{i,j}$$

Il problema può anche essere interpretato come l'individuazione dei *colli di bottiglia* (*bottle necks*) della rete.

Cammino aumentante

Sia P un cammino, ossia una catena orientata tra i e j da s a t non orientato, ossia tale che possa contenere archi (i, j) presi sia nel verso originale del grafo G che in quello opposto (si definisce catena tra i e j la sequenza di archi che collega i a j : $(i, k_1), (k_1, k_2), \dots, (k_m, j)$ con $k_i \in N, i = 1, \dots, |N|$). Siano F gli archi in avanti i primi e B gli archi all'indietro i secondi del cammino P . Il cammino P è detto aumentante rispetto al flusso v se:

- $\forall F \in P$ vale $x_{ij} < c_{ij}$, ossia $\forall F$ possiede una capacità residua > 0 , dunque può ulteriormente essere caricato;
- $\forall B \in P$ vale $x_{ij} > 0$, ossia $\forall B \in P$ ha il flusso che lo attraversa positivo, dunque può essere scaricato.

Dato un cammino aumentante P , la quantità di flusso che può percorrere il cammino è:

$$\varepsilon = \min\{\varepsilon_1, \varepsilon_2\}$$

dove:

- $\varepsilon_1 = \min\{c_{ij} - x_{ij} : (i, j) \in P \wedge F\}$
- $\varepsilon_2 = \min\{x_{ij} : (i, j) \in P \wedge B\}$

Individuato un cammino aumentante P si può osservare che il flusso v può essere aumentato di ε aumentando di tale quantità il flusso su tutti gli F di P e diminuendo ugualmente di ε il flusso sugli archi di B di P .

Il valore v del flusso è massimo se e solo se non esistono cammini aumentanti da s a t relativamente a tale flusso.

Se tutte le capacità assegnate agli archi della rete sono intere, allora esiste un flusso di valore massimo con flussi interi sugli archi.

Grafo residuale o residuo (grafo incrementale)

Sia $G = (N, A)$ un grafo. E' detto grafo residuo, o residuo $\bar{G} = (N, \bar{A})$ il grafo ottenuto da G assegnando ad ogni arco di G al più due archi. Ad ogni arco generico $(i, j) \in A$ attraversato da un flusso x_{ij} avente capacità c_{ij} corrispondono i seguenti archi:

- arco a^+ da i a j se $x_{ij} < c_{ij}$;
- arco a^- da j a i se $x_{ij} > 0$.

A tali archi viene assegnata una lunghezza definita come:

- per gli archi a^+ : $r_{ij} = c_{ij} - x_{ij}$;
- per gli archi a^- : $r_{ji} = x_{ij}$.

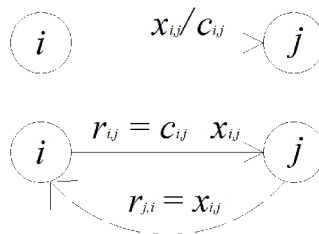


Figura 76 – Corrispondenza degli archi tra il grafo e il residuo

Il flusso $r_{ij} = c_{ij} - x_{ij}$ rappresenta la quantità ancora trasferibile nella direzione $i \rightarrow j$ fino al raggiungimento della saturazione della capacità. La definizione di $r_{ji} = x_{ij}$ prende spunto dalla seguente considerazione: ipotizzando di voler trasferire un flusso δ lungo un percorso di direzione opposta a quella dell'orientamento dell'arco (i, j) , affinché la distribuzione di flusso sia ammissibile è necessario ridurre di δ il flusso trasferito nella direzione $j \rightarrow i$ in modo da assicurare il soddisfacimento dei vincoli di bilanciamento di flusso in corrispondenza dei nodi i e j .

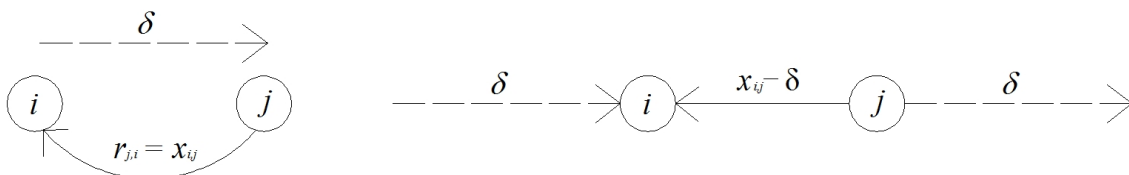


Figura 77 – Interpretazione grafica del flusso nel grafo residuo

Teorema del maxflow – min cut

Il valore massimo di un flusso da s a t è uguale alla capacità di un taglio di minima capacità:

$$Max\ flow = min\ cut$$

L'algoritmo con cui viene risolto il problema di flusso massimo fornisce immediatamente anche una soluzione per il problema di taglio a costo minimo. Il problema di taglio a costo minimo è un problema duale del problema di flusso massimo.

Teorema del cammino aumentante

Considerato un flusso v il suo valore è massimo se e solo se il grafo residuo non contiene cammini aumentanti.

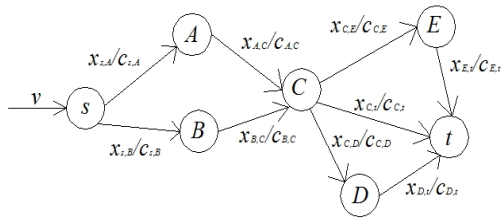
Algoritmo di Folk – Fulkerson

L'algoritmo di Folk – Fulkerson permette di trovare il flusso massimo che attraversa un grafo da un punto ad un altro di questo.

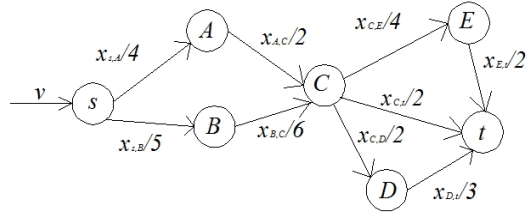
I passi dell'algoritmo sono i seguenti:

- 1) porre $v = 0$, $x_{ij} = 0 \quad \forall (i, j) \in A$;
- 2) porre $\bar{A} = \{\emptyset\}$;
costruire il grafo residuale $\bar{G} = (N, \bar{A})$;
per ogni arco $(i, j) \in A$, nel grafo residuale corrisponderanno:
 - $\bar{A} = \bar{A} \cup (i, j)$, $\lambda(i, j) = \text{vero}$, $r_{ij} = c_{ij} - x_{ij}$ se $x_{ij} < c_{ij}$;
 - $\bar{A} = \bar{A} \cup (j, i)$, $\lambda(j, i) = \text{falso}$, $r_{ji} = x_{ij}$ se $x_{ij} > 0$;
- 3) cercare un cammino aumentante P tra s e t sul grafo residuale $\bar{G} = (N, \bar{A})$;
 - se non esiste nessun cammino allora stop $\Rightarrow v = \max$
 - altrimenti P costituisce un cammino aumentante sul grafo $G = (N, A)$
- 4) calcolare $\varepsilon = \min \{c_{ij} - x_{ij} : (i, j) \in P\}$
- 5) sul grafo $G = (N, A) \quad \forall (i, j) \in P$ porre
 - $x_{ij} = x_{ij} + \varepsilon$ se $\lambda(i, j) = \text{vero}$;
 - $x_{ij} = x_{ij} - \varepsilon$ se $\lambda(i, j) = \text{falso}$;
- 6) porre $v = v + \varepsilon$ e tornare al passo 2).

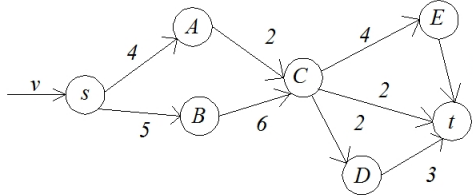
A titolo di esempio nelle figure che seguono è illustrata l'applicazione del metodo su una rete di flusso caratterizzata dai nodi s, t, A, B, C, D, E, D e relativi archi di capacità nota.



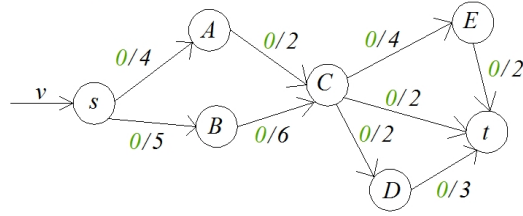
residual graph initial



flow graph initial $x_m=0$

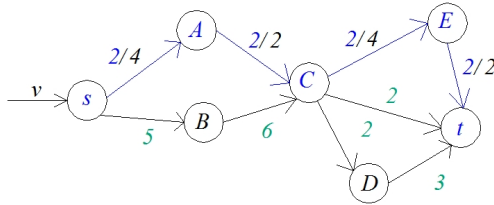


augmenting path $x_{ij}=2$
 $p(s \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow t)$ $x_m=0+2=2$

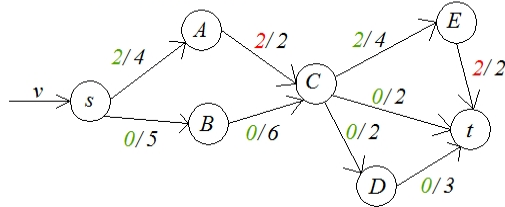


residual graph updating

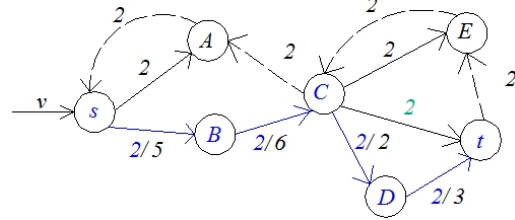
capacità arco inverso residuale = flusso saturated path
capacità arco diretto residuale = capacità arco diretto - flusso saturated path



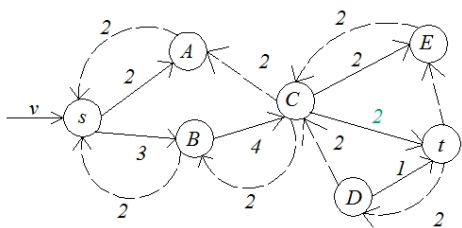
flow graph updated $x_m=2$



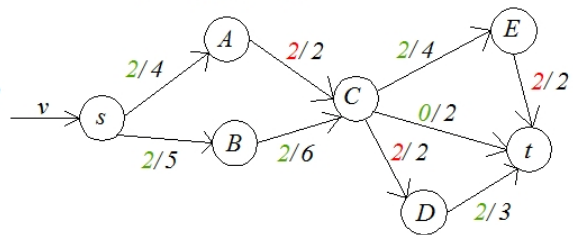
augmenting path $x_{ij}=2$
 $p(s \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow t)$ $x_m=0+2+2=4$



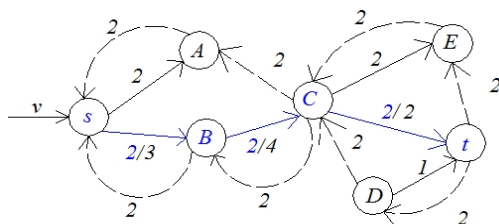
residual graph updating



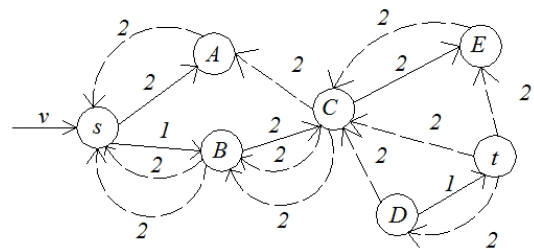
flow graph updated $x_m=4$

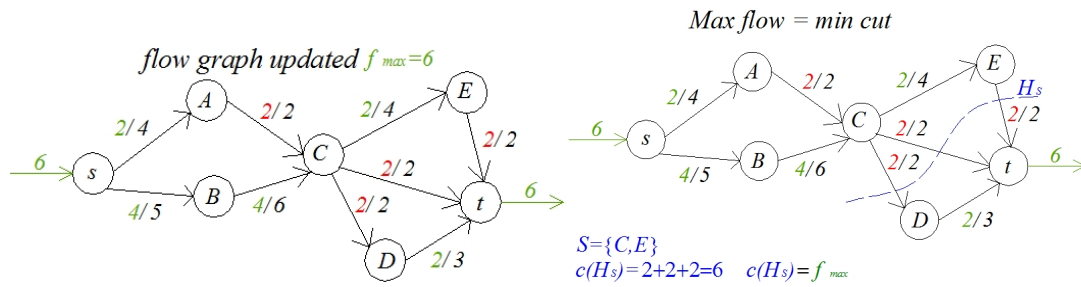


augmenting path $x_{ij}=2$
 $p(s \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow t)$ $x_m=0+2+2+2=6$



residual graph updating





Problema multi sorgenti e multi pozzi

In alcuni casi può capitare che il diagramma reticolare presenti più sorgenti e più pozzi. In questo caso, al fine di impostare correttamente il problema matematico, devono essere inserite una meta sorgente (super sorgente) e un meta pozzo (super pozzo), a cui vanno collegate le sorgenti e i pozzi. Ad ogni ramo di collegamento tra super sorgente e sorgenti e super pozzo e pozzi, va assegnata una capacità infinita. Nel caso pratico è sufficiente assegnare un valore di capacità molto superiore alle capacità di tutti i rami presenti nel diagramma.

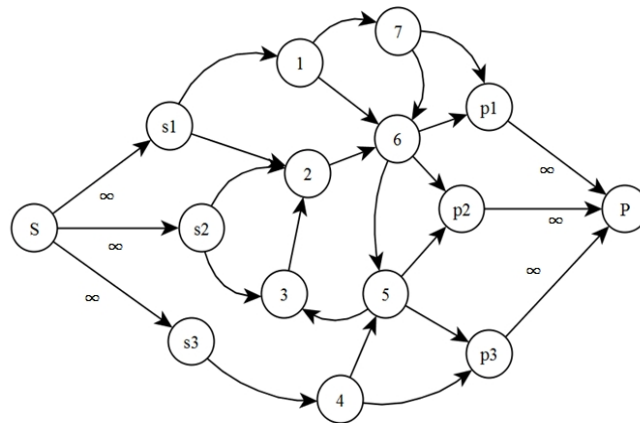


Figura 78 – Rete di flusso multi sorgente e multi pozzo

9.6 Scelta dei modelli

L’ottimizzazione dei processi produttivi relativi alla attività di estrazione e trasformazione dei lapidei carbonatici considerati nel presente studio, presuppone l’individuazione delle funzioni obiettivo da minimizzare o massimizzare a seconda della loro natura. Fondamentalmente il miglioramento della produzione si raggiunge massimizzando il flusso di materiale processato, compatibilmente con le capacità tecnologiche delle linee produttive, oppure minimizzando i costi dei fattori produttivi secondo le forme che essi assumono e secondo la loro variazione nel tempo e nello spazio.

All'interno dello stabilimento si individuano processi produttivi ben definiti e schematizzabili in quanto le linee di lavorazione sono fisse nello spazio e funzionano in modo costante nel tempo, per cui è possibile optare per l'applicazione di diversi modelli matematici da applicare a seconda del problema da risolvere. Nel caso studiato si è scelto di affrontare un problema di *scheduling* associato separatamente al percorso temporale delle fasi di lavorazione dei blocchi regolari e quello dei blocchi informi, essendo le linee produttive distinte. Il metodo migliore per la risoluzione del problema è il *Critical Path Method* (Percorso Critico), pertanto si è optato per questa scelta. Ugualmente si è proceduto per quanto riguarda le lavorazioni in cava, data la disposizione delle catene di lavorazione in serie e parallelo dedicate alla produzione delle bancate, fette e blocchi.

In stabilimento si è inoltre scelto di affrontare il problema della determinazione delle quantità massime di materiale da processare, in modo che vengano rispettati i vincoli dettati dalle capacità delle linee produttive, e dell'individuazione dei nodi critici del sistema che possano in tal modo risolti. A tale fine si è optato per l'applicazione del *Max Flow/Min Cut Method* (Massimo Flusso/Minimo Taglio). Di entrambi i metodi è stata data la descrizione teorica ai paragrafi precedenti.

Tabella 35 – Quadro riepilogativo dei problemi affrontati e dei relativi metodi di risoluzione

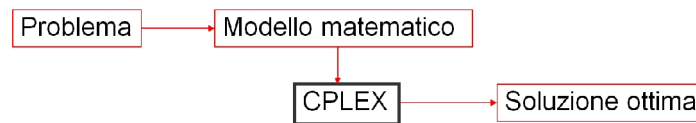
Area	Reparto	Problema	Variabili	Pesi	Funzione Obiettivo	Metodo risolutivo	Algoritmo risolutivo
Ca	Ca	Determinazione del percorso critico corrispondente al tempo massimo di lavorazione dell'intera linea produttiva	F	T	Percorso sequenziale ottimo	CPM	LPA
Ca	Ca	Determinazione del percorso critico corrispondente al tempo massimo di lavorazione dell'intera linea produttiva	F	T	Percorso sequenziale ottimo	CPM	SPA
St	Pl	Determinazione del percorso critico corrispondente al tempo massimo di lavorazione dell'intera linea produttiva	F	T	Percorso sequenziale ottimo	CPM	LPA
St	Pp	Determinazione del percorso critico corrispondente al tempo massimo di lavorazione dell'intera linea produttiva	F	T	Percorso sequenziale ottimo	CPM	SPA
St	Pp	Determinazione del massimo flusso in ingresso alla linea di lavorazione	Q	C	Flusso di materiale in ingresso a monte della linea produttiva	MF	FFA
St	Pl	Determinazione del massimo flusso in ingresso alla linea di lavorazione	Q	C	Flusso di materiale in ingresso a monte della linea produttiva	MF	FFA
St	Pp	Individuazione dei bottle necks (colli di bottiglia)	Q	C	Punti a capacità produttiva critica	mc	FFA
St	Pl	Individuazione dei bottle necks (colli di bottiglia)	Q	C	Punti a capacità produttiva critica	mc	FFA

Simbologia

Ca: cava;
 St: stabilimento;
 Pl: produzione lastre;
 Pp: produzione pannelle;
 F: fase lavorativa;
 Q: Flusso di materiale passante nell'arco di linea produttiva;
 T: tempo di lavorazione della fase produttiva;
 S: costo della movimentazione;
 L: lunghezza del percorso;
 C: capacità massima dell'arco di linea produttiva;
 CPM: Critical Path Method;
 MCF: Min Cost Flow
 MF: Max Flow Method;
 Mc: Min Cut Method;
 FFA: Ford – Fulkerson Algorithm;
 LPA: Longest Path Algorithm;
 SPA: Shortest Path Algorithm.

9.7 Il solver per la risoluzione numerica

Per l'elaborazione degli algoritmi si è optato per l'impiego del software IBM© ILOG Cplex. Cplex è un software implementato in linguaggio C, fortemente utilizzato in ambito industriale e di ricerca, finalizzato alla soluzione di problemi di programmazione matematica lineare, anche di notevoli dimensioni, utilizzando le varianti primale o duale del metodo del simplesso o metodi di punto interno. Risolve inoltre problemi di programmazione quadratica convessa, e problemi con vincoli quadratici convessi.



La finalità è la ricerca della soluzione ottima: ad ogni variabile del sistema viene attribuito un valore in modo che la funzione obiettivo sia la migliore ottenibile in base ai parametri del problema. Il software può essere utilizzato in modalità interattiva, applicazione con la quale è possibile interagire tramite riga di comando. Si può descrivere il modello del problema (o importarlo da un file esterno) tramite una determinata sintassi, configurare il risolutore tramite l'impostazione di parametri opportuni e infine chiedere l'ottimizzazione del modello specificato. La struttura di un'applicazione che utilizza questa tecnologia prevede generalmente le seguenti fasi:

- costruzione di un ambiente, ovvero un oggetto che si occuperà in particolare della gestione ottimizzata della memoria di sistema;
- creazione di un modello, ovvero un insieme di vincoli da rispettare e una funzione obiettivo da ottimizzare;
- impostazione dei parametri di controllo;
- risoluzione del modello, ovvero il procedimento tramite il quale Cplex raggiunge la soluzione;
- querying dei risultati.

La tipica forma di un problema di ottimizzazione lineare risolubile da Cplex è la seguente:

$$\begin{aligned}
 &\text{maximize (or minimize)} && c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + \dots + c_n \cdot x_n \\
 &\text{subject to} && a_{1,1} \cdot x_1 + a_{1,2} \cdot x_2 + \dots + a_{1,n} \cdot x_n = b_1 \\
 &&& a_{2,1} \cdot x_1 + a_{2,2} \cdot x_2 + \dots + a_{2,n} \cdot x_n = b_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \dots \\ & a_{m,1} \cdot x_1 + a_{m,2} \cdot x_2 + \dots + a_{m,n} \cdot x_n = b_m \\ \text{with these bounds } & l_1 \leq x_1 \leq u_1 \\ & \dots \\ & l_n \leq x_n \leq u_n \\ \text{where } & l_n, u_n \in \mathfrak{R} \end{aligned}$$

I parametri in input sono i seguenti:

Coefficienti della funzione obiettivo: c_1, c_2, \dots, c_n

Coefficienti dei vincoli: $a_{1,1}, a_{1,2}, \dots, a_{1,n}$

...

$a_{m,1}, a_{m,2}, \dots, a_{m,n}$

Colonna dei termini noti: b_1, b_2, \dots, b_m

Limiti inferiori e superiori: $u_1, u_2, \dots, u_n, l_1, l_2, \dots, l_n$

La soluzione ottima fornita da Cplex è espressa nelle variabili x_1, x_2, \dots, x_n .

Si possono inoltre risolvere le seguenti estensioni di problemi di LP:

- problemi di flusso attraverso reti;
- problemi di programmazione quadratica (QP), in cui la funzione obiettivo include termini quadratici;
- problemi di programmazione intera mista (MIP), dove una o tutte le variabili LP o QP sono ulteriormente limitati a prendere valori interi nella soluzione ottimale e dove MIP si è esteso per includere costrutti da insiemi ordinati speciali (SOS) e variabili semi-continue.

La sequenza operativa per la risoluzione di un problema di PL con Cplex è la seguente:

- creazione del modello;
- risoluzione del modello;
- interrogazione dei risultati;
- manipolazione delle condizioni di errore.

La versione del software impiegata per il presente studio è “ILOG CPLEX Optimization Studio Community Edition” versione 12.6.2, in una versione “trial” avente durata temporale limitata, ma piena potenzialità operativa e priva di limiti di calcolo.

Si tratta sostanzialmente di un pacchetto di strumenti dedicati alla modellazione e lo sviluppo di applicazioni di ottimizzazione, ed in particolare:

- solver per la risoluzione di problemi di programmazione lineare;
- solver per la risoluzione di problemi di programmazione con vincoli;
- solver per la risoluzione di problemi di programmazione quadratica convessa;
- linguaggio di programmazione algebrico OPL (Optimization Programming Linear).

Un programma scritto in linguaggio OPL è costituito da una sequenza di dichiarazioni di costanti e di variabili, un'istruzione che indica la funzione obiettivo e una sequenza di dichiarazione dei vincoli. In particolare i passaggi, da tradurre secondo la corretta sintassi, sono i seguenti:

- definizione della funzione obiettivo: la dichiarazione del problema deve sempre iniziare con la parola chiave;
- “*minimize* o *maximize*”: che introduce la sezione della funzione obiettivo che deve essere ottimizzata; alla funzione obiettivo può essere assegnato un nome, altrimenti le viene assegnato il nome di default *obj*;
- definizione dei vincoli: la dichiarazione dei vincoli è introdotta dalla parola chiave;
- “*subject to*”: seguita dalla descrizione dei vari vincoli del problema; ciascun vincolo deve essere inserito in una nuova riga, che inizia con il nome assegnatogli dall'utente o da quello di default attribuitogli; esso può estendersi anche su più righe e termina con l'indicazione del verso del vincolo (\leq , \geq o $=$) e il termine noto;
- definizione dei limiti delle variabili: la descrizione degli intervalli di esistenza delle diverse variabili inizia con la parola chiave;
- “*bounds*”: seguita dalla dichiarazione, uno per riga, dei vari limiti. Se non presente, le variabili sono assunte essere non negative;
- specifica delle variabili: indica la natura delle variabili e quindi il campo dei valori che può assumere; è introdotta dalla parola chiave;
- “*general*” o “*binary*” o “*integer*”: seguita dalla lista delle corrispettive variabili;
- terminazione: il file si chiude con la parola chiave “*end*”.

Il file viene scritto solitamente in formato “.dat” e riconosciuto automaticamente dal software.

