

Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

D.I.I.A.R. – Infrastrutture Viarie

Anno Accademico 2010/11



Tesi di Laurea

**SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE DEI TRATTAMENTI DI STABILIZZAZIONE  
IN SITO DEI TERRENI IN AMBITO AEROPORTUALE**

Relatore: Prof. M. Crispino

Correlatore: Ing. F. Giustozzi

Candidato:

Marco Proverbio

Matr. 745058

# **INDICE**

<b>1 – Introduzione</b>	<b>5</b>
1.1 Normativa in ambito aeroportuale: aspetti ambientali	7
1.2 Riutilizzo e valorizzazione dei materiali presenti in sito	12
1.3 Life Cycle Impact Assessment (LCIA)	16
1.4 “Green airports”	23
<b>2 – La stabilizzazione del terreno in sito con cemento e/o calce</b>	<b>32</b>
2.1 Il consolidamento dei terreni in sito	34
2.1.1 Caratterizzazione del terreno	38
2.1.2 I leganti idraulici	42
2.1.3 La compattazione del terreno	49
2.2 Le fasi esecutive e la tempistica	57
2.3 Le prestazioni meccaniche attese	60
<b>3 – Adeguamento delle STRIP aeroportuali</b>	<b>64</b>
3.1 Linee guida per adeguamento STRIP	66
3.2 Metodologie innovative: il caso studio di Malpensa	71
3.2.1 Descrizione del progetto esecutivo dell'intervento	73
3.2.2 Il cronoprogramma	80
3.2.3 La tecnica esecutiva	83
3.2.4 I macchinari impiegati	88
3.2.5 I costi	93
3.3 Metodologie tradizionali	94
<b>4 – Analisi ambientale ed energetica</b>	<b>104</b>
4.1 L'inquinamento prodotto dalle manutenzioni in ambito aeroportuale	105
4.2 Carbon footprints	108
4.3 Embodied energies	111
4.4 Metodologia di calcolo delle emissioni relative alle fasi di esecuzione	113
4.5 Metodologia di calcolo delle energie relative alle fasi di esecuzione	119
4.6 Analisi dei risultati	121
4.7 Confronto con metodologie tradizionali	123
<b>5 – Conclusioni</b>	<b>131</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>134</b>
<b>APPENDICE A – Tabelle riassuntive e grafici</b>	<b>136</b>

## **INDICE FIGURE E TABELLE**

Fig. 1.1 – PDCA Cycle .....	9
Fig. 1.2 – Ciclo di vita di un prodotto (Rebitzer et al.,2000) .....	16
Fig. 1.3 – Tipologia di impatto delle fasi del ciclo di vita di un prodotto (Rebitzer, 2002) .....	17
Fig. 1.4 – Fasi applicative della LCA (ISO 14040) .....	18
Fig.1.5 – Elementi delle LCIA (ISO 14042).....	19
Fig. 1.6 – Schema delle relazioni secondo il metodo giapponese LIME .....	21
Fig. 1.7 – Hong Kong International Airport .....	23
Fig. 1.8 – Riduzioni delle emissioni di CO2 di HKIA .....	25
Fig. 1.9 – Rifiuti riciclati da HKIA .....	25
Fig. 1.10 – Centrair Airport.....	26
Fig. 1.11 – Principali impatti ambientali causati dall’attività del Centrair .....	27
Fig. 1.12 - valori di WECPNL del Centrair .....	28
Fig. 1.13 – Terminal passeggeri NDIA .....	29
Fig. 1.14 – Schema di analisi delle problematiche ambientali di un aeroporto (GAI) .....	31
Fig. 2.1 – Stabilizzazione con leganti idraulici e polimeri idrosolubili .....	35
Fig. 2.2 – Il Light Tamping.....	36
Fig. 2.3 – La stabilizzazione di massa.....	37
Fig. 2.4 – Classificazione delle terre HBR-AASHTO (UNI 10006) .....	39
Fig. 2.5 – Diagrammi per la determinazione dell’indice di gruppo (CNR -UNI) .....	41
Fig. 2.6 – Effetto immediato: diminuzione indice plastico .....	44
Fig. 2.7 – Effetto immediato: appiattimento curva Proctor e innalzamento optimum d’acqua .....	45
Fig. 2.8 – Resistenza a compressione di terreni trattati a calce.....	45
Tab. 2.1 – Aumento di volume dopo lo scavo.....	49
Fig. 2.9 – Diagramma prova di compattazione .....	50
Fig. 2.10 – Curve ( $w, \gamma_d$ ) al variare dell’energia di costipamento.....	51
Fig. 2.11 – Rullo gommato .....	53
Fig. 2.12 – Rullo a punte .....	53
Fig. 2.13 – Schema delle masse ruotanti .....	54
Fig. 2.14 – Forze presenti tra granuli a contatto .....	54
Fig. 2.15 – Rullo monotamburo dinamico 15t.....	55
Tab. 2.2 – Metodi per la valutazione della portanza .....	61
Tab. 2.3 – Classi di portanza sottofondo (CNR) .....	62
Tab. 2.4 – Portanza finale di progetto del caso di studio. ....	63
Fig. 3.1 – Clear and Graded Area .....	65
Fig. 3.2 – Iveco-Magirus Super Dragon X8 .....	68
Fig. 3.3 – Carrello anteriore Airbus A380 .....	69
Fig. 3.4 – Aeroporto di Milano Malpensa.....	71
Tab. 3.1 – Requisiti di portanza per la CGA e la restante parte di strip .....	77
Tab. 3.2 - Requisiti di regolarità per la CGA e la restante parte di strip .....	78
Tab. 3.3 – Descrizione intervento per aree di strip extra CGA.....	79
Fig. 3.5 – Cronoprogramma metodologia innovativa .....	81
Fig. 3.6 – Schema aree d’intervento.....	84
Fig. 3.7 – Pulvimixer Wirtgen .....	88
Fig. 3.8 – Dozer Caterpillar .....	89

Fig. 3.9 – Benna non dentata per escavatore.....	90
Fig. 3.10 – Spandilegante Streumaster .....	91
Fig. 3.11 – Grader Caterpillar.....	92
Fig. 3.12 – Bilico per movimentazione mezzi cingolati .....	92
Fig. 3.13 - Idrosemina .....	92
Tab. 3.4 – Incidenza attività su importo lavori .....	93
Fig. 3.14 – Cronoprogramma metodologia tradizionale.....	96
Fig. 3.15 – Escavatore cingolato New Holland.....	98
Fig. 3.16 – Trakker Iveco .....	99
Fig. 3.17 – Pala gommata Caterpillar .....	99
Fig. 3.18 – Schema percorsi aree di stoccaggio.....	101
Tab. 3.5 – Confronto costi materie prime .....	103
Fig. 4.1 – Fattori moltiplicativi per i gas serra (DEFRA).....	109
Tab. 4.1 – Fattori moltiplicativi in diversi orizzonti temporali (IPCC) .....	110
Tab. 4.2 – Valori di energia per materiale (ICE) .....	112
Tab. 4.3 – Tipologia e numero di mezzi impiegati .....	113
Tab. 4.4 – Tempo d’impiego di ogni macchinario .....	114
Fig. 4.2 – Pulvimixer WR 2500 S (Wirtgen).....	114
Fig. 4.3 – Caratteristica meccanica: TCD 2015 V8 (Deutz) .....	115
Fig. 4.4 – Scheda tecnica motore: TCD 2012 L04-L06 (Deutz) .....	116
Tab. 4.5 – Embodied energy: cemento .....	119
Tab. 4.6 – Embodied energy: trasporto.....	119
Tab. 4.7 – Embodied energy: misto granulare.....	120
Tab. 4.8 – Risultati analisi ambientale.....	121
Tab. 4.9 – Risultati analisi energetica.....	121
Tab. 4.10 – Metodologia tradizionale: tipologia e numero di mezzi impiegati .....	123
Tab. 4.11 – Metodologia tradizionale: risultati analisi ambientale .....	124
Tab. 4.12 – Metodologia tradizionale: risultati analisi energetica.....	125
Tab. 4.13 – Confronto ambientale tra le metodologie realizzative .....	126
Fig. 4.5 – Metodologia tradizionale: incidenza delle fasi sulle emissioni totali .....	126
Fig. 4.6 – Metodologia innovativa: incidenza delle fasi sulle emissioni totali.....	127
Tab. 4.14 – Confronto energetico tra le metodologie realizzative .....	127
Tab. 4.15 – Confronto incidenza trasporto tra le metodologie realizzative.....	128
Fig. 4.7 – Sensibilità del trasporto materiali sulle emissioni totali .....	129
Fig. 4.8 – Sensibilità del trasporto materiali sull’energia totale .....	129
Tab. A.1 – Dati relativi all’aeroporto di Malpensa .....	136
Tab. A.2 – Dati relativi alle lavorazioni con metodologia innovativa.....	137
Tab. A.3 – Dati relativi alle lavorazioni con metodologia tradizionale.....	138
Tab. A.4 – Metodologia innovativa: calcoli analisi ambientale .....	139
Tab. A.5 – Metodologia tradizionale: calcoli analisi ambientale.....	140
Fig. A.1 – Incidenza dei macchinari sulle emissioni totali in entrambe le metodologie.....	141
Fig. A.2 – Incidenza del trasporto sull’energia totale in entrambe le metodologie.....	142
Tab. A.6 – Analisi di sensibilità del trasporto degli inerti sull’energia totale .....	142
Fig. A.3 – Incidenza della distanza di trasporto sull’energia totale.....	143
Tab. A.7 – Analisi di sensibilità del trasporto degli inerti sulle emissioni totali.....	143

# 1 Introduzione

La tematica della sostenibilità ambientale è un argomento quanto mai d'attualità. Sempre più diffusa è la convinzione che la pratica realizzativa non possa soffermarsi all'analisi dei tempi e dei costi che conducono un processo produttivo a generare un bene, ma che sia necessario domandarsi quali conseguenze abbia la produzione di quel bene, opera, lavorazione o servizio sull'ambiente che ci circonda.

Attualmente la forma di trasporto maggiormente in evoluzione è rappresentata dal trasporto aereo. Moltissimi enti, governativi e non, studiano metodiche che rendano la produzione e la gestione di questo servizio, senza alcun dubbio indispensabile, maggiormente sostenibile.

Uno degli aspetti maggiormente dibattuti riguarda il progetto, l'organizzazione, la costruzione e la gestione degli scali aeroportuali nel mondo. La possibilità infatti di raggiungere, in tempi molto ridotti, quasi ogni località presente sul Pianeta, ha portato la creazione di numerosi nuovi aeroporti.

Quella della sostenibilità aeroportuale è una tematica molto ampia, che abbraccia numerosi ambiti, e che non arriva a compimento con la realizzazione dell'infrastruttura. La fase di esercizio e gestione dello scalo risultano infatti altrettanto impattanti a livello ambientale della costruzione dell'infrastruttura stessa. Normalmente quando si parla di gestione sostenibile di un aeroporto si pensa al rumore prodotto dai velivoli, all'inquinamento dovuto al passaggio frenetico di mezzi, merci e persone nello scalo, all'energia consumata da una struttura funzionante 24 ore su 24. Questi aspetti risultano certamente importanti se si intende puntare ad una maggiore sostenibilità del trasporto aereo, tuttavia non risultano essere gli unici.

Un aeroporto oltre che essere funzionale alle esigenze del trasporto deve innanzitutto risultare sicuro per la circolazione e la movimentazione dei velivoli. Esistono standard internazionali molto specifici e restrittivi sulle caratteristiche che deve garantire la parte dell'aeroporto destinata al decollo, atterraggio e movimentazione a terra degli aerei, chiamata normalmente *air side*. Per far sì che tali standard vengano rispettati non è sufficiente un progetto ed una realizzazione ottimale dell'infrastruttura, ma un ruolo

fondamentale è giocato dalla manutenzione costante che l'ente gestore di uno scalo deve eseguire, al fine di garantire sicurezza, efficienza ed operatività dell'aeroporto.

Nello specifico questo elaborato riguarderà la manutenzione dell'area circostante la pista di volo, chiamata STRIP.

La finalità di questo studio non è tanto rivolta alla definizione di una tecnica che consenta di eseguire una manutenzione tale da rispettare le prescrizioni normative in termini prestazionali, ma quella di evidenziare come, diverse metodologie manutentive, abbiano una diversa sostenibilità ambientale.

Si procederà pertanto alla definizione degli standard prestazionali relativi alle strip aeroportuali. Si chiariranno i fattori determinanti per ottenere tali prestazioni e le metodologie realizzative degli interventi manutentivi. Nello specifico sarà analizzata la sostenibilità ambientale delle fasi di lavorazione e di cantierizzazione. Infine saranno presentati i risultati delle analisi svolte definendo l'incidenza dei parametri considerati sull'impatto complessivo delle lavorazioni.

## 1.1 Normativa in ambito aeroportuale: aspetti ambientali

Il trasporto aereo opera all'interno del sistema internazionale dell'aviazione civile in cui interagiscono soggetti di diritto pubblico, operatori, imprese e normative complesse che caratterizzano l'interno scenario.

L'ICAO (International Civil Aviation Organization), agenzia dell'ONU, è un'istituzione internazionale specializzata a carattere permanente, di cui possono far parte anche Stati che non sono membri dell'ONU. Questa unione internazionale di Stati, dotata di propria personalità giuridica, ha come scopo istituzionale quello di: "elaborare i principi e la tecnica della navigazione aerea internazionale e promuovere la pianificazione e lo sviluppo dei trasporti aerei internazionali". In sostanza l'ICAO stabilisce diritti e doveri degli stati contraenti, stabilisce la sovranità di uno Stato sul suo spazio aereo e prescrive le norme di regolamentazione della navigazione aerea in tutti i suoi aspetti.

Nello svolgere le sue funzioni l'ICAO ha emanato 18 "annessi"; il n°14, "Aerodromes", riguarda l'esercizio e la progettazione degli aeroporti e degli eliporti. Sostanzialmente esso rappresenta, unitamente agli *standard* e alle *raccomandazioni*, emanate sempre dall'ICAO, la normativa internazionale vigente in materia aeroportuale.

Dal punto di vista prettamente ambientale, il primo passo compiuto dall'ICAO, fu la costituzione, nel 1970, della CAN (Committee on Aircraft Noise), e nel 1977 della CAEE (Committee on Aircraft Engine Emission); queste due commissioni particolari si occupavano in maniera specifica dello studio rispettivamente di: rumore ed emissioni prodotte dai velivoli. Nel 1983 venne creata la CAEP (Committee on Aviation Environmental Protection), una commissione che superava il carattere molto specialistico delle precedenti, ed affrontava il tema della sostenibilità ambientale del trasporto aereo in tutti i suoi aspetti. Con il passare degli anni la tematica ambientale ha avuto importanza sempre crescente, nel 1992 l'ONU ha organizzato la *United Nation Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), per analizzare le cause e gli effetti dei mutamenti climatici, che ha posto le basi per la successiva ratifica del "Protocollo di Kyoto".

Nel 2004, l'ICAO, ha stabilito tre obiettivi strategici da perseguire:

- Limitare o ridurre il numero di persone affette da rumore aeronautico;
- Limitare o ridurre l'impatto delle emissioni dei velivoli sulla qualità dell'aria delle località interessate;
- Limitare o ridurre l'impatto dei gas emessi dai motori sul clima globale.

La scelta di questi obiettivi è stata dettata dal fatto che rappresentano le problematiche che, con un approccio comune di intervento su base mondiale, possono essere più efficacemente risolte o comunque ridotte.

Contestualmente alla scelta di tali obiettivi è stato stabilito che la CAEP, commissione composta da membri ed osservatori degli Stati, delle associazioni ambientaliste non governative e delle industrie aeronautiche, debba redigere, ogni tre anni, un rapporto chiamato: "*Environmental Report*". In questo documento si relaziona l'andamento dei dati, ottenuti con il monitoraggio, relativi ai fattori d'inquinamento presi in considerazione, si esprimono valutazioni sulle strategie intraprese e si propongono nuovi standard e raccomandazioni che verranno in seguito ratificati dal Consiglio dell'ICAO.

Nell'ottobre 2010 sono state adottate le risoluzioni A37-18 e A37-19. La prima si occupa di gestione del rumore aeroportuale, di gestione del suolo e di qualità dell'aria. La seconda riguarda esclusivamente i mutamenti climatici dovuti all'inquinamento prodotto da aeroporti e velivoli. Oltre a questi aspetti nell'*Environmental Report 2010* sono stati analizzati anche moltissimi altri aspetti, tra cui: la possibilità di utilizzo di carburanti innovativi per i velivoli, le nuove tecnologie connesse alla realizzazione di motori con meno emissioni e più silenziosi, organizzazione delle procedure a terra e delle rotte meno impattanti e nuovi strumenti e metodologie di misura, raccolta ed elaborazione dei dati sensibili.

A livello mondiale, tralasciando per un istante l'ambito prettamente aeroportuale, il maggior ente che sviluppa e diffonde normative è l'ISO (International Organization for Standardization). L'ISO (dal greco *isos*: uguale) è un'organizzazione non governativa formata dagli organismi nazionali di standardizzazione di 160 paesi e da membri che operano nel settore privato delle industrie nazionali ed internazionali. La famiglia di norme ISO-14000 riguarda l'*Environmental Management System* (EMS), ovvero il sistema di gestione ambientale. In particolare la norma 14001-2004 tratta i requisiti di un EMS, mentre la norma 14004-2004 discute delle linee guida e dei principali doveri connessi all'EMS. Le ISO-14000 hanno carattere generale ed un'impostazione tale da renderle



adattabili a contesti molto diversi, tuttavia è possibile riconoscere in esse una logica di fondo, che viene poi applicata ai vari campi d'azione. L'approccio comune al problema ambientale è ben rappresentato dal seguente schema, chiamato PDCA Cycle (Fig. 1.1).

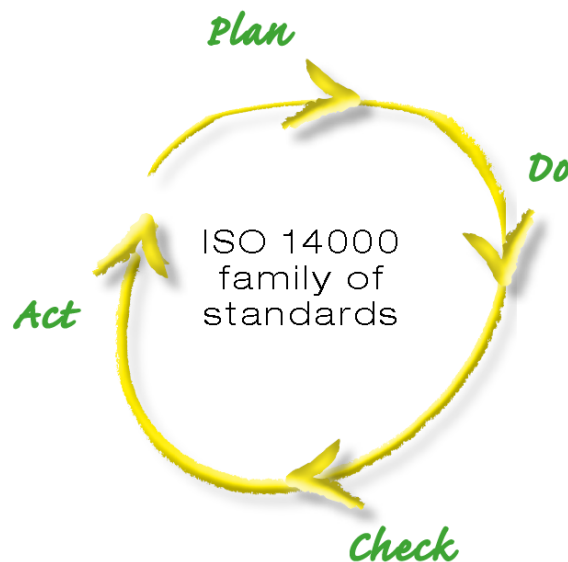


Fig. 1.1 – PDCA Cycle

Il concetto è quello di partire da una pianificazione di possibili strategie d'azione, che poi debbono essere attuate. All'attuazione segue una fase di verifica e controllo dei risultati ottenuti secondo parametri rigorosamente misurabili ed oggettivi. Infine si giunge all'emanazione degli standard e delle norme così sperimentate.

Un'altra peculiarità delle norme ISO 14000 è rappresentata dall'analisi delle possibilità di coniugare la necessità della tutela dell' ambientale, quale bene comune per l'umanità, con l'opportunità di un risparmio economicamente quantificabile in diversi aspetti, tra cui:

- Riduzione dell'utilizzo di materie prime e risorse grazie al riciclaggio;
- Riduzione dei consumi energetici grazie all'efficienza dei processi produttivi;
- Riduzione dei costi di smaltimento dei rifiuti.

In tal senso l'ISO è impegnato in campagne di sensibilizzazione con l'obiettivo di ottenere un maggior rispetto delle prescrizioni normative da parte di tutti i soggetti interessati, non solo per evitare di incorrere in possibili sanzioni, ma soprattutto per la comprensione dei vantaggi che possono scaturire da una gestione oculata del patrimonio ambientale.

Tornando ad analizzare la normativa aeroportuale, a livello europeo nel 2002 è stata costituita un'agenzia, la EASA (European Aviation Safety Agency), con lo scopo di regolamentare a livello comunitario, in materia di sicurezza e di protezione ambientale, l'aviazione civile. La missione di questa agenzia è duplice: da un lato fornire consulenza tecnica all'UE nella stesura dei regolamenti e nella conclusione di accordi internazionali riguardanti la sicurezza aerea, dall'altro ha assunto alcune funzioni operative dapprima svolte dalle Autorità Aeronautiche dei paesi membri, al fine di porre fine alla discrezionalità e libertà di interpretazione dei regolamenti vigenti.

Ad oggi, su suggerimento di tale agenzia, l'UE ha adottato il regolamento (EC) n°1702/2003 “ *laying down implementing rules for the airworthiness and environmental certification of aircraft and related products, parts and appliances, as well as for the certification of design and production organizations*” relativo ai processi di certificazione dei prodotti aeronautici.

A livello nazionale l'ente che disciplina la materia aeroportuale è L'ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile) istituito nel 1997. Questo ente ha compiti ispettivi, di certificazione, di autorizzazione, coordinamento, controllo e sanzione nel settore dell'aviazione civile nazionale. L'ENAC normalmente recepisce e dà efficacia giuridica ai contenuti tecnici degli annessi, degli standard e delle raccomandazioni emanati dall'ICAO.

In materia ambientale e nell'ambito delle sue competenze, l'ENAC:

- emette disposizioni che garantiscano i miglioramenti delle prestazioni ambientali degli aeromobili;
- emana circolari applicative in materia di rumore in ambito aeroportuale, anche in conformità alle linee guida dell'ICAO, allo scopo di garantire la corretta ed uniforme applicazione della normativa vigente.

Per quanto concerne il rumore aeroportuale, ad esempio, sono state recepite, oltre alle specifiche dell'ICAO, anche una serie di decreti e direttive dell'UE e i decreti legislativi e ministeriali del governo italiano. Tutto ciò si è tradotto nelle “*Linee Guida*” che prevedono, tra l'altro, che ogni velivolo sia in possesso di una certificazione acustica che attesti la conformità dei valori misurati ai limiti previsti dalle norme internazionali. Altrettanto è stato fatto con l'informativa ENAC: “*Linee Guida relative ad interventi per minimizzare l'uso di combustibile e ridurre le emissioni gassose*”. In questo documento si affronta il problema

nel suo complesso, coinvolgendo diversi aspetti delle attività svolte in ambito aeroportuale, e si suggeriscono interventi e procedure riguardanti:

- Operazioni a terra;
- Manutenzione velivoli;
- Massa e ripartizione del carico nei velivoli;
- Pianificazione delle rotte;
- Gestione del traffico aereo.

Come si è visto alla tematica ambientale, a tutti i livelli, viene riconosciuta una notevole importanza, con l'obiettivo di ridurre l'impatto globale del trasporto aereo e migliorare la qualità della vita nelle zone limitrofe gli aeroporti, dove la rumorosità e la gestione e l'utilizzo del suolo sono spesso motivo di scontro tra comunità ed enti gestori. Tuttavia è universalmente riconosciuto che il semplice rispetto delle norme non è sufficiente e seppur queste siano in costante sviluppo e riguardino un numero sempre maggiore di aspetti ambientali, risulta, infatti, fondamentale e strategico l'impegno degli enti che progettano e gestiscono le aree aeroportuali.

Negli Stati Uniti, ad esempio, la FAA (Federal Aviation Administration), cioè l'agenzia preposta all'organizzazione e alla sorveglianza del trasporto aereo civile, ha introdotto specifici ambiti che, le valutazioni ambientali preliminari dei progetti, devono affrontare. La *"Solar Guide: technical guidance for evaluating selected solar technologies on airports"* affronta la tematica dell'utilizzo di energie rinnovabili, in questo caso il fotovoltaico, in ambito aeroportuale. Vengono analizzate le tecnologie attualmente disponibili e le caratteristiche peculiari di ciascuna, la possibilità e le modalità di inserimento nel layout aeroportuale e viene proposta un'analisi economica della fattibilità dell'investimento e dei vantaggi che si possono trarre dall'impiego di tale tecnologia.

A tutti i livelli il trend che seguono le normative è quello di coinvolgere un numero sempre crescente di aspetti ambientali, di innalzare gli standard minimi richiesti, e di considerare l'efficienza energetica e la ecosostenibilità quali fattori primari da sviluppare in fase progettuale e da realizzare in fase di costruzione, manutenzione e ampliamento degli aeroporti.

## 1.2 Riutilizzo e valorizzazione dei materiali presenti in sito

Uno dei temi più dibattuti ed affrontati, quando si parla di tutela ambientale, è la sostenibilità di un intervento o di un'opera. Il concetto di sostenibilità è stato spiegato in molti modi, ma la definizione forse più appropriata nell'ambito affrontato in questo paragrafo è : "to keep going continuously" (Fowler and Fowler, 1963), ovvero in senso ingegneristico, "lo sviluppo che rispetta la necessità del presente senza compromettere la capacità delle future generazioni di sopperire alle proprie necessità" (Brundtland Commission, 1987). Uno degli obiettivi delle realizzazioni di infrastrutture di trasporto deve essere quello di assicurare che le conseguenze di quanto viene compiuto oggi, non risulti un ostacolo vincolante per l'ambiente e per quanto possa essere realizzato in futuro. La "scienza della sostenibilità" è relativamente un nuovo campo d'interesse, sviluppatosi in questo secolo. Essa racchiude le dinamiche dell'interazione uomo-ambiente nel tentativo di minimizzare l'impatto presente e futuro delle azioni umane sulla natura e sulla società.

Uno dei fattori necessari affinché un ciclo realizzativo risulti sostenibile è l'utilizzo di materiali sostenibili. Ciò include l'utilizzo di materiali riciclati, di scarto e di quelli che già sono disponibili in sito. Nella scelta di un materiale da costruzione, normalmente, viene considerato l'aspetto tecnico e ambientale, che conduce alla scelta di un materiale di idonee caratteristiche meccaniche, per garantire sicurezza e prestazioni adeguate in esercizio, e che non risulti inquinante o pericoloso per l'ambiente. Spesso queste due necessità sono in contrapposizione, allora si cerca di giungere ad un compromesso, nell'attesa che le nuove tecnologie forniscano materie prime tecnicamente performanti e del tutto sicure per l'ambiente. Un aspetto, però, spesso trascurato è la sostenibilità dei materiali impiegati. Non ci sono dubbi che, ad esempio, a parte gli effetti ambientali conseguenti all'apertura di cave di prestito e miniere, gli inerti utilizzati siano una risorsa non rinnovabile e pertanto una riserva finita e non inesauribile.

Uno dei metodi per ridurre l'impatto e favorire l'utilizzo di materie prime sostenibili, è l'impiego delle materie prime disponibili nel sito di realizzazione dell'opera. Questo concetto, valido in generale, è ancora più determinante nel caso di realizzazioni di infrastrutture di trasporto, generalmente caratterizzate da notevoli estensioni lineari (strade e ferrovie) o areali (aeroporti e porti), che richiedono pertanto ingenti quantitativi di materie prime ed il loro trasporto dal luogo di prelievo fino al sito di costruzione. Per ottimizzare le

risorse disponibili il primo passo deve necessariamente essere costituito da un'attenta analisi, già in fase di progetto preliminare e di studio di fattibilità, della condizione corrente del sito di realizzazione. Risulta necessario valutare le caratteristiche del materiale presente in sito, cioè le proprietà fisiche e meccaniche che ne caratterizzano la struttura e ne definiscono le possibilità d'impiego. In seconda istanza vanno definiti i quantitativi disponibili di tale materiale, e le possibilità di incrementare le sue caratteristiche tecniche mediante processi chimici, fisici e meccanici.

Pensando ad una materia prima, nell'ottica della sostenibilità, il suo costo non è solo la quotazione di mercato del prodotto eventualmente sommato alle spese di trasporto fino al sito di utilizzo. È necessario considerare anche i costi ambientali e sociali che vanno sostenuti affinché la materia prima sia pronta per l'impiego e quelli connessi alle conseguenze del suo utilizzo, nel nostro caso, nella realizzazione di un' opera civile. In questo senso la possibilità di utilizzare un materiale già disponibile in sito costituisce un notevole fattore di risparmio sulle seguenti voci di computo:

- Fornitura di nuovo materiale;
- Trasporto in opera del materiale;
- Eventuale rimozione e smaltimento del materiale già presente in sito non utilizzato.

A Melbourne, Australia, nei lavori di rimozione, smantellamento e sostituzione di un ponte in calcestruzzo armato al termine della sua vita utile, si è pensato di frantumare il calcestruzzo del vecchio impalcato ed utilizzarlo come aggregati e sabbia per la realizzazione delle travi portanti del nuovo ponte. Tutto ciò ha consentito di prolungare la vita utile di parte del materiale di cui era costituito l'impalcato da demolire e contestualmente di non rendere necessario l'acquisizione ed il trasporto di inerti da cava per realizzare il nuovo impalcato (*Frank Collins – Life cycle carbon emission by built concrete infrastructure*). Inoltre bisogna considerare il risparmio che si è ottenuto dalla riduzione del quantitativo di materiale da smaltire lontano dal sito di costruzione del nuovo ponte.

In taluni casi la materia prima presente in sito non ha idonee caratteristiche tecniche per essere impiegata, tuttavia il progresso tecnologico ci fornisce soluzioni applicabili ai diversi casi. Pensiamo alle quantità di acqua necessarie, per i più diversi impieghi, nel cantiere, ad esempio, di un rilevato stradale. L'acqua viene utilizzata per garantire la percentuale di umidità necessaria alla compattazione del suolo, per ridurre l'innalzamento di polvere e

consentire fasi di lavorazione più agevoli, per l'impasto del calcestruzzo, per la pulizia dei macchinari, ecc. Spesso l'acqua utilizzata è potabile o con caratteristiche molto simili ad essa, per evitare problematiche connesse alla presenza di sali solubili (Netterberg 1979, Roads Department, 2001), e viene normalmente prelevata dal sottosuolo, andando a ridurre i quantitativi disponibili per le popolazioni per sopperire alle proprie esigenze vitali. Le problematiche sono maggiormente connesse all'evaporazione dell'acqua e alla precipitazione e cristallizzazione dei sali solubili. Ciò comporta un allentamento e l'indebolimento degli strati superiori di materiale compattato, riducendo l'adesione dei materiali legati a bitume ai materiali sciolti e danneggiando, di conseguenza, le caratteristiche strutturali della pavimentazione. Tuttavia, con l'utilizzo di nano-tecnologie, è possibile alterare le caratteristiche dei materiali e renderli idonei anche all'utilizzo in tali circostanze. Alcune ricerche, in tal senso, hanno dimostrato che, la semplice applicazione immediata, dopo la compattazione, di uno strato di bitume o di una membrana impermeabile che, non consentendo la traspirazione di vapori d'acqua, fa sì che la cristallizzazione dei sali solubili avvenga negli strati inferiori, senza danneggiare la pavimentazione. In aree aride del pianeta una simile soluzione permette di realizzare un'infrastruttura senza spreco di una risorsa vitale per le popolazioni.

Nel campo dell'ingegneria stradale ci sono due validi esempi di valorizzazione e riutilizzo di materiali già presenti in sito: il primo è l'utilizzo di calce o cemento per stabilizzare terreni che, altrimenti, non avrebbero idonee caratteristiche tecniche (capacità portante in primis) per fungere da strati di base per sorreggere una pavimentazione. Di questo si parlerà in maniera diffusa nel seguito dell'elaborato. Il secondo caso riguarda il riciclaggio del conglomerato bituminoso preesistente in fase di manutenzione o rinnovamento di un'infrastruttura. Fino al recente passato era pratica comune, nei lavori di manutenzione o rifacimento degli strati di una pavimentazione, eseguire la scarifica degli strati da sostituire, smaltire a discarica il conglomerato di risulta e stendere nuovi strati di pavimentazione. Le moderne tecnologie consentono di scarificare gli strati, trattarli e utilizzarli per la stesa dei layer della nuova pavimentazione, con i seguenti vantaggi:

- Riduzione necessità di materie prime;
- Riduzione aree adibite a discarica;
- Riduzione inquinamento;
- Risparmio energetico;
- Convenienza economica.

Il trattamento può avvenire in stabilimento, ma anche in sito, riducendo ulteriormente le operazioni di trasporto di materiale, e in due diverse modalità: a caldo o a freddo. La prima prevede la scarifica del conglomerato, il suo riscaldamento, l'aggiunta di nuovo legante e inerti, la miscelazione e la stesa del conglomerato così ottenuto. Nella modalità a freddo, invece, si procede alla scarifica e, con appositi macchinari, grazie all'utilizzo di emulsioni o bitumi schiumati, si produce la miscela riciclata che viene immediatamente stesa e compattata. La seconda modalità, in particolare, è quanto mai oggetto di ricerca ed evoluzione, perché garantisce vantaggi notevoli, tra cui: lavorazioni più sicure, risparmio energetico, minori problematiche relative all'escursione termica tra fase di posa e di esercizio della pavimentazione.

### 1.3 Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Il raggiungimento di uno sviluppo sostenibile richiede metodi e strumenti che aiutino a quantificare e comparare l'impatto ambientale che la produzione di beni e servizi, nel seguito denominati per semplicità "prodotti", ha sulla nostra società. Questi prodotti sono creati e vengono utilizzati poiché sopperiscono ad un bisogno, che può essere attuale o anche solamente percepito. Ogni prodotto ha un "ciclo di vita", che comincia con la sua ideazione e il successivo sviluppo, prosegue con la ricerca delle materie prime che lo compongono, la produzione, l'utilizzo o il consumo e termina con la sua raccolta (differenziata o meno), il suo riciclaggio e riutilizzo o la sua messa a discarica. Ogni singolo passaggio nel ciclo di vita del prodotto ha un impatto ambientale, dovuto al consumo di risorse, all'emissione di sostanze in natura o ad altri tipi di scambi con l'ambiente, come, per esempio, l'emissione di radiazioni.

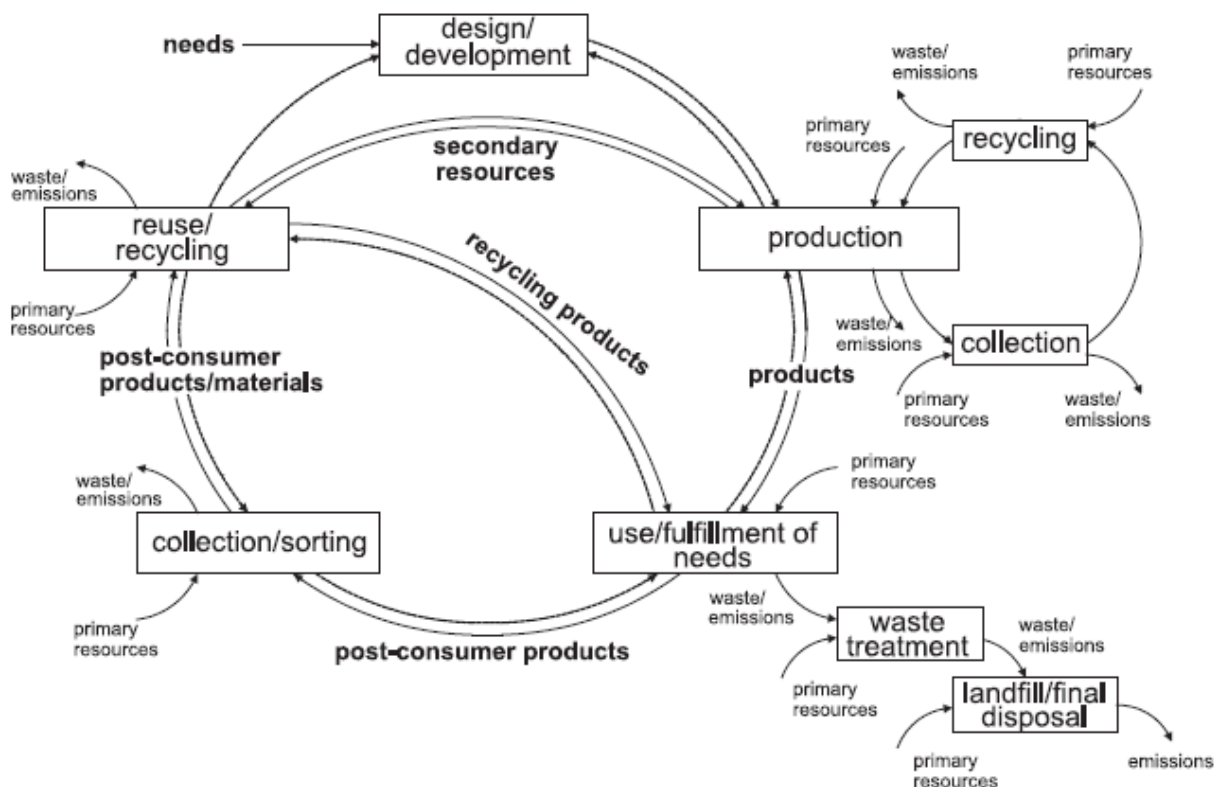


Fig. 1.2 – Ciclo di vita di un prodotto (Rebitzer et al., 2000)



Viene rappresentato (Fig. 1.2) uno schema semplificato del ciclo di vita di un prodotto, con anelli collegamenti tra le varie fasi del ciclo, in cui le frecce rappresentano i flussi di materiali ed energia e i flussi di informazioni.