CAPITOLO 10

Elaborazione dei dati

10.1 Creazione dei modelli matematici – Scenario “Stabilimento”

Lo stabilimento può essere considerato suddiviso in tre aree fondamentali, in cui avvengono processi di trasformazione dei materiali in prodotti e semilavorati distinti.

I parametri fondamentali che condizionano la continuità produttiva in maniera ottima sono i tempi di lavorazione delle sotto fasi e i flussi di materiale processato lungo le linee di produzione. In questo scenario si è pensato di applicare il *Critical Path Method* per la determinazione del percorso critico, ossia la sequenza di attività che non è possibile ritardare affinché venga assicurato il rispetto dei tempi previsti per ottenere il prodotto finito a disposizione nel magazzino finale. Oltre a questo si è proceduto a determinare, tramite il metodo del *Maximum Flow and Minimum Cut*, le quantità ottime di materiale in termini di flusso di processo in ingresso dalla sorgente principale e i relativi valori di flusso ottimali attraverso le linee produttive, affinché non si abbiano colli di bottiglia (*bottlenecks*) compatibilmente ai vincoli dettati dalla capacità fisica e tecnologica delle linee stesse.

Si sono individuati nello stabilimento tre aree funzionali, in cui avvengono sotto cicli produttivi apparentemente indipendenti, ma in realtà vincolati tutti al magazzino finale dove vengono allocati i prodotti finiti. In effetti, pur essendoci due sorgenti distinte da cui provengono differenti materie da processare, ossia i blocchi regolari e i blocchi informi, i prodotti finiti costituiti dalle lastre lucidate e dalle piastrelle sono giacenti nella stessa area di magazzino, costituendo di fatto un vincolo spaziale di capacità da cui dipendono le fasi produttive precedenti. Si è pensato così di considerare le due sorgenti collegate da un arco fittizio a durata temporale pari a zero, e un pozzo finale in comune che simula il magazzino da cui vengono prelevati i prodotti destinati ai clienti finali.

10.1.1 Costruzione dei diagrammi reticolari

Per poter applicare i metodi matematici di ottimizzazione citati al paragrafo precedente, si è reso necessario elaborare due tipi di diagrammi reticolari, ognuno dei quali ha permesso di modellizzare il ciclo produttivo secondo i parametri da inserire nel modello di calcolo. In particolare sono stati elaborate le seguenti tipologie di grafo:

- grafo dei potenziali di task: grafo orientato in cui i nodi rappresentano le task (fasi) di processo a cui sono associati i relativi tempi di esecuzione e i rami rappresentano le sequenze operative; le task possiedono vincoli di

sequenziamento (precedenze di task rispetto ad altri) e vincoli dingiuntivi (impossibilità di svolgere più task contemporaneamente);

- rete di flusso: grafo orientato in cui i nodi le interconnessioni tra le fasi operative collegate da archi che ne rappresentano i percorsi attraverso i quali passano flussi di materiale, caratterizzati da un vincolo di capacità non negativo che limita superiormente il valore del flusso stesso.

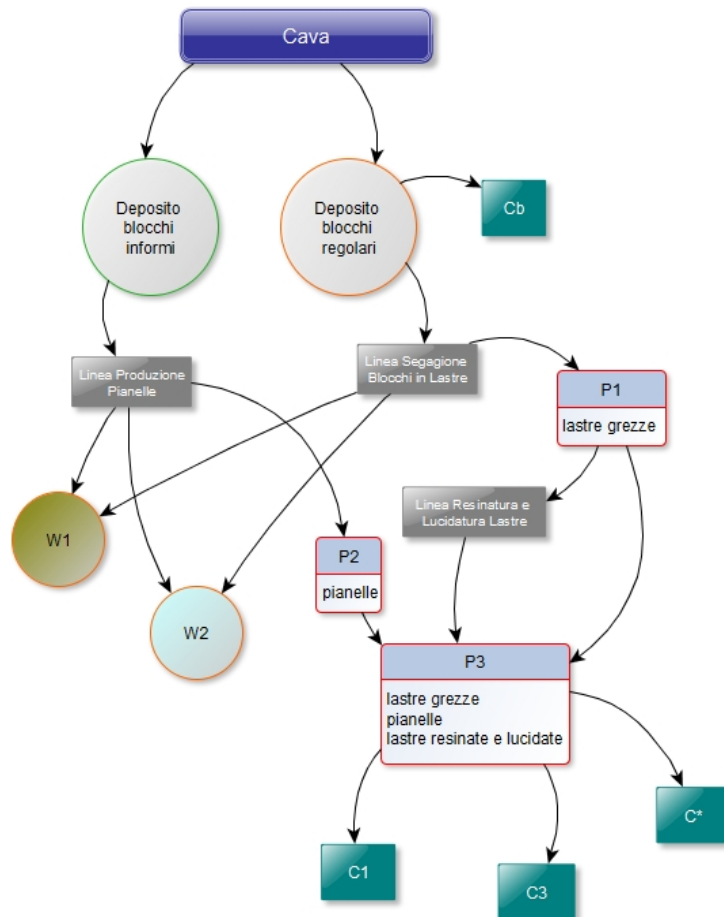


Figura 79 – Schematizzazione del processo da cui sono stati elaborati i diagrammi reticolari

Grafo dei potenziali di task

Per applicare il Critical Path Method si reso necessario rappresentare il ciclo produttivo dello stabilimento mediante una forma di diagramma reticolare denominata *grafo dei potenziali di task*, in cui ad ogni nodo corrisponde una fase di lavorazione ben definita caratterizzata da un tempo di esecuzione estrapolato sulla base dei dati rilevati, e ogni arco rappresenta la successione delle fasi stesse.

Per maggior semplicità, il diagramma reticolare completo è stato costruito sulla base dell'unione dei cicli produttivi base, i quali sono stati identificati nel modo seguente:

- ciclo A: lavorazione dei blocchi regolari fino alla suddivisione in lastre grezze e loro deposito temporaneo all'interno dell'area di retinatura, resinatura e lucidatura;
- ciclo B: lavorazione delle lastre grezze con il processo di retinatura, resinatura e lucidatura e deposito dei prodotti nell'area di stoccaggio finale;
- ciclo C: lavorazione dei blocchi infirmi e produzione delle piastrelle e loro deposito nell'area di stoccaggio finale.

Il diagramma reticolare finale è dato dall'unione del ciclo A, B e C, come mostrato nelle figure che seguono. E' stata considerata anche la condizione $(A \cup B) \cup C$ senza i tempi di percorrenza degli sfridi (archi fittizi).

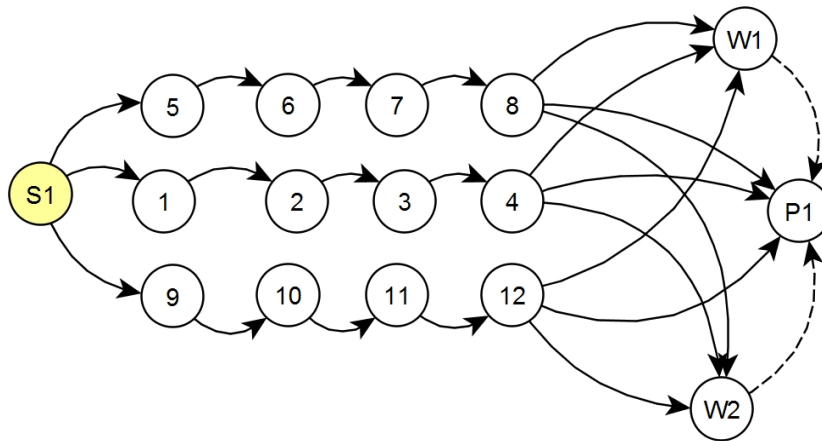


Figura 80 – Grafo dei task A: segazione dei blocchi regolari

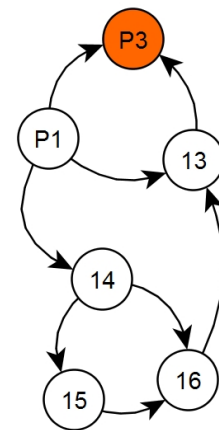


Figura 81 – Grafo dei task B: Retinatura, resinatura e lucidatura delle lastre

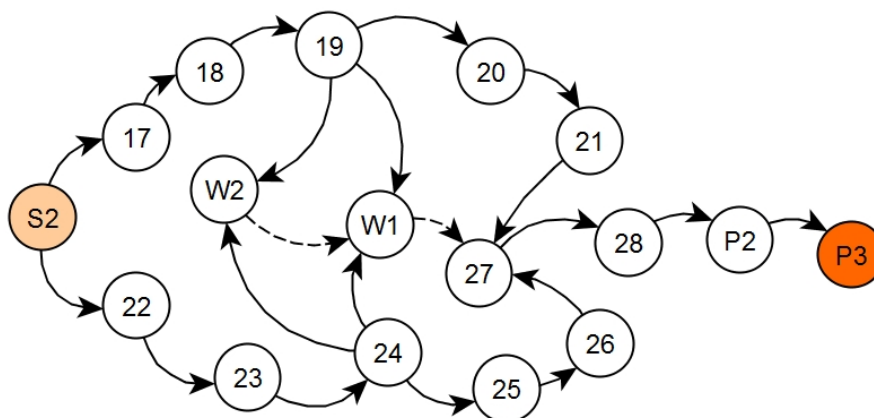


Figura 82 – Grafo dei task C: Segazione dei blocchi infirmi e produzione delle piastrelle

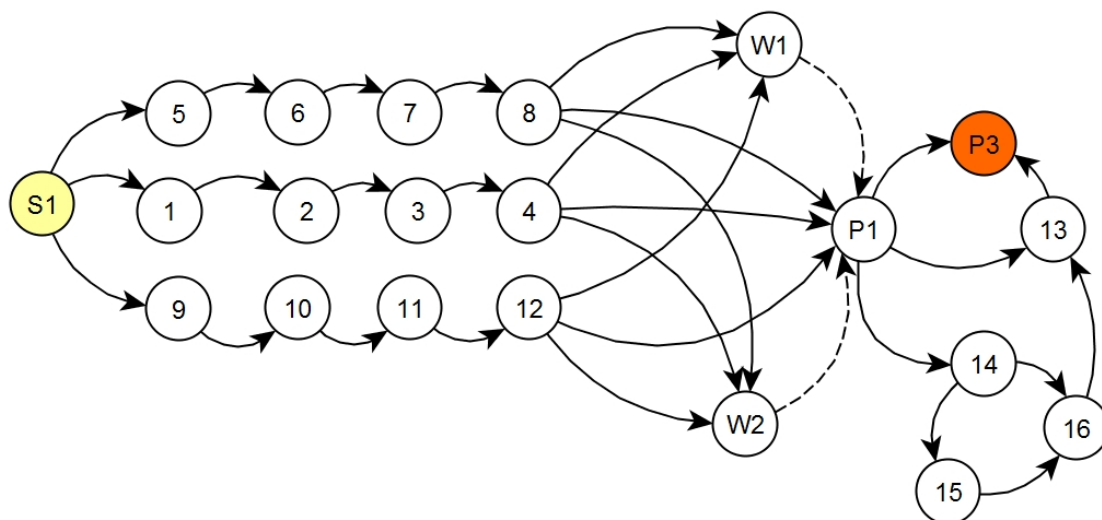


Figura 83 – Grafo completo della produzione delle lastre: $(A \cup B)$

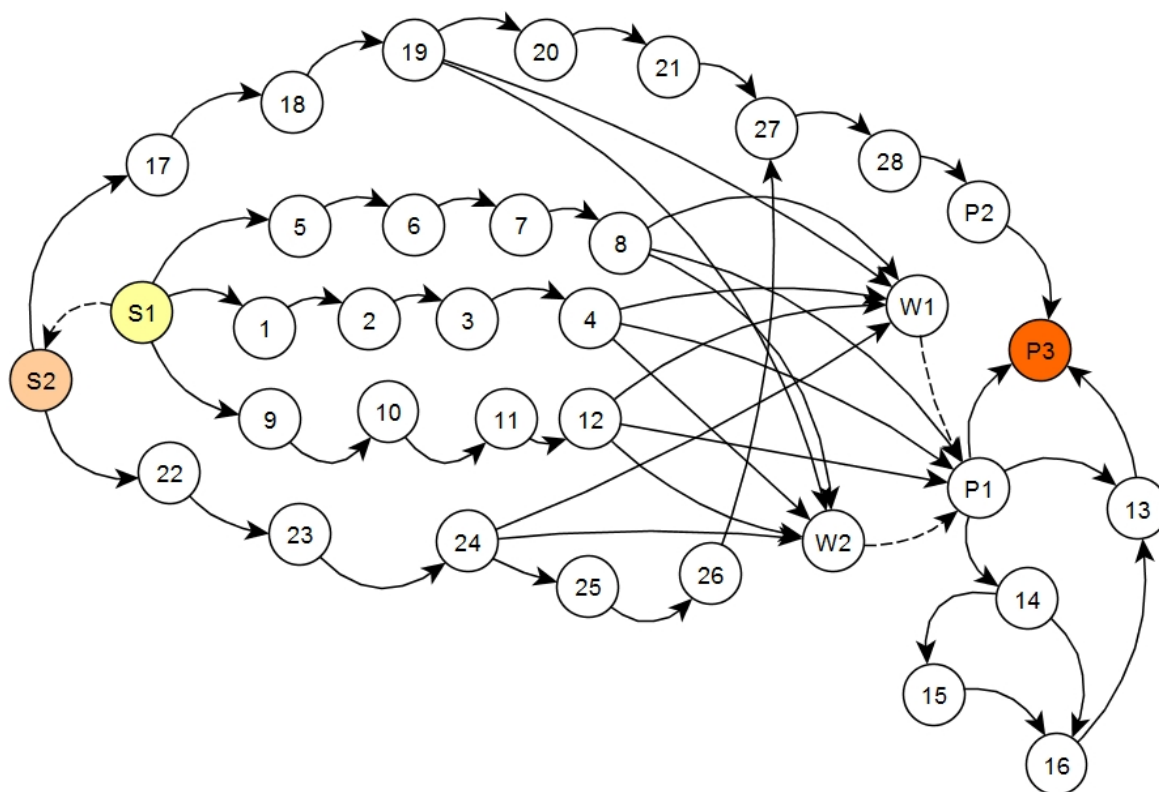


Figura 84 – Ciclo produttivo completo dello stabilimento: $(A \cup B) \cup C$

Tabella 36 – Significato della simbologia impiegata nel grafo ($A \cup B$)

Nodo	Tipo (p/s/t)	Descrizione Attività/Fase	Predecessore
S1	s	Inizio processo segazione blocco regolare in lastre: arrivo dei blocchi.	-
1	t	Posizionamento blocco sul carrello.	S1
2	t	Ingresso del blocco al telaio multilama A e preparazione al taglio.	1
3	t	Taglio del blocco in lastre.	2
4	t	Uscita del carrello con lastre segate.	3
5	t	Posizionamento blocco sul carrello.	S1
6	t	Ingresso del blocco al telaio multilama B e preparazione al taglio.	5
7	t	Taglio del blocco in lastre.	6
8	t	Uscita del carrello con lastre segate.	7
9	t	Posizionamento blocco sul carrello.	S1
10	t	Ingresso del blocco al telaio multilama C e preparazione al taglio.	9
11	t	Taglio del blocco in lastre.	10
12	t	Uscita del carrello con lastre segate.	11
P1	t	Zona stoccaggio pre-resinatura/lucidatura.	8-4-12-W1-W2
13	t	Lucidatura.	P1-16
14	t	Preriscaldamento.	P1
15	t	Rinforzo con rete in fibra di vetro.	14
16	t	Resinatura, asciugatura e catalisi in forno.	15
W1	t	Invio degli sfridi solidi in discarica.	8-4-12
W2	t	Invio degli sfridi fini in sospensione all'impianto di recupero delle acque di processo.	8-4-12
P3	p	Magazzino piazzale/vendita.	P1-13

Legenda:

p = nodo pozzo; s = nodo sorgente; t = nodo di transito

Tabella 37 - Durata delle fasi lavorative nel grafo ($A \cup B$)

arco uscite (+)	arco entrante (-)	Ramo/Arco			arco uscite (+)	arco entrante (-)	Ramo/Arco		
N_i	N_j	A_{ij}	Tipo (r/f)	d_{ij} [min]	N_i	N_j	A_{ij}	Tipo (r/f)	d_{ij} [min]
S1	5	S1-5	r	13	11	12	11-12	r	8
5	6	5-6	r	16	12	W1	12-W1	r	2
6	7	6-7	r	484	12	W2	12-W2	r	2
7	8	7-8	r	8	P1	P3	P1-P3	r	3
8	W1	8-W1	r	2	12	P1	12-P1	r	2
8	P1	8-P1	r	2	P1	13	P1-13	r	25
8	W2	8-W2	r	2	P1	14	P1-14	r	5
S1	1	S1-1	r	13	14	15	14-15	r	2
1	2	1-2	r	17	15	16	15-16	r	410
2	3	2-3	r	482	16	13	16-13	r	25
3	4	3-4	r	9	W1	P1	W1-P1	f	0
4	W1	4-W1	r	2	W2	P1	W2-P1	f	0
4	P1	4-P1	r	2	13	P3	13-P3	r	2
4	W2	4-W2	r	2	14	16	14-16	r	410
S1	9	S1-9	r	12					
9	10	9-10	r	16					
10	11	10-11	r	483					

Legenda:

r = arco reale

f = arco fittizio

d_{ij} = durata della fase j dal termine della fase i

Tabella 38 – Significato della simbologia impiegata nel grafo C

Nodo	Tipo (p/s/t)	Descrizione Attività/Fase	Predecessore
S2	s	Inizio processo segazione blocco informe in lastre: arrivo dei blocchi.	-
17	t	Posizionamento blocco sul carrello della linea 1.	S2
18	t	Ingresso del blocco alla tagliablocchi con sistema di caricamento automatico della linea 1.	17
19	t	Taglio del blocco in lastre - linea 1.	18
W1	t	Invio degli sfridi solidi in discarica.	19-24-W2
W2	t	Invio degli sfridi fini in sospensione all'impianto di recupero delle acque di processo.	19-24
20	t	Prelievo lastre dal blocco segato e posizionamento automatico sull'intestatrice - linea 1.	19
21	t	Taglio a misura delle pannelle dalle lastre e scarico del materiale - linea 1.	20
22	t	Posizionamento blocco sul carrello della linea 2.	S2
23	t	Ingresso del blocco alla tagliablocchi con sistema di caricamento automatico della linea 2.	22-W2
24	t	Taglio del blocco in lastre - linea 2.	23
25	t	Prelievo lastre dal blocco e posizionamento manuale sull'intestatrice - linea 2.	24
26	t	Taglio a misura delle pannelle dalle lastre e scarico del materiale - linea 2.	25
27	t	Pallettizzazione delle pannelle.	26-21-W1
28	t	Siglatura e nastratura.	27
P2	t	Area stoccaggio temporaneo pannelle.	28
P3	p	Magazzino piazzale/vendita.	P2

Legenda:

p = nodo pozzo; s = nodo sorgente; t = nodo di transito

Tabella 39 - Durata delle fasi lavorative nel grafo C

arco uscite (+)	arco entrante (-)	Ramo/Arco			arco uscite (+)	arco entrante (-)	Ramo/Arco		
		A_{ij}	Tipo (r/f)	d_{ij} [min]			A_{ij}	Tipo (r/f)	d_{ij} [min]
N_i	N_j	A_{ij}	Tipo (r/f)	d_{ij} [min]	N_i	N_j	A_{ij}	Tipo (r/f)	d_{ij} [min]
S2	17	S2-17	r	7	25	26	25-26	r	2
17	18	17-18	r	2	26	27	26-27	r	1,5
18	19	18-19	r	4	19	W1	19-W1	r	0
19	20	19-20	r	0,5	19	W2	19-W2	r	0
20	21	20-21	r	2	24	W1	24-W1	r	0
21	27	21-27	r	1,5	24	W2	24-W2	r	0
S2	22	S2-22	r	7	27	28	27-28	r	1,1
22	23	22-23	r	3	28	P2	28-P2	r	1,2
23	24	23-24	r	3,5	P2	P3	P2-P3	r	2,3
24	25	24-25	r	1	W2	W1	W2-W1	f	0

Legenda:

r = arco reale

f = arco fittizio

d_{ij} = durata della fase j dal termine della fase i

Tabella 40 – Significato della simbologia impiegata nel grafo $(A \cup B) \cup C$

Nodo	Tipo (p/s/t)	Descrizione Attività/Fase	Predecessore
S1	s	Inizio processo segazione blocco regolare in lastre: arrivo dei blocchi.	-
1	t	Posizionamento blocco sul carrello.	S1
2	t	Ingresso del blocco al telaio multilama A e preparazione al taglio.	1
3	t	Taglio del blocco in lastre.	2
4	t	Uscita del carrello con lastre segate.	3
5	t	Posizionamento blocco sul carrello.	S1
6	t	Ingresso del blocco al telaio multilama B e preparazione al taglio.	5
7	t	Taglio del blocco in lastre.	6
8	t	Uscita del carrello con lastre segate.	7
9	t	Posizionamento blocco sul carrello.	S1
10	t	Ingresso del blocco al telaio multilama C e preparazione al taglio.	9
11	t	Taglio del blocco in lastre.	10
12	t	Uscita del carrello con lastre segate.	11
P1	t	Zona stoccaggio pre-resinatura/lucidatura.	W1-W2-8-4-12
13	t	Lucidatura.	P1-16
14	t	Preriscaldamento.	P1
15	t	Rinforzo con rete in fibra di vetro.	14
16	t	Resinatura, asciugatura e catalisi in forno.	14-15
S2	t	Inizio processo segazione blocco informe in lastre: arrivo dei blocchi.	S1
17	t	Posizionamento blocco sul carrello della linea 1.	S2
18	t	Ingresso del blocco alla tagliablocchi con sistema di caricamento automatico della linea 1.	17
19	t	Taglio del blocco in lastre – linea 1.	18
W1	t	Invio degli sfridi solidi in discarica.	19-8-4-12-24
W2	t	Invio degli sfridi fini in sospensione all'impianto di recupero delle acque di processo.	19-8-4-12-24
20	t	Prelievo lastre dal blocco segato e posizionamento automatico sull'intestatrice – linea 1.	19
21	t	Taglio a misura delle pannelle dalle lastre e scarico del materiale – linea 1.	20
22	t	Posizionamento blocco sul carrello della linea 2.	S2
23	t	Ingresso del blocco alla tagliablocchi con sistema di caricamento automatico della linea 2.	22
24	t	Taglio del blocco in lastre – linea 2.	23
25	t	Prelievo lastre dal blocco e posizionamento manuale sull'intestatrice – linea 2.	24
26	t	Taglio a misura delle pannelle dalle lastre e scarico del materiale – linea 2.	25
27	t	Pallettizzazione delle pannelle.	26-21
28	t	Siglatura e nastratura.	27
P2	t	Area stoccaggio temporaneo pannelle.	28
P3	p	Magazzino piazzale/vendita.	P2-P1-13

Legenda:

p = nodo pozzo; s = nodo sorgente; t = nodo di transito

Tabella 41 - Durata delle fasi lavorative nel grafo $(A \cup B) \cup C$

arco uscente (+)	arco entrante (-)	Ramo/Arco			arco uscente (+)	arco entrante (-)	Ramo/Arco		
N_i	N_j	A_{ij}	Tipo (r/f)	d_{ij} [min]	N_i	N_j	A_{ij}	Tipo (r/f)	d_{ij} [min]
S2	17	S2-17	r	7	7	8	7-8	r	8
17	18	17-18	r	2	8	W1	8-W1	r	2
18	19	18-19	r	4	8	P1	8-P1	r	2
19	20	19-20	r	0,5	8	W2	8-W2	r	2
20	21	20-21	r	2	S1	1	S1-1	r	13
21	27	21-27	r	1,5	1	2	1-2	r	17
S2	22	S2-22	r	7	2	3	2-3	r	482
22	23	22-23	r	3	3	4	3-4	r	9
23	24	23-24	r	3,5	4	W1	4-W1	r	2
24	25	24-25	r	1	4	P1	4-P1	r	2
25	26	25-26	r	2	4	W2	4-W2	r	2
26	27	26-27	r	1,5	S1	9	S1-9	r	12
19	W1	19-W1	r	0	9	10	9-10	r	16
19	W2	19-W2	r	0	10	11	10-11	r	483
24	W1	24-W1	r	0	11	12	11-12	r	8
24	W2	24-W2	r	0	12	W1	12-W1	r	2
27	28	27-28	r	1,1	12	P1	12-P1	r	2
28	P2	28-P2	r	1,2	12	W2	12-W2	r	2
P2	P3	P2-P3	r	2,3	P1	P3	P1-P3	r	3
S1	5	S1-5	r	13	P1	13	P1-13	r	25
5	6	5-6	r	16	P1	14	P1-14	r	5
6	7	6-7	r	484	14	15	14-15	r	2
S1	S2	S1-S2	f	0	15	16	15-16	r	410
W1	P1	W1-P1	f	0	16	13	16-13	r	25
W2	P1	W2-P1	f	0	14	16	14-16	r	410
13	P3	13-P3	r	2					

Legenda:

r = arco reale

f = arco fittizio

d_{ij} = durata della fase j dal termine della fase i

Rete di flusso

In questo caso il diagramma reticolare è stato costruito su tutto il ciclo produttivo considerando una super sorgente e un super pozzo che rappresentano un artificio matematico necessario a rendere coerente il sistema di equazioni da inserire nel modello. Si noti che anche in questo caso, le linee produttive dedicate alla segagione dei blocchi informi e il successivo taglio delle filagne in pannelle sono state distinte in base alle due diverse tipologie delle macchine. Come descritto ai capitoli precedenti il layout operativo prevede due gruppi di n ed m macchine tagliablocchi che eseguono le operazioni in parallelo ognuno dei quali è seguito in serie ugualmente da n e m macchine attestatrici. Esse sono distinte in base alle capacità tecnologiche delle macchine che condizionano il flusso di materiale trattato nelle due linee.

Uguale discorso è stato fatto per i telai multilama dedicati alla segagione dei blocchi regolai, suddivisi in tre tipologie ognuna delle quali è caratterizzata da capacità tecnologiche differenti che diversificano in tal modo il flusso di materiale processato in parallelo.

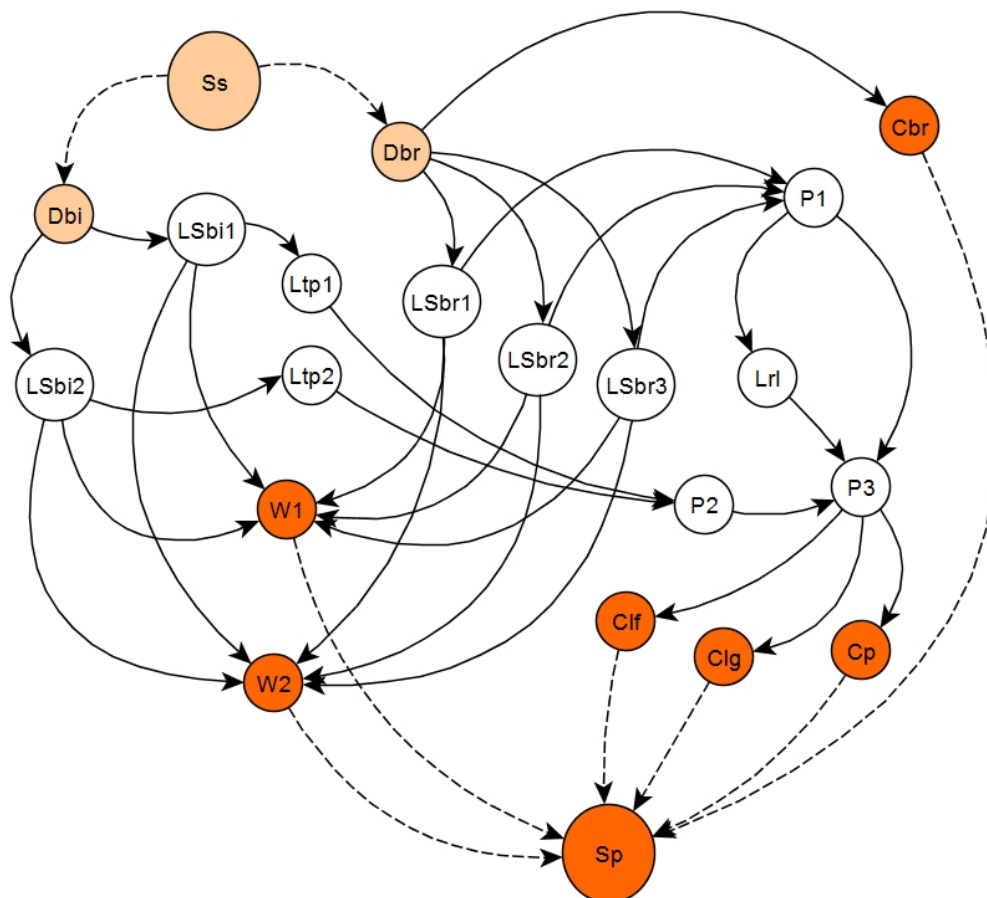


Figura 85 – Rete di flusso dello stabilimento

Tabella 42 – Significato della simbologia impiegata nella rete di flusso dello stabilimento

Nodo	Tipo (P/p/S/s/t)	Descrizione Attività/Fase
Dbi	s	Piazzale deposito blocchi informi
Lsbi1	t	Linea segagione blocchi informi 1
Lsbi2	t	Linea segagione blocchi informi 2
Ltp1	t	Linea taglio pianelle 1
Ltp2	t	Linea taglio pianelle 2
Dbr	s	Piazzale deposito blocchi regolari
Cbr	p	Cliente blocchi regolari
Lsbr1	t	Linea segagione blocchi regolari 1
Lsbr2	t	Linea segagione blocchi regolari 2
Lsbr3	t	Linea segagione blocchi regolari 3
Lrl	t	Linea resinatura lucidatura
W1	p	Discarica sfridi
W2	p	Discarica finissimi
P1	t	Area stoccaggio temporaneo lastre grezze
P2	t	Area stoccaggio temporaneo pianelle
P3	t	Magazzino prodotti finiti
Clf	p	Cliente lastre finite
Clg	p	Cliente lastre grezze
Cp	p	Cliente pianelle
Ss	S	Super sorgente
Sp	P	Super pozzo

Legenda:

s = nodo sorgente p = nodo pozzo
 S = nodo super sorgente P = nodo super pozzo
 t = nodo di transito

I nodi elencati rappresentano una semplificazione del processo in quanto ognuno di essi potrebbe essere a sua volta esaminato e scomposto in ulteriori sotto fasi articolando in modo ancora più dettagliato il processo.

Tabella 43 – Capacità produttive massime dei rami della rete di flusso

Arco	Descrizione Attività/Fase		capacità (c_{ij}) [mq/h]
Ss-Dbi	Super sorgente	Piazzale deposito blocchi informi	500
Ss-Dbr	Super sorgente	Piazzale deposito blocchi regolari	500
Dbi-LSbi1	Piazzale deposito blocchi informi	Linea segagione blocchi informi 1	200
Dbi-LSbi2	Piazzale deposito blocchi informi	Linea segagione blocchi informi 2	200
Dbr-LSbr1	Piazzale deposito blocchi regolari	Linea segagione blocchi regolari 1	100
Dbr-LSbr2	Piazzale deposito blocchi regolari	Linea segagione blocchi regolari 2	100
Dbr-LSbr3	Piazzale deposito blocchi regolari	Linea segagione blocchi regolari 3	100
Dbr-Cbr	Piazzale deposito blocchi regolari	Cliente blocchi regolari	100
LSbi1-Ltp1	Linea segagione blocchi informi 1	Linea taglio pannelle 1	90,7
LSbi1-W1	Linea segagione blocchi informi 1	Discarica sfridi	10
LSbi1-W2	Linea segagione blocchi informi 1	Discarica finissimi	10
LSbi2-Ltp2	Linea segagione blocchi informi 2	Linea taglio pannelle 2	105,2
LSbi2-W1	Linea segagione blocchi informi 2	Discarica sfridi	10
LSbi2-W2	Linea segagione blocchi informi 2	Discarica finissimi	10
Ltp1-P2	Linea taglio pannelle 1	Area stoccaggio temporaneo pannelle	151,2
Ltp2-P2	Linea taglio pannelle 2	Area stoccaggio temporaneo pannelle	268,8
LSbr1-W1	Linea segagione blocchi regolari 1	Discarica sfridi	10
LSbr1-W2	Linea segagione blocchi regolari 1	Discarica finissimi	10
LSbr1-P1	Linea segagione blocchi regolari 1	Area stoccaggio temporaneo lastre grezze	28,8
LSbr2-W1	Linea segagione blocchi regolari 2	Discarica sfridi	10
LSbr2-W2	Linea segagione blocchi regolari 2	Discarica finissimi	10
LSbr2-P1	Linea segagione blocchi regolari 2	Area stoccaggio temporaneo lastre grezze	33,75
LSbr3-W1	Linea segagione blocchi regolari 3	Discarica sfridi	10
LSbr3-W2	Linea segagione blocchi regolari 3	Discarica finissimi	10
LSbr3-P1	Linea segagione blocchi regolari 3	Area stoccaggio temporaneo lastre grezze	33,75
P1-Lrl	Area stoccaggio temporaneo lastre grezze	Linea resinatura lucidatura	96,3
P1-P3	Area stoccaggio temporaneo lastre grezze	Magazzino prodotti finiti	96,3
Lrl-P3	Linea resinatura lucidatura	Magazzino prodotti finiti	50,4
P2-P3	Area stoccaggio temporaneo pannelle	Magazzino prodotti finiti	420
P3-Cp	Magazzino prodotti finiti	Cliente pannelle	420
P3-Clg	Magazzino prodotti finiti	Cliente lastre grezze	96,3
P3-Clf	Magazzino prodotti finiti	Cliente lastre finite	50,4
W1-Sp	Discarica sfridi	Super pozzo	1000
W2-Sp	Discarica finissimi	Super pozzo	1000
Clf-Sp	Cliente lastre finite	Super pozzo	50,4
Clg-Sp	Cliente lastre grezze	Super pozzo	96,3
Cp-Sp	Cliente pannelle	Super pozzo	420
Cbr-Sp	Cliente blocchi regolari	Super pozzo	500
Sp-Out	Super pozzo	-	1000000
In-Ss	-	Super sorgente	1000000

Le capacità produttive degli archi di attività indicate nella tabella sono state determinate in base alle seguenti considerazioni:

- le potenzialità massime delle macchine e delle installazioni sono state desunte dall'analisi della documentazione tecnica esaminata in stabilimento e tenendo conto della disposizione e del numero delle stesse in relazione ad ogni linea;
- la capacità della super sorgente e del super pozzo è stata considerata molto più elevata delle capacità dei rimanenti rami al fine di rendere il modello matematico calcolabile (nella teoria si sarebbe dovuto assegnare loro il valore infinito);
- le capacità dei rami in uscita dai nodi che rappresentano il ritiro merci da parte dei clienti non può essere superiore alla capacità dei rami in ingresso;
- le capacità dei rami in uscita dai nodi che rappresentano aree di stoccaggio temporanee non può essere superiore alla capacità dei rami in ingresso;
- i flussi di materiale verso gli sfridi sono solamente indicativi in quanto non è stato possibile eseguire una stima accurata della produzione degli stessi.

10.1.2 Modelli matematici

Sulla base di quanto descritto al paragrafo 9.4, è stato elaborato il sistema lineare risolutivo per la ricerca dell'ottimo della funzione obiettivo. Il modello descritto è del tipo *longest path* primale e serve a determinare il percorso più lungo che coincide con il cammino critico del diagramma reticolare, avente come dati in input quelli indicati nelle tabelle illustrate. Oltre al ciclo completo dello stabilimento, si è determinato il percorso critico della sola produzione delle lastre e della sola produzione delle pianelle, essendo in alcuni casi lavorazioni che possono essere svolte in maniera autonoma l'una rispetto all'altra. Si immagini ad esempio la condizione in cui un reparto o l'altro debbano essere temporaneamente sospese le operazioni per motivi legati ad eventuali manutenzioni straordinarie o ad esigenze di mercato.

Grafo (A ∪ B) – produzione delle lastre

La funzione obiettivo è:

$$\begin{aligned} \max z &= \sum_i \sum_j c_{ij} \cdot x_{ij} \\ \text{s.t. } \sum_j x_{ij} - \sum_k x_{ki} &= b_i \quad (i = 1, \dots, n) \end{aligned}$$

- la matrice di incidenza nodi/archi ha dimensione: $\dim(A) = (21 \times 31)$;
- il vettore dei pesi ha dimensione: $\dim(\bar{c}) = (31 \times 1)$;
- il vettore dei termini noti ha dimensione: $\dim(\bar{b}) = (21 \times 1)$;
- il vettore delle variabili dimensione: $\dim(\bar{x}) = (31 \times 1)$;

Gli elementi del vettore dei pesi rappresentano i tempi di esecuzione delle fasi, il vettore dei termini noti (bilancio ai nodi) descrive la tipologia del nodo (sorgente, pozzo o transito), mentre la matrice di incidenza nodi/archi esprime per ogni nodo il senso di percorrenza dell'arco nel caso il nodo sia connessa all'arco considerato.

Eseguendo il calcolo matriciale si può infine esplicitare il modello nel seguente modo:

$$\begin{aligned} \max z \\ z &= 13x_1 + 16x_2 + 484x_3 + 8x_4 + 2x_5 + 12x_6 + 2x_7 + 13x_8 + 17x_9 + 482x_{10} + 9x_{11} + 2x_{12} + 2x_{13} + 2x_{14} + \\ & 12x_{15} + 16x_{16} + 483x_{17} + 8x_{18} + 2x_{19} + 2x_{20} + 2x_{21} + 3x_{22} + 25x_{23} + 5x_{24} + 2x_{25} + 410x_{26} + \\ & + 25x_{27} + 2x_{30} + 410x_{31} \end{aligned}$$

Subject to

$x_1 + x_8 + x_{15} = 1$	$-x_{16} + x_{17} = 0$
$-x_8 + x_9 = 0$	$-x_{17} + x_{18} = 0$

$-x_9 + x_{10} = 0$	$-x_{18} + x_{19} + x_{20} + x_{21} = 0$
$-x_{10} + x_{11} = 0$	$-x_6 - x_{13} - x_{20} + x_{22} + x_{23} + x_{24} - x_{28} - x_{29} = 0$
$-x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} = 0$	$-x_{23} - x_{27} + x_{30} = 0$
$-x_1 + x_2 = 0$	$-x_{24} + x_{25} + x_{31} = 0$
$-x_2 + x_3 = 0$	$-x_{25} + x_{26} = 0$
$-x_3 + x_4 = 0$	$-x_5 - x_{12} - x_{19} + x_{28} = 0$
$-x_4 + x_5 + x_6 + x_7 = 0$	$-x_{22} + x_{30} = -1$
$-x_{15} + x_{16} = 0$	
$-x_7 - x_{14} - x_{21} + x_{29} = 0$	
$-x_{26} + x_{27} - x_{31} = 0$	

Il problema duale permette di identificare, i ritardi ammissibili dall'istante di partenza di ogni fase rispetto alla precedente.

La funzione obiettivo è:

$$\min Z = t_n - t_1$$

$$\text{s.t. } t_j - t_i \geq c_{ij} \quad (i = 1, \dots, n)$$

- la matrice di incidenza nodi/archi ha dimensione: $\dim(A) = (32 \times 21)$;
- il vettore dei termini noti ha dimensione: $\dim(\bar{b}) = (32 \times 1)$;
- il vettore delle variabili ha dimensione: $\dim(\bar{t}) = (21 \times 1)$;

Gli elementi del vettore dei pesi rappresentano i tempi di esecuzione delle fasi, il vettore dei termini noti descrive la tipologia del nodo (sorgente, pozzo o transito), mentre la matrice di incidenza nodi/archi esprime per ogni nodo il senso di percorrenza dell'arco nel caso il nodo sia connessa all'arco considerato.

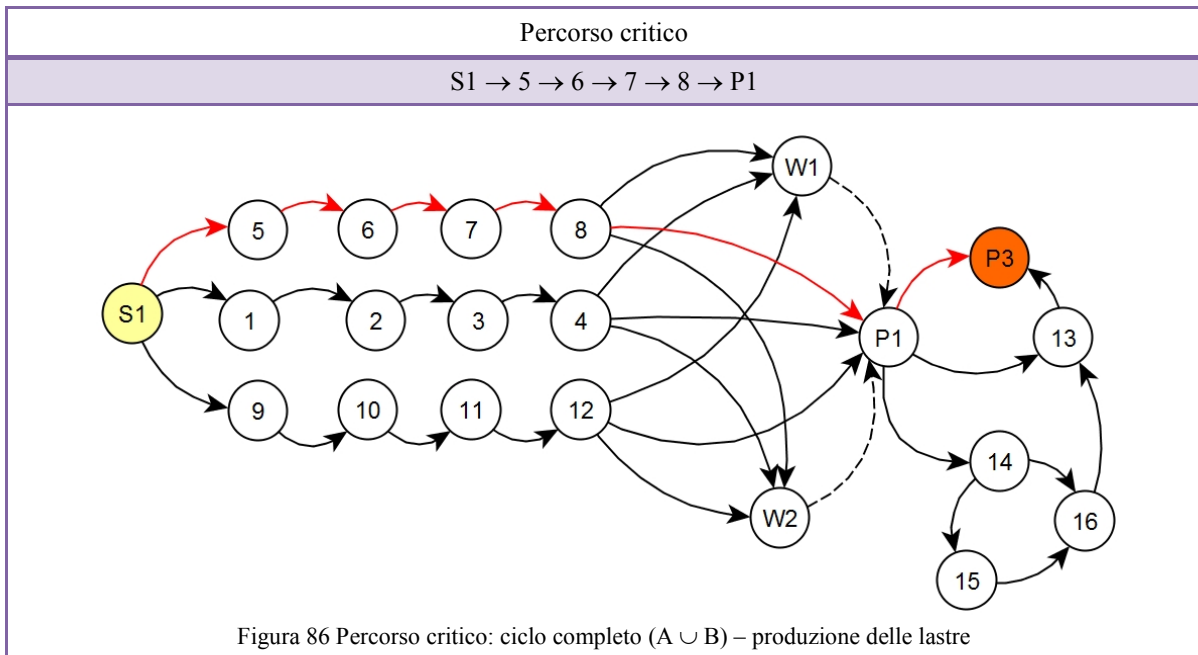
Eseguendo il calcolo matriciale si può infine esplicitare il modello nel seguente modo:

$$\min Z = t_{21} - t_1$$

Subject to

$t_6 - t_1 \geq 13$	$t_{19} - t_5 \geq 2$	$t_{15} - t_{14} \geq 25$	$t_{18} - t_{15} \geq 25$	$t_{14} - t_{13} \geq 2$
$t_7 - t_6 \geq 16$	$t_{14} - t_5 \geq 2$	$t_{16} - t_{14} \geq 5$	$t_{19} - t_{14} \geq 0$	$t_4 - t_3 \geq 482$
$t_8 - t_7 \geq 484$	$t_{20} - t_5 \geq 2$	$t_{17} - t_{16} \geq 2$	$t_{20} - t_{14} \geq 0$	$t_2 - t_1 \geq 13$
$t_9 - t_8 \geq 8$	$t_{10} - t_1 \geq 12$	$t_{18} - t_{17} \geq 410$	$t_{21} - t_{15} \geq 2$	$t_{20} - t_9 \geq 2$
$t_{19} - t_9 \geq 2$	$t_{11} - t_{10} \geq 16$	$t_{18} - t_{16} \geq 410$	$t_{20} - t_{13} \geq 2$	$t_{19} - t_{13} \geq 2$
$t_{14} - t_9 \geq 2$	$t_{12} - t_{11} \geq 483$	$t_{13} - t_{12} \geq 8$	$t_{21} - t_{14} \geq 3$	$t_5 - t_4 \geq 9$
$t_3 - t_2 \geq 17$				

Inserendo i dati nel software ed elaborando si ottiene il seguente risultato:



I ritardi ammissibili dall'istante di partenza in minuti sono i seguenti:

Nodo	Tempo di ritardo [min]		Nodo	Tempo di ritardo [min]	
	Istante al nodo	valore		Istante al nodo	valore
S1	t1	0	10	t11	30
1	t2	13	11	t12	513
2	t3	30	12	t13	521
3	t4	512	P1	t14	523
4	t5	521	13	t15	548
5	t6	13	14	t16	528
6	t7	29	15	t17	530
7	t8	513	16	t18	940
8	t9	521	W1	t19	523
9	t10	14	W2	t20	523

Grafo C – produzione delle pannelle

La funzione obiettivo è:

$$\max z = \sum_i \sum_j c_{ij} \cdot x_{ij}$$

$$\text{s.t. } \sum_j x_{ij} - \sum_k x_{ki} = b_i \quad (i = 1, \dots, n)$$

- la matrice di incidenza nodi/archi ha dimensione: $\dim(A) = (17 \times 21)$;
- il vettore dei pesi ha dimensione: $\dim(\bar{c}) = (17 \times 1)$;
- il vettore dei termini noti ha dimensione: $\dim(\bar{b}) = (17 \times 1)$;

- il vettore delle variabili dimensione: $\dim(\bar{x}) = (21 \times 1)$;

Gli elementi del vettore dei pesi rappresentano i tempi di esecuzione delle fasi, il vettore dei termini noti (bilancio ai nodi) descrive la tipologia del nodo (sorgente, pozzo o transito), mentre la matrice di incidenza nodi/archi esprime per ogni nodo il senso di percorrenza dell'arco nel caso il nodo sia connessa all'arco considerato.

Eseguendo il calcolo matriciale si può infine esplicitare il modello nel seguente modo:

max z

$$z = 7x_1 + 2x_2 + 4x_3 + 0,5x_4 + 2x_5 + 1,5x_6 + 7x_7 + 3x_8 + 3,5x_9 + x_{10} + 2x_{11} + 1,5x_{12} + 1,1x_{17} + 1,2x_{18} + 2,3x_{19}$$

Subject to

$x_1 + x_7 = 1$	$-x_8 + x_9 - x_{20} = 0$	$-x_{19} = -1$
$-x_1 + x_2 = 0$	$-x_9 + x_{10} + x_{15} + x_{16} = 0$	$-x_5 + x_6 = 0$
$-x_2 + x_3 = 0$	$-x_{10} + x_{11} = 0$	$-x_7 + x_8 = 0$
$-x_3 + x_4 + x_{13} + x_{14} = 0$	$-x_{11} + x_{12} = 0$	
$-x_{13} - x_{15} - x_{20} + x_{21} = 0$	$-x_6 - x_{12} + x_{17} - x_{21} = 0$	
$-x_{14} - x_{16} + x_{20} = 0$	$-x_{17} + x_{18} = 0$	
$-x_4 + x_5 = 0$	$-x_{18} + x_{19} = 0$	

Il problema duale permette di identificare i ritardi ammissibili dall'istante di partenza di ogni fase rispetto alla precedente.

La funzione obiettivo è:

$$\min Z = t_n - t_1$$

$$\text{s.t. } t_j - t_i \geq c_{ij} \quad (i = 1, \dots, n)$$

- la matrice di incidenza nodi/archi ha dimensione: $\dim(A) = (21 \times 17)$;
- il vettore dei termini noti ha dimensione: $\dim(\bar{b}) = (21 \times 1)$;
- il vettore delle variabili ha dimensione: $\dim(\bar{t}) = (17 \times 1)$;

Gli elementi del vettore dei pesi rappresentano i tempi di esecuzione delle fasi, il vettore dei termini noti descrive la tipologia del nodo (sorgente, pozzo o transito), mentre la matrice di incidenza nodi/archi esprime per ogni nodo il senso di percorrenza dell'arco nel caso il nodo sia connessa all'arco considerato.