La *Life Cycle Assessment* (LCA) è una struttura metodologica per stimare ed assegnare ad ogni fase del ciclo di vita di un prodotto il corrispettivo impatto ambientale, ad esempio: l'induzione di mutamenti climatici, l'esaurimento dell'ozono nella stratosfera, la creazione di smog nella troposfera, l'eutrofizzazione delle acque, le aggressioni tossiche ed acide agli ecosistemi ed alla salute umana, l'esaurimento di risorse naturali, il consumo di acqua, l'occupazione del suolo, il rumore, ecc. Normalmente quando si esegue una LCA, si trascura la fase di ideazione e sviluppo, in quanto si ritiene che non fornisca significativi contributi all'analisi. Anche ammesso che ciò risulti corretto, dobbiamo sottolineare che la fase di progettazione e sviluppo dell'idea iniziale ha una grandissima influenza sull'impatto ambientale che le fasi di vita del prodotto avranno successivamente. Ad esempio il progetto di un'automobile ha un'influenza diretta sul consumo di carburante per chilometro, sulle emissioni e sulla possibilità di riciclare parte dei componenti utilizzati al termine della sua vita utile. La figura seguente (Fig. 1.3) mostra il contributo all'impatto ambientale attribuibile ad ogni singola fase del ciclo di vita di un prodotto. Perciò, se l'obiettivo di una LCA è quello di contribuire a generare prodotti meno impattanti, è fondamentale svolgere l'analisi fin dall'ideazione dei prodotti, in modo che i risultati ottenuti possano contribuire alle scelte progettuali.

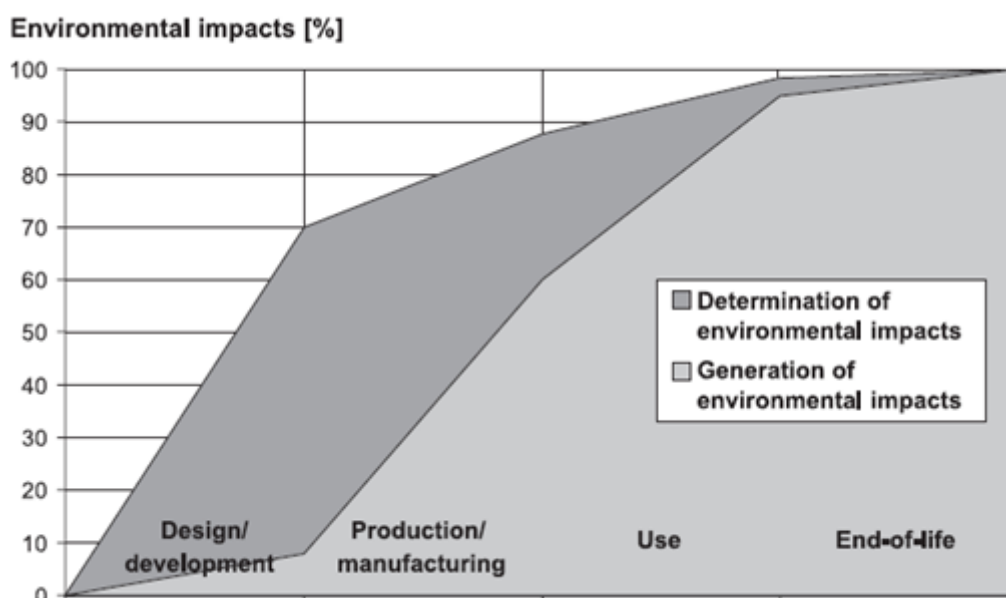


Fig. 1.3 – Tipologia di impatto delle fasi del ciclo di vita di un prodotto (Rebitzer, 2002)

Dal punto di vista pratico la redazione di una LCA è composta principalmente da due fasi:

- *Life Cycle Inventory (LCI)*;
- *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)*.

La fase di LCI consiste nella compilazione, tabulazione e analisi preliminare di tutti le interazioni tra prodotto e ambiente (emissioni, consumo di risorse, ecc.) in tutte le fasi del ciclo di vita, ovvero, “from cradle to grave”. Debbono essere considerate anche le possibili interazioni con i cicli di vita di altri prodotti, che possono risultare afferenti con quello del soggetto dell’analisi. In tal senso si parla di “sistema prodotto”, per indicare il ciclo di vita completo, considerando tutti i flussi di materiali ed energia impiegate, generate e trasmesse da un singolo prodotto. Il risultato di questa fase è un modello, basato sullo scopo dell’analisi, che rappresenta il sistema prodotto e le sue interazioni, di input e output, con l’ambiente naturale.

La LCIA costituisce invece lo step successivo e ha come scopo quello di fornire gli indicatori e i fondamenti per l’analisi dei potenziali contributi, in termini di utilizzo di materie prime, emissioni e consumi, rispetto ad un inventario di possibili tipologie d’impatto ambientale. Il risultato di questa analisi è una valutazione del ciclo di vita del prodotto, rispetto a delle unità di misura funzionali della gravità d’impatto, rispetto a categorie singole (mutamenti climatici, rumore, sfruttamento del suolo, ecc.) o aggregate (riduzione della qualità della vita, aumento della mortalità, ecc.).

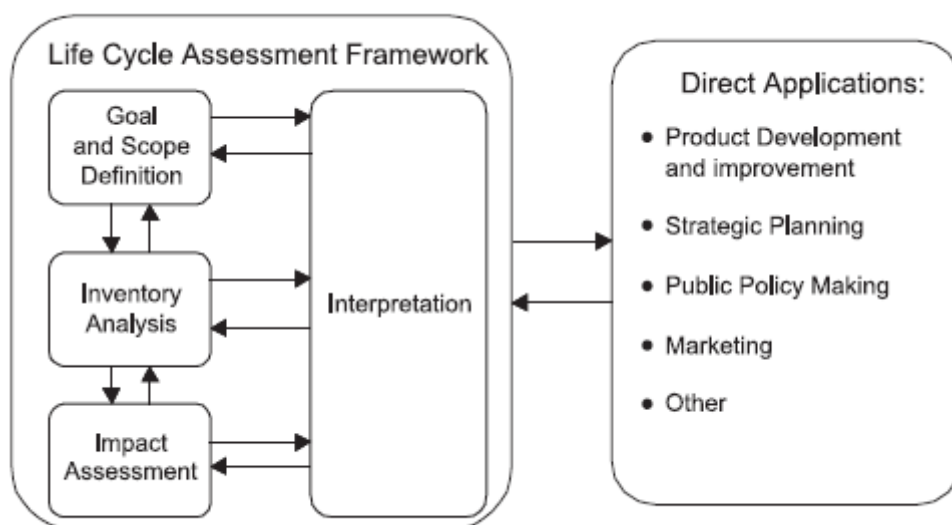


Fig. 1.4 – Fasi applicative della LCA (ISO 14040)

Alle due fasi citate, secondo la normativa ISO 14040 (Fig.1.4), vanno aggiunte la fase di definizione degli obiettivi e degli scopi dell'analisi da effettuare, che include la definizione delle unità funzionali, che consentono di confrontare beni e servizi di natura differente, e la fase di interpretazione. Quest'ultima costituisce l'analisi critica dei risultati che spesso presentano nel contempo vantaggi e svantaggi rispetto alle varie alternative, pertanto è necessario stabilire quali priorità perseguire.

Vista la finalità di questo elaborato, ci limitiamo a presentare con maggiore dettaglio la fase di LCIA, cioè di utilizzo di un modello di analisi per la valutazione dell'impatto dei prodotti, senza approfondire ulteriormente la definizione degli obiettivi dell'analisi e degli indicatori e la fase di creazione e sviluppo del modello.

La normativa ISO 14042 precisa che la redazione della LCIA sia composta sia da elementi obbligatori che da elementi opzionali, come mostrato nella figura riportata (Fig.1.5).

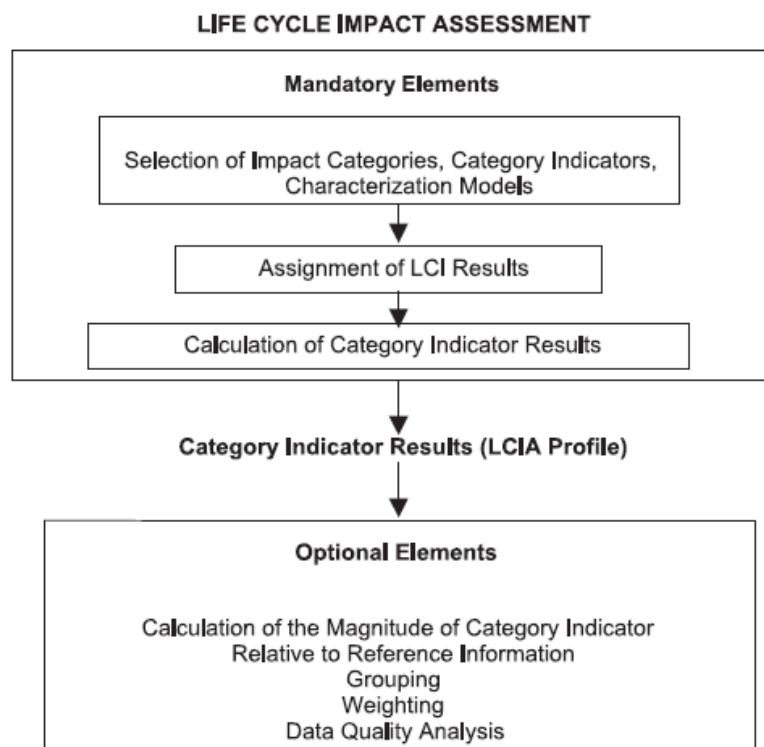


Fig.1.5 – Elementi delle LCIA (ISO 14042)

Gli elementi che devono essere necessariamente presenti sono:

- La scelta delle categorie d'impatto di interesse, degli indicatori per ciascuna categoria d'impatto e, sebbene vengano spesso considerati implicitamente, dei modelli di base utilizzati;
- L'assegnazione alle categorie d'impatto selezionate dei dati raccolti nella fase di classificazione (LCI);
- Il calcolo dei valori corrispondenti degli indicatori usati per descrivere l'impatto di ciascuna categoria. Con ciò si ottiene il profilo dell'analisi effettuata.

Gli elementi accessori e opzionali sono:

- Il calcolo dell'intensità di ogni indicatore di categoria, relativamente alle informazioni considerate;
- L'aggregazione dei dati utilizzati;
- I coefficienti di ponderazione dei dati eventualmente utilizzati;
- L'analisi qualitativa dei dati.

Definiti gli elementi essenziali di una valutazione del costo d'impatto ambientale, resta da chiarire quali scelte normalmente vengano effettuate dai team di professionisti che redigono gli elaborati. La normativa ISO, come si è visto, presenta sì un algoritmo di compilazione dell'analisi e di fasi da eseguire, tuttavia lascia completa possibilità di scelta di categorie d'impatto ambientale e di indicatori utilizzati per caratterizzare l'analisi del ciclo di vita di un prodotto.

La scelta di quali categorie di impatto ambientale considerare non è agevole, in quanto risultano essere molto numerose: mutamenti climatici, formazione di agenti inquinanti, riduzione dello strato d'ozono, eutrofizzazione, alterazione delle acque e degli ecosistemi, inquinamento acustico e del suolo, ecc. I criteri di scelta sono molteplici e dipendenti dalla tipologia specifica di analisi che si sta eseguendo. Ad esempio, sono stati recentemente proposti (Udo de Haes and Lindeijer, 2002) tre gruppi fondamentali di categorie d'impatto, relative rispettivamente a:

- Tutela della salute umana;
- Tutela dell'ambiente naturale (risorse ed ecosistemi, rispetto del clima, fertilità del suolo, ecc.);
- Tutela dell'ambiente antropizzato (edifici, monumenti, piantagioni, ecc.).

Oppure il metodo giapponese “LIME” (Itsubo and Inaba, 2003) (Fig. 1.6), che rappresenta i collegamenti tra i dati di inventario (LCI), gli indicatori delle categorie d’impatto, l’ambito di riferimento, per arrivare fino ad una valutazione complessiva del danno prodotto in funzione di un unico indicatore monetario, nel caso specifico espresso in Yen.

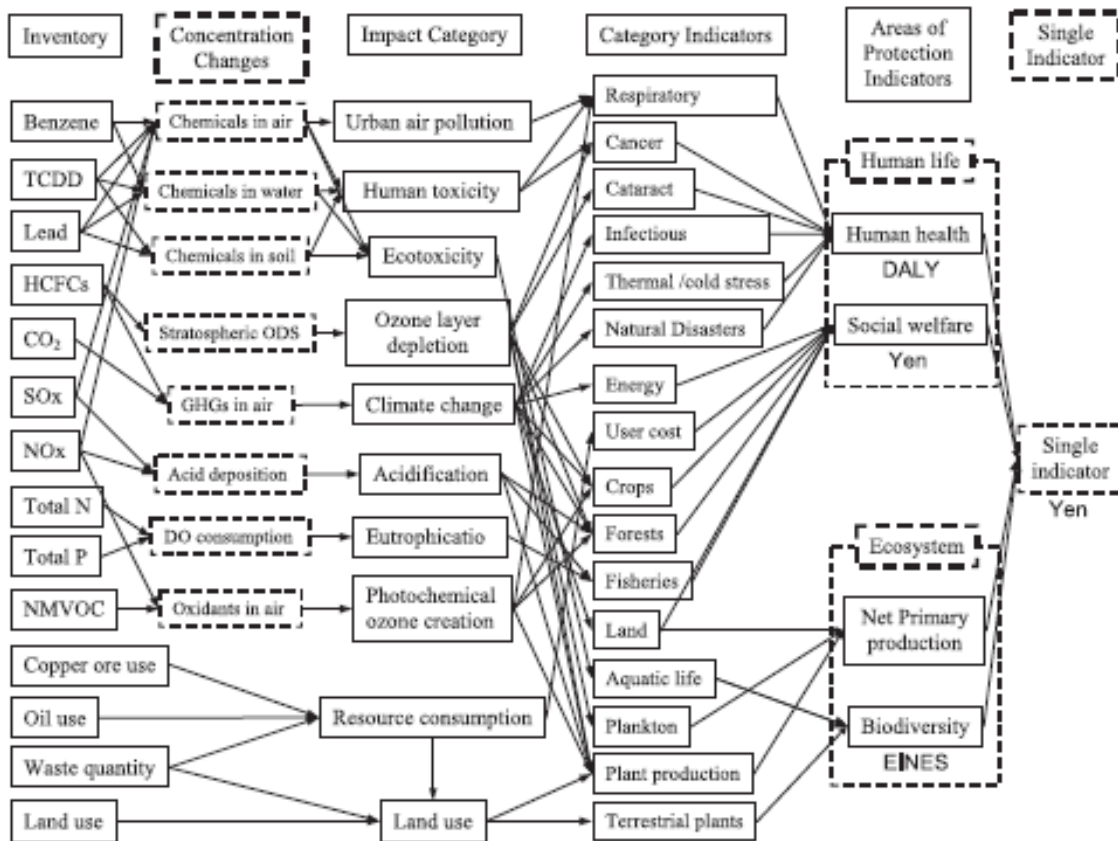


Fig. 1.6 – Schema delle relazioni secondo il metodo giapponese LIME

Il calcolo degli indicatori di categoria può avvenire con modalità diverse. A titolo d’esempio si riporta una semplice relazione che consente di calcolare gli indicatori di categoria a partire dai dati raccolti con la LCI e usando i fattori di caratterizzazione:

$$Category\ Indicator = \sum_s Characterization\ Factor\ (s) \times Emission\ Inventory\ (s)$$

In cui l’indice (s) denota la categoria considerata (ad esempio il rischio chimico). I fattori di caratterizzazione sono disponibili in letteratura, oppure ottenibili dai database di supporto

per la stesura delle LCA. Una semplice equazione per descrivere i fattori di caratterizzazione può essere la seguente:

$$\text{Characterization Factor } (s, i, t) = \sum_j \frac{\text{Effect } (s, j, t)}{\text{Emission } (s, i)}$$

In cui: (*s*) indica la categoria (rischio chimico), (*i*) la localizzazione dell'emissione, (*j*) la localizzazione del ricettore dell'emissione e (*t*) il periodo di impatto considerato. Ovviamente esistono molte altre possibili relazioni, a seconda della categoria considerata e delle finalità dell'analisi.

In conclusione ci preme sottolineare che la *Life Cost Assessment* è un'applicazione ancora giovane ed in continua evoluzione, le cui radici risalgono alle ricerche sui fabbisogni energetici degli anni '60 (Curran, 1996) e sulla prevenzione dell'inquinamento degli anni '70 (Royston, 1979). Gli sviluppi e le prospettive di ricerca più recenti includono:

- L'incremento della profondità e della larghezza della modellazione dei meccanismi naturali in termini di consistenza e comparabilità, nell'intento di produrre una più semplice identificazione della rilevanza ambientale degli indicatori in termini di rischi reali e potenziali.
- Il superamento delle incertezze nei risultati dei calcoli degli indicatori. L'obiettivo è comprendere da cosa dipendano tali incertezze e se siano risolvibili modificando la modellazione o il processo decisionale che costituisce l'analisi.
- L'ulteriore sviluppo delle scienze naturali, sociali ed economiche, con l'obiettivo di generare un supporto integrato al processo decisionale, che superi la semplice definizione di categorie d'impatto ambientale e di aree da tutelare (salute umana, tutela ecosistemi, risparmio di risorse, ecc.). Solo con una visione globale del problema ambientale, infatti, è possibile rendere i beni ed i servizi maggiormente sostenibili per la collettività.

## 1.4 “Green airports”

Nei paragrafi precedenti sono state elencate le normative nazionali ed internazionali che si occupano di tutela dell’ambiente in campo aeroportuale. Sono stati presentati i concetti di sostenibilità ambientale e ciclo di vita di un prodotto e si è descritta una modalità di analisi dell’impatto che, una qualunque realizzazione infrastrutturale, ha sull’ambiente e sugli esseri viventi. Tutto ciò ha contribuito a suscitare una coscienza ambientale sempre maggiore che sempre più spesso trova compimento e attuazione nelle nuove realizzazioni e nei progetti. Nello specifico, in questo paragrafo, presenteremo alcune soluzioni innovative adottate nella realizzazione e nella gestione di importanti aeroporti internazionali.

### ➤ Hong Kong International Airport (HKIA)

Questo è uno degli aeroporti asiatici con maggior traffico passeggeri annuo (più di 50 milioni di passeggeri in transito nel 2010, secondo Airport Council International). Occupa una superficie di 1255 ettari, con un’area adibita a terminal di 750 mila metri quadri (Fig. 1.7).



Fig. 1.7 – Hong Kong International Airport

Questo aeroporto ha adottato una politica di gestione interna molto attenta alla tematica ambientale, intraprendendo iniziative che hanno avuto buoni riscontri, tra cui:

- L'utilizzo di oltre 320 veicoli ecologici (elettrici e biodiesel B5) per la mobilità interna all'aeroporto. Anche i servizi di sicurezza utilizzano veicoli elettrici, per cui sono state predisposte nell'area aeroportuale più di 20 stazioni di ricarica rapida per veicoli elettrici.
- La predisposizione di un efficiente servizio di collegamento con la città, grazie al quale più del 66% dei passeggeri utilizza mezzi pubblici per il trasporto da e per l'aeroporto.
- È stato realizzato un sistema fisso di preclimatizzazione degli aeromobili, in modo che l'aria pre-condizionata sia generata con macchinari elettrici e non dai velivoli stessi, il che ha consentito una riduzione delle emissioni di  $CO_2$  (Fig. 1.8). Inoltre tutti i *finger* di accesso sono predisposti per fornire energia elettrica ai velivoli, in modo che i motori possano rimanere spenti durante le operazioni.
- Definizione di un'attenta campagna di promozione della raccolta differenziata, sia per gli utenti dell'aeroporto che per le compagnie e gli addetti ai lavori, grazie alla quale sono stati riciclate più di 4600 tonnellate di rifiuti in cinque anni (Fig. 1.9). Si è realizzato anche un sistema di compostaggio per rifiuti organici, con cui si genera concime per il *landside* aeroportuale.
- Riciclaggio del conglomerato bituminoso delle piste per la realizzazione di strati di base di nuove pavimentazioni.
- Sono stati modificati i sistemi di climatizzazione dei terminal e riprogrammati in modo ridurre il periodo di funzionamento giornaliero, grazie ad un sistema di monitoraggio in continuo del consumo energetico delle aree dei terminal.
- Si è proceduto alla sostituzione di oltre 4200 lampade fisse con luci LED. Questi due accorgimenti hanno portato un risparmio di circa 10 milioni di kWh all'anno, equivalenti ad una riduzione di emissioni di 5600 tonnellate di  $CO_2$ .
- Sono state adottate particolari cure nelle operazioni per tutelare specie animali e vegetali che vivono nei pressi dell'isola su cui è situato l'aeroporto.

Oltre a queste, ed altre, specifiche scelte, effettuate per ridurre l'impatto ambientale dell'aeroporto, è stato predisposto un sistema di monitoraggio delle emissioni e dei consumi energetici dello scalo, al fine di poter valutare l'efficacia degli interventi eseguiti e di stabilire una programmazione pluriennale efficiente. L'attenzione riservata alla tematica



ambientale si denota anche dalla volontà dell'ente gestore di condividere le scelte operate, al fine di ottenere un miglioramento globale della sostenibilità degli aeroporti mondiali. In questo senso vengono periodicamente organizzati workshop e convegni, a cui partecipano esperti da tutto il mondo, per studiare le problematiche riscontrate e suggerire nuove strategie d'intervento.

Carbon Reduction Achieved by the Airport Authority in 2009/10

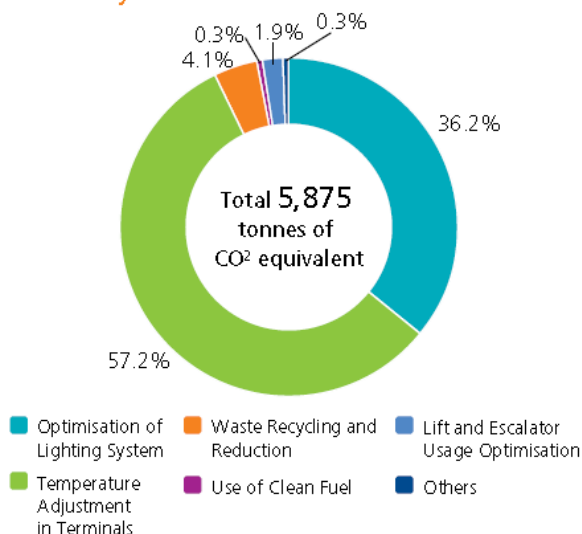


Fig. 1.8 – Riduzioni delle emissioni di CO<sub>2</sub> di HKIA

Amount of Waste Recycled by the Airport Authority in 2009/10 in tonnes

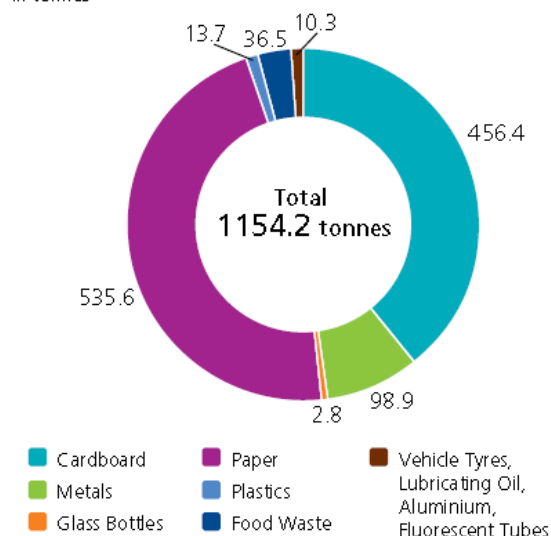


Fig. 1.9 – Rifiuti riciclati da HKIA

➤ Central Japan International Airport (Centrair)

Realizzato per l'Expo 2005 di Aichi, sorge su un'isola artificiale di fronte alla città di Nagoya (Fig. 1.10), ed è il terzo aeroporto internazionale del Giappone per importanza (oltre 18 milioni di passeggeri nel 2005), dopo lo scalo Narita di Tokyo ed il Kansai di Osaka. Questo aeroporto occupa una superficie di 470 ettari, con circa 220 mila metri quadri adibiti a terminal. Inaugurato nel Febbraio 2005, questo aeroporto è stato il primo, in Giappone, ad acquisire la certificazione ISO 14001. Nel 1998 è stata effettuata una valutazione di impatto ambientale dell'opera, con un monitoraggio durato circa un anno, che ha condotto nel 2001 a stabilire un Environmental Management System (EMS), in accordo con la normativa ISO, che potesse essere utilizzato durante la costruzione ed aggiornato nel corso delle varie fasi di realizzazione dell'opera.



Fig. 1.10 – Centrair Airport

Per quanto riguarda l'impatto ambientale dell'opera sono state considerate tutte le criticità tipiche di un'infrastruttura aeroportuale, a cui va aggiunto il fatto che lo scalo insiste su un'isola artificiale. L'immagine seguente (Fig. 1.11) mostra i principali impatti connessi all'attività aeroportuale del Centrair. Si riscontrano le problematiche già citate in precedenza in base agli aspetti peculiari considerati (velivoli, edifici, consumi energetici delle operazioni, emissioni, ecc.). Ci preme, tuttavia, sottolineare l'aspetto connesso alla realizzazione dello scalo su un'isola artificiale. Questa, in prima istanza, potrebbe essere considerata una circostanza negativa, che si scontra fortemente con i concetti di sostenibilità precedentemente esposti. In realtà, la particolare ubicazione dello scalo, consente di ovviare o quantomeno limitare alcune delle maggiori problematiche connesse al trasporto aeronautico, tra cui: l'inquinamento acustico e l'occupazione del suolo. Questo spiega il crescente numero di aeroporti realizzati su isole artificiali, per citarne alcuni: il Kansai ad Osaka, l'HKIA ad Hong Kong e l'Aeroporto Internazionale di Macao.



Fig. 1.11 – Principali impatti ambientali causati dall'attività del Centrair

Nella progettazione dell'isola sono stati considerati l'impatto sulle correnti marine e sugli habitat prodotto dalla realizzazione dell'opera. La forma dell'isola ed il suo posizionamento sono stati concepiti per consentire adeguati ricambi d'acqua ed impedire ristagni e la forma smussata di uno degli angoli consente il passaggio delle correnti marine, scongiurando il formarsi di pericolosi vortici. Lo studio dell'orientamento delle piste, e dell'isola stessa, ha consentito l'adozione di rotte particolarmente favorevoli nelle fasi di salita e di discesa, attesa ed avvicinamento. Tali rotte insistono su zone sovrastanti il mare, il che consente di preservare le zone densamente abitate dal rumore aeronautico e dall'inquinamento atmosferico diretto, oltre agli ovvi vantaggi in termini di sicurezza delle operazioni. Nel caso dell'inquinamento acustico, ad esempio, intense campagne di misurazione hanno consentito di verificare il totale rispetto dei limiti previsti per l'indice *WECPNL* (*Weighted Equivalent Continuous Perceived Noise Level*), stabiliti dall'ICAO, nelle zone costiere. Come si può notare dall'immagine seguente (Fig. 1.12), infatti, le isofone corrispondenti ai valori limite di 70 e 75 *WECPNL* non arrivano a lambire le coste limitrofe all'isola. Con la finalità di ridurre l'impatto sull'ecosistema marino dell'isola artificiale, è stata realizzata una gradonatura subacquea in pietra naturale, procedendo anche al trapianto della vegetazione, attorno alle barriere frangiflutti dell'isola, in modo da ricreare un habitat idoneo allo sviluppo dell'ecosistema autoctono.

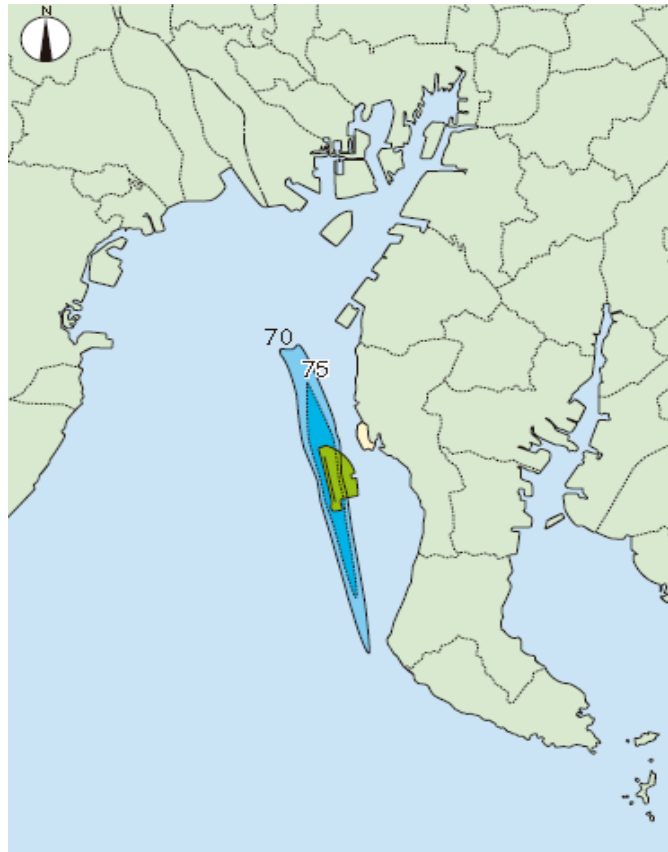


Fig. 1.12 - valori di WECPNL del Centrair

Per quanto concerne la riduzione dell'impatto ambientale dell'infrastruttura aeroportuale, sono state adottate alcune soluzioni particolari, tra cui ricordiamo:

- L'utilizzo di un sistema di co-generazione con gas naturale, che consente di produrre, utilizzando il gas naturale, sia calore che energia elettrica. Sostanzialmente si utilizza il calore generato per la produzione di elettricità per riscaldare l'acqua e per il condizionamento, anziché disperderlo in atmosfera. Questo consente di ottenere un'efficienza energetica tra 70% e 80% (energia elettrica e calore) contro una normale efficienza di circa il 42% (solo energia elettrica).
- Lo sfruttamento, grazie ad un sistema a pompa e scambiatore di calore, dell'acqua di mare. In pratica si utilizza l'acqua di mare come fluido di raffreddamento e, una volta riscaldata, si utilizza il calore che ha immagazzinato trasformandolo in energia termica.

- L'installazione di circa 1500 pannelli fotovoltaici sulle coperture del terminal. Questo ha consentito la produzione di 166000 kWh all'anno, con il conseguente risparmio in termini di emissioni di idrocarburi in atmosfera.
- Grazie all'installazione di moltissime superfici vetrate fotocatalitiche, si ottiene un notevole contributo all'illuminazione dei terminal, riducendo il fabbisogno di energia elettrica degli edifici.
- Raccolta differenziata e riciclaggio dei rifiuti, veicoli ecologici, sistemi centralizzati di alimentazione e rifornimento dei velivoli negli stalli di sosta, ecc.

➤ *New Doha International Airport (NDIA)*

Questo aeroporto, la cui realizzazione è iniziata nel 2004, è in fase di completamento e dovrebbe essere inaugurato nel 2012. Quando sarà completato dovrà rimpiazzare l'attuale aeroporto di Doha (Qatar) che, con una sola pista ed un terminal di dimensioni molto contenute, non è in grado di far fronte alle crescenti esigenze del trasporto internazionale. Per la sua posizione geografica, questo aeroporto, potrebbe rivestire un ruolo fondamentale come punto di scalo passeggeri e smistamento merci per le rotte che collegano l'oriente con l'occidente. Per tali motivi il progetto del NDIA è stato particolarmente accurato nel definire il layout del terminal e alle zone destinate alla circolazione dei passeggeri in transito (Fig. 1.13).



Fig. 1.13 – Terminal passeggeri NDIA

Il progetto del terminal, oltre al comfort dei passeggeri, cura in maniera specifica l'efficienza energetica del complesso degli edifici. Per citare alcuni esempi delle scelte progettuali effettuate, possiamo riportare:

- L'adozione di coperture e pareti di vetro isolante, in grado di garantire la luminosità dei locali, riducendo la dissipazione termica, in modo da contenere il dispendio di energia per il condizionamento del terminal.
- L'utilizzo di sensori elettronici per regolare l'illuminazione, la ventilazione e l'umidità degli edifici, ottimizzando la programmazione e l'utilizzo di energia elettrica.
- L'installazione di impianti di recupero e depurazione delle acque utilizzate nel complesso aeroportuale, per l'irrigazione del *landside*, a cui si aggiunge la scelta di utilizzare piante tipiche dell'area desertica, che richiedono minor irrigazione.
- La predisposizione dei sistemi di distribuzione dell'aria climatizzata e di acqua fredda in tunnel isolati ed interrati. Questa scelta è stata dettata dalle elevate temperature e dall'irraggiamento solare tipico di questa area geografica.

Le scelte tecnologiche descritte in questo paragrafo per ridurre l'impatto ambientale degli aeroporti sono solo alcune, in quanto ogni sito, come si è visto, ha le sue peculiarità e problematicità, che richiedono uno studio adeguato e specifico. La stragrande maggioranza degli enti gestori di aeroporti nel mondo si sta muovendo in questa direzione, infatti sempre più enti redigono "*environmental reports*" con frequenza annuale o pluriennale per analizzare le variazioni d'impatto dell'aeroporto sull'ambiente e l'efficacia delle scelte organizzative e tecnologiche adottate.

Un altro aspetto essenziale, ed in crescente aumento, è la divulgazione delle tecnologie impiegate, con i relativi risultati ottenuti, e la definizione di linee comuni d'azione. In tal senso ricordiamo la costituzione della "*Green Sustainable Airports (GSA)*", associazione i cui membri sono principalmente enti gestori di aeroporti che si trovano nell'Europa settentrionale (UK, Bel, Nor, NL, Den, Ger). Tale associazione promuove obiettivi ed iniziative comuni di sostenibilità ed organizza confronti e meeting coinvolgendo i soggetti direttamente interessati.

Negli Stati Uniti, con il contributo dei dipartimenti federali per l'energia, per la tutela dell'ambiente e del Congresso, è stata costituita la *Clean Airports Partnership, Inc.*, una corporazione no-profit con la finalità di aiutare gli aeroporti e le comunità a cooperare per



migliorare la qualità dell'ambiente. Il principale progetto di questa associazione è denominato *GAI (Green Airport Initiative)*. Questa iniziativa ha lo scopo di definire semplici ed immediate strategie che consentano uno sviluppo sostenibile dell'aeroporto, rispetto all'ambiente ed alle comunità che vivono nelle zone limitrofe. La peculiarità del metodo proposto è la sua semplicità, rapidità e facilità di attuazione per qualunque ente gestore aeroportuale. Il metodo prevede due fasi: la *"baseline phase"* che normalmente si conclude in meno di sei mesi, con cui si analizzano le criticità tipiche dell'aeroporto in esame e si propongono le misure da attuare. Successivamente avviene la *"implementation phase"*, con cui si pianificano, sviluppano e mettono in atto le misure proposte e si verificano i risultati. A titolo d'esempio si riporta lo schema adottato dal progetto GAI per definire le principali criticità ambientali di un qualsiasi aeroporto (Fig. 1.14).