Eseguendo il calcolo matriciale si può infine esplicitare il modello nel seguente modo:

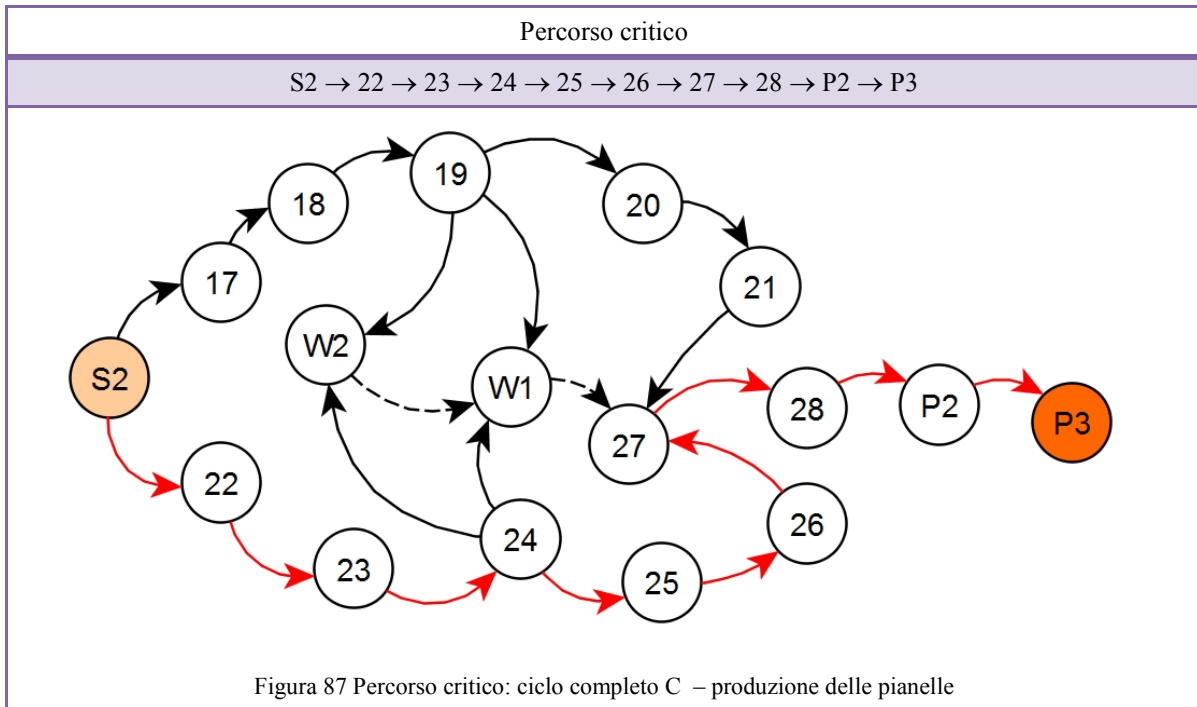
$$\min Z = t_{17} - t_1$$

Subject to

$t_2 - t_1 \geq 7$	$t_{14} - t_{13} \geq 1,5$	$t_9 - t_1 \geq 7$	$t_{15} - t_{14} \geq 1,1$
$t_3 - t_2 \geq 2$	$t_5 - t_4 \geq 0$	$t_{10} - t_9 \geq 3$	$t_{16} - t_{15} \geq 1,2$

$t_4 - t_3 \geq 4$	$t_6 - t_4 \geq 0$	$t_{11} - t_{10} \geq 3,5$	$t_{17} - t_{16} \geq 2,3$
$t_7 - t_4 \geq 0,5$	$t_{11} - t_5 \geq 0$	$t_{12} - t_{11} \geq 1$	$t_6 - t_5 \geq 0$
$t_8 - t_7 \geq 2$	$t_{11} - t_6 \geq 0$	$t_{13} - t_{12} \geq 2$	$t_{14} - t_5 \geq 0$
$t_{14} - t_8 \geq 1,5$			

Inserendo i dati nel software ed elaborando si ottiene il seguente risultato:



I ritardi ammissibili dall'istante di partenza in minuti sono i seguenti:

Nodo	Tempo di ritardo [min]		Nodo	Tempo di ritardo [min]	
	Istante al nodo	valore		Istante al nodo	valore
S2	t1	0	23	t10	10
17	t2	7	24	t11	13,5
18	t3	9	25	t12	14,5
19	t4	13	26	t13	16,5
W1	t5	13	27	t14	18
W2	t6	13	28	t15	19,1
20	t7	14,5	P2	t16	20,3
21	t8	16,5	P3	t17	22,6
22	t9	7			

Grafo $(A \cup B) \cup C$ – ciclo produttivo completo dello stabilimento

La funzione obiettivo è:

$$\begin{aligned} \max z &= \sum_i \sum_j c_{ij} \cdot x_{ij} \\ \text{s.t. } \sum_j x_{ij} - \sum_k x_{ki} &= b_i \quad (i = 1, \dots, n) \end{aligned}$$

- la matrice di incidenza nodi/archi ha dimensione: $\dim(A) = (35 \times 51)$;
- il vettore dei pesi ha dimensione: $\dim(\bar{c}) = (51 \times 1)$;
- il vettore dei termini noti ha dimensione: $\dim(\bar{b}) = (35 \times 1)$;
- il vettore delle variabili dimensione: $\dim(\bar{x}) = (51 \times 1)$;

Gli elementi del vettore dei pesi rappresentano i tempi di esecuzione delle fasi, il vettore dei termini noti (bilancio ai nodi) descrive la tipologia del nodo (sorgente, pozzo o transito), mentre la matrice di incidenza nodi/archi esprime per ogni nodo il senso di percorrenza dell'arco nel caso il nodo sia connessa all'arco considerato.

Eseguendo il calcolo matriciale si può infine esplicitare il modello nel seguente modo:

$$\begin{aligned} \max z \\ z = 7x_1 + 2x_2 + 4x_3 + 0,5x_4 + 2x_5 + 1,5x_6 + 7x_7 + 3x_8 + 3,5x_9 + x_{10} + 2x_{11} + 1,5x_{12} + 2x_{13} + 2x_{14} + 2x_{15} + 2x_{16} \\ + 1,1x_{17} + 1,2x_{18} + 2,3x_{19} + 13x_{20} + 16x_{21} + 484x_{22} + 8x_{23} + 2x_{24} + 2x_{25} + 2x_{26} + \\ + 13x_{27} + 17x_{28} + 482x_{29} + 9x_{30} + 2x_{31} + 2x_{32} + 2x_{33} + 12x_{34} + 16x_{35} + 483x_{36} + 8x_{37} + \\ 2x_{38} + 2x_{39} + 2x_{40} + 3x_{41} + 25x_{42} + 5x_{43} + 2x_{44} + 410x_{45} + 25x_{46} + 2x_{50} + 410x_{51} \end{aligned}$$

Subject to

$x_{20} + x_{27} + x_{34} + x_{47} = 1$	$-x_3 + x_4 + x_{13} + x_{14} = 0$
$-x_{27} + x_{28} = 0$	$-x_{13} - x_{15} - x_{24} - x_{31} - x_{38} + x_{48} = 0$
$-x_{28} + x_{29} = 0$	$-x_{14} - x_{16} - x_{26} - x_{33} - x_{40} + x_{49} = 0$
$-x_{29} + x_{30} = 0$	$-x_4 + x_5 = 0$
$-x_{30} + x_{31} + x_{32} + x_{33} = 0$	$-x_5 + x_6 = 0$
$-x_{20} + x_{21} = 0$	$-x_7 + x_8 = 0$
$-x_{21} + x_{22} = 0$	$-x_8 + x_9 = 0$
$-x_{22} + x_{23} = 0$	$-x_9 + x_{10} + x_{15} + x_{16} = 0$
$-x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} = 0$	$-x_{10} + x_{11} = 0$
$-x_{34} + x_{35} = 0$	$-x_{11} + x_{12} = 0$
$-x_{35} + x_{36} = 0$	
$-x_{36} + x_{37} = 0$	
$-x_{37} + x_{38} + x_{39} + x_{40} = 0$	
$-x_{25} - x_{32} - x_{39} + x_{41} + x_{42} + x_{43} - x_{49} = 0$	

$-x_{43} + x_{44} + x_{51} = 0$	$-x_{17} + x_{18} = 0$
$-x_{44} + x_{45} = 0$	$-x_{18} + x_{19} = 0$
$-x_{45} + x_{46} - x_{51} = 0$	$-x_{42} - x_{46} + x_{50} = 0$
$x_{49} + x_7 - x_{47} = 0$	$-x_{19} - x_{41} + x_{50} = -1$
$-x_1 + x_2 = 0$	$-x_6 - x_{12} + x_{17} = 0$
$-x_2 + x_3 = 0$	

Il problema duale permette di identificare i ritardi ammissibili dall'istante di partenza di ogni fase rispetto alla precedente.

La funzione obiettivo è:

$$\min Z = t_n - t_1$$

$$\text{s.t. } t_j - t_i \geq c_{ij} \quad (i = 1, \dots, n)$$

- la matrice di incidenza nodi/archi ha dimensione: $\dim(A) = (51 \times 35)$;
- il vettore dei termini noti ha dimensione: $\dim(\bar{b}) = (51 \times 1)$;
- il vettore delle variabili ha dimensione: $\dim(\bar{t}) = (35 \times 1)$;

Gli elementi del vettore dei pesi rappresentano i tempi di esecuzione delle fasi, il vettore dei termini noti descrive la tipologia del nodo (sorgente, pozzo o transito), mentre la matrice di incidenza nodi/archi esprime per ogni nodo il senso di percorrenza dell'arco nel caso il nodo sia connessa all'arco considerato.

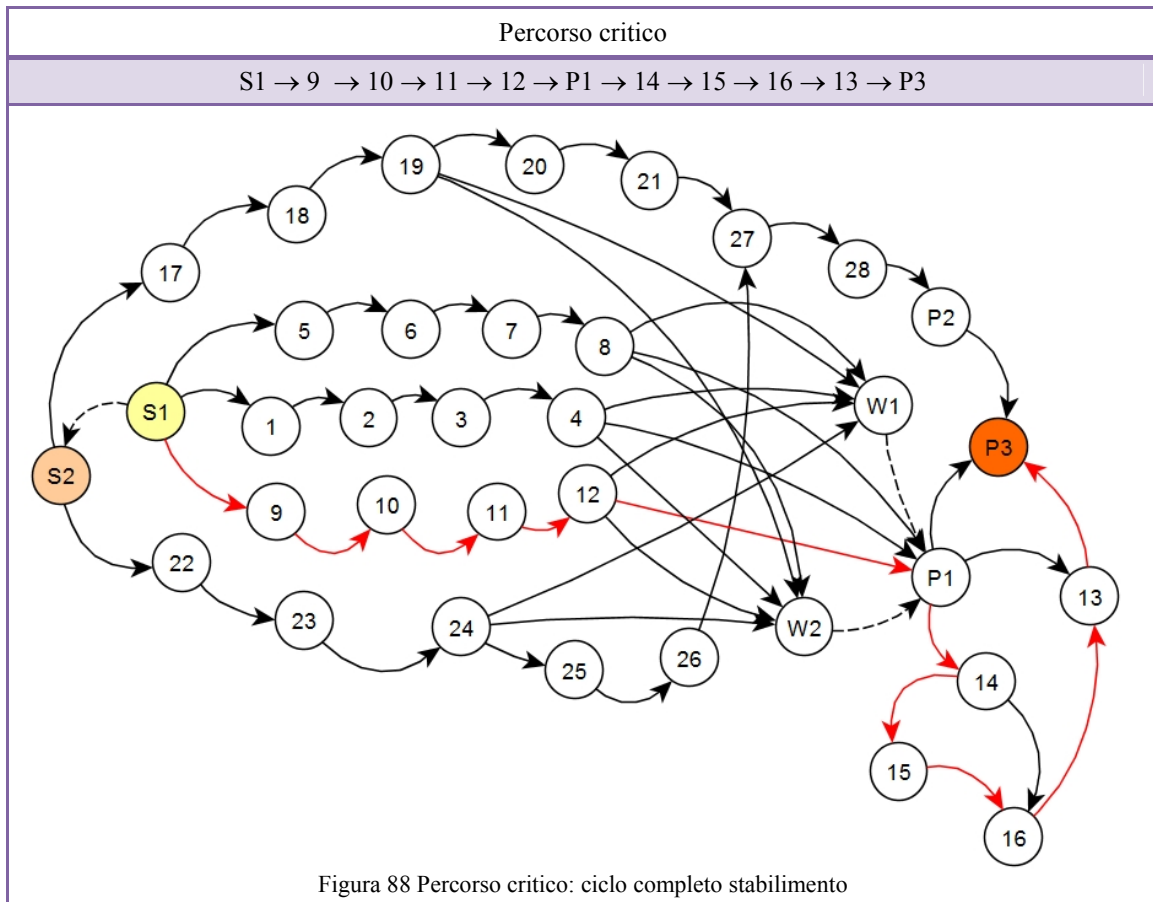
Eseguendo il calcolo matriciale si può infine esplicitare il modello nel seguente modo:

$$\min Z = t_{35} - t_1$$

Subject to

$t_{20} - t_{19} \geq 7$	$t_6 - t_1 \geq 13$	$t_{13} - t_{12} \geq 8$	$t_{34} - t_{33} \geq 1,2$
$t_{21} - t_{20} \geq 2$	$t_7 - t_6 \geq 16$	$t_{13} - t_{12} \geq 2$	$t_{35} - t_{34} \geq 2,3$
$t_{22} - t_{21} \geq 4$	$t_8 - t_7 \geq 484$	$t_{14} - t_{13} \geq 2$	$t_{29} - t_{24} \geq 0$
$t_{25} - t_{22} \geq 0,5$	$t_9 - t_8 \geq 8$	$t_{24} - t_{13} \geq 2$	$t_{33} - t_{32} \geq 1,1$
$t_{26} - t_{25} \geq 2$	$t_{23} - t_9 \geq 2$	$t_{35} - t_{14} \geq 3$	$t_{29} - t_{23} \geq 0$
$t_{32} - t_{26} \geq 1,5$	$t_{14} - t_9 \geq 2$	$t_{15} - t_{14} \geq 25$	$t_{10} - t_1 \geq 12$
$t_{27} - t_{19} \geq 7$	$t_{24} - t_9 \geq 2$	$t_{16} - t_{14} \geq 5$	$t_{11} - t_{10} \geq 16$
$t_{28} - t_{27} \geq 3$	$t_2 - t_1 \geq 13$	$t_{17} - t_{16} \geq 2$	$t_{12} - t_{11} \geq 483$
$t_{29} - t_{28} \geq 3,5$	$t_3 - t_2 \geq 17$	$t_{18} - t_{17} \geq 410$	$t_{18} - t_{16} \geq 410$
$t_{30} - t_{29} \geq 1$	$t_4 - t_3 \geq 482$	$t_{18} - t_{15} \geq 25$	$t_{35} - t_{15} \geq 2$
$t_{31} - t_{30} \geq 2$	$t_5 - t_4 \geq 9$	$t_{19} - t_1 \geq 0$	$t_{24} - t_5 \geq 2$
$t_{32} - t_{31} \geq 1,5$	$t_{23} - t_5 \geq 2$	$t_{23} - t_{14} \geq 0$	$t_{24} - t_{22} \geq 0$
$t_{23} - t_{22} \geq 0$	$t_{14} - t_5 \geq 2$	$t_{24} - t_{14} \geq 0$	

Inserendo i dati nel software ed elaborando si ottiene il seguente risultato:



I ritardi ammissibili dall'istante di partenza in minuti sono i seguenti:

Nodo	Tempo di ritardo [min]		Nodo	Tempo di ritardo [min]	
	Istante al nodo	valore		Istante al nodo	valore
S1	t1	0	S2	t19	0
1	t2	13	17	t20	7
2	t3	30	18	t21	9
3	t4	512	19	t22	13
4	t5	521	W1	t23	523
5	t6	528	W2	t24	523
6	t7	484	20	t25	524
7	t8	0	21	t26	526
8	t9	521	22	t27	7
9	t10	14	23	t28	4
10	t11	30	24	t29	523
11	t12	513	25	t30	524
12	t13	521	26	t31	526
P1	t14	523	27	t32	527,5
13	t15	548	28	t33	546,5
14	t16	528	P2	t34	547,7
15	t17	530	P3	t35	550
16	t18	940			

Maxflow – min cut method (sulla rete di flusso)

Sulla base di quanto descritto al paragrafo 9.5, è stato elaborato il sistema lineare risolutivo per la ricerca dell'ottimo della funzione obiettivo. Il modello descritto è del tipo *maximum flow* e serve a determinare la quantità di massimo flusso in ingresso e la distribuzione su tutti i rami del diagramma reticolare di figura 85 affinché la produzione sia continua e non si creino interruzioni. I dati in input sono quelli indicati nelle tabelle 38 e 39.

$$\begin{aligned} \max z &= f \\ \text{s.t. } \sum_{j \in \omega^+(i)} x_{ij} - \sum_{j \in \omega^-(i)} x_{ij} &= \begin{cases} f & i = 0 \text{ (nodo sorgente)} \\ 0 & i \neq 0, n \text{ (nodo di transito)} \\ -f & i = n \text{ (nodo pozzo)} \end{cases} \\ & x_{ij} \leq c_{ij} \\ & x_{ij} \geq 0 \end{aligned}$$

- la matrice di incidenza nodi/archi (matrice di equilibrio ai nodi) ha dimensione: $\dim(A) = (21 \times 40)$;
- il vettore delle variabili ha dimensione: $\dim(\bar{x}) = (40 \times 1)$;
- il vettore dei termini noti è il vettore nullo avente dimensione: $\dim(\bar{0}) = (21 \times 1)$;

Gli elementi del vettore delle variabili rappresentano i flussi incogniti, mentre la matrice di incidenza nodi/archi (matrice di equilibrio) esprime per ogni nodo la legge di conservazione del flusso (legge di Kirchoff).

Eseguendo il calcolo matriciale si può infine esplicitare il modello nel seguente modo:

$\max f$

Subject to

$-x_1 + x_3 + x_4 = 0$	$-x_{10} - x_{13} - x_{17} - x_{20} - x_{23} + x_{33} = 0$
$-x_3 + x_9 + x_{10} + x_{11} = 0$	$-x_{11} - x_{14} - x_{18} - x_{21} - x_{24} + x_{34} = 0$
$-x_4 + x_{12} + x_{13} + x_{14} = 0$	$-x_{19} - x_{22} - x_{25} + x_{26} = 0$
$-x_9 + x_{15} = 0$	$-x_{15} - x_{16} + x_{29} = 0$
$-x_{12} + x_{16} = 0$	$-x_{28} - x_{29} + x_{30} + x_{31} + x_{32} = 0$
$-x_2 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 = 0$	$-x_{32} + x_{35} = 0$
$-x_8 + x_{38} = 0$	$-x_{31} + x_{36} = 0$
$-x_5 + x_{17} + x_{18} + x_{19} = 0$	$-x_{30} + x_{37} = 0$
$-x_6 + x_{20} + x_{21} + x_{22} = 0$	$-f + x_1 + x_2 = 0$
$-x_7 + x_{23} + x_{24} + x_{25} = 0$	$-x_{33} - x_{34} - x_{35} - x_{36} - x_{37} - x_{38} + f = 0$
$-x_{26} + x_{28} = 0$	

$x_1 \leq 500$	$x_{11} \leq 10$	$x_{21} \leq 10$	$x_{31} \leq 96,3$
$x_2 \leq 500$	$x_{12} \leq 105,2$	$x_{22} \leq 33,75$	$x_{32} \leq 50,4$
$x_3 \leq 200$	$x_{13} \leq 10$	$x_{23} \leq 10$	$x_{33} \leq 1000$
$x_4 \leq 200$	$x_{14} \leq 10$	$x_{24} \leq 10$	$x_{34} \leq 1000$
$x_5 \leq 100$	$x_{15} \leq 151,2$	$x_{25} \leq 33,75$	$x_{35} \leq 50,4$
$x_6 \leq 100$	$x_{16} \leq 268,8$	$x_{26} \leq 96,3$	$x_{36} \leq 96,3$
$x_7 \leq 100$	$x_{17} \leq 10$	$x_{27} \leq 96,3$	$x_{37} \leq 420$
$x_8 \leq 100$	$x_{18} \leq 10$	$x_{28} \leq 50,4$	$x_{38} \leq 500$
$x_9 \leq 90,7$	$x_{19} \leq 28,8$	$x_{29} \leq 420$	$f \leq 1000000$
$x_{10} \leq 10$	$x_{20} \leq 10$	$x_{30} \leq 420$	

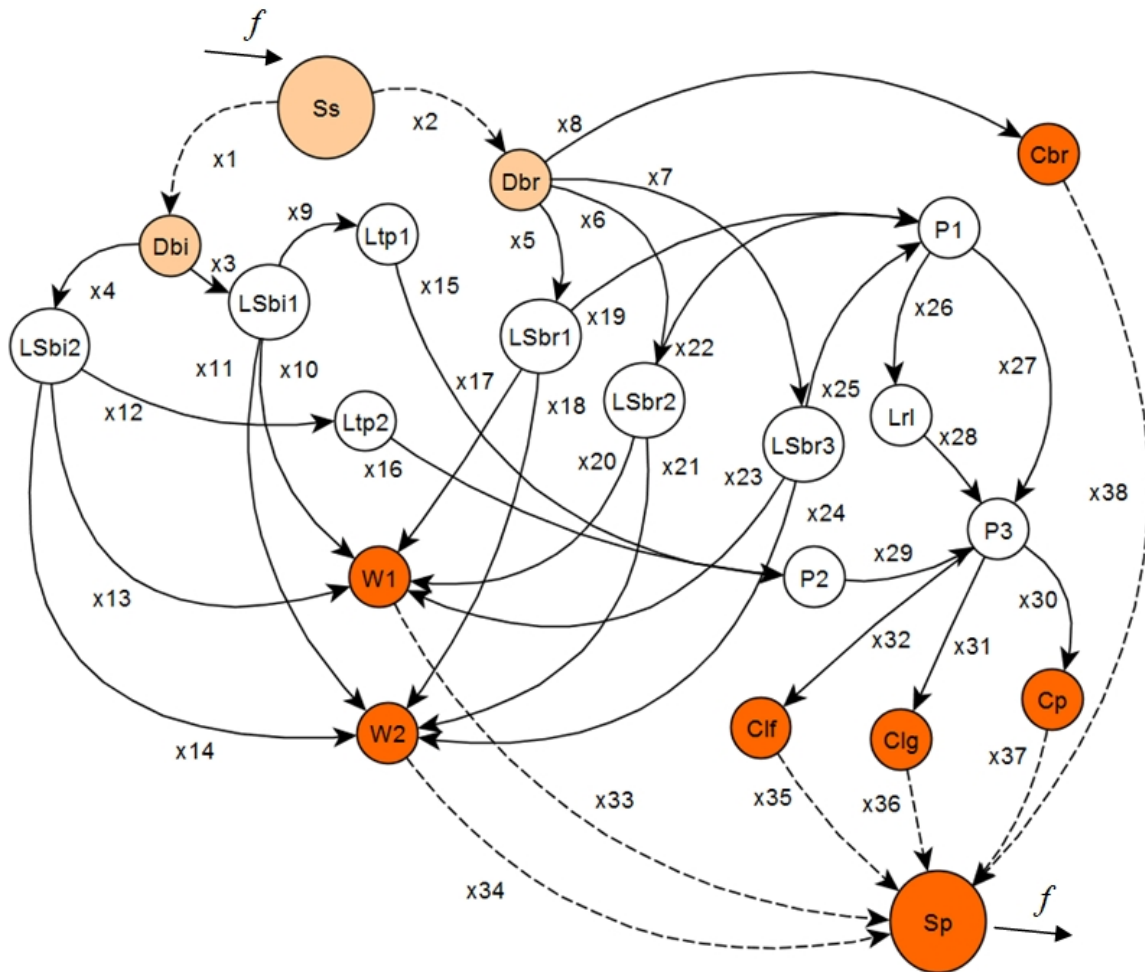


Figura 89 - Rete di flusso con indicazione delle variabili per ogni ramo

Il problema duale permette di identificare i nodi a *collo di bottiglia* (*bottlenecks*), in quanto per il teorema del Massimo flusso e Minimo Taglio, il valore ottimo di f corrisponde al taglio di capacità minima.

$$\begin{aligned} \min Z &= \sum_i \sum_j c_{ij} \cdot y_{ij} \\ \text{s.t.} \quad & u_i - u_j + y_{ij} \geq 0 \\ & -u_s + u_t = 1 \\ & y_{ij} \geq 0 \\ & u_i = 0 \quad \text{se } i \in A \\ & u_i = 1 \quad \text{se } i \in \bar{A} \\ & y_{ij} = 1 \quad \text{se } (i,j) \in (A, \bar{A}) \\ & y_{ij} = 0 \quad \text{altrimenti} \end{aligned}$$

con (A, \bar{A}) un qualsiasi taglio della rete di flusso

Il taglio a capacità minima può essere determinato direttamente sulla rete di flusso ottimizzata in quanto tutti gli archi diretti del taglio sono saturi e quelli inversi sono vuoti.