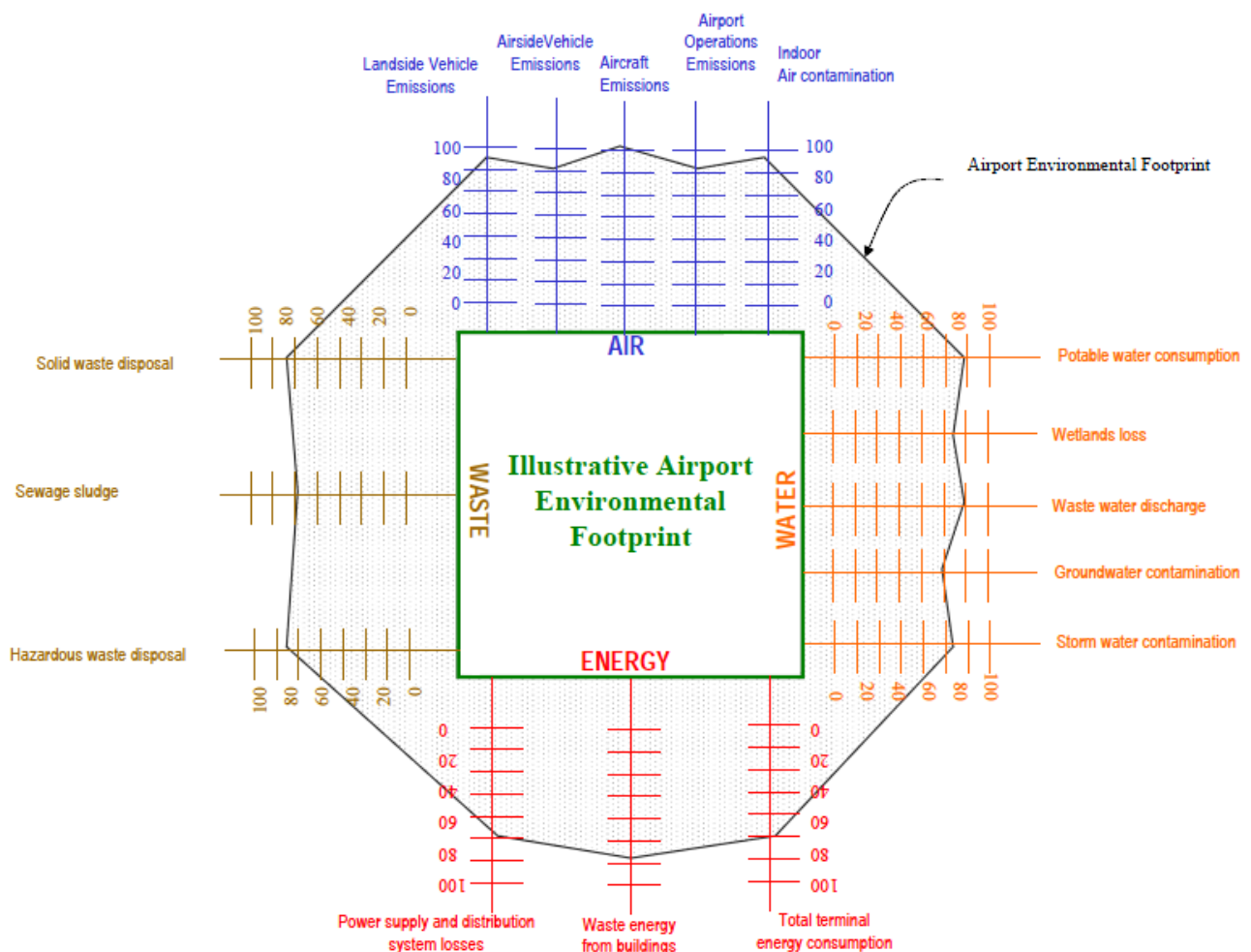


Fig. 1.14 – Schema di analisi delle problematiche ambientali di un aeroporto (GAI)

## 2 La stabilizzazione del terreno in sito con cemento e/o calce

In questo capitolo si tratterà il tema del consolidamento dei terreni in sito e più nel dettaglio la stabilizzazione delle terre mediante leganti idraulici (calce e/o cemento).

La necessità di migliorare, attraverso il consolidamento, le caratteristiche meccaniche e fisiche di un terreno, è la diretta conseguenza del concetto di sostenibilità ambientale, di cui si è discusso nel capitolo precedente. In tutte le opere civili e particolarmente nel caso delle opere infrastrutturali, una condizione essenziale per garantire la stabilità ed il funzionamento ottimale in esercizio dell'opera, consiste nella capacità del terreno, su cui insiste l'opera, di garantire adeguati livelli di portanza. Sostanzialmente, la capacità portante di un terreno, rappresenta l'attitudine dello stesso a sopportare una certa distribuzione di carico a cui può essere soggetto. Ovviamente si deve chiarire con che modalità ed in quali condizioni il suddetto carico venga applicato. Lo studio dei fattori che influenzano la capacità portante di un terreno (tipologia di terreno, grado di costipamento, condizioni al contorno, ecc) e le prove che possono essere svolte per determinare un indice rappresentativo della portanza, costituiscono una branca di studio molto ampia e si ritiene che, un approfondimento in tal senso, esuli dalle finalità di questo elaborato. Tuttavia appare evidente che, di fronte ad un terreno naturale di capacità portante insufficiente, sia necessario individuare delle strategie d'intervento, finalizzate ad ottenere un incremento delle caratteristiche meccaniche e fisiche del terreno stesso.

Una soluzione, anche se non sempre applicabile, potrebbe essere quella di rimuovere il terreno naturale che risulti essere non idoneo, per sostituirlo con strati di materiale di caratteristiche appropriate. Questo però comporta l'utilizzo di quantitativi ingenti di risorse non rinnovabili e crea il problema dello smaltimento del terreno asportato in precedenza.

Un'alternativa è rappresentata dalla possibilità di non asportare il terreno in sito, ma di utilizzare particolari tecnologie per implementare le sue caratteristiche fisiche e meccaniche e di conseguenza le prestazioni che è in grado di fornire. In questo senso si parla di consolidamento di un terreno in sito.

La stabilizzazione può essere definita come un mezzo di permanente consolidamento delle terre con materiali adatti ad incrementare la capacità portante e la resistenza meccanica di esse, diminuendone la sensibilità all'azione dell'acqua ed al cambiamento di



volume durante i cicli di imbibizione e di essiccazione. Lo scopo della stabilizzazione è, dunque, quello di rendere un terreno utilizzabile, migliorandone le caratteristiche reologiche, chimiche, meccaniche ed incrementando la conservazione nel tempo delle relative proprietà.

Per ottenere tale stabilizzazione, alle terre viene generalmente aggiunto un legante idraulico. Ovviamente la tipologia di legante, i quantitativi utilizzati e la metodologia di miscelazione, dipendono fortemente dalle caratteristiche del terreno naturale presente in sito. Uno dei sistemi, che va più rapidamente diffondendosi in tutti i Paesi, è la stabilizzazione a mezzo della calce. Tale additivo è particolarmente efficace in terreni contenenti argille, in quanto queste reagiscono sia chimicamente sia fisicamente con esso, ottenendo una miscela di ottime qualità e tale da poter essere impiegata.

Il consolidamento di un terreno in sito rientra, come già analizzato nel paragrafo 1.2, nelle tipologie di interventi volti a valorizzare i materiali presenti in sito, riducendo l'impiego di risorse non rinnovabili e contenendo i quantitativi di materiali di scarto.

## 2.1 Il consolidamento dei terreni in sito

Il panorama tecnico e tecnologico attuale offre molteplici modalità di consolidamento di un terreno. La scelta della metodologia più appropriata per il singolo intervento dipende da diversi fattori, tra cui i principali risultano essere:

- Le caratteristiche meccaniche e fisiche del terreno in sito;
- La finalità dell'intervento e le prestazioni meccaniche da garantire;
- Le tecnologie disponibili;
- La tempistica ed il costo dell'intervento.

Le modalità di consolidamento sono numerose, tuttavia è possibile procedere ad una breve descrizione di quelle maggiormente utilizzate nel campo delle infrastrutture di trasporto.

### ➤ Stabilizzazione granulometrica

Questa applicazione rappresenta, di norma, il metodo più diffuso per il miglioramento dei terreni: la stabilizzazione viene effettuata mediante lo scavo e l'asportazione di terreno fino ad una determinata profondità, provvedendo successivamente al riempimento con strati successivi di spessore controllato, compattando infine il terreno con un adeguato dispositivo di costipamento. L'efficacia di questo tipo di stabilizzazione dipende sia dalla granulometria e dalla litologia del materiale con cui si esegue il riempimento, che dalla modalità di costipamento. Per questa operazione, solitamente, si utilizzano rulli statici o dinamici, le cui caratteristiche e peculiarità d'impiego verranno descritte in seguito.

### ➤ Stabilizzazione con leganti idraulici

Tale metodologia, anch'essa ampiamente utilizzata, consiste nell'additivare il terreno in sito con sostanze chimiche, solitamente calce e/o cemento, per poi procedere alla miscelazione del terreno con il legante e alla successiva compattazione degli strati. Su tale

metodologia non ci si sofferma, in quanto sarà oggetto di ampia e approfondita trattazione nei paragrafi successivi.

➤ Stabilizzazione con leganti idraulici e polimeri idrosolubili

Concettualmente molto simile alla precedente, si differenzia da essa per la presenza di un additivo polimerico idrosolubile (nanoterra), la cui funzione è quella di migliorare le reazioni dei leganti idraulici (Fig. 2.1).

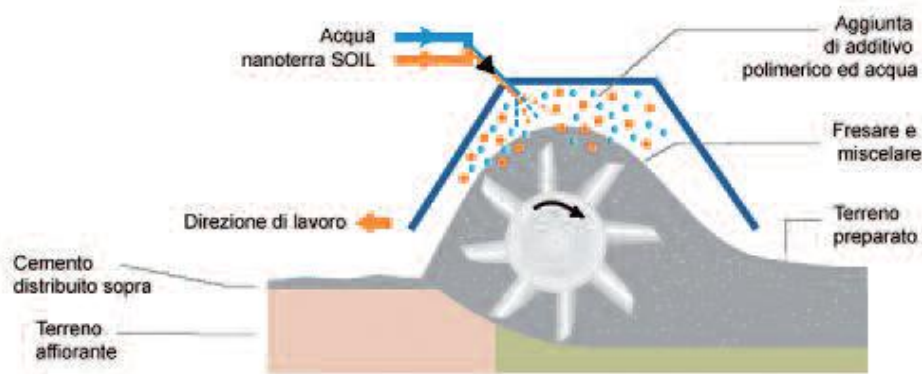


Fig. 2.1 – Stabilizzazione con leganti idraulici e polimeri idrosolubili

➤ Stabilizzazione con Light Tamping

Consiste in una supercompattazione degli strati superficiali e mediamente profondi per mezzo degli urti e delle vibrazioni prodotte dall'impatto di una massa lasciata cadere ripetutamente sul terreno (Fig. 2.2). Considerata la profondità dello strato da stabilizzare, si può calcolare quale debba essere l'entità della massa battente da utilizzare e la quota di caduta. La compattazione avviene attraverso più fasi nelle quali l'interasse fra i punti di impatto, realizzati a maglia regolare, varia progressivamente. Le onde d'urto e le elevatissime tensioni indotte dalla caduta della massa battente portano alla riduzione dei vuoti del terreno, talora con sua parziale liquefazione, e la creazione di percorsi preferenziali di drenaggio attraverso i quali l'acqua dei pori può essere dissipata, come

accade in particolare in presenza di sabbia fine e limo. Chiaramente la riduzione della percentuale dei vuoti porta a un aumento della capacità portante del terreno.

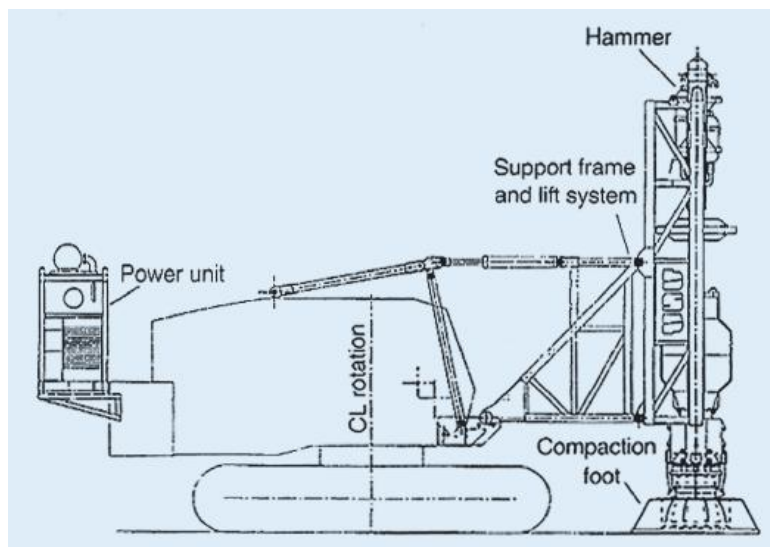


Fig. 2.2 – Il Light Tamping

➤ Stabilizzazione di massa

Si tratta di una metodologia che consente di movimentare e miscelare omogeneamente il terreno per la profondità di alcuni metri mediante apposite apparecchiature di concezione svedese. L'unità miscelatrice viene applicata all'escavatore al posto della benna ed è dotata di una testa mossa da un motore idraulico che viene alimentato direttamente dal sistema idraulico dell'escavatore (Fig. 2.3). La testa dell'apparecchiatura diventa un'unità mobile di miscelazione la cui efficacia è dovuta a un sistema elicoidale montato sul tamburo orizzontale posto all'estremità del braccio che, ruotando, miscela omogeneamente il materiale con i leganti iniettati alla base. Completa il treno di intervento l'alimentatore del legante che inietta a una pressione di 8-10 bar. Tutte le operazioni sono controllate da una unità di acquisizione e registrazione dati con particolare rilievo della pressione di iniezione, della portata del legante e delle caratteristiche del terreno attraverso l'energia richiesta per il funzionamento delle macchine.

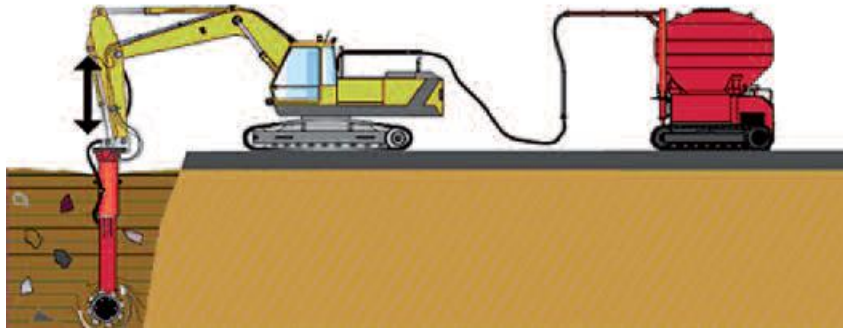


Fig. 2.3 – La stabilizzazione di massa

A queste metodologie se ne aggiungono molte altre, che tuttavia esulano dal contesto in cui viene sviluppato questo elaborato. Tra queste è possibile ricordare:

- L'utilizzo di fibre geotessili e goe-griglie;
- Sistemi di drenaggio profondi, come i pali di pietrame;
- Sistemi ad iniezione e/o *jet-grouting*.

Nel proseguo dell'elaborato verranno analizzate nel dettaglio le prime due metodologie riportate, cioè la stabilizzazione granulometrica e quella con leganti idraulici, in quanto rappresentano rispettivamente la modalità usuale per il consolidamento dei terreni aeroportuali e la modalità innovativa, oggetto di questa trattazione.

## 2.1.1 Caratterizzazione del terreno

Nel campo dell'ingegneria dei trasporti si è sempre cercato di avere a disposizione un metodo che consentisse di stabilire, con poche e semplici misure, se il materiale di risulta di uno scavo, prelevato da una cava di prestito o già presente in sito, risultasse idoneo o meno per la costruzione di rilevati o per costituire il piano d'appoggio di una sovrastruttura.

Questa esigenza ha portato a definire alcune classificazioni delle terre, fondate principalmente sulla natura o sullo stato del terreno stesso. Quando si parla di natura di una terra ci si riferisce alla granulometria, alla sensibilità all'acqua, alla eventuale modificabilità del materiale sotto l'azione di macchine; lo stato, invece, riguarda prevalentemente il contenuto d'acqua di una terra e, in particolare, se tale contenuto è tale da consentire il costipamento oppure se è eccessivo, per cui la terra necessiterà di particolari trattamenti per garantire idonee prestazioni meccaniche. Attualmente sistemi di classificazione prevalentemente usati sono due:

- Sistema USCS, riportato in Italia dalle raccomandazioni AGI (1990);
- Sistema HBR-AASHTO ripreso in Italia nella norma CNR-UNI 10006.

I due sistemi di classificazione si differenziano sostanzialmente per lo scopo che si prefiggono. Il sistema USCS descrive le condizioni naturali del terreno, così come appaiono in sito, facilita la compilazione delle stratigrafie e fornisce informazioni di carattere geotecnico. Il sistema AASHTO permette di stabilire l'idoneità di un determinato terreno ad essere utilizzato come materiale da costruzione. In questi casi le informazioni immediatamente fornite dalla classificazione riguardano: compressibilità del materiale, comportamento in presenza di acqua, suscettibilità al gelo, ecc.

Nella classificazione HBR-AASHTO (*Classification of Soil and Soil-Aggregate Mixture for Highway Construction Purposes*) i terreni inorganici sono suddivisi in otto gruppi (da  $A_1$  ad  $A_8$ ), passando da materiali con elevate caratteristiche di resistenza a materiali mediocri e scadenti, fino alla torba. Alcuni gruppi sono suddivisi a loro volta in modo da comprendere complessivamente dodici sottogruppi (Fig. 2.4).

Classificazione generale	Terre ghiaia - argillose Frazione passante allo staccio 0,075 UNI 2332 $\leq$ 35%							Terre limo - argillose Frazione passante allo staccio 0,075 UNI 2332 $>$ 35%					Torbe e terre organiche palustri
	A 1		A 3	A 2				A 4	A 5	A 6	A 7		
Sottogruppo	A 1-a	A 1-b		A 2-4	A 2-5	A 2-6	A 2-7				A 7-5	A 7-6	
Analisi granulometrica Frazione passante allo staccio													
2 UNI 2332 %	$\leq$ 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,4 UNI 2332 %	$\leq$ 30	$\leq$ 50	$>$ 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,075 UNI 2332 %	$\leq$ 15	$\leq$ 25	$\leq$ 10	$\leq$ 35	$\leq$ 35	$\leq$ 35	$\leq$ 35	$>$ 35	$>$ 35	$>$ 35	$>$ 35	$>$ 35	$>$ 35
Caratteristiche della frazione passante allo staccio 0,4 UNI 2332													
Limite liquido	-	-	-	$\leq$ 40	$>$ 40	$\leq$ 40	$>$ 40	$\leq$ 40	$>$ 40	$\leq$ 40	$>$ 40	$>$ 40	$>$ 40
Indice di plasticità	$\leq$ 6	-	N.P.	$\leq$ 10	$\leq$ 10	$>$ 10	$>$ 10	$\leq$ 10	$\leq$ 10	$>$ 10	$>$ 10	$>$ 10	$>$ 10
											IP $\leq$ LL .30	IP $>$ LL .30	
Indice di gruppo	0		0	0			$\leq$ 4	$\leq$ 8	$\leq$ 12	$\leq$ 16	$\leq$ 20		
Tipi usuali dei materiali caratteristici costituenti il gruppo	Ghiaia o breccia, ghiaia o breccia sabbiosa, sabbia grossa, pomice, scorie vulcaniche, pozzolane		Sabbia fina	Ghiaia e sabbia limosa o argillosa				Limo poco compressibili	Limo fortemente compressibili	Argille poco compressibili	Argille fortemente compressibili e plastiche	Argille fortemente compressibili e plastiche	Torbe di recente o remota formazione, detriti organici di origine palustre
Qualità portanti quale terreno di sottofondo in assenza di gelo	Da eccellente a buono					Da mediocre a scadente					Da scartare come sottofondo		
Azione del gelo sulle qualità portanti del terreno di sottofondo	Nessuna e lieve		Media				Molto elevata	Media	Elevata	Media			
Ritiro o rigonfiamento	Nullo		Nullo o lieve				Lieve o medio	Elevato	Elevato	Molto elev.			
Permeabilità	Elevata		Media o scarsa					Scarsa o nulla					
Identificazione dei terreni in sito	Facilmente individuabili a vista		Aspri al tatto. Incoerenti allo stato asciutto	La maggior parte dei granuli sono individuabili ad occhio nudo. Aspri al tatto. Una tenacità media o elevata allo stato asciutto indica la presenza di argilla.				Reagiscono alla prova di scuotimento*. Polverulenti o poco tenaci allo stato asciutto. Non facilmente modellabili allo stato umido.	Non reagiscono alla prova di scuotimento*. Tenaci allo stato asciutto. Facilmente modellabili in bastoncini sottili allo stato umido.				Fibrosi di color bruno o nero. Facilmente individuabili a vista.

\* Prova di cantiere che può servire a distinguere i limi dalle argille. Si esegue scuotendo nel palmo della mano un campione di terra bagnata e comprimendolo successivamente fra le dita. La terra reagisce alla prova se, dopo lo scuotimento, apparirà sulla superficie un velo lucido di acqua libera, che scomparirà comprimendo il campione fra le dita.

Fig. 2.4 – Classificazione delle terre HBR-AASHTO (UNI 10006)

Ai primi 3 gruppi ( $A_1, A_2, A_3$ ) appartengono le terre ghiaioso-sabbiose, caratterizzate da una percentuale di passante al setaccio 0,075 mm inferiore al 35%. I gruppi successivi (da  $A_4$  ad  $A_7$ ) definiscono terre limo-argillose, con percentuali di passante al setaccio 0,075 mm superiore al 35%, mentre il gruppo  $A_8$  comprende i terreni organici e le torbe. Il gruppo  $A_1$  si suddivide nei sottogruppi  $A_{1-a}$  e  $A_{1-b}$  che si differenziano per una diversa percentuale di frazione fina: prevalenza di ghiaia nel primo e di sabbia grossa nel secondo. I gruppi  $A_2$  e  $A_7$  si suddividono a loro volta in sottogruppi, caratterizzati da un numero che indica il gruppo di appartenenza della frazione fine. Per individuare il gruppo ed il sottogruppo questa classificazione prevede semplici prove di laboratorio, consistenti nell'analisi granulometrica, nella determinazione del limite (di Atterberg) liquido  $w_L$  e dell'indice di plasticità  $I_p$ . Questa classificazione raccomanda poi che ogni terreno contenente una quantità apprezzabile di materiale fine (dal gruppo  $A_4$  in poi) sia classificato anche con indice di gruppo ( $I_g$ ), che si può definire come un coefficiente di qualità di una terra espresso dall'equazione:

$$I_g = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd$$

$a$  = passante al setaccio 0,075 mm meno 35 (valore massimo 40)

$b$  = passante al setaccio 0,075 mm meno 15 (valore massimo 40)

$c$  = limite  $w_L$  meno 40 (valore minimo 0 e massimo 20)

$d$  = indice  $I_p$  meno 10 (valore minimo 0 e massimo 20)

I valori di  $I_g$  possono essere ricavati anche graficamente mediante l'utilizzo di due diagrammi (Fig. 2.5).



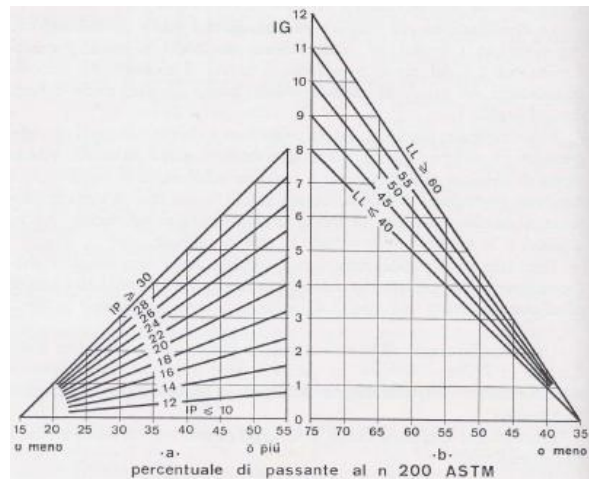


Fig. 2.5 – Diagrammi per la determinazione dell'indice di gruppo (CNR - UNI)

L'indice di gruppo è tanto maggiore quanto è più elevata la percentuale di materiale fino presente nella terra. Come si può vedere dalla classificazione HBR-AASHTO le terre con le caratteristiche meccaniche migliori hanno valori bassi di indice di gruppo, e viceversa. Questo è dovuto principalmente al fatto che le frazioni fini limo-argillose sono soggette, in presenza d'acqua, al fenomeno della consolidazione, cioè il trasferimento del carico sopportato dall'acqua allo scheletro solido che costituisce i minerali delle argille. Questo fenomeno microscopico, ha come conseguenze macroscopiche la possibilità che si verifichino cedimenti notevoli anche dopo molto tempo dall'applicazione di un sovraccarico su di un terreno. Con ciò si chiarisce quale importanza rivesta la suscettibilità all'acqua di un terreno ed il motivo per cui la classificazione HBR-AASHTO imponga la determinazione dell'indice di gruppo per le terre con contenuti sensibili di frazione limo-argillosa.

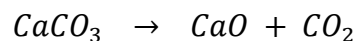
Nel proseguo dell'elaborato si farà sempre riferimento a quest'ultima classificazione delle terre e si descriveranno le caratteristiche dei gruppi di terre rilevanti a livello progettuale.

## 2.1.2 I leganti idraulici

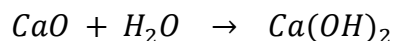
In questo paragrafo si intende caratterizzare i due leganti idraulici universalmente impiegati nelle stabilizzazioni del terreno, ovvero: la calce ed il cemento. Gli aspetti di maggior interesse, ai fini di questo elaborato, sono quelli connessi alle reazioni chimiche che si generano tra legante e particelle di terra, ai legami che si instaurano e alle conseguenti prestazioni meccaniche ottenibili.

### ➤ La calce

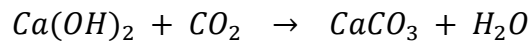
La calce è uno dei primi leganti, conosciuto dall'uomo. Essa si ottiene calcinando (riduzione ad alta temperatura) le rocce carbonatiche praticamente pure (con residui argillosi < 5%) a temperature superiori a 1000°C. Il carbonato di calcio (o di calcio e magnesio), infatti, per effetto della temperatura a cui è sottoposto, perde anidride carbonica ( $CO_2$ ), trasformandosi in ossido di calcio (calce viva), secondo la seguente reazione:



La calce così prodotta può essere messa in commercio come calce viva in zolle, ma per essere utilizzata come legante deve subire il cosiddetto processo di spegnimento, con il quale si mette a contatto il prodotto con l'acqua per formare idrato di calcio (calce spenta) secondo la seguente reazione:



Si ottiene così una polvere bianca e asciutta che prende il nome di calce idrata. Se lo spegnimento avviene con un quantitativo di acqua eccessivo rispetto a quello stechiometrico strettamente necessario, si ottiene una pasta morbida e gelatinosa, che prende il nome di grassello. La calce al contatto con l'anidride carbonica contenuta nell'aria si trasforma di nuovo in carbonato di calcio (carbonatazione) e, trasformandosi, lega tutti i materiali granulari con cui è stata messa a contatto (sabbia, laterizi, pietre, ecc.):



In queste condizioni è necessario un continuo apporto di anidride carbonica, che si diffonde attraverso l'acqua d'impasto, da cui il nome calce aerea. L'acqua d'impasto non scompare, anzi, con il procedere della reazione, si forma altra acqua, che deve poi evaporare per ottenere l'indurimento. Questa è la tipologia di legante comunemente utilizzato per stabilizzare i terreni.

Il trattamento a calce consiste nella miscelazione intima di una terra con calce e acqua in quantità tali da modificare, attraverso reazioni chimico-fisiche, le sue caratteristiche di lavorabilità e resistenza meccanica in opera. L'aggiunta di calce, sotto forma di calce viva macinata  $CaO$  o di calce idrata in polvere  $Ca(OH)_2$ , a un terreno limo-argilloso anche molto plastico produce effetti a breve termine (effetto bonifica) ed effetti a medio e lungo termine (effetto stabilizzazione). Di solito la percentuale di calce che si aggiunge a un terreno varia dal 3% al 6%.

Alla base dell'effetto stabilizzante ci sono i seguenti fenomeni chimico-fisici:

- Idratazione della calce: la calce aerea a contatto con l'acqua si trasforma in calce idrata, secondo la reazione precedentemente esposta. Tale reazione è fortemente esotermica e pertanto la tendenza all'idratazione e la contemporanea evaporazione, provocano riduzioni sensibili del contenuto d'acqua del materiale trattato;
- Scambio ionico tra i componenti: la presenza in soluzione acquosa di grosse quantità di ioni calcio provenienti dalla dissociazione della calce consente un processo di trasferimento di cationi di  $Ca^{2+}$  nelle posizioni occupate dagli ioni positivi ( $H^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ , ecc.) che a loro volta passano in soluzione;
- Reazione pozzolanica: con tale termine si intende la formazione di composti stabili, essenzialmente silico-alluminati di calcio idrati, che posseggono forti proprietà leganti. Tali prodotti risultano essere molto simili a quelli che si formano dall'idratazione del cemento.

Dalla reazione calce-argilla si ottengono i seguenti effetti immediati:

- Riduzione del contenuto d'acqua di un terreno se si utilizza calce viva;

- Cambiamento dei limiti di Atterberg con marcata diminuzione dell'indice di plasticità; In tal modo la miscela mantiene lo stato solido per valori di umidità sensibilmente maggiori rispetto a quelli che rendono plastica la terra non trattata (Fig. 2.6);
- Modifica della distribuzione granulometrica per effetto della flocculazione legata allo scambio ionico: si riduce in tal modo il contenuto di particelle fini con capacità leganti;
- Appiattimento della curva Proctor ed innalzamento dell'optimum d'acqua (Fig. 2.7) a causa della natura mutata del terreno. Questi due fattori consentono maggiori margini di lavorabilità del terreno nelle fasi esecutive;
- Riduzione del rigonfiamento e del ritiro a causa della diminuzione di affinità all'acqua dei materiali trattati e della formazione di legami stabili che si oppongono ai cambiamenti di volume;
- Aumento del valore CBR con conseguente aumento della portanza.

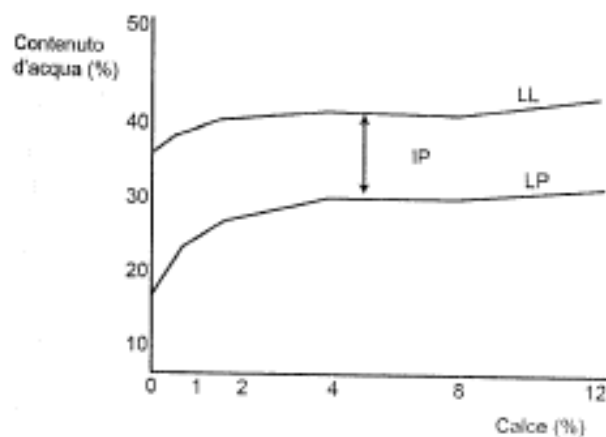


Fig. 2.6 – Effetto immediato: diminuzione indice plastico

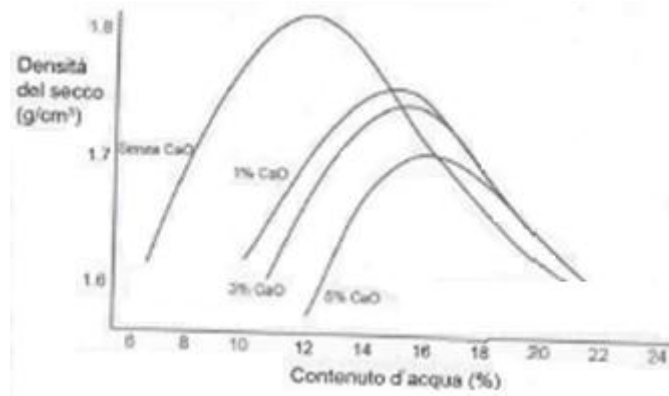


Fig. 2.7 – Effetto immediato: appiattimento curva Proctor e innalzamento optimum d'acqua

Gli effetti a lungo termine possono essere così sintetizzati:

- Incrementi sensibili della resistenza a taglio;
- Aumento considerevole del modulo di elasticità;
- Incrementi significativi della resistenza a fatica.

Complessivamente la struttura dei minerali diventa molto più compatta nel suo insieme e si possono osservare cambiamenti profondi nella curva sforzo-deformazione del materiale trattato. A scopo esemplificativo si riporta l'andamento della resistenza a compressione nel tempo per un terreno argilloso trattato a calce (Fig. 2.8).

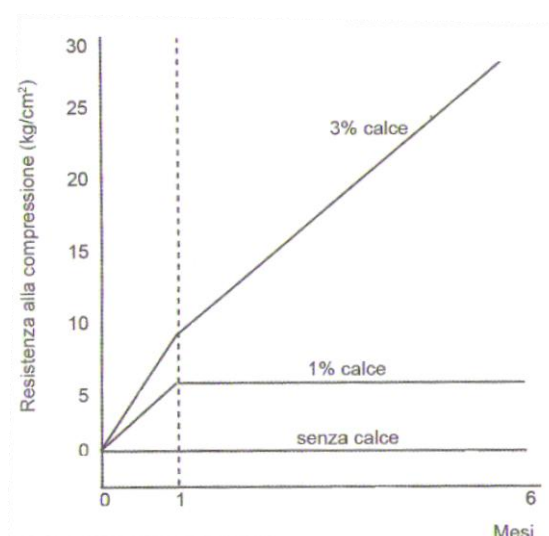


Fig. 2.8 – Resistenza a compressione di terreni trattati a calce

Sono idonee al trattamento con calce le terre fini plastiche limo-argillose dei gruppi  $A_6$  e  $A_7$  con valori di indice plastico maggiori di 10. Anche le ghiaie limo-argillose identificabili come  $A_{2-6}$  e  $A_{2-7}$  sono stabilizzabili con calce, purché di idonea granulometria. Nel caso di terre appartenenti ai gruppi  $A_4$  e  $A_5$  la calce può essere utilizzata principalmente per ridurre l'umidità del terreno naturale. Anche la scelta del tipo di calce da utilizzare dipende dalle caratteristiche del terreno, normalmente in presenza di terre molto argillose e umide si utilizza calce viva, in quanto la reazione fortemente esotermica che induce consente una maggior riduzione dell'umidità. Al contrario in terreni con tenori di umidità ridotti viene usualmente utilizzata la calce idrata.

➤ Il cemento

Il cemento è un legante idraulico sotto forma di polvere finissima, con dimensioni dei grani comprese tra 1 e 50  $\mu\text{m}$ . La Comunità Europea ha unificato le norme per la classificazione del cemento in tutti i paesi dell'Unione, concentrando l'attenzione su due requisiti fondamentali: il tipo e la classe di resistenza (UNI EN 197-1, 2006). I cementi sono suddivisi in 5 tipi fondamentali, contrassegnati da numeri romani e suddivisi ulteriormente in 25 sottotipi, in base alla qualità e alla quantità di sostanze aggiunte (pozzolana, loppa d'altoforno, ceneri volanti, ecc.). Ogni tipo, a sua volta può essere suddiviso in 6 classi di resistenza. Sarebbero teoricamente possibili, pertanto, 150 tipi di cemento diversi. Tuttavia non tutti i paesi producono tutti i tipi di cemento, sia perché non dispongono geograficamente di certi ingredienti, sia perché privi di una tradizione industriale che permetta di produrle ed impiegarne determinati tipi.

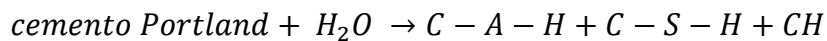
In questa trattazione con il termine "cemento" si indicherà sempre il *cemento Portland*, ovvero la tipologia maggiormente diffusa ed impiegata. Tale cemento si ottiene, per almeno il 95%, dalla macinazione del *clinker*, minerale tipicamente composto dai seguenti ossidi:

- 67%  $\text{CaO}$  [C]
- 22%  $\text{SiO}_2$  [S]
- 5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [A]
- 3%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [F]

- 3% altri componenti minori.

Tra parentesi quadra è stato indicato per ciascun composto la lettera con cui, per semplicità, viene normalmente indicato nelle reazioni chimiche riguardanti il cemento. A quelli menzionati va aggiunta l'  $H_2O$ , indicata normalmente con [H].