Inserendo i dati nel software ed elaborando si ottiene il seguente risultato:

Variabili	capacità [mq/h]	flussi ottimi [mq/h]	Variabili	capacità [mq/h]	flussi ottimi [mq/h]	Variabili	capacità [mq/h]	flussi ottimi [mq/h]
x1	500	235,9	x14	10	10	x27	96,3	0
x2	500	210,4	x15	151,2	90,7	x28	50,4	50,4
x3	200	110,7	x16	268,8	105,2	x29	420	195,9
x4	200	125,2	x17	10	10	x30	420	99,6
x5	100	20	x18	10	10	x31	96,3	96,3
x6	100	36,65	x19	28,8	0	x32	50,4	50,4
x7	100	53,75	x20	10	10	x33	1000	50
x8	100	100	x21	10	10	x34	1000	50
x9	90,7	90,7	x22	33,75	16,65	x35	50,4	50,4
x10	10	10	x23	10	10	x36	96,3	96,3
x11	10	10	x24	10	10	x37	420	99,6
x12	105,2	105,2	x25	33,75	33,75	x38	500	100
x13	10	10	x26	96,3	50,4	f	1000000	446,3

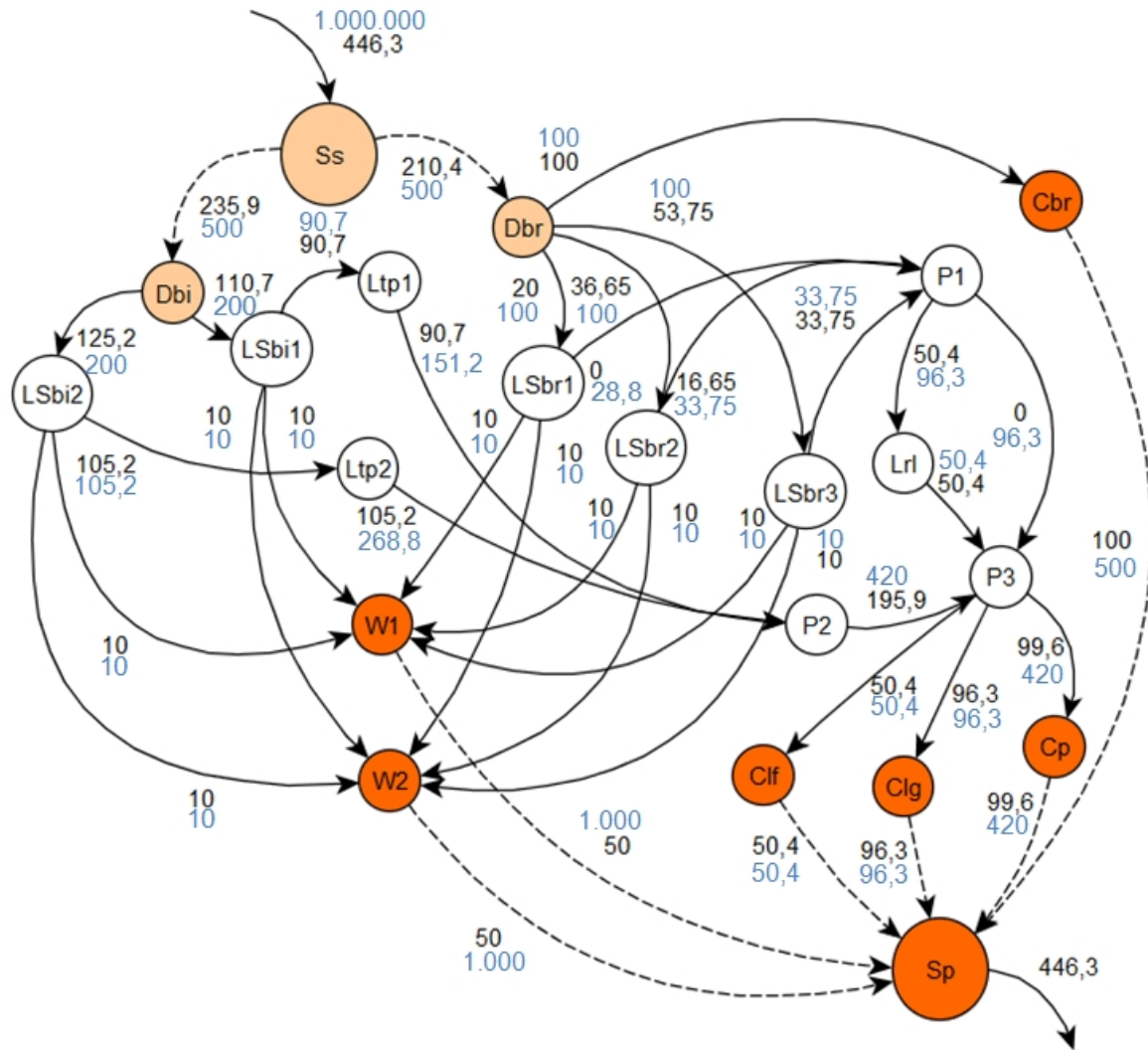


Figura 90 - Rete di flusso con la comparazione tra i flussi ottimali e le capacità massime

Nelle condizioni di capacità massime ipotizzate, non si rilevano nodi a collo di bottiglia.

10.2 Creazione dei modelli matematici – Scenario “Cava”

Nella cava si è pensato di applicare il *Critical Path Method* per la determinazione del percorso critico, ossia la sequenza di attività che non è possibile ritardare affinché venga assicurata la continuità del processo produttivo.

10.2.1 Costruzione dei diagrammi reticolari

Allo scopo di applicare il metodo matematico di ottimizzazione più opportuno, come nel caso dello stabilimento si è reso necessario elaborare diagrammi reticolari che hanno permesso di modellizzare il ciclo produttivo secondo i parametri da inserire nel modello di calcolo. In particolare sono stati elaborate i grafi dei potenziali di task, ossia grafi orientati aciclici in cui i nodi rappresentano le task (fasi) di processo a cui sono associati i relativi tempi di esecuzione e i rami rappresentano le sequenze operative; le task possiedono vincoli di sequenziamento (precedenze di task rispetto ad altri) e vincoli disgiuntivi (impossibilità di svolgere più task contemporaneamente)

Grafo dei potenziali di task

Per applicare il Critical Path Method si è preso in considerazione il ciclo produttivo relativo alla produzione di una serie di blocchi da una bancata. Al fine di simulare le reali condizioni operative in cava si è supposto di coltivare tre bancate utilizzando come configurazione operativa elementare quella relativa al ciclo di taglio descritto nel capitolo 6.4. Inoltre si è immaginato di operare con 1, 2 o 3 configurazioni distinte (costituite dallo stesso numero di macchine e installazioni ma di tipologia e caratteristiche tecniche diverse), sempre contemporaneamente sulle tre bancate. La coltivazione simultanea delle bancate è garantita dalla suddivisione della cava in platee, dalle quali possono essere estratte le bancate in maniera autonoma e indipendente.

Anche in questi casi si è fatto ricorso alla rappresentazione tramite *grafo dei potenziali di task*, in cui ad ogni nodo corrisponde una fase di lavorazione ben definita caratterizzata da un tempo di esecuzione estrapolato sulla base dei dati rilevati, e ogni arco rappresenta la successione delle fasi stesse.

I diagrammi reticolari rappresentativi delle diverse situazioni operative sono i seguenti:

- grafo A: tre configurazioni o linee di taglio operanti in parallelo ognuna su una bancata;
- grafo B: due configurazioni o linee di taglio che si articolano in modo da operare sulle tre bancate;

- grafo C: una sola configurazione o linea di taglio operante sulle tre bancate.
- I diagrammi reticolari descritti sono mostrati nelle figure che seguono.

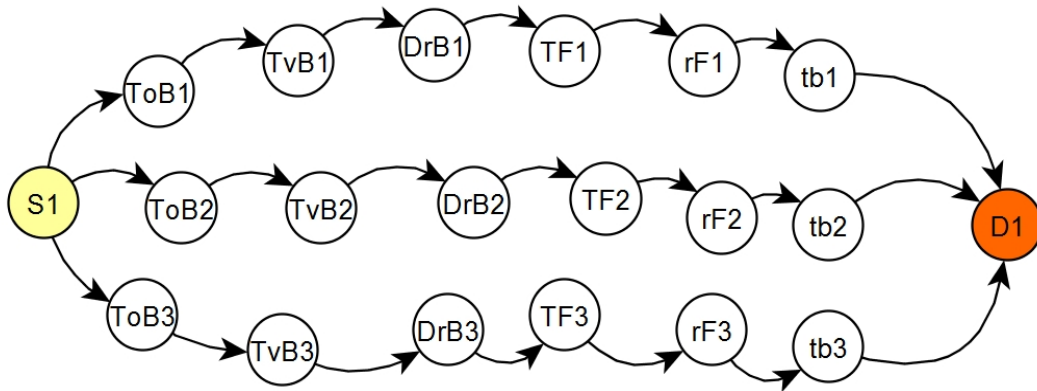


Figura 91 – Grafo dei task A: tre linee di taglio operanti in parallelo su tre bancate

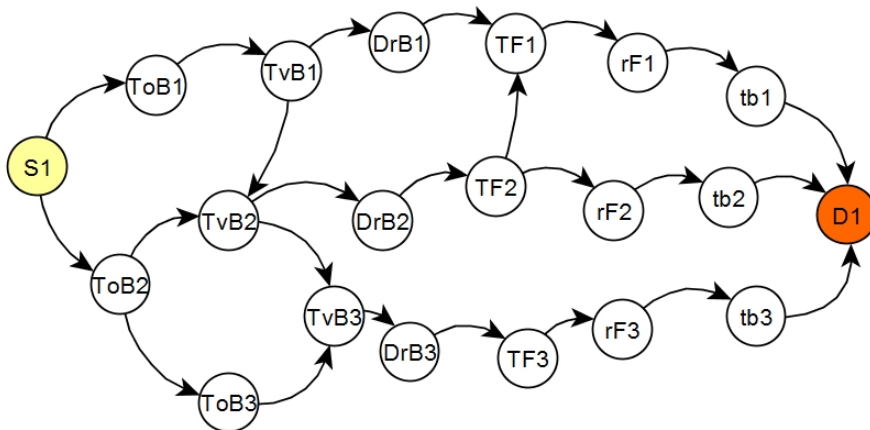


Figura 92 – Grafo dei task B: due linee di taglio operanti su tre bancate

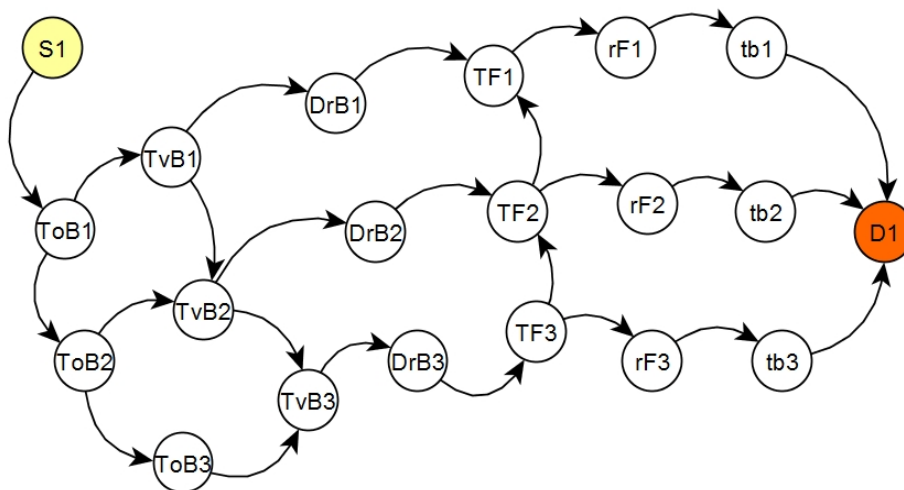


Figura 93 – Grafo dei task C: una linea di taglio operante su tre bancate

Tabella 44 – Significato della simbologia impiegata nel grafo A

Nodo	Tipo (p/s/t)	Descrizione Attività/Fase	Predecessore
S1	s	Partenza dall'area di ricovero mezzi o da altri fronti di coltivazione	-
ToB1	t	Taglio orizzontale della bancata 1	S1
ToB2	t	Taglio orizzontale della bancata 2	ToB1
ToB3	t	Taglio orizzontale della bancata 3	ToB2
TvB1	t	Taglio verticale della bancata 1	ToB1
TvB2	t	Taglio verticale della bancata 2	TvB1-ToB2
TvB3	t	Taglio verticale della bancata 3	TvB2-ToB3
DrB1	t	Fase di distacco e ribaltamento della bancata 1	TvB1
DrB2	t	Fase di distacco e ribaltamento della bancata 2	TvB2
DrB3	t	Fase di distacco e ribaltamento della bancata 3	TvB3
TF1	t	Fase di taglio della bancata 1 in fette	DrB1
TF2	t	Fase di taglio della bancata 1 in fette	DrB2-TF3
TF3	t	Fase di taglio della bancata 1 in fette	DrB3
rF1	t	Fase di rovesciamento della fetta della bancata 1	TF1
rF2	t	Fase di rovesciamento della fetta della bancata 2	TF2
rF3	t	Fase di rovesciamento della fetta della bancata 3	TF3
tb1	t	Fase di taglio della fetta della bancata 1 in blocchi	rF1
tb2	t	Fase di taglio della fetta della bancata 2 in blocchi	rF2
tb3	t	Fase di taglio della fetta della bancata 3 in blocchi	rF3
D1	p	Deposito finale blocchi	tb1-tb2-tb3

Legenda: p = nodo pozzo; s = nodo sorgente; t = nodo di transito

Tabella 45 - Durata delle fasi lavorative nel grafo A

arco uscente (+)	arco entrante (-)	Ramo/Arco		
N_i	N_j	A_{ij}	Tipo (r/f)	d_{ij} [min]
S1	ToB1	S1-ToB1	r	1740
ToB1	ToB2	ToB1-ToB2	r	1740
ToB1	TvB1	ToB1-TvB1	r	1200
ToB2	ToB3	ToB2-ToB3	r	1740
ToB3	TvB3	ToB3-TvB3	r	1200
TvB1	DrB1	TvB1-DrB1	r	125
TvB1	TvB2	TvB1-TvB2	r	1200
TvB2	DrB2	TvB2-DrB2	r	120
TvB2	TvB3	TvB2-TvB3	r	1200
TvB3	DrB3	TvB3-DrB3	r	118
ToB2	TvB2	ToB2-TvB2	r	1200
DrB1	TF1	DrB1-TF1	r	1440
DrB2	TF2	DrB2-TF2	r	1440
DrB3	TF3	DrB3-TF3	r	1440
TF3	TF2	TF3-TF2	r	1440
TF2	TF1	TF2-TF1	r	1440
TF1	rF1	TF1-rF1	r	150
TF2	rF2	TF2-rF2	r	135
TF3	rF3	TF3-rF3	r	140
rF1	tb1	rF1-tb1	r	450
rF2	tb2	rF2-tb2	r	450
rF3	tb3	rF3-tb3	r	450
tb1	D1	tb1-D1	r	50
tb2	D1	tb2-D1	r	50
tb3	D1	tb3-D1	r	50

Legenda: r = arco reale; f = arco fittizio; d_{ij} = durata della fase j dal termine della fase i

Tabella 46 – Significato della simbologia impiegata nel grafo B

Nodo	Tipo (p/s/t)	Descrizione Attività/Fase	Predecessore
S1	s	Partenza dall'area di ricovero mezzi o da altri fronti di coltivazione	-
ToB1	t	Taglio orizzontale della bancata 1	ToB1
ToB2	t	Taglio orizzontale della bancata 2	ToB2
ToB3	t	Taglio orizzontale della bancata 3	TvB2-ToB3
TvB1	t	Taglio verticale della bancata 1	S1
TvB2	t	Taglio verticale della bancata 2	S1
TvB3	t	Taglio verticale della bancata 3	ToB2
DrB1	t	Fase di distacco e ribaltamento della bancata 1	TvB1
DrB2	t	Fase di distacco e ribaltamento della bancata 2	TvB2
DrB3	t	Fase di distacco e ribaltamento della bancata 3	TvB3
TF1	t	Fase di taglio della bancata 1 in fette	DrB1
TF2	t	Fase di taglio della bancata 1 in fette	DrB2
TF3	t	Fase di taglio della bancata 1 in fette	DrB3
rF1	t	Fase di rovesciamento della fetta della bancata 1	TF1
rF2	t	Fase di rovesciamento della fetta della bancata 2	TF2
rF3	t	Fase di rovesciamento della fetta della bancata 3	TF3
tb1	t	Fase di taglio della fetta della bancata 1 in blocchi	rF1
tb2	t	Fase di taglio della fetta della bancata 2 in blocchi	rF2
tb3	t	Fase di taglio della fetta della bancata 3 in blocchi	rF3
D1	p	Deposito finale blocchi	tb1-tb2-tb3

Legenda: p = nodo pozzo; s = nodo sorgente; t = nodo di transito

Tabella 47 - Durata delle fasi lavorative nel grafo B

arco uscente (+)		arco entrante (-)		Ramo/Arco			arco uscente (+)		arco entrante (-)		Ramo/Arco			
N_i	N_j	A_{ij}	Tipo (r/f)	d_{ij} [min]	N_i	N_j	A_{ij}	Tipo (r/f)	d_{ij} [min]	N_i	N_j	A_{ij}	Tipo (r/f)	d_{ij} [min]
S1	ToB1	S1-ToB1	r	1740	TF1	rF1	TF1-rF1	r	150	TF1	rF1	TF1-rF1	r	150
S1	ToB2	S1-ToB2	r	1680	TF2	rF2	TF2-rF2	r	135	TF2	rF2	TF2-rF2	r	135
ToB1	TvB1	ToB1-TvB1	r	1200	TF2	TF1	TF2-TF1	r	1440	TF2	TF1	TF2-TF1	r	1440
TvB1	TvB2	TvB1-TvB2	r	1260	TF3	rF3	TF3-rF3	r	140	TF3	rF3	TF3-rF3	r	140
ToB2	ToB3	ToB2-ToB3	r	1680	rF1	tb1	rF1-tb1	r	450	rF1	tb1	rF1-tb1	r	450
ToB2	TvB2	ToB2-TvB2	r	1260	rF2	tb2	rF2-tb2	r	450	rF2	tb2	rF2-tb2	r	450
ToB3	TvB3	ToB3-TvB3	r	1140	rF3	tb3	rF3-tb3	r	450	rF3	tb3	rF3-tb3	r	450
TvB1	DrB1	TvB1-DrB1	r	125	tb1	D1	tb1-D1	r	50	tb1	D1	tb1-D1	r	50
TvB2	DrB2	TvB2-DrB2	r	120	tb2	D1	tb2-D1	r	50	tb2	D1	tb2-D1	r	50
TvB2	TvB3	TvB2-TvB3	r	1140	tb3	D1	tb3-D1	r	50	tb3	D1	tb3-D1	r	50
TvB3	DrB3	TvB3-DrB3	r	118										
DrB1	TF1	DrB1-TF1	r	1440										
DrB2	TF2	DrB2-TF2	r	1368										
DrB3	TF3	DrB3-TF3	r	1368										

Legenda: r = arco reale; f = arco fittizio; d_{ij} = durata della fase j dal termine della fase i

Tabella 48 – Significato della simbologia impiegata nel grafo C

Nodo	Tipo (p/s/t)	Descrizione Attività/Fase	Predecessore
S1	s	Partenza dall'area di ricovero mezzi o da altri fronti di coltivazione	S1
ToB1	t	Taglio orizzontale della bancata 1	ToB1
ToB2	t	Taglio orizzontale della bancata 2	ToB2
ToB3	t	Taglio orizzontale della bancata 3	ToB1
TvB1	t	Taglio verticale della bancata 1	TvB1-ToB2
TvB2	t	Taglio verticale della bancata 2	TvB2-ToB3
TvB3	t	Taglio verticale della bancata 3	TvB1
DrB1	t	Fase di distacco e ribaltamento della bancata 1	TvB2
DrB2	t	Fase di distacco e ribaltamento della bancata 2	TvB3
DrB3	t	Fase di distacco e ribaltamento della bancata 3	DrB1
TF1	t	Fase di taglio della bancata 1 in fette	DrB2-TF3
TF2	t	Fase di taglio della bancata 1 in fette	DrB3
TF3	t	Fase di taglio della bancata 1 in fette	TF1
rF1	t	Fase di rovesciamento della fetta della bancata 1	TF2
rF2	t	Fase di rovesciamento della fetta della bancata 2	TF3
rF3	t	Fase di rovesciamento della fetta della bancata 3	rF1
tb1	t	Fase di taglio della fetta della bancata 1 in blocchi	rF2
tb2	t	Fase di taglio della fetta della bancata 2 in blocchi	rF3
tb3	t	Fase di taglio della fetta della bancata 3 in blocchi	tb1-tb2-tb3
D1	p	Deposito finale blocchi	S1

Legenda: p = nodo pozzo; s = nodo sorgente; t = nodo di transito

Tabella 49 - Durata delle fasi lavorative nel grafo C

arco uscente (+)		arco entrante (-)		Ramo/Arco			arco uscente (+)		arco entrante (-)		Ramo/Arco			
N_i	N_j	A_{ij}	Tipo (r/f)	d_{ij}	N_i	N_j	A_{ij}	Tipo (r/f)	d_{ij}	N_i	N_j	A_{ij}	Tipo (r/f)	d_{ij}
S1	ToB1	S1-ToB1	r	1740	TF3	TF2	TF3-TF2	r	1440	TF3	TF2	TF3-TF2	r	1440
ToB1	ToB2	ToB1-ToB2	r	1740	TF2	TF1	TF2-TF1	r	1440	TF2	TF1	TF2-TF1	r	1440
ToB1	TvB1	ToB1-TvB1	r	1200	TF1	rF1	TF1-rF1	r	150	TF1	rF1	TF1-rF1	r	150
ToB2	ToB3	ToB2-ToB3	r	1740	TF2	rF2	TF2-rF2	r	135	TF2	rF2	TF2-rF2	r	135
ToB3	TvB3	ToB3-TvB3	r	1200	TF3	rF3	TF3-rF3	r	140	TF3	rF3	TF3-rF3	r	140
TvB1	DrB1	TvB1-DrB1	r	125	rF1	tb1	rF1-tb1	r	450	rF1	tb1	rF1-tb1	r	450
TvB1	TvB2	TvB1-TvB2	r	1200	rF2	tb2	rF2-tb2	r	450	rF2	tb2	rF2-tb2	r	450
TvB2	DrB2	TvB2-DrB2	r	120	rF3	tb3	rF3-tb3	r	450	rF3	tb3	rF3-tb3	r	450
TvB2	TvB3	TvB2-TvB3	r	1200	tb1	D1	tb1-D1	r	50	tb1	D1	tb1-D1	r	50
TvB3	DrB3	TvB3-DrB3	r	118	tb2	D1	tb2-D1	r	50	tb2	D1	tb2-D1	r	50
ToB2	TvB2	ToB2-TvB2	r	1200	tb3	D1	tb3-D1	r	50	tb3	D1	tb3-D1	r	50
DrB1	TF1	DrB1-TF1	r	1440										
DrB2	TF2	DrB2-TF2	r	1440										
DrB3	TF3	DrB3-TF3	r	1440										

Legenda: r = arco reale; f = arco fittizio; d_{ij} = durata della fase j dal termine della fase i

10.2.2 Modelli matematici

Sulla base di quanto descritto al paragrafo 9.4, anche nel caso della cava è stato elaborato il sistema lineare risolutivo per la ricerca dell'ottimo della funzione obiettivo. Il modello descritto è del tipo *longest path* primale e serve a determinare il percorso più lungo che coincide con il cammino critico del diagramma reticolare, avente come dati in input quelli indicati nelle tabelle illustrate.

Grafo A – configurazione a tre linee di taglio su tre bancate

La funzione obiettivo è:

$$\begin{aligned} \max z &= \sum_i \sum_j c_{ij} \cdot x_{ij} \\ \text{s.t. } \sum_j x_{ij} - \sum_k x_{ki} &= b_i \quad (i = 1, \dots, n) \end{aligned}$$

- la matrice di incidenza nodi/archi ha dimensione: $\dim(A) = (20 \times 21)$;
- il vettore dei pesi ha dimensione: $\dim(\bar{c}) = (1 \times 20)$;
- il vettore dei termini noti ha dimensione: $\dim(\bar{b}) = (21 \times 1)$;
- il vettore delle variabili dimensione: $\dim(\bar{x}) = (21 \times 1)$;

Gli elementi del vettore dei pesi rappresentano i tempi di esecuzione delle fasi, il vettore dei termini noti (bilancio ai nodi) descrive la tipologia del nodo (sorgente, pozzo o transito), mentre la matrice di incidenza nodi/archi esprime per ogni nodo il senso di percorrenza dell'arco nel caso il nodo sia connessa all'arco considerato.