Gli alluminati ed i silicati del clinker, quando vengono a contatto con l'acqua, si idratano formando prodotti stabili con una reazione esotermica. Idratandosi, gli alluminati, che hanno una velocità di reazione più elevata, contribuiscono al fenomeno della presa, mentre i silicati, più lenti, a quello dell'indurimento. Schematizzando, l'idratazione del cemento può essere rappresentata con la seguente relazione:



Con la formazione sostanzialmente di tre prodotti: C-A-H per idratazione degli alluminati ( $C_3A$  e  $C_4AF$ ), C-S-H per idratazione dei silicati ( $C_3S$  e  $C_2S$ ) e CH, cioè  $Ca(OH)_2$ , ovvero calce. In tale formula in realtà solo il termine CH indica un prodotto chimico ben definito. I termini C-A-H e C-S-H sono degli acronimi, rispettivamente di *calcium aluminate hydrate* e *calcium silicate hydrate*, e non formule chimiche.

Dal punto di vista della stabilizzazione del terreno la stessa azione svolta dalla calce può essere ottenuta anche con il cemento, ma l'interesse della stabilizzazione a cemento va oltre. Con queste miscele, infatti, si verifica un vero e proprio fenomeno di presa che produce resistenze meccaniche notevoli. L'aggiunta del legante idraulico a una terra, a prevalente composizione sabbio-limosa, comporta infatti il miglioramento rapido delle caratteristiche geotecniche della terra stessa: riduzione della sensibilità all'azione dell'acqua, aumento della coesione e riduzione della compressibilità, con conseguente incremento della resistenza al taglio e della capacità portante. Le caratteristiche della miscela di terra e cemento dipendono dalla tipologia di terra trattata, dal quantitativo di cemento e dal grado di umidità della terra.

A questo proposito è bene fare chiarezza tra due trattamenti utilizzati spesso nell'ingegneria dei trasporti, ma con finalità diverse: l'utilizzo di cemento per stabilizzare una terra, non idonea a costituire uno strato di una sovrastruttura, ed il trattamento di un misto granulare, che si vuole rendere idoneo a sopportare sollecitazioni elevate. Nel primo caso, quello che costituisce l'oggetto di questo elaborato, si tratta di stabilizzare una terra

in sito, al fine di trasformare in idoneo un materiale altrimenti destinato allo scarto, in tal caso si parla di “*miscela terra-cemento*”. Nel secondo caso, invece, si tratta di creare strati portanti per fungere da fondazione a sovrastrutture caratterizzate da carichi di traffico intenso e pesante, in tal caso si parla di “*misto cementato*”.

I fattori che influenzano le caratteristiche della miscela terra-cemento sono:

- Il contenuto di cemento;
- Il costipamento;
- Il corretto sviluppo della presa;
- La maturazione della miscela.

Il trattamento a cemento è dunque previsto per terre a prevalente composizione sabbioso-limosa, nell’ambito di preparazione dei piani di posa e del corpo dei rilevati. Come esempi di applicazione si possono citare:

- terreni prevalentemente limosi che (con percentuali di cemento superiori al 10%) possono formare sottofondi insensibili all’acqua e al gelo;
- miglioramento di materiali eccessivamente poveri di fino e con frazioni sabbiose abbondanti, di cui risulta molto difficile il costipamento (percentuali di cemento dal 2% al 4%);
- misti granulari con forte plasticità ( $I_p = 10 - 15$ ) che, con un tenore di cemento del 4-5%, possono acquisire buona rigidità;

Risulta invece difficile stabilizzare terre che abbiano un  $I_p > 15$ , ricche cioè di frazione argillosa. In tali casi le particelle fini risultano circondate dalle molecole d’acqua che, di fatto tendono a respingersi reciprocamente, impedendo la flocculazione. Occorre pertanto eliminare parte dell’acqua d’idratazione, in modo che le particelle riescano, almeno in parte, a legarsi tra loro formando una struttura simile a quella delle terre granulari. Per questi motivi nel caso di terreni plastici si è soliti eseguire prima la stabilizzazione con il trattamento a calce e successivamente la miscelazione con cemento.



### 2.1.3 La compattazione del terreno

La compattazione è un'operazione volta a migliorare le caratteristiche di una terra. Tale operazione permette di diminuire i vuoti, di modificare in modo permanente la disposizione dei grani e, conseguentemente, di aumentare l'addensamento del terreno stesso. In seguito a queste modifiche i materiali divengono meno deformabili e più stabili, meno compressibili, meno sensibili all'acqua e più impermeabili.

Quando un materiale granulare è accumulato in una zona di stoccaggio contiene una percentuale di vuoti nettamente maggiore a quella naturale e, di conseguenza, ha un peso di volume molto inferiore: 1 m<sup>3</sup> di sabbia o ghiaia naturale occupa uno spazio di circa 1,2-1,3 m<sup>3</sup> nel cassone di un autocarro e occupa uno spazio ancora maggiore quando viene scaricato per le lavorazioni. Questo fenomeno è da considerarsi con attenzione nelle lavorazioni riguardanti i movimenti di terra, in quanto il volume di terreno dopo lo scavo tende ad aumentare naturalmente, poiché aumenta la percentuale di vuoti, diminuendo la compattezza del materiale. Di seguito si riportano (Tab. 2.1) le variazioni tipiche di volume dei terreni dopo lo scavo.

Tipo di terreno in condizioni naturali (1 m <sup>3</sup> )	Volume dopo lo scavo [m <sup>3</sup> ]
Terreno vegetale sciolto	1,1
Sabbia	1,05
Ghiaia	1,15
Argilla	1,25 – 1,40
Marna compatta	1,40 – 1,60
Roccia dura	1,40 – 1,60

Tab. 2.1 – Aumento di volume dopo lo scavo

Risulta fondamentale chiarire la differenza tra compattazione e consolidazione, in quanto sono due fenomeni totalmente diversi. La compattazione è quel fenomeno, ottenuto mediante un procedimento meccanico, mediante il quale le particelle costituenti lo scheletro del terreno vengono avvicinate le une alle altre, con conseguente riduzione dei vuoti riempiti d'aria ed il sostanziale mantenimento dei volumi di frazione solida e liquida, con un generale incremento della densità della terra.

Per consolidazione si intende, invece, il processo di graduale fuoriuscita di acqua dal terreno per aumento della pressione interstiziale, con un conseguente trasferimento del carico portato dalla parte fluida allo scheletro solido del terreno. In tal caso si ha una riduzione del volume del terreno proporzionale alla fuoriuscita di acqua.

Eseguendo prove di compattazione su una determinata terra, si nota che il suo peso di volume, espresso generalmente come peso di volume secco  $\gamma_d$ , varia al variare dell'energia impiegata nella compattazione e, a parità di energia utilizzata, al variare del contenuto d'acqua  $w$ . L'esperienza mostra che il diagramma  $(w, \gamma_d)$  ha un andamento a campana, il cui il valore massimo di densità si ottiene per una determinata percentuale d'acqua, chiamata umidità ottima  $w_{opt}$  (Fig. 2.9). A parità di energia di compattazione, quando il contenuto d'acqua è molto basso si generano pressioni nei pori negative che tendono a mantenere i granuli molto vicini tra loro ostacolando la compattazione. La maggior presenza di acqua in tal senso crea una sorta di sottile pellicola tra i granuli, lubrificandoli, e rendendo più agevole ed efficace la compattazione. Al crescere dell'umidità, superando il valore  $w_{opt}$ , la presenza di acqua risulta ostacolare la compattazione, impedendo di ottenere la massima densità possibile.

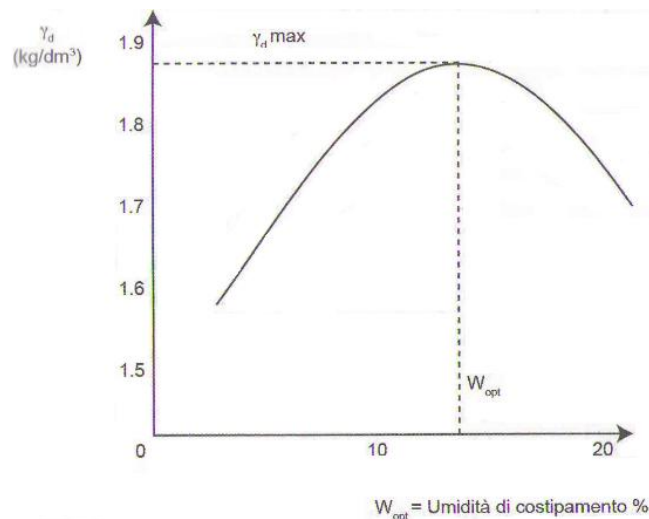


Fig. 2.9 – Diagramma prova di compattazione

Per valutare la compattazione di una terra si utilizza la prova Proctor, messa a punto negli anni '30 dall'ingegnere americano R.R. Proctor. In realtà tale prova è stata poi modificata dall'*U.S. Army Corps of Engineers*, variandone solo il livello energetico utilizzato, ed è stata standardizzata dalla AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) con il nome di: "prova Proctor modificata" o AASHTO T-180-61. Fondamentalmente le prove di compattazione hanno lo scopo di determinare l'umidità ottima e la massima densità ottenibile compattando una terra. Di seguito si riporta l'andamento qualitativo ottenibile con una serie di prove Proctor modificate per diverse energie di costipamento (Fig. 2.10).

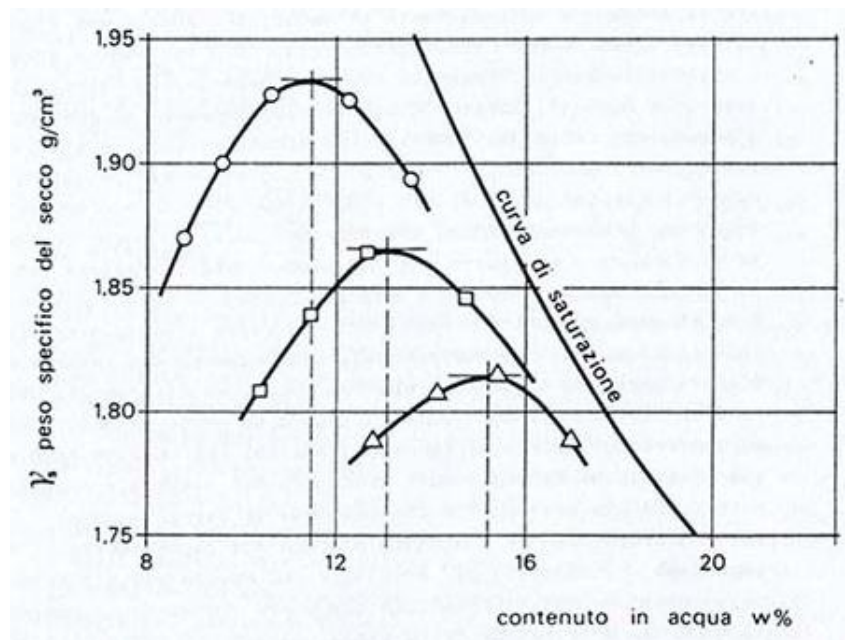


Fig. 2.10 – Curve  $(w, \gamma_d)$  al variare dell'energia di costipamento

Si può notare che, al crescere dell'energia impiegata nella compattazione:

- Tutti i punti della curva di costipamento si innalzano, non oltrepassando mai la linea di saturazione. Tuttavia l'innalzamento, ossia l'aumento di densità, non risulta proporzionale all'aumento di energia impiegata;

- Il punto di massima densità innalzandosi si avvicina all'asse delle ordinate. Se si vuole ottenere la massima densità, aumentando l'energia di compattazione, si deve ridurre l'umidità.

Ovviamente la forma della curva a campana dipende dal tipo di terra compattata. Tanto più la terra sarà granulometricamente ben assortita, tanto più la curva risulterà convessa. All'aumentare del tenore di particelle fini ed argilla, la curva risulterà sempre più appiattita. Pertanto agli stessi valori di densità secca non corrispondono in terre diverse gli stessi gradi di indeformabilità; quindi il valore di densità secca non può essere indicativo del grado di indeformabilità, se non associato alla conoscenza della terra che si deve trattare.

Una volta definita, per una specifica terra, la massima densità raggiungibile con la compattazione e il corrispettivo contenuto ottimale di acqua, si potranno effettuare richieste in termini di compattazione da ottenere in cantiere. Normalmente si richiede che la compattazione raggiunga un valore prossimo al massimo (ad esempio: 90-95%) relativamente alla prova di riferimento eseguita con una determinata energia.

Dal punto di vista pratico, in cantiere, la compattazione si ottiene mediante l'utilizzo di rulli. La pressione statica, l'impatto e le vibrazioni, sono i principali fattori che intervengono nel costipamento. Di conseguenza per la scelta del macchinario adatto è necessario valutare la granulometria del terreno, il contenuto d'acqua e lo spessore dello strato da compattare. I rulli vengono caratterizzati dai seguenti parametri:

- Tipo di azione compattante: statica e/o dinamica;
- Peso statico, che è direttamente connesso con la capacità di compattazione;
- Carico statico lineare: è il peso della macchina nel suo complesso, comprensivo di operatore e carburante, diviso per la sua lunghezza;
- Larghezza del tamburo, con cui si determina l'ampiezza della superficie trattata;
- Articolazione tra parte motrice e rullo, da cui discende il raggio minimo di sterzata;
- Velocità di avanzamento, che è normalmente bassa per ottimizzare l'effetto costipante.

Le macchine utilizzabili possono sostanzialmente dividersi in due gruppi:

- Macchine ad azione statica, agenti per compressione e frantumazione;

- Macchine ad azione dinamica, caratterizzate da un peso che viene lasciato cadere ripetutamente sulla superficie, a brevi intervalli di tempo, sfruttando così la combinazione di carico vibrante e statico.

A tal proposito risulta utile chiarire le differenze tra macchine ad azione statica e ad azione dinamica.

➤ Macchine ad azione statica

L'effetto delle macchine ad azione statica è dovuto all'avvicinamento ed al reciproco scorrimento dei clasti prodotto prevalentemente dall'azione di compressione verticale delle ruote e si può variare aumentando o diminuendo la massa (aggiungendo zavorre) o modificando la superficie di contatto (variando la pressione degli pneumatici nei rulli gommati). Generalmente i rulli statici hanno un effetto compattante limitato, fino a profondità non superiori ai 20 cm. Principalmente ci sono due tipologie di macchine statiche: rulli con ruote metalliche o ruote gommate lisce (Fig.2.11) e rulli a punte o piede di montone (Fig.2.12). Nel primo caso l'efficienza della compattazione dipende principalmente dal carico statico lineare. Nel secondo caso, invece, si ha una vera e propria azione di punzonamento locale del terreno, mediante opportuni risalti che creano notevoli azioni di taglio, oltre che di compressione. Sotto questo tipo di rulli, grazie alle modeste dimensioni delle superfici di contatto delle punte con il terreno, si sviluppano azioni di elevata compressione e, a causa del notevole rapporto perimetro/area della superficie d'appoggio di ciascun puntone, si creano diffuse e forti azioni di taglio in grado di vincere le forze coesive dello strato.



Fig. 2.11 – Rullo gommato



Fig. 2.12 – Rullo a punte

➤ Macchine ad azione dinamica

Le macchine ad azione dinamica (Fig. 2.15) sono dotate di dispositivi formati da coppie di alberi ruotanti in senso opposto. Su ciascuno di questi alberi è montata una massa eccentrica che genera delle forze centrifughe in cui la componente orizzontale è assorbita dal telaio e le componenti verticali si sommano (Fig. 2.13).

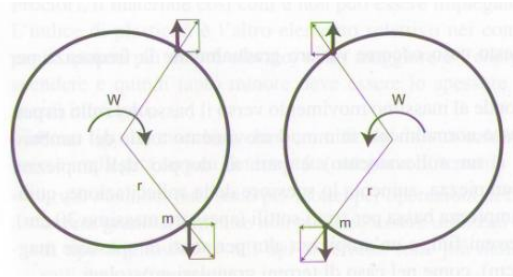


Fig. 2.13 – Schema delle masse ruotanti

La macchina, grazie al suo peso e all'effetto delle masse vibranti, esercita sul materiale da compattare una forza di determinata frequenza, variabile istante per istante. Ne consegue che le forze di contatto intergranulari sono, a loro volta, continuamente variabili. Quindi si avranno condizioni nelle quali risulteranno privilegiate le componenti trasversali ( $T$ ) rispetto a quelle normali ( $N$ ) (Fig. 2.14). Pertanto, sotto il carico istantaneo variabile, inizia l'assestamento di quei granuli per i quali si verificano le condizioni di scorrimento, cioè:

$$T > N \cdot tg\varphi$$

Segue poi lo spostamento di tutti gli altri granuli a seguito dello squilibrio provocato dall'assestamento dei primi granuli in movimento.

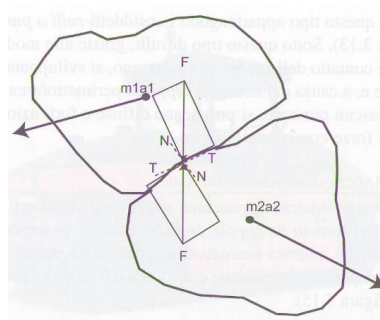


Fig. 2.14 – Forze presenti tra granuli a contatto

I due fattori che influiscono sulle caratteristiche del costipamento sono:

- 1) La frequenza [Hz]: rappresenta il numero di volte che il tamburo colpisce la superficie da compattare nell'unità di tempo. La compattazione aumenta all'aumentare della frequenza. Nelle fasi finali, tuttavia, quando il terreno, già quasi completamente compattato, risulta addensato ed elastico, il rullo tende a rimbalzare sul terreno stesso, con conseguente diminuzione dell'effetto compattante. In tal caso occorre variare la frequenza per ridurre tale effetto.
- 2) L'ampiezza [mm]: corrisponde al massimo sollevamento verso il basso del rullo rispetto al suo asse. Il movimento totale del tamburo, pertanto, è pari al doppio dell'ampiezza. All'aumentare dell'ampiezza aumenta lo spessore della sollecitazione, quindi è preferibile un'ampiezza bassa per strati sottili (profondità < 30 cm), come nel caso dei terreni fini, e un'ampiezza maggiore nel caso di spessori maggiori (limitati comunque al più a 50 cm), come nel caso di terreni granulari grossolani.