Eseguendo il calcolo matriciale si può infine esplicitare il modello nel seguente modo:

$$\begin{aligned} \max z \\ z &= 1740x_1 + 1680x_2 + 1710x_3 + 1200x_4 + 1260x_5 + 1140x_6 + 125x_7 + 120x_8 + 118x_9 + 1440x_{10} + 1368x_{11} \\ &\quad 1512x_{12} + 150x_{13} + 135x_{14} + 140x_{15} + 450x_{16} + 450x_{17} + 450x_{18} + 50x_{19} + 50x_{20} + 50x_{21} \\ \text{Subject to} \end{aligned}$$

$x_1 + x_2 + x_3 = 1$	$-x_5 + x_8 = 0$	$-x_{10} + x_{13} = 0$	$-x_{15} + x_{18} = 0$
$-x_1 + x_4 = 0$	$-x_6 + x_9 = 0$	$-x_{11} + x_{14} = 0$	$-x_{16} + x_{19} = 0$
$-x_2 + x_5 = 0$	$-x_7 + x_{10} = 0$	$-x_{12} + x_{15} = 0$	$-x_{17} + x_{20} = 0$
$-x_3 + x_6 = 0$	$-x_8 + x_{11} = 0$	$-x_{13} + x_{16} = 0$	$-x_{18} + x_{21} = 0$
$-x_4 + x_7 = 0$	$-x_9 + x_{12} = 0$	$-x_{14} + x_{17} = 0$	$-x_9 - x_{20} - x_{21} = -1$

Il problema duale permette di identificare, i ritardi ammissibili dall'istante di partenza di ogni fase rispetto alla precedente.

La funzione obiettivo è:

$$\begin{aligned} \min Z &= t_n - t_1 \\ \text{s.t. } t_j - t_i &\geq c_{ij} \quad (i = 1, \dots, n) \end{aligned}$$

- la matrice di incidenza nodi/archi ha dimensione: $\dim(A) = (21 \times 20)$;
- il vettore dei termini noti ha dimensione: $\dim(\bar{b}) = (21 \times 1)$;
- il vettore delle variabili ha dimensione: $\dim(\bar{t}) = (20 \times 1)$;

Gli elementi del vettore dei pesi rappresentano i tempi di esecuzione delle fasi, il vettore dei termini noti descrive la tipologia del nodo (sorgente, pozzo o transito), mentre la matrice di incidenza nodi/archi esprime per ogni nodo il senso di percorrenza dell'arco nel caso il nodo sia connessa all'arco considerato.

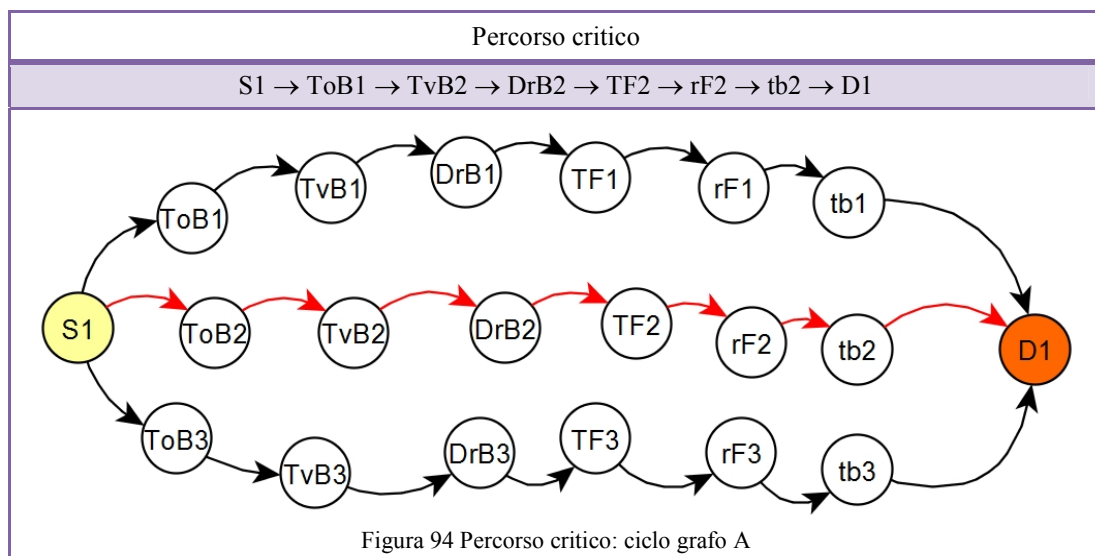
Eseguendo il calcolo matriciale si può infine esplicitare il modello nel seguente modo:

$$\min Z = t_{20} - t_1$$

Subject to

$t_2 - t_1 \geq 1740$	$t_8 - t_5 \geq 125$	$t_{13} - t_{10} \geq 1512$	$t_{18} - t_{15} \geq 450$
$t_3 - t_1 \geq 1680$	$t_9 - t_6 \geq 120$	$t_{14} - t_{11} \geq 150$	$t_{19} - t_{16} \geq 450$
$t_4 - t_1 \geq 1710$	$t_{10} - t_7 \geq 118$	$t_{15} - t_{12} \geq 135$	$t_{20} - t_{17} \geq 50$
$t_5 - t_2 \geq 1200$	$t_{11} - t_8 \geq 1440$	$t_{16} - t_{13} \geq 140$	$t_{20} - t_{18} \geq 50$
$t_6 - t_3 \geq 1260$	$t_{12} - t_9 \geq 1368$	$t_{17} - t_{14} \geq 450$	$t_{20} - t_{19} \geq 50$
$t_7 - t_4 \geq 1140$			

Inserendo i dati nel software ed elaborando si ottiene il seguente risultato:



I ritardi ammissibili dall'istante di partenza in minuti sono i seguenti:

Nodo	Tempo di ritardo [min]		Nodo	Tempo di ritardo [min]	
	Istante al nodo	valore		Istante al nodo	valore
S1	t1	0	TF1	t11	4505
ToB1	t2	1740	TF2	t12	4520
ToB2	t3	1772	TF3	t13	4485
ToB3	t4	1715	rF1	t14	4655
TvB1	t5	2940	rF2	t15	4655
TvB2	t6	3032	rF3	t16	4625
TvB3	t7	2855	tb1	t17	5105
DrB1	t8	3065	tb2	t18	5105
DrB2	t9	3152	tb3	t19	5075
DrB3	t10	2973	D1	t20	5155

Grafo B – configurazione a due linee di taglio su tre bancate

La funzione obiettivo è:

$$\max z = \sum_i \sum_j c_{ij} \cdot x_{ij}$$

$$\text{s.t. } \sum_j x_{ij} - \sum_k x_{ki} = b_i \quad (i = 1, \dots, n)$$

- la matrice di incidenza nodi/archi ha dimensione: $\dim(A) = (20 \times 24)$;
- il vettore dei pesi ha dimensione: $\dim(\bar{c}) = (1 \times 20)$;
- il vettore dei termini noti ha dimensione: $\dim(\bar{b}) = (24 \times 1)$;
- il vettore delle variabili dimensione: $\dim(\bar{x}) = (20 \times 1)$;

Gli elementi del vettore dei pesi rappresentano i tempi di esecuzione delle fasi, il vettore dei termini noti (bilancio ai nodi) descrive la tipologia del nodo (sorgente, pozzo o transito), mentre la matrice di incidenza nodi/archi esprime per ogni nodo il senso di percorrenza dell'arco nel caso il nodo sia connessa all'arco considerato.

Eseguendo il calcolo matriciale si può infine esplicitare il modello nel seguente modo:

max z

$$z = 1740x_1 + 1680x_2 + 1200x_3 + 1260x_4 + 1680x_5 + 1260x_6 + 1140x_7 + 125x_8 + 120x_9 + 1440x_{10} + 118x_{11} + 1440x_{12} + 1368x_{13} + 1368x_{14} + 150x_{15} + 136x_{16} + 1440x_{17} + 140x_{18} + 450x_{19} + 450x_{20} + 450x_{21} + 50x_{22} + 50x_{23} + 50x_{24}$$

Subject to

$x_1 + x_2 = 1$	$-x_2 + x_5 + x_6 = 0$	$-x_{12} + x_{15} - x_{17} = 0$	$-x_{18} + x_{21} = 0$
$-x_3 + x_4 + x_8 = 0$	$-x_5 + x_7 = 0$	$-x_{13} + x_{16} + x_{17} = 0$	$-x_{19} + x_{22} = 0$
$-x_4 - x_6 + x_9 + x_{10} = 0$	$-x_8 + x_{12} = 0$	$-x_{14} + x_{18} = 0$	$-x_{20} + x_{23} = 0$
$-x_7 - x_{10} + x_{11} = 0$	$-x_9 + x_{13} = 0$	$-x_{15} + x_{19} = 0$	$-x_{21} + x_{24} = 0$
$-x_1 + x_3 = 0$	$-x_{11} + x_{14} = 0$	$-x_{16} + x_{20} = 0$	$-x_{22} - x_{23} - x_{24} = -1$

Il problema duale permette di identificare, i ritardi ammissibili dall'istante di partenza di ogni fase rispetto alla precedente.

La funzione obiettivo è:

$$\begin{aligned} \min Z &= t_n - t_1 \\ \text{s.t. } t_j - t_i &\geq c_{ij} \quad (i = 1, \dots, n) \end{aligned}$$

- la matrice di incidenza nodi/archi ha dimensione: $\dim(A) = (24 \times 20)$;
- il vettore dei termini noti ha dimensione: $\dim(\bar{b}) = (24 \times 1)$;
- il vettore delle variabili ha dimensione: $\dim(\bar{t}) = (20 \times 1)$;

Gli elementi del vettore dei pesi rappresentano i tempi di esecuzione delle fasi, il vettore dei termini noti descrive la tipologia del nodo (sorgente, pozzo o transito), mentre la matrice di incidenza nodi/archi esprime per ogni nodo il senso di percorrenza dell'arco nel caso il nodo sia connessa all'arco considerato.

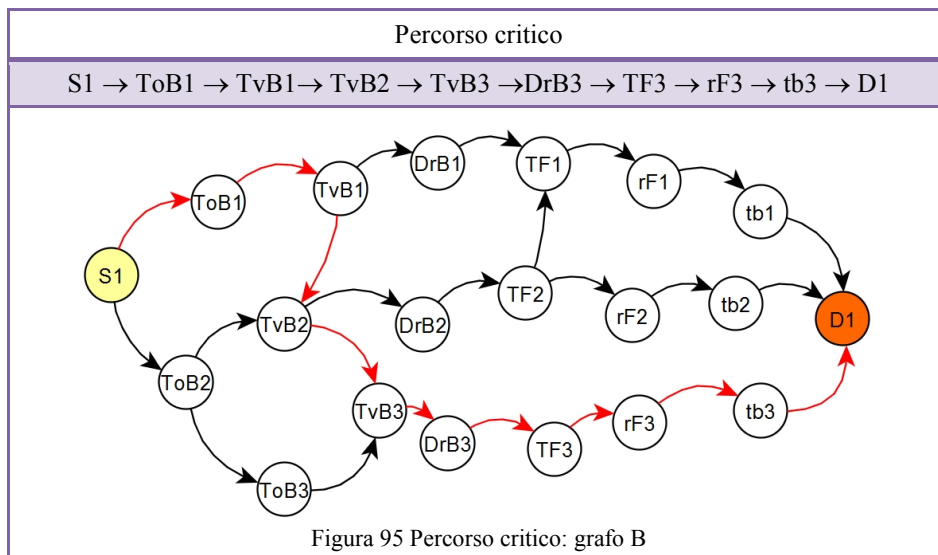
Eseguito il calcolo matriciale si può infine esplicitare il modello nel seguente modo:

$$\min Z = t_{20} - t_1$$

Subject to

$t_5 - t_1 \geq 1740$	$t_7 - t_4 \geq 1140$	$t_{12} - t_9 \geq 1368$	$t_{17} - t_{14} \geq 450$
$t_6 - t_1 \geq 1680$	$t_8 - t_2 \geq 125$	$t_{13} - t_{10} \geq 1368$	$t_{18} - t_{15} \geq 450$
$t_5 - t_2 \geq 1200$	$t_9 - t_3 \geq 120$	$t_{14} - t_{11} \geq 150$	$t_{19} - t_{16} \geq 450$
$t_3 - t_2 \geq 1260$	$t_4 - t_3 \geq 1440$	$t_{15} - t_{12} \geq 135$	$t_{20} - t_{17} \geq 50$
$t_7 - t_6 \geq 1680$	$t_{10} - t_4 \geq 118$	$t_{12} - t_{11} \geq 1440$	$t_{20} - t_{18} \geq 50$
$t_6 - t_3 \geq 1260$	$t_{11} - t_8 \geq 1440$	$t_{16} - t_{13} \geq 140$	$t_{20} - t_{19} \geq 50$

Inserendo i dati nel software ed elaborando si ottiene il seguente risultato:



I ritardi ammissibili dall'istante di partenza in minuti sono i seguenti:

Nodo	Tempo di ritardo [min]		Nodo	Tempo di ritardo [min]	
	Istante al nodo	valore		Istante al nodo	valore
S1	t1	840	TF1	t11	2751
ToB1	t2	0	TF2	t12	4191
ToB2	t3	1260	TF3	t13	4186
ToB3	t4	2700	rF1	t14	4326
TvB1	t5	2580	rF2	t15	4326
TvB2	t6	2520	rF3	t16	4326
TvB3	t7	4200	tb1	t17	4776
DrB1	t8	125	tb2	t18	4776
DrB2	t9	2823	tb3	t19	4776
DrB3	t10	2818	D1	t20	4826

Grafo C – configurazione a una linea di taglio su tre bancate

La funzione obiettivo è:

$$\max z = \sum_i \sum_j c_{ij} \cdot x_{ij}$$

$$\text{s.t. } \sum_j x_{ij} - \sum_k x_{ki} = b_i \quad (i = 1, \dots, n)$$

- la matrice di incidenza nodi/archi ha dimensione: $\dim(A) = (20 \times 25)$;
- il vettore dei pesi ha dimensione: $\dim(\bar{c}) = (1 \times 20)$;
- il vettore dei termini noti ha dimensione: $\dim(\bar{b}) = (25 \times 1)$;
- il vettore delle variabili dimensione: $\dim(\bar{x}) = (20 \times 1)$;

Gli elementi del vettore dei pesi rappresentano i tempi di esecuzione delle fasi, il vettore dei termini noti (bilancio ai nodi) descrive la tipologia del nodo (sorgente, pozzo o transito), mentre la matrice di incidenza nodi/archi esprime per ogni nodo il senso di percorrenza dell'arco nel caso il nodo sia connessa all'arco considerato.

Eseguendo il calcolo matriciale si può infine esplicitare il modello nel seguente modo:

max z

$$z = 1740x_1 + 1740x_2 + 1200x_3 + 1740x_4 + 1200x_5 + 125x_6 + 1200x_7 + 120x_8 + 1200x_9 + 118x_{10} + 1200x_{11} + 1440x_{12} + 1440x_{13} + 1440x_{14} + 1440x_{15} + 1440x_{16} + 150x_{17} + 135x_{18} + 140x_{19} + 450x_{20} + 450x_{21} + 450x_{22} + 50x_{23} + 50x_{24} + 50x_{25}$$

Subject to

$x_1 = 1$	$-x_7 + x_8 + x_9 - x_{11} = 0$	$-x_{12} - x_{16} + x_{17} = 0$	$-x_{19} + x_{22} = 0$
$-x_1 + x_2 + x_3 = 0$	$-x_5 - x_9 + x_{10} = 0$	$-x_{13} - x_{15} + x_{16} + x_{18} = 0$	$-x_{20} + x_{23} = 0$
$-x_2 + x_4 + x_{11} = 0$	$-x_6 + x_{12} = 0$	$-x_{14} + x_{15} + x_{19} = 0$	$-x_{21} + x_{24} = 0$
$-x_4 + x_5 = 0$	$-x_8 + x_{13} = 0$	$-x_{17} + x_{20} = 0$	$-x_{22} + x_{25} = 0$
$-x_3 + x_6 + x_7 = 0$	$-x_{10} + x_{14} = 0$	$-x_{18} + x_{21} = 0$	$-x_{23} - x_{24} - x_{25} = -1$

Il problema duale permette di identificare, i ritardi ammissibili dall'istante di partenza di ogni fase rispetto alla precedente.

La funzione obiettivo è:

$$\begin{aligned} \min Z &= t_n - t_1 \\ \text{s.t. } t_j - t_i &\geq c_{ij} \quad (i = 1, \dots, n) \end{aligned}$$

- la matrice di incidenza nodi/archi ha dimensione: $\dim(A) = (25 \times 20)$;
- il vettore dei termini noti ha dimensione: $\dim(\bar{b}) = (25 \times 1)$;
- il vettore delle variabili ha dimensione: $\dim(\bar{t}) = (20 \times 1)$;

Gli elementi del vettore dei pesi rappresentano i tempi di esecuzione delle fasi, il vettore dei termini noti descrive la tipologia del nodo (sorgente, pozzo o transito), mentre la matrice di incidenza nodi/archi esprime per ogni nodo il senso di percorrenza dell'arco nel caso il nodo sia connessa all'arco considerato.

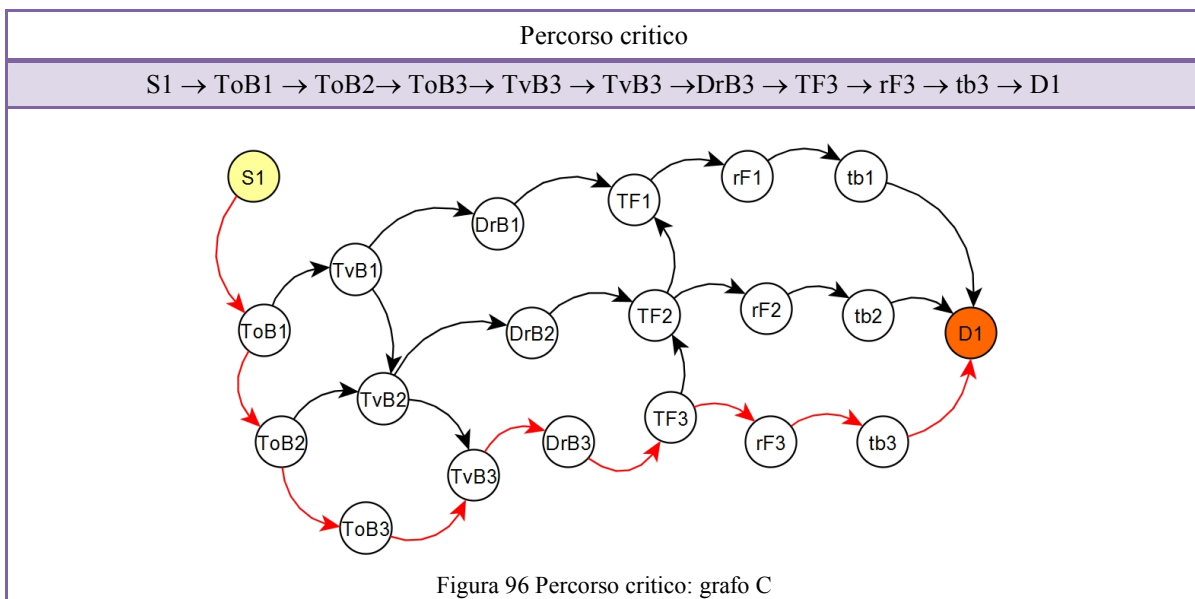
Eseguido il calcolo matriciale si può infine esplicitare il modello nel seguente modo:

$$\min Z = t_{20} - t_1$$

Subject to

$t_2 - t_1 \geq 1740$	$t_6 - t_5 \geq 1200$	$t_{12} - t_9 \geq 1440$	$t_{16} - t_{13} \geq 140$	$t_{20} - t_{19} \geq 50$
$t_3 - t_2 \geq 1740$	$t_9 - t_6 \geq 120$	$t_{13} - t_{10} \geq 1440$	$t_{17} - t_{14} \geq 450$	$t_{20} - t_{18} \geq 50$
$t_5 - t_2 \geq 1200$	$t_7 - t_6 \geq 1200$	$t_{13} - t_{12} \geq 1440$	$t_{18} - t_{15} \geq 450$	$t_{15} - t_{12} \geq 135$
$t_4 - t_3 \geq 1740$	$t_{10} - t_7 \geq 118$	$t_{12} - t_{11} \geq 1400$	$t_{19} - t_{16} \geq 450$	$t_{11} - t_8 \geq 1440$
$t_7 - t_4 \geq 1200$	$t_6 - t_3 \geq 1200$	$t_{14} - t_{11} \geq 150$	$t_{20} - t_{17} \geq 50$	$t_8 - t_5 \geq 125$

Inserendo i dati nel software ed elaborando si ottiene il seguente risultato:



I ritardi ammissibili dall'istante di partenza in minuti sono i seguenti:

Nodo	Tempo di ritardo [min]		Nodo	Tempo di ritardo [min]	
	Istante al nodo	valore		Istante al nodo	valore
S1	t1	0	TF1	t11	5138
ToB1	t2	1740	TF2	t12	6538
ToB2	t3	3480	TF3	t13	7978
ToB3	t4	5220	rF1	t14	8118
TvB1	t5	3480	rF2	t15	8118
TvB2	t6	4680	rF3	t16	8118
TvB3	t7	6420	tb1	t17	8568
DrB1	t8	3698	tb2	t18	8568
DrB2	t9	4800	tb3	t19	8568
DrB3	t10	6538	D1	t20	8618

CAPITOLO 11

Conclusioni

Risultati della ricerca

Il lavoro di ricerca svolto ha mostrato che è possibile applicare le tecniche matematiche di ottimizzazione su reti in ausilio alla pianificazione e al controllo dei processi di lavorazione nel settore dei lapidei carbonatici. E' stato possibile simulare diversi scenari operativi in stabilimento e in cava, sui quali sono stati applicati con successo due metodi di ottimizzazione già ampiamente utilizzati in altri contesti operativi: il *metodo del Percorso Critico* e il *Metodo del Massimo Flusso e Minimo Taglio*. Questi metodi rappresentano un potente strumento analitico in ausilio alle decisioni che il tecnico deve prendere sia in fase di progettazione delle attività, sia nel caso occorra monitorare le attività già in corso nell'ottica del miglioramento dell'efficienza dei processi. D'altro canto la buona riuscita del metodo di lavoro indicato è condizionato dalla corretta rappresentazione dei processi. Tanto maggiore sarà il dettaglio e l'articolazione delle fasi di lavoro, e tanto più i risultati delle simulazioni si avvicineranno alla realtà aziendale. In particolare, il caso studio affrontato ha permesso di analizzare i processi su tutta la filiera, dalla estrazione del blocco nella cava, alla sua trasformazione fino al prodotto ultimo più raffinato, ossia la lastra lucidata e le pannelle in marmo. La notevole dimensione dell'azienda ha tuttavia reso complessa l'operazione di raccolta dei dati di processo e la ricostruzione dei sotto cicli produttivi associati alle differenti tipologie di prodotto ottenuto. In particolare, il lavoro in campo sulla cava è stato fortemente condizionato dalle condizioni meteorologiche (situazioni critiche dovute alle precipitazioni durante il periodo invernale) e da avversità di natura tecnico – pratica (particolare cautele da seguire per la sicurezza sul lavoro e necessità di non interrompere le lavorazioni).

Vantaggi dell'approccio modellistico

le tecniche di ottimizzazione basate sulla *teoria dei grafi* sono state impiegate con successo in luogo dell'approccio classico alla risoluzione dei problemi di programmazione lineare, come il metodo del simplesso e tutte le sue rielaborazioni. La teoria dei grafi possiede come caratteristica principale l'interdisciplinarietà del processo modellistico, da attribuire al fatto che molte strutture fisiche reali possono essere schematizzate utilizzando i grafi, come ad esempio le sequenze operative di lavoro nei processi studiati nel corso di questa ricerca. Tra i principali vantaggi derivanti da questo approccio è possibile annoverare i seguenti:

- in riferimento a scopi di pianificazione esso permette di adottare strategie che da una sola analisi strutturale del problema non apparirebbero evidenti o che a volte potrebbero essere perfino contro intuitive;
- il modello può essere risolto matematicamente ottenendo soluzioni definite e analitiche;
- il modello, una volta definito correttamente, permette di effettuare tutte le simulazioni che si vuole, attribuendo ai parametri numerici i valori desiderati corrispondenti alle più svariate condizioni che si intendono verificare;
- è possibile ridurre i costi associati ai parametri ottimizzati conseguendo il miglioramento economico dell'attività;
- i modelli permettono sia di pianificare il ciclo produttivo prima dell'inizio delle attività, sia di ottimizzarle nel caso di produzione già avviata;
- i modelli possono essere risolti tramite appositi e potenti software che riescono a gestire in tempi relativamente brevi un gran numero di variabili.

Criticità emerse

Alcune criticità applicando l'approccio modellistico, emerse durante la ricerca effettuate, possono essere riassunte nei seguenti punti:

- alcuni parametri da inserire nei modelli sono di difficile quantificazione e la qualità delle risposte che un modello produce potrebbe essere fortemente condizionata dall'accuratezza dei dati considerati;
- la precisione delle previsioni è direttamente legata, oltre che alla strutturazione del modello, anche alla sua articolazione e al suo dettaglio: la precisione aumenta all'aumentare della risoluzione della rappresentazione schematica (numero di nodi e archi).

Sviluppo della ricerca

Dai risultati della ricerca appare evidente che è possibile applicare la metodologia impiegata, oltre che per la ricerca degli ottimi direttamente legati alla produzione in senso stretto, anche per la gestione degli sfridi di lavorazione, del magazzino prodotti finiti e semi lavorati, e delle risorse energetiche. Sarebbe quindi auspicabile affrontare con lo stesso approccio adottato durante questo studio, le tematiche pocanzi citate, anche ricorrendo ad altri metodi matematici forniti dalla *Teoria delle Decisioni*.

APPENDICI

Appendice.01

Teoria della Programmazione Lineare

La forma più comune dei problemi succitati è la seguente (forma standard, ossia tutti i vincoli sono in forma di uguaglianza e tutte le variabili sono non negative):

$$\min \{z = c^T \cdot \bar{x}\} \text{ dove } z \text{ è la funzione obiettivo; } (\min\{z\} = -\max\{z\})$$

$$A \cdot \bar{x} = \bar{b} \text{ rappresenta il sistema dei vincoli;}$$

$$\bar{x} \in \mathfrak{R}^n ; \bar{x} \geq 0 ;$$

in cui

$$A = \text{matrice} \in \mathfrak{R}^{m \times n} \text{ dei coefficienti dei vincoli: } A = [a_{ij}] \text{ con } i = 1, \dots, m \text{ e } j = 1, \dots, n$$

$$\bar{b} = \text{vettore } m \times 1 \text{ dei termini noti dei vincoli } \bar{b} \geq 0, b_j \geq 0 \forall j = 1, \dots, m$$

$$\bar{x} = \text{vettore } n \times 1 \text{ delle variabili decisionali}$$

$$c = \text{vettore } n \times 1 \text{ dei coefficienti della funzione obiettivo (detto anche vettore di costi)}$$

Esplicitando in notazione matriciale si ottiene:

$$\begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \dots & a_{m,n} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_m \end{pmatrix}$$

il quale può essere scritto in forma sistemica come segue:

$$\begin{cases} a_{1,1} \cdot x_1 + a_{1,2} \cdot x_2 + \dots + a_{1,n} \cdot x_n = b_1 \\ a_{2,1} \cdot x_1 + a_{2,2} \cdot x_2 + \dots + a_{2,n} \cdot x_n = b_2 \\ \dots \\ a_{m,1} \cdot x_1 + a_{m,2} \cdot x_2 + \dots + a_{m,n} \cdot x_n = b_m \end{cases}$$

$$\text{con } x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$$

Si ritengono soddisfatte inoltre le seguenti ipotesi:

$$m < n$$

$$m = \text{rango}(A)$$

	MINIMIZATION PROBLEM	MAXIMIZATION PROBLEM
Standard Form	Minimize $\sum_{j=1}^n c_j x_j$ Subject to $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad i = 1, \dots, m$ $x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$	Maximize $\sum_{j=1}^n c_j x_j$ Subject to $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad i = 1, \dots, m$ $x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$
Canonical Form	Minimize $\sum_{j=1}^n c_j x_j$ Subject to $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \quad i = 1, \dots, m$ $x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$	Maximize $\sum_{j=1}^n c_j x_j$ Subject to $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad i = 1, \dots, m$ $x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$

Figura 97 – Forme standard e canoniche (M.S. Bazaraa, J.J. Larvis, 2010)

Il problema di PL si dice in forma canonica quando i vincoli sono di disequaglianza e tutte le variabili sono non negative:

$$\begin{cases} \min \{c^T \cdot \bar{x}\} \\ A \cdot \bar{x} (\geq \text{or} \leq) \mathbf{0} \\ \bar{x} \geq 0 \end{cases}$$

E' possibile ricondurre la forma canonica alla forma standard introducendo la variabile

di scarto (*slack variable*) $s_i \geq 0$ in modo che risulti $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + s_i = b_i$ oppure

$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j - s_i = b_i$ se si prende in considerazione la generica equazione

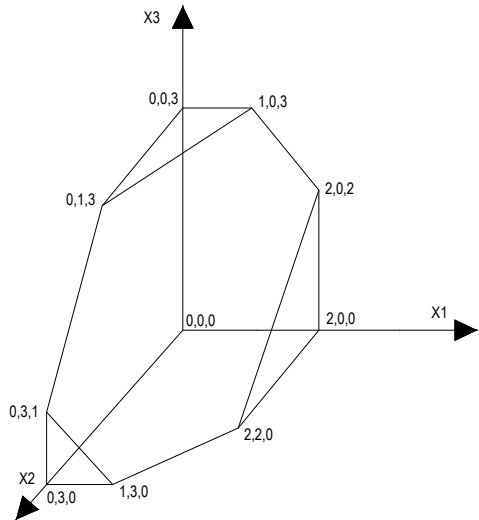
$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i$ oppure la $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i$.

Dal punto di vista geometrico una soluzione è un punto nello spazio a n dimensioni e la regione ammissibile è un poliedro convesso nello stesso spazio.

Dato un problema di PL, se il poliedro P delle soluzioni ammissibili è non vuoto e limitato, allora esiste almeno una soluzione ottima corrispondente con un vertice di P (vertice di P ottimo). Le soluzioni si trovano sulla frontiera del poliedro P.

A titolo di esempio si osserva la seguente figura che mostra la regione ammissibile come poliedro convesso in \mathcal{R}^3 . Se il poliedro P delle soluzioni ammissibili è non vuoto e limitato, allora esiste almeno una soluzione ottima corrispondente con un vertice di P (vertice di P ottimo).

Si definisce genericamente convesso l'insieme dei punti di \mathfrak{R}^n ottenuti come $x = \lambda \cdot x_a + (1 - \lambda) \cdot x_b$, con $x_a, x_b \in \mathfrak{R}^n$ al variare di $\lambda \in [0,1]$, ovvero è il segmento di estremi $[x_a, x_b]$.



$$\begin{cases} x_1 \leq 2 \\ x_2 \leq 3 \\ x_3 \leq 3 \\ x_1 + x_2 + x_3 \leq 4 \\ x_1, x_2, x_3 \geq 0 \end{cases}$$

Metodi di risoluzione

Si consideri il problema PL in forma standard:

$$\min \{z = c^T \cdot \bar{x}\} \Rightarrow \min \{c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + \dots + c_n \cdot x_n\}$$

$$A \cdot \bar{x} = \bar{b}$$

$$\bar{x} \in \mathfrak{R}^n$$

$$\bar{x} \geq 0$$

Dato che per ipotesi vale

$$m = \text{rango}(A), \quad m < n$$

si può individuare:

$$A = [B|N]$$

dove

$$B = \text{matrice non singolare } B \in \mathfrak{R}^{m \times m} \text{ (con } \det(B) \neq 0 \text{)}$$

$$N = \text{matrice } N \in \mathfrak{R}^{m \times (n-m)}$$

La matrice B , detta Matrice di Base (o Base) è composta da m colonne linearmente indipendenti di A , per cui esse rappresentano una base nello spazio vettoriale ad m dimensioni delle colonne di A .

Analogamente, per una scelta di B ed N , si può individuare:

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} \bar{x}_B \\ \bar{x}_N \end{bmatrix} \begin{matrix} m_componenti \\ n-m_componenti \end{matrix}$$

dove

\bar{x}_B = vettore delle variabili in Base $\bar{x}_B \in \mathfrak{R}^m$

\bar{x}_N = vettore delle variabili fuori Base $\bar{x}_N \in \mathfrak{R}^{n-m}$

Il sistema $A \cdot \bar{x} = \bar{b}$ può essere riscritto come segue:

$$\begin{bmatrix} B & N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}_B \\ \bar{x}_N \end{bmatrix} = \bar{b} \Rightarrow B \cdot \bar{x}_B + N \cdot \bar{x}_N = \bar{b}$$

da cui

$$\bar{x}_B = B^{-1} \cdot \bar{b} - B^{-1} \cdot N \cdot \bar{x}_N$$

Quindi una soluzione del sistema iniziale corrisponde a determinare il valore per m variabili \bar{x}_B dopo aver fissato arbitrariamente il valore delle restanti n-m variabili \bar{x}_N .

Per $\bar{x}_N = \mathbf{0}$ si ottiene

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} \bar{x}_B \\ \bar{x}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B^{-1} \cdot \bar{b} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

Tale soluzione è detta Soluzione di Base.

Se $\bar{x}_B = B^{-1} \cdot \bar{b} \geq \mathbf{0}$ la soluzione è detta Soluzione di Base Ammissibile.

Il massimo numero di basi possibili corrisponde al numero di possibili estrazioni di m colonne su n colonne di A, calcolabile tramite la seguente formula:

$$\binom{n}{m} = \frac{n!}{m!(n-m)!}$$

L'importanza delle Soluzioni di Base deriva dalla seguente proprietà (corrispondenza tra vertici e soluzioni di Base):

- dato un sistema di equazioni $A \cdot \bar{x} = \bar{b}$ e il corrispondente poliedro della regione ammissibile $P = \{x \in \mathfrak{R}^n : A \cdot \bar{x} = \bar{b}\}$, x è soluzione di base del sistema $A \cdot \bar{x} = \bar{b} \Leftrightarrow x$ è vertice di P.

In base a quanto appena affermato la ricerca delle soluzioni di un problema di PL si può effettuare esaminando solamente un numero finito di soluzioni che corrispondono alle Soluzioni di Base associate al poliedro dei vincoli.

In generale a ciascuna matrice di base corrisponde una sola Soluzione di Base (ammissibile); ad una Soluzione di Base (ammissibile) possono corrispondere più matrici di base (soluzioni degeneri, $\bar{x}_B = 0$).

Appendice.02

Analisi statistiche: richiami teorici

Analisi preliminare dei dati

Se si rilevano m variabili su n unità, in generale le osservazioni raccolte possono essere organizzate nella seguente matrice dei dati:

$$M = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{nm} \end{pmatrix} \quad M = \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{21} \\ \dots \\ x_{i1} \\ \dots \\ x_{n1} \end{pmatrix}$$

L' i -esima riga della matrice rappresenta le osservazioni raccolte sull' i -esima unità, mentre la j -esima colonna rappresenta le osservazioni relative a tutte le unità per la j -esima variabile. Se si rileva una sola variabile, ossia $n = 1$, la matrice degenera nel vettore colonna:

Le variabili osservate possono essere *quantitative* o *qualitative*. Le variabili sono dette *quantitative (numeriche)* quando assumono valori numerici. Si possono distinguere in:

- *continue*, se assumono valori continui in un intervallo, ovvero appartenenti all'insieme \mathfrak{R} ;
- *discrete*, se assumono valori finiti o numerabili.

Le variabili sono dette *qualitative (non numeriche)* quando assumono valori non numerici. Si possono distinguere in:

- *ordinali*, se i dati sono in un ordine;
- *categoriali*, se descrivono una caratteristica o un attributo dell'oggetto sottoposto alla misurazione.

Rappresentazione dei dati

- *Istogramma*. Grafico costituito da barre non distanziate, con basi in generale di dimensioni diverse, dove ogni barra (classe) possiede un'area proporzionale alla corrispondente frequenza o quantità; l'altezza del rettangolo corrispondente alla classe i -esima deve essere proporzionale al rapporto fra la frequenza della classe (assoluta o relativa) e la corrispondente ampiezza, ossia $h_i \propto \frac{f_i}{x_{i+1} - x_i}$ (per classi di ampiezza uniforme $h_i = f_i$);

- *Box plot*. E' una rappresentazione grafica utilizzata per descrivere la distribuzione di un campione tramite indici di dispersione e di posizione: si costruisce nel modo seguente:
 - si devono calcolare i tre quartili della distribuzione: Q_1 (primo quartile), $Q_2 = Me$ (secondo quartile che coincide con la mediana), Q_3 (terzo quartile);
 - su un asse orientato, si individua un rettangolo (scatola/box) i cui estremi sono costituiti rispettivamente dal primo e dal terzo quartile e la cui lunghezza è rappresentata dalla differenza interquartile $DI = Q_3 - Q_1$;
 - il rettangolo (box) viene suddiviso in due parti da un segmento che delimita la posizione della mediana;
 - si individuano i due valori $T_1 = \min$ (valore minimo $Q_1 - 1,5 \cdot DI$) e $T_2 = \max$ (valore massimo $Q_3 + 1,5 \cdot DI$);
 - si tracciano due linee esterne alla scatola (*whiskers*) delimitate rispettivamente da T_1 e T_2 calcolati in precedenza.

Le osservazioni il cui valore è più piccolo di T_1 o più grande di T_2 vengono considerate come dati anomali (*outlier*).

Teoria delle misure

Ogni grandezza fisica è rappresentata completamente da uno o più numeri (a seconda che si tratti di grandezza scalare o vettoriale) seguiti dall'unità di misura, cioè dal simbolo della grandezza ad essa omogenea che si è scelta convenzionalmente come grandezza campione.

Il numero che rappresenta la misura della grandezza fisica in questione può essere ottenuto attraverso due metodi distinti:

- metodo di misura diretta: si esegue direttamente il confronto, secondo un procedimento operativo che fa parte della definizione stessa della grandezza, tra la grandezza da misurare ed il campione, ovvero un'altra grandezza omogenea di misura nota;

- metodo di misura indiretta: si calcola il valore della grandezza attraverso una relazione analitica che ne dà l'espressione in funzione di altre grandezze a loro volta misurate direttamente.

Ogni misura implica un giudizio sull'eguaglianza tra la grandezza incognita e la grandezza campione. E' chiaro che tale giudizio non può essere assoluto, ma dipende dalle condizioni in cui la misura viene effettuata. In generale, si definisce sensibilità di uno strumento (o del procedimento sperimentale in cui viene usato) la minima differenza apprezzabile tra il valore della grandezza da misurare e quella campione. Effettuando una serie di misure, i risultati differiranno tra loro in quanto sono presenti errori di misura superiori alla sensibilità dello strumento.

Ogni misura x_s può essere dunque rappresentata dalla seguente espressione:

$x_s = x_i + \varepsilon_i$ dove x_s è il valore vero, x_i è il valore misurato e ε_i rappresenta l'incertezza della misura.

Gli errori possono essere suddivisi per tipologia in due categorie fondamentali:

- l'errore sistematico o determinato è definito come lo scostamento tra il valore ottenuto con una misurazione ed il valore reale della grandezza studiata ed è indice dell'accuratezza dei dati. È detto sistematico perché è costante al ripetersi della misura, e per questo non può essere eliminato con la ripetizione della misurazione. L'errore sistematico è in genere prodotto dall'utilizzo di uno strumento difettoso, alterato, non calibrato;
- l'errore casuale o statistico è qualsiasi errore di misurazione che può incidere con la stessa probabilità in aumento o in diminuzione sul valore misurato. Dalla definizione segue che una serie ripetuta di misurazioni comporta la progressiva riduzione dell'errore casuale, poiché i singoli scostamenti si annullano reciprocamente. Questo genere di errore è prodotto da fenomeni aleatori derivati da errori di lettura degli strumenti o fluttuazioni indotte da fenomeni esterni.

Statistica descrittiva

Si consideri una popolazione statistica costituita da N oggetti osservati, e ogni osservazione i-esima assuma valore x_i . Si definiscono parametri i numeri che permettono di descrivere le caratteristiche di tendenza e dispersione della distribuzione di tali valori.

Gli indici di posizione (indici di tendenza centrale) danno un'idea approssimata dell'ordine di grandezza dei valori esistenti. Sono indici di posizione la media, la mediana, il quartile, il quantile e la moda. Gli indici di dispersione (indici di variabilità) servono a descrivere sinteticamente una distribuzione statistica quantitativa, e in modo particolare la misura con la quale i suoi valori sono distanti da un valore centrale. Sono indici di dispersione il campo di variazione, la varianza, la deviazione standard, lo scarto interquartile.

- *Mediana.* Data una distribuzione di un carattere quantitativo ordinabile è definibile come il valore assunto dalle unità statistiche che si trovano nel mezzo della distribuzione: se il numero n di dati è dispari, la mediana corrisponde al valore numerico del dato centrale, quello che occupa la posizione $\frac{n+1}{2}$, mentre se il numero di dati è pari, la mediana è stimata utilizzando i due valori centrali che occupano le posizioni $\frac{n}{2}$ e $\frac{n}{2}+1$;
- *Quantile.* Dato un insieme di valori n , ordinati in modo non decrescente, si definisce quantile di ordine $p \in (0,1)$ un valore che lascia al di sopra una determinata percentuale $p\%$ e al di sotto una determinata percentuale $(1-p)\%$, di n valori dati;
- *Moda.* E' il numero di osservazioni che compare con maggiore frequenza;
- *Media della popolazione:* $\mu = \frac{1}{N} \sum_1^N x_i$
- *Varianza della popolazione:* $\sigma^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_1^N (x_i - \mu)^2$
- *Deviazione standard:* $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_1^N (x_i - \mu)^2}$

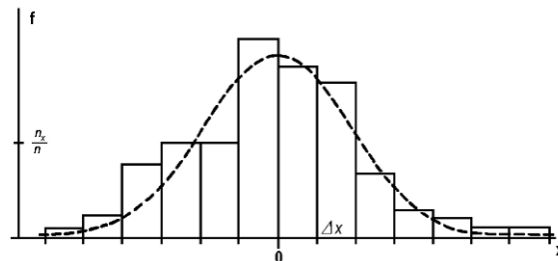
Distribuzione degli errori

Misurando ripetutamente una stessa grandezza fisica si ottengono in generale dei risultati che differiscono gli uni dagli altri in quanto per definizione, ogni misura è condizionata dalla presenza di errori.

Supponendo di considerare una popolazione di N misure, caratterizzate dal valore x_i , e ipotizzando che ogni x_i sia una variabile aleatoria (casuale) è possibile studiare la distribuzione di tali errori nel seguente modo:

- si distribuiscono gli errori sull'asse delle ascisse (x) e si divide l'intervallo totale in intervalli uguali di ampiezza Δx (suddivisione in classi);
- si calcola la frequenza relativa dell'errore definita come $f_i = \frac{n_i}{n}$ dove n_i rappresenta il numero delle misure errori ricadenti nell'intervallo Δx_i e n il numero totale delle misure;
- si rappresentano le frequenze f_i calcolate in precedenza sull'asse delle ordinate.

La distribuzione suddetta apparirà come quella indicata in figura.



L'area di ogni rettangolo è uguale alla frequenza relativa dell'errore nell'intervallo considerato.

La distribuzione è caratterizzata dalla seguente proprietà:

- $\sum_i f_i = \sum_i \frac{n_i}{n} = 1$
- se $\lim_{\Delta x \rightarrow 0}$ e $n \rightarrow \infty$ il diagramma degenera ad una curva chiamata curva di Gauss;
- l'equazione della curva di Gauss è $f = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2}$ dove μ è la media dei valori e σ la deviazione standard della popolazione analizzata, con $x \in [-\infty, +\infty]$;
- la funzione descritta dalla curva di Gauss gode della seguente proprietà:

$$A_{sottesa} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} dx = 1;$$

- la media e la deviazione standard della popolazione sono completamente rappresentative delle distribuzione, essendo questa simmetrica rispetto a μ e avendo i punti di flesso corrispondenti a σ ;
- la distribuzione percentuale delle misurazioni è funzione del valore di μ e di σ (come rappresentato in figura).

Appendice.03

IBM© ILOG Cplex

Il software si basa sul linguaggio di programmazione OPL (Optimization Programming Language), il quale consiste in una serie di istruzioni caratterizzate dalla seguente sintassi:

- ogni istruzione deve terminare con “;”;
- è possibile inserire commenti, i quali devono essere compresi tra “/*” e “*/”, oppure dopo “//” fino a fine linea;
- colori del testo: blu (parole chiave), verde (commenti), nero (altro testo);
- differenza tra carattere minuscolo e maiuscolo.

I nomi delle variabili (decisionali e non) devono cominciare sempre con un carattere alfabetico oppure _ (underscore), seguito da caratteri alfabetici o numerici oppure _ (underscore).

Tutte le variabili devono essere dichiarate con il loro tipo.

I tipi base per le variabili non decisionali sono:

- *int*, *float* e *string*

I tipi base per le variabili decisionali sono:

- *int*, *float*, *oolean*, *int+*, *float+*

Una variabile decisionale viene dichiarata tale con:

- *dvar*

La funzione obiettivo si dichiara nel seguente modo:

- massimizzare: *maximize*
- minimizzare: *minimize*

I vincoli devono essere dichiarati nel seguente modo:

- *subject to { };* oppure *constraints { };*

Ad un vincolo può essere assegnato anche un nome: *nome_vincolo: vincolo;*

I modelli possono essere semplice o complesso. Un modello è complesso quando i dati sono strutturati usando insiemi, range, array e tuple, assieme alle istruzioni *forall* e *sum*.

L'insieme è definito come una collezione di elementi non indicizzati e non duplicabili.

Se T è un tipo allora $\{T\}$ o in alternativa *setof(T)* denota un insieme di tipo T .

Un range è utilizzato per indicizzare un array, specificare il campo di valori (lower bound e upper bound) delle variabili decisionali, indicizzare i vincoli quando si usa l'istruzione *forall*.

La sintassi dell'istruzione range è *range nome_range = l..u;*

La sintassi dell'istruzione *range float* è *range float nome_range = l..u;*

L'istruzione *sum* effettua una sommatoria.

La sintassi è: *sum* (qualificatori) espressione;

L'istruzione *forall* consente di scrivere un gruppo di vincoli.

La sintassi è: *forall* (qualificatori) vincolo;

L'istruzione *assert* consente di verificare alcune assunzioni.

La sintassi è: *assert* espressione;

Una tupla accomuna dati fra di loro correlati. Ciascun dato della tupla corrisponde ad un campo. Dichiarando una tupla si definisce un nuovo tipo.

Tabella 50 – Riepilogo delle regole principali e della sintassi

Descrizione	Regole e sintassi
Istruzione	Ogni istruzione deve terminare con “;”
Inserimento commenti	è possibile inserire commenti, i quali devono essere compresi tra “/*” e “*/”, oppure dopo “//” fino a fine linea
Colori del testo	blu (parole chiave), verde (commenti), nero (altro testo)
Maiuscolo e minuscolo	Differiscono
Variabili	I nomi delle variabili (decisionali e non) devono cominciare sempre con un carattere alfabetico oppure underscore, seguito da caratteri alfabetici o numerici oppure underscore.
Variabili	Tutte le variabili devono essere dichiarate con il loro tipo.
Variabili non decisionali	Possono assumere il valore <i>int</i> , <i>float</i> e <i>string</i>
Variabili decisionali	Possono assumere il valore <i>int</i> , <i>float</i> , <i>boolean</i> , <i>int+</i> , <i>float+</i>
Dichiarazione della variabile	Una variabile decisionale viene dichiarata tale con questa istruzione <i>dvar</i> variabile
Funzione obiettivo	Massimizzare <i>maximize</i>
Funzione obiettivo	Minimizzare <i>minimize</i>
Vincoli	Dichiarazione dei vincoli <i>subject to</i> { } oppure <i>constraints</i> { }; ad un vincolo si può dare un nome: <i>nome_vincolo: vincolo</i> ;
Dichiarazione di un insieme	Esempio: <i>{tipo}</i> <i>setof{string}nomi = {antonio, marco, giovanni}</i>
Operazioni sugli insiemi	Esempi: <ul style="list-style-type: none"> <i>{int}s1 = {1,2,3};</i> <i>{int}s2 = {1,4,5};</i> <i>{int}s3 = s1 inter s2;</i> <i>{int}s4 = {1,4,8,10} inter s2;</i> <i>{int}s5 = s1 union {5,7,9};</i> <i>{int}s6 = s1 diff s2;</i> <i>{int}s7 = s1 symdiff {1,4,5};</i>
Range	<i>range nome_range = l..u</i>
Range float	<i>range float nome_range = l..u</i>
Array monodimensionali	Esempi: <ul style="list-style-type: none"> <i>int a[1..4] = [10,20,30,40];</i> <i>float f[1..4] = [1.2,2.3,3.4,4.5];</i> <i>string d[1..2] = ["Antonio", "Giovanni"];</i> <i>range R = 1..100; int A[R];</i>
Array multidimensionali	Esempio: <ul style="list-style-type: none"> <i>float cc[1..4][1..4] = [0,150,400,300],[150,0,250,200],[400,250,0,200],[300,200,200,0];</i>
Inizializzazione di array	Esempi: <ul style="list-style-type: none"> modalità ordinaria: <i>int a[1..2][1..3]=[10,20,30,[40,50,60]];</i> modalità coppia indice-valore: <i>/*.mod file*/</i>

Array generici
indicizzati

```
{string}giorni={lun,mar,mer,gio,ven,sab,dom};
int a[giorni]=...;
a=#[mar:2,lun:1,mer:3,gio:4,ven:5,sab:6,dom:7]#;
```

- modalità combinata:

```
/*.mod file*/
int a[1..2][1..3]=...;
/*.dat file*/
a=#[ 2:[40,50,60],1:[10,20,30]]#;
```

Esempi:

- $int\ a[i\ in\ 1..10]=i+1;$
- $int\ m[i\ in\ 0..10][j\ in\ 0..10]=10*i+j;$
- */*t=trasporta di m */*
 $int\ m[Dim1][Dim2]=000;$
 $int\ t[j\ in\ Dim2][i\ in\ Dim1]=m[i][j];$

Operazione sum
(sommatoria)

Esempio:

```
• int n=10;
range Range =0..n-1;
dvar int s[Range];
subject to
{
sum(i in Range) s[i]==n;
sum(i in Range) s[i]*i==n;
}
```

Operazione forall
(gruppo di vincoli)

Esempio:

```
• int n=8;
dvar int a[1..n][1..n];
subject to
{
forall(i in 1..8);
forall(j in 1..8:i<j)
a[i][j]>=0;
}
```

Operazione assert
(verifica assunzioni)
Tuple

assert espressione

Esempio:

```
• tuple Punto {
int x;
int y;
}
Punto p=<2,3>;
assert p.x==2;
Punto punto[1..3]=[<1,2>,<2,3>,<3,4>];
Punto punti={<1,2>,<2,3>};
tuple Rettangolo {
Punto ll;
Punto ur;
```

Inizializzazione di
tuple

Esempi:

- modalità ordinaria:

```
tuple rettangolo {  
int id;  
int x[1..2];  
int y[1..2];  
}  
rettangolo r=<1,[0,10],[0,10]>;
```

- modalità coppia campo-valore:

```
/*.mod file*/  
tuple point  
{  
int x  
int y;  
}  
point p1=...;  
point p2=...;  
/*.dat file*/  
p1=#<y:1,x:2>#;  
p2=<2,1>;
```

Elenco delle figure

Figura 1 – Schema della ricerca	10
Figura 2 - Classificazione dei calcari (Folks [1962])	19
Figura 3 - Carta geologica e sezione rappresentativa dell'area interessata dalle attività di cava	20
Figura 4 - Colonna stratigrafica delle giacimento di marmo di Orosei (Siotto, G., 2006).....	21
Figura 5 – Tipologie commerciali del marmo di Orosei	23
Figura 6 - Ingresso alla cava della ditta S.I.M.G. srl	26
Figura 7 - Inquadramento geografico generale dell'area studiata	27
Figura 8 - Simbologia impiegata nei diagrammi di flusso.....	42
Figura 9 - Esempio di diagramma di Gantt utilizzato per l'analisi delle fasi lavorative	43
Figura 10 – Organigramma di cava	43
Figura 11 – Organigramma di stabilimento.....	44
Figura 12 - Panoramica a 180° del piazzale di cava	44
Figura 13 - Funzioni di produzione individuate nella cava	45
Figura 14 - Gerarchia della produzione: platee, bancate, fette e blocchi	46
Figura 15 - Rappresentazione schematica del taglio verticale (a), taglio orizzontale (b)	47
Figura 16 - Taglio della bancata in fette (a), taglio delle fette in blocchi (b), riquadratura (c).....	48
Figura 17 - Schema di suddivisione in volumi elementari di produzione	48
Figura 18 - Taglio della fetta in blocchi: esempio di lavorazioni in parallelo	49
Figura 19 - Taglio della bancata in fette e taglio di una fetta in blocchi: esempio di lavorazioni in serie..	49
Figura 20 - Taglio di isolamento della bancata: taglio verticale tramite filo diamantato (a) e taglio orizzontale	49
Figura 21 - Catena elementare di lavorazione	50
Figura 22 - Catena di lavorazione ripetuta con disposizione in serie	51
Figura 23 - Catene di lavorazione distinte disposte in parallelo	51
Figura 24 - Catena di lavorazione ripetuta con disposizione in parallelo	52
Figura 25 – Diagramma di flusso della fase di taglio orizzontale della bancata.....	55
Figura 26 – Diagramma di flusso della fase di taglio verticale della bancata.....	55
Figura 27 – Diagramma di flusso delle fasi di preparazione del letto di caduto e	56
Figura 28 – Diagramma di flusso della fase di taglio verticale della fetta.....	58
Figura 29 – Diagramma di flusso delle fasi di preparazione del letto di caduta e	59
Figura 30 – Diagramma di flusso della fase di taglio verticale del blocco	61
Figura 31 – Ripresa aerea dello stabilimento	62
Figura 32 – Funzioni di produzione individuate in stabilimento	64
Figura 33 – Diagramma di flusso della fase di segagione dei blocchi regolari	68
Figura 34 – Diagramma di flusso della fase di segagione dei blocchi informi.....	71
Figura 35 – Diagramma di flusso della fase di retinatura, resinatura e lucidatura.....	77
Figura 36 – La segatrice a catena durante il taglio su terna (a) e su binario fisso (b).....	78
Figura 37 – La segatrice a catena durante le fasi iniziali del taglio	78
Figura 38 – Principio di asportazione del truciolo.....	79
Figura 39 – Rappresentazione geometrica degli angoli caratteristici	79

Figura 40 – Sezione trasversale di taglio risultante dall'azione in successione degli inserti	80
Figura 41 – Inserti in widia (a) e loro disposizione sulla catena (b).....	80
Figura 42 – Schema della segatrice a catena	81
Figura 43 – Configurazione di taglio al piede della bancata	84
Figura 44 – Configurazione di taglio superiore.....	84
Figura 45 – (a) Operazione di taglio verticale; (b) particolare della puleggia di rinvio	85
Figura 46 – Filo diamantato per marmo (Testa M., 2002)	85
Figura 47 – Schema guida della perforatrice (a funzionamento idraulico o elettrico).....	87
Figura 48 – Immagine e schema della macchina taglia blocchi a filo diamantato	89
Figura 49 – Escavatore impegnato in operazioni di carico (a) e spostamento dei blocchi (b).....	90
Figura 50 – Pala gommata impegnata nella movimentazione dei blocchi (a) e nello sgombero sfridi (b).....	91
Figura 51 – Dumper in fase di trasporto (a) e autocarro in fase di preparazione del letto di caduta (b).....	92
Figura 52 – Compressore e tubazione di collegamento alle utenze	93
Figura 53 - Distribuzione dei blocchi regolari estratti elaborata per classi di volume.....	101
Figura 54 - Distribuzione dei blocchi informi estratti elaborata per classi di volume	101
Figura 55 – grafici mostranti le percentuali di semilavorato ottenuto in base alle due tipologie prodotte (a) e la perdita di materiale subita durante la lavorazione (b).....	103
Figura 56 – grafici mostranti le produzioni di semilavorato in percentuale rispetto ai tre telai multilama distinte per tipologia a spessore pari a 2 cm (a) e a 3 cm (b).....	103
Figura 57 – Produzione di piastrelle: ripartizione percentuale per tipologia di spessore espressa in superficie prodotta.....	105
Figura 58 – Produzione di piastrelle: ripartizione percentuale per tipologia di spessore espressa in numero di pezzi prodotti.....	105
Figura 59 – Diagramma di Gantt relativo al taglio orizzontale di isolamento della bancata	107
Figura 60 – Diagramma di Gantt relativo al taglio verticale di isolamento della bancata	108
Figura 61 – Diagramma di Gantt relativo al ribaltamento della bancata	109
Figura 62 – Diagramma di Gantt relativo al taglio della bancata in fette (ciclo relativo ad 1 fetta).....	109
Figura 63 – Diagramma di Gantt relativo al ribaltamento della fetta (ciclo relativo ad 1 fetta)	109
Figura 64 – Diagramma di Gantt relativo al taglio della fetta in blocchi (ciclo relativo ad 1 blocco).....	110
Figura 65 – Schema impianto di trattamento e riciclo acque (Marras G., 2007).....	119
Figura 66 – Diagramma di flusso del processo di chiarificazione delle acque.....	119
Figura 67 – diagramma di flusso risoluzione problema matematico	121
Figura 68 – Esempio di diagramma reticolare in cui i nodi rappresentano fasi di lavoro con i rispettivi tempi di esecuzione e gli archi le connessioni direzionali delle fasi stesse	133
Figura 69 – Collegamento di nodi in contrasto con la regola 4.....	133
Figura 70 – Risoluzione del contrasto con la regola 4 tramite l'utilizzo di un arco fittizio (X).....	134
Figura 71 – Esempio di diagramma reticolare: i numeri tra parentesi rappresentano.....	134
Figura 72 – Rappresentazione alternativa di diagramma reticolare	134
Figura 73 – Coppia di nodi legati da un arco attraverso il quale passa un flusso	143
Figura 74 – Esempio di rete di flusso	143
Figura 75 – Esempio di rete di flusso con taglio <i>Hs</i>	145

Figura 76 – Corrispondenza degli archi tra il grafo e il residuo	147
Figura 77 – Interpretazione grafica del flusso nel grafo residuo	147
Figura 78 – Rete di flusso multi sorgente e multi pozzo	150
Figura 79 – Schematizzazione del processo da cui sono stati elaborati i diagrammi reticolari	158
Figura 80 – Grafo dei task A: segagione dei blocchi regolari	159
Figura 81 – Grafo dei task B: Retinatura, resinatura e lucidatura delle lastre	159
Figura 82 – Grafo dei task C: Segagione dei blocchi informi e produzione delle pianelle	159
Figura 83 – Grafo completo della produzione delle lastre: $(A \cup B)$	160
Figura 84 – Ciclo produttivo completo dello stabilimento: $(A \cup B) \cup C$	160
Figura 85 – Rete di flusso dello stabilimento	165
Figura 86 Percorso critico: ciclo completo $(A \cup B)$ – produzione delle lastre	171
Figura 87 Percorso critico: ciclo completo C – produzione delle pianelle	173
Figura 88 Percorso critico: ciclo completo stabilimento	176
Figura 89 - Rete di flusso con indicazione delle variabili per ogni ramo	178
Figura 90 - Rete di flusso con la comparazione tra i flussi ottimali e le capacità massime	180
Figura 91 – Grafo dei task A: tre linee di taglio operanti in parallelo su tre bancate	182
Figura 92 – Grafo dei task B: due linee di taglio operanti su tre bancate	182
Figura 93 – Grafo dei task C: una linea di taglio operante su tre bancate	182
Figura 86 Percorso critico: ciclo grafo A	187
Figura 86 Percorso critico: grafo B	189
Figura 86 Percorso critico: grafo C	191
Figura 94 – Forme standard e canoniche (M.S. Bazaraa, J.J. Larvis, 2010).....	198

Elenco delle tabelle

Tabella 1 - Caratteristiche tecnologiche e geomeccaniche	23
Tabella 2 - Confronto tra proprietà fisico-meccaniche del marmo di Orosei e dei principali marmi Apuani	24
Tabella 3 - Matrice della tecnica riassuntiva di tutti i parametri di calcolo	39
Tabella 4 - Configurazione tipica operativa della lucidatrice	76
Tabella 5 – Caratteristiche tecniche della tagliatrice a catena usata in cava su binario fisso	81
Tabella 6 - Parti funzionali e fattori produttivi della tagliatrice a catena su binario fisso	82
Tabella 7 – Caratteristiche tecniche della tagliatrice a catena usata in cava su terna	82
Tabella 8 – Parti funzionali e fattori produttivi della tagliatrice a catena su terna	83
Tabella 9 – Caratteristiche tecniche della macchina a filo diamantato	86
Tabella 10 – Parti funzionali e fattori produttivi della macchina a filo diamantato	86
Tabella 11 – Caratteristiche tecniche della perforatrice e del mini trasportatore	88
Tabella 12 – Parti funzionali e fattori produttivi della perforatrice e del mini trasportatore	88
Tabella 13 – Caratteristiche tecniche della perforatrice elettrica	88
Tabella 14 – Caratteristiche tecniche della taglia blocchi a filo diamantato	89
Tabella 15 – Parti funzionali e fattori produttivi della macchina a filo diamantato	89
Tabella 16 – Caratteristiche tecniche degli escavatori	90
Tabella 17 – Parti funzionali e fattori produttivi degli escavatori	90
Tabella 18 – Caratteristiche tecniche della pala meccanica	91
Tabella 19 – Parti funzionali e fattori produttivi della pala meccanica	91
Tabella 20 – Caratteristiche tecniche del dumper/autocarro	92
Tabella 21 – Parti funzionali e fattori produttivi del dumper/autocarro	92
Tabella 22 – Caratteristiche tecniche del compressore	93
Tabella 23 – Parti funzionali e fattori produttivo del compressore	93
Tabella 24 – Distribuzione in classe di volume e peso dei blocchi regolari e informi	102
Tabella 25 - Produzioni specifiche riferite ai telai multilama	104
Tabella 26 – Dati di produzione relativi al pentamestre giugno – novembre	104
Tabella 27 – Dati di produzione relativi al pentamestre dicembre – gennaio	104
Tabella 28 – Dati relativi al diagramma della figura superiore	107
Tabella 29 – Dati relativi al diagramma della figura superiore	108
Tabella 30 – Superfici di lavoro delle aree di magazzino	111
Tabella 31 – Capacità massime delle aree di magazzino	111
Tabella 32 – Quadro sinottico con i parametri ambientali significativi delle tipiche attività di cava presi in considerazione e atti a subire processi di ottimizzazione numerica	113
Tabella 33 – Costruzione del Duale di un problema in forma standard	139
Tabella 34 – Corrispondenza tra problema Primale e Duale	139
Tabella 35 – Quadro riepilogativo dei problemi affrontati e dei relativi metodi di risoluzione	152
Tabella 36 – Significato della simbologia impiegata nel grafo ($A \cup B$)	161
Tabella 37 - Durata delle fasi lavorative nel grafo ($A \cup B$)	161
Tabella 36 – Significato della simbologia impiegata nel grafo C	162

Tabella 37 - Durata delle fasi lavorative nel grafo C.....	162
Tabella 36 – Significato della simbologia impiegata nel grafo $(A \cup B) \cup C$	163
Tabella 37 - Durata delle fasi lavorative nel grafo $(A \cup B) \cup C$	164
Tabella 38 – Significato della simbologia impiegata nella rete di flusso dello stabilimento.....	166
Tabella 39 – Capacità produttive massime dei rami della rete di flusso.....	167
Tabella 36 – Significato della simbologia impiegata nel grafo A.....	183
Tabella 37 - Durata delle fasi lavorative nel grafo A.....	183
Tabella 36 – Significato della simbologia impiegata nel grafo B.....	184
Tabella 37 - Durata delle fasi lavorative nel grafo B.....	184
Tabella 36 – Significato della simbologia impiegata nel grafo C.....	185
Tabella 37 - Durata delle fasi lavorative nel grafo C.....	185
Tabella 40 – Riepilogo delle regole principali e della sintassi.....	210

Bibliografia

1. Alma M., “Criteri di ottimizzazione tecnico economica nell'estrazione di blocchi da telaio”, Tesi di Laurea, Università di Bologna Dipartimento D.I.C.M.A.
2. Anke E.M.B., Skogestad S., Strand S., 2007, “Throughput maximization by improved bottleneck control”
3. Bortolussi A., Giuliani S., Siotto G., 1986, “Processo di produzione in uno stabilimento industriale per la segagione dei marmi. Analisi tecnico – economica dei metodi di lavorazione in atto, loro critica e proposte innovative”, Atti Convegno, 141-156
4. Bortolussi A., Giuliani S., Siotto G., 1990, “Un modello per l'esame tecnico – economico di un processo di valorizzazione di blocchi irregolari di calcare ornamentale”, L'industria Mineraria no 4, 1-15
5. Brahma K. C., December 2007, “A study on application of strategic planning models and Operations research techniques in open cast mining”, PhD thesis, National Institute of Technology of Rourkela
6. Cantamessa M., Cobos E., Rafele C., 2007, “Il project management. Un approccio sistemico alla gestione dei progetti”, Edizioni Isedi, ISBN: 9788880083290
7. Careddu N. Siotto G., “Promoting ecological sustainable planning for natural stone quarrying. The case of the Orosei Marble Producing Area in Eastern Sardinia”
8. Comincioli V., 2005, “Problemi e Modelli Matematici nelle le Scienze Applicate”, Edizioni Apogeo, ISBN: 9788850310302
9. Crivellari M., 2013, “Algoritmi euristici per la risoluzione di problemi di graph coloring”, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova, Facoltà di Ingegneria Informatica.
10. Cucchiara S., “Analisi economica dell'attività di cava e tecnica di commercializzazione – Economic analysis of quarryng and marketing techniques”
11. Gabba M., 2011, “Programmazione Lineare: confronto tra metodi esistenti e un metodo innovativo”, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Facoltà di Ingegneria dei Processi Industriali
12. Gazi A., Skevis G., Founti M.A., 2012, “Energy efficiency and environmental assessment of a typical marble quarry and processing plant”, Journal of cleaner production, Vol. 32, 10-21
13. Giuliani S., “Appunti di Economia e Organizzazione Aziendale”, ACA Cagliari, Vol

- no 1, Chap. VI, XI e XII
14. Giuliani S., 1985, “Progettazione e gestione di attività minerarie mediante impostazione sistemica e in riferimento alla teoria del governo dei processi”, Atti Facoltà Ingegneria Università di Cagliari, anno XIII, no 1
 15. Giuliani S., Siotto G., Tilocca M. C., “Esame tecnico – economico di un processo di segazione di blocchi regolari di calcare ornamentale mediante telaio multilame”, 363-380
 16. IBM, 2010, “IBM ILOG AMPL Version 12.2, User’s Guide”.
 17. IBM, 2009, “IBM ILOG OPL Version 6.3, IBM ILOG OPL Language User’s Manual”.
 18. Karaca Z., Onargan T., 2007, “The Application of Critical Path Method (CPM) in Workflow Schema of Marble Processing Plants”, Material and Manufacturing Processes, 22:1, 37-44, DOI 10.1080/10426910601015865
 19. Manerba D., 2013, Appunti del “Corso di Algoritmi di Ottimizzazione”, Università degli Studi di Brescia.
 20. Mankiw N. G., Taylor M. P., 2012, “L’essenziale di Economia”, Edizioni Zanichelli, ISBN: 8808294862
 21. Marras G., 2010, “Recovery and valuation of ultrafine marble dust contained in waste slurries deriving from carbonatic natural stones processing plants” PhD Tesis, Università degli Studi di Cagliari
 22. Mokhtar S. Bazaraa, J. J. Jarvis, H. D. Sherali , 2010, “Linear Programming and Network Flows”, Wiley
 23. Navidi W., 2006, “Probabilità e statistica per l’ingegneria e le scienze”, Edizioni McGraw Hill, ISBN: 8838663343
 24. Newman A.M. , Rubio E., Caro R., Weintraub A., Eurek K., May-June 2010, “A review of Operations Research in Mine Planning”, Vol. 40, no. 3, 222-245
 25. Osservatorio Economico della Sardegna, 2007, “Le industrie estrattive in Sardegna – Analisi economica e strutturale”
 26. Ozfirat P.M., 2012, “An integer programming approach for the three dimensional cutting planning problem of marbe processing industry”, International Journal od Advanced Manufactured and Technologies, Vol. 59, 1057-1064, DOI: 10.1007/s00170-011-3574-1
 27. Pareschi A., 2007, “Impianti industriali”, Edizioni Soc. Editrice Esculapio, ISBN: 9788874882342

28. Pinzari M., 2002, "Pianificazione e dimensionamento delle cave", Convegno Nazionale Pianificazione dell'Attività di Cava, Napoli.
29. Pizzadili A., 2012, "La progettazione integrata per il recupero ed il trattamento degli scarti di cava del polo estrattivo di Buddusò. Un sistema di supporto decisionale (DSS) basato su un modello matematico di ottimizzazione", Tesi di Laurea, Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura.
30. Polonio V., 2012, "Una formulazione MIP per Roade/Euro 2011-2012 (Machine Reassignment)", Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova, Facoltà di Ingegneria Informatica.
31. Primavori P., "I materiali lapidei in Sardegna", Edizioni Sardegna Ricerche
32. Primavori P., 2004, "Il Primavori. Lessico del settore lapideo. Stone sector lexicon", Edizioni Giorgio Tusi Editore, ISBN: 88-900067-9-X
33. Primavori P., 2006, "Il manuale della tagliatrice a catena", Edizioni Fantini Sud S.p.A
34. Ramazan S., Dimitrakopoulos R., 2004, "Recent applications of operations research and efficient MIP formulations in open pit mining", Society for mining, metallurgy and exploration, Vol. 316.
35. Rodriguez G., Seatzu S., 2010, "Introduzione alla Matematica Applicata e Computazionale", Pitagora Editrice, Bologna, ISBN: 88-371-1817-1
36. Siotto G., "Guida ai Marmi e Graniti di Orosei", Mediterranea progetti e Finanza s.r.l.
37. Siotto G., 2005, "Piano Generale di Recupero Ambientale del Comparto Lapideo di Monte Tuttavista in Comune di Orosei"
38. Tadei R., Della Croce F., 2013, "Elementi di Ricerca Operativa", Soc. Ed. Esculapio, Bologna, ISBN: 978-88-7488-385-1
39. Testa M., 2002, "Taglio del granito con il filo diamantato", Tesi di Laurea, Università di Cagliari, Dipartimento di Geoingegneria e Tecnologie Ambientali
40. UNI EN ISO 10628, september 2003, "Diagrammi di flusso per impianti di processo: regole generali"
41. Valuev A.M, 2014, "Models and methods of multi objective optimization in problems of quarry design and planning", Wseas transactions on mathematics, Vol. 13, ISSN: 2224-2880
42. Wilke F. L., 1987, "Recent Methodological Trends in Operations Research and

Computing as Applied to Mining Problems", Johannesburg, APCOM 87, Twentieth International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries. Vol. no 1, 109-113

43. Zuddas P., 2004, "Ricerca Operativa", Appunti del Corso

Ringraziamenti

Ringrazio per la disponibilità i miei tutori Ing. Nicola Careddu, Ing. Caterina Tilocca e in particolar modo la Professoressa Paola Zuddas e il suo staff di ricercatori (Massimo di Francesco, Simone Zanda e Luca Meloni) per l'aiuto datomi.

Grazie al sig. Gianni Bonfigli e alla sig.ra Anna Scancella, per aver reso possibile questo lavoro ospitandomi presso la loro splendida azienda, e al prof. Giampaolo Siotto che me li ha presentati.

Grazie all'amico Giampaolo e all'amico Andrea per i consigli e il continuo sostegno manifestato fino all'ultimo.

Grazie a Carla, mia sorella, sempre presente anche nei momenti di maggiore difficoltà e a tutta la mia famiglia, in senso stretto e allargata.

Dedico questo lavoro con tutto il cuore a Raffaella e al mio piccolo splendido Lorenzo, la mia famiglia e la mia vita.