Fig. 2.15 – Rullo monotamburo dinamico 15t

A questo punto resta solo da chiarire quale tipologia di rullo e con che impiego risulti preferibile adottare in base alle caratteristiche del terreno da compattare.

Per terreni incoerenti a grana grossa (ghiaia, pietrischi, ecc.) il mezzo costipante più efficace è costituito dai rulli vibranti, con peso e potenza commisurati allo spessore dello strato da compattare (solitamente al più 50 cm). Con rulli lisci lo spessore dello strato sciolto non deve superare i 20 cm. Per terre fini ( $A_4, A_5, A_6, A_7$ ) il mezzo più idoneo è il rullo statico a punte, perché lo spostamento e l'avvicinamento dei granuli può essere ottenuto solamente applicando apprezzabili valori di forze di taglio. In questo caso gli elementi fondamentali per determinare il peso del mezzo da impiegare sono: il contenuto d'acqua del terreno ed il suo indice di plasticità. Quanto più il contenuto d'acqua è modesto, tanto più è difficile il costipamento e quindi maggiore deve risultare l'energia spesa. Le condizioni in cui il contenuto d'acqua è prossimo all'ottimale consentono la miglior compattazione possibile, tuttavia se il contenuto d'acqua aumenta ulteriormente approssimandosi alla saturazione, la compattazione del materiale diventa instabile. In tali casi, se risulta possibile, è preferibile aerare il terreno, sfruttando la naturale evaporazione per ridurre il tenore d'acqua presente. L'indice di plasticità è un altro elemento selettivo nei confronti dei mezzi costipanti: quanto più esso è elevato, tanto maggiore è l'energia di costipamento da spendere e quindi tanto minore deve essere lo spessore degli strati a parità di mezzi impiegati.

Sintetizzando è possibile dire che ogni tipologia di rullo risulta più idonea su terreni con determinate caratteristiche:

- I rulli metallici lisci sono più idonei per operazioni di finitura su terreni granulari, mentre risultano inadatti su terreni di tipo argilloso. In tali circostanze sono preferibili rulli dotati di punte.
- I rulli vibranti consentono di aumentare il grado di compattazione e la profondità della zona compattata, ma è idoneo il loro utilizzo solo su terreni granulari privi di coesione, in quanto l'effetto impastante dell'argilla fa da collante e rende nullo, o quasi, l'effetto benefico delle vibrazioni delle forze di contatto ( $T$  ed  $N$ ) tra i granuli.

Anche le velocità di avanzamento dei rulli influiscono sulla compattazione. Da un punto di vista generale si ha che minore è la velocità di applicazione del carico e maggiore risulta la capacità di compattazione, tuttavia nella pratica la compattazione deve avvenire in tempi economicamente accettabili, pertanto si utilizzano per la compattazione delle terre velocità operative dell'ordine di 4-6 km/h.



## 2.2 Le fasi esecutive e la tempistica

Da punto di vista esecutivo, le lavorazioni di stabilizzazione di un terreno con legante idraulico sono, di norma, precedute da una serie di operazioni preliminari. Queste operazioni possono essere così sintetizzate:

- Identificazione del terreno e verifica di trattabilità con legante idraulico;
- Studio della miscela di legante da utilizzare;
- Realizzazione di un campo prove;
- Scelta della miscela più opportuna.

Queste operazioni costituiscono un'analisi sperimentale in vera grandezza che ha come compito, oltre a quello di definire la miscela ottimale, di ricercare le migliori soluzioni tecnologiche possibili per determinare, mediante la predisposizione di diversi schemi di rullatura, la combinazione ottimale e più economica relativa ai mezzi. Si devono sostanzialmente definire la scelta dei mezzi, del numero di passate e delle velocità di avanzamento per ottenere il grado di addensamento richiesto. Questa fase preliminare si conclude con la determinazione di un progetto esecutivo d'intervento che, stabilisce le prescrizioni operative ed i risultati attesi, che dovranno poi essere verificati sperimentalmente durante l'esecuzione. Infine sarebbe opportuno prevedere la possibilità che si evidenziassero comportamenti anomali in fase realizzativa, dovuti alla presenza di materiali suscettibili di creare problemi, e definendo in tal caso le strategie d'intervento opportune.

Conclusa la fase preliminare e definite sia la miscela che la modalità di trattamento, si passa alla fase esecutiva vera e propria. Il trattamento prevede le seguenti fasi operative:

- Scotico dello strato vegetale;
- Scarifica del terreno;
- Frantumazione delle zolle;
- Eventuale apporto d'acqua;
- Spandimento del legante;
- Miscelazione;

- Compattazione.

La fase di scotico del substrato vegetale, che solitamente occupa uno spessore compreso tra i 15 e i 30 cm, risulta necessaria per mettere in luce il terreno da trattare. Questa operazione normalmente viene eseguita con mezzi in grado di scavare e movimentare il materiale (*dozer o scrapers*). Il vegetale così scavato viene stoccato in aree dedicate e utilizzato, almeno in parte, per opere di finitura al termine delle lavorazioni di stabilizzazione del terreno e realizzazione della sovrastruttura.

La scarifica del terreno avviene con appositi aratri o con l'utilizzo dei *rippers* montati sulla parte posteriore dei dozer. Risulta fondamentale riuscire a dissodare tutto lo spessore che dovrà poi essere trattato con il legante. Questa operazione facilita quella che sarà poi la miscelazione del legante con il terreno in sito, in quanto riduce notevolmente la coesione e la compattezza del terreno presente.

La frantumazione delle zolle avviene con opportune *frese*. La sua funzione è quella di rendere la superficie regolare prima dello spandimento del legante. A questa operazione viene spesso affiancata quella di livellazione del terreno, eseguita solitamente con *grader*, con cui si impostano le pendenze longitudinali e trasversali che, il piano di fondazione della sovrastruttura o il terreno in generale, deve garantire.

L'apporto d'acqua in sito avviene mediante l'utilizzo di *cisterne*. La finalità di questa fase è di garantire un tenore di umidità il più prossimo possibile a quello ottimale  $w_{opt}$  definito con la prova Proctor. Questa operazione avviene ovviamente solo nei casi in cui l'umidità del terreno risulti inferiore al valore ottimale, che consente di raggiungere il massimo valore (teorico) di densità del terreno.

Lo spandimento del legante si esegue mediante apposite macchine *spanditrici*. Questa lavorazione deve essere eseguita esclusivamente sulla porzione di terreno da trattare entro la giornata lavorativa. I macchinari sono dotati di un sistema a coclea di rilascio del legante correlato alla velocità di avanzamento, in modo tale da garantire il rilascio omogeneo della percentuale di legante prevista nel progetto esecutivo, pur variando la velocità d'azione della spandilegante.

La miscelazione viene eseguita mediante macchine ad albero orizzontale rotante (*pulvimixer*), che permettono una miscelazione omogenea del terreno e del legante su

tutto lo spessore da trattare. È fondamentale garantire un sufficiente sbriciolamento della terra, sino ad ottenere una colorazione uniforme, con zolle di dimensione massima dell'ordine dei 4-5 cm.

Infine si esegue la compattazione con l'utilizzo di *rulli*. La tipologia di macchinario ed il numero di passate devono risultare conformi con quanto previsto nel progetto esecutivo, in modo tale da garantire le prestazioni meccaniche attese.

Dato che le reazioni chimiche-fisiche proprie dei trattamenti con leganti idraulici avvengono in soluzione acquosa, vi è l'esigenza di ottenere un elevato livello di diffusione delle particelle di legante e di acqua nel materiale da stabilizzare e un intimo contatto tra queste. Condizioni essenziali per ottenere un buon risultato sono quindi un'adeguata polverizzazione della terra, un'intima e omogenea miscelazione del legante e un valore di umidità prossima a quella ottimale della miscela di progetto.

Le operazioni citate avvengono cronologicamente nell'ordine in cui sono state descritte. La durata di ogni singola fase è diretta conseguenza del numero e della produttività dei mezzi impiegati per svolgerla. Di questo e delle caratteristiche proprie dei macchinari si tratterà in maniera diffusa nei prossimi capitoli. Tuttavia è opportuno sottolineare che le operazioni di spandimento del legante, correzione del tenore d'acqua e miscelazione, devono obbligatoriamente svolgersi nell'ambito della stessa giornata lavorativa, altrimenti si vanifica l'interazione tra legante e terreno, indispensabile per ottenere una corretta stabilizzazione.

## 2.3 Le prestazioni meccaniche attese

Nei paragrafi precedenti sono stati definiti gli effetti della miscelazione di un terreno con un legante idraulico in termini di variazione di proprietà meccaniche (resistenza a compressione, resistenza al taglio, moduli elastici, ecc.). Sono state poi definite le caratteristiche legate alla compattazione di un terreno, sia mediante prove sperimentali che durante la realizzazione in sito. Per concludere l'analisi teorica degli effetti della stabilizzazione a leganti idraulici di un terreno resta da definire quale sia il miglioramento ottenibile, grazie a tale procedura, in termini di prestazioni meccaniche, del terreno stesso. In sostanza si dovrà valutare la variazione di capacità portante indotta.

Solitamente si parla di capacità portante in maniera univoca, sebbene la sua definizione sia strettamente legata al campo di applicazione a cui ci si riferisce. Ad esempio in ambito geotecnico la portanza è definita come: il livello di sforzo al quale la deformazione complessiva raggiunge un valore limite. In tale contesto si suppone che esistano condizioni di carico molto lunghe e che le deformazioni recuperabili siano quasi trascurabili rispetto a quelle permanenti. Nell'ambito delle infrastrutture di trasporto, invece, i carichi sono più che altro di natura dinamica (al di là del peso proprio dell'infrastruttura), pertanto la definizione di capacità portante diventa: l'attitudine di uno strato a sopportare un certo numero di cicli di carico, trasmessi alla sovrastruttura, senza subire deformazioni tali da comprometterne la funzionalità. Quando però si tratta di definire quantitativamente la portanza sorgono notevoli problemi, in quanto a priori risulta estremamente difficile conoscere il numero di cicli di carico, la loro entità, la loro successione nel tempo, le modalità di trasmissione del carico e le deformazioni ammissibili. Per risolvere tali problematiche si è passati da una definizione univoca di portanza ad una legata alla modalità di misurazione, cioè: la portanza è quel valore di carico che produce prefissati cedimenti per determinate modalità di prova.

Inizialmente si è fatto ricorso unicamente a prove empiriche (classificazione del terreno, CBR, ecc.) i cui risultati venivano correlati alle prestazioni meccaniche grazie a rilevamenti statistici del comportamento di sovrastrutture esistenti. Attualmente però si stanno diffondendo metodi razionali, il più diffuso dei quali è il "multistrato elastico", nei quali la

sovrastuttura è schematizzata come una successione di strati sovrapposti di spessore noto, ciascuno dei quali è caratterizzato da parametri elastici (modulo elastico  $E$ , coefficiente di Poisson  $\nu$ ) rappresentativi delle proprietà meccaniche dei materiali che lo costituiscono, compreso il sottofondo. Pertanto a quest'ultimo sono assegnati valori di portanza derivati dalla teoria dell'elasticità. Per simulare poi il comportamento elasto-plasto-viscoso del sottofondo, cioè la minor influenza dei carichi mobili rispetto a quelli statici nel produrre deformazioni, si utilizza in modulo elastico dinamico.

Dal punto di vista operativo, pertanto, sono attualmente disponibili molti metodi per valutare la portanza di uno strato (Tab. 2.2).

Parametri statici		Parametri dinamici
Empirici	Razionali	
Indice <i>CBR</i>	Modulo elastico statico $E_{st}$	Modulo resiliente $M_r$
Modulo di deformazione $M_d$	Modulo di reazione $K$	Modulo elastico dinamico $E_{din}$

Tab. 2.2 – Metodi per la valutazione della portanza

Attualmente i metodi più utilizzati, sebbene non forniscano un indicazione fisica del comportamento del terreno in sito soggetto al carico di progetto, sono quelli empirici; questo fatto è dovuto soprattutto alla semplicità di determinazione dei valori, alla familiarità degli indici corrispondenti e all'enorme quantità di studi disponibili in letteratura a riguardo.

Il valore di *CBR* (*California Bearing Ratio*) si ottiene direttamente con una prova di laboratorio eseguito su un provino di terreno confezionato con il compattatore Proctor. Per quanto riguarda il modulo di deformazione  $M_d$ , si ottiene direttamente eseguendo in sito una prova di carico su piastra. Per determinare i valori dei moduli, indispensabili ai fini dell'analisi razionale, si utilizzano prove deflettometriche, utilizzando ad esempio la FWD (*Falling Weight Deflectometer*). Mentre il modulo resiliente  $M_r$  viene determinato con la ripetizione di un impulso assiale di compressione su un campione cilindrico in cella triassiale a pressione isotropa costante.

Sebbene dal punto di vista teorico questi indici non siano direttamente confrontabili, in quanto afferenti a proprietà fisiche diverse, la pratica ha prodotto delle espressioni di

correlazioni tra i vari indici sopracitati, in modo da rendere confrontabili i valori di portanza ottenuti.

Per fornire un ordine di grandezza dei valori citati, si riportano nella tabella sottostante (Tab. 2.3), i valori di portanza di un sottofondo da sovrastruttura stradale, secondo il catalogo delle pavimentazioni CNR.

Classe	CBR [%]	$M_d$ [MPa]	$M_r$ [MPa]
Scadente	0 - 3	15	30
Scarsa	4 - 7	25	50
Media	8 - 20	75	150
Buona	21 - 50	175	350
Eccellente	> 50	250	500

Tab. 2.3 – Classi di portanza sottofondo (CNR)

Una volta determinata la portanza di un terreno in sito si può valutare, qualora sia insufficiente che tipologia di intervento attuare. Nel caso si opti per una stabilizzazione a legante idraulico ovviamente l'incremento di portanza dipenderà principalmente da:

- Tipologia di legante;
- Umidità in sito;
- Quantità di legante impiegato in percentuale rispetto al terreno;
- Profondità dello strato trattato;
- Compattazione effettuata.

La scelta di questi parametri dipenderà dalla capacità portante che si intende realizzare.

Nel caso oggetto di studio, che verrà presentato in maniera completa nei prossimi capitoli, il terreno in sito allo stato naturale presenta un valore di modulo di deformazione  $M_d$  pari mediamente a 6-8 MPa. Con i valori di carico previsti e noti i cedimenti ammissibili, si è verificato che tale valore risulta insufficiente. Per ovviare al problema si è optato per stabilizzare una strato di 20 cm di terreno mediante l'impiego di cemento in percentuale pari ad 1,5%. Grazie a questo intervento è stato possibile incrementare la portanza del terreno, misurata all'estradosso dello strato stabilizzato, fino a portarla ai valori riportati di seguito (Tab. 2.4). Come si può notare la portanza, espressa in termini di modulo di deformazione, aumenta contestualmente alla presa del legante che avviene nel tempo. Un

fatto importante da notare è che la prescrizione finale richiede un limite superiore di portanza. Questa prescrizione è una delle principali motivazioni che ha spinto i progettisti ad optare per la stabilizzazione a cemento del terreno, infatti regolando la percentuale di legante in relazione all'umidità presente in sito e allo spessore dello strato e prescrivendo un valore di compattazione idoneo è possibile ottenere la portanza voluta.

Sostanzialmente si tratta di una stabilizzazione “controllata”, cioè non finalizzata ad ottenere la massima portanza possibile, ma ad ottenerne mediamente uno specifico valore, in questo caso compreso tra gli 85 e i 120 MPa.

Moduli di deformazione $M_d$	Tempo	Note
> 18 M Pa	t = 0 h	<b>Valore di accettazione iniziale</b>
> 36 M Pa	t > 48 h	Valore di "controllo" della presa del cemento
> 85 M Pa	7 giorni	Valore di "controllo" intermedio
≤ 120 M Pa		<b>Valore di accettazione finale</b>

**Tab. 2.4 – Portanza finale di progetto del caso di studio.**

### 3 Adeguamento delle STRIP aeroportuali

Le criticità del trasporto aereo, in termini di sicurezza di esercizio, statisticamente si concentrano nelle fasi di decollo ed atterraggio durante le quali i velivoli si trovano ad interagire con l'*air side* aeroportuale. Al fine di garantire idonei standard di sicurezza in queste particolari circostanze, l'ICAO ha indicato nell'annesso 14 (*Aerodromes*) tutta una serie di caratteristiche che, gli elementi costituenti l'*air side* aeroportuale debbono rispettare, in base alla classificazione dell'aeroporto ed alla tipologia di pista. Gli elementi costituenti l'*air side* sono molti: le piste (*runways*), le aree di sicurezza di fine pista (*RESA*), le vie di rullaggio (*taxiways*), le piazzole di sosta, ecc. In questo capitolo e nel resto dell'elaborato ci occuperemo solo di un particolare elemento dell'*air side*: la STRIP.

Ad ogni pista di volo è associata una striscia di sicurezza (STRIP), cioè una zona non pavimentata libera da ostacoli che circonda la pista stessa. Il suo scopo è quello di:

- ridurre il rischio di danni ad un aeromobile che esce di pista mediante la rispondenza a specifici requisiti relativi alle pendenze longitudinali e trasversali e alla portanza;
- proteggere gli aeromobili in volo sopra essa durante atterraggi, decolli, atterraggi e decolli abortiti, fornendo loro un'area priva di ostacoli, ad eccezione di alcuni aiuti necessari alla navigazione aerea e debitamente autorizzati.

La strip ha forma rettangolare. Nel caso di una pista di volo di codice 4 (classificazione funzionale delle piste ICAO), che rappresenta il caso più vincolante, la strip deve estendersi simmetricamente per 150m da entrambi i lati della pista rispetto al suo asse (*center line*) e si deve estendere oltre i fine pista e relative zone di arresto per una distanza non inferiore a 60m. Viene richiesto che la parte di strip in prossimità delle testate della pista sia adeguatamente trattata per resistere all'erosione del getto dei motori e che tutta la strip abbia caratteristiche di portanza tali da consentire il transito dei veicoli di emergenza.



All'interno della strip, per piste strumentali di precisione di codice 3 o 4, si deve prevedere un'area livellata priva di ostacoli, chiamata CGA (*Clear and Graded Area*), avente le dimensioni riportate nella figura sottostante (Fig. 3.1).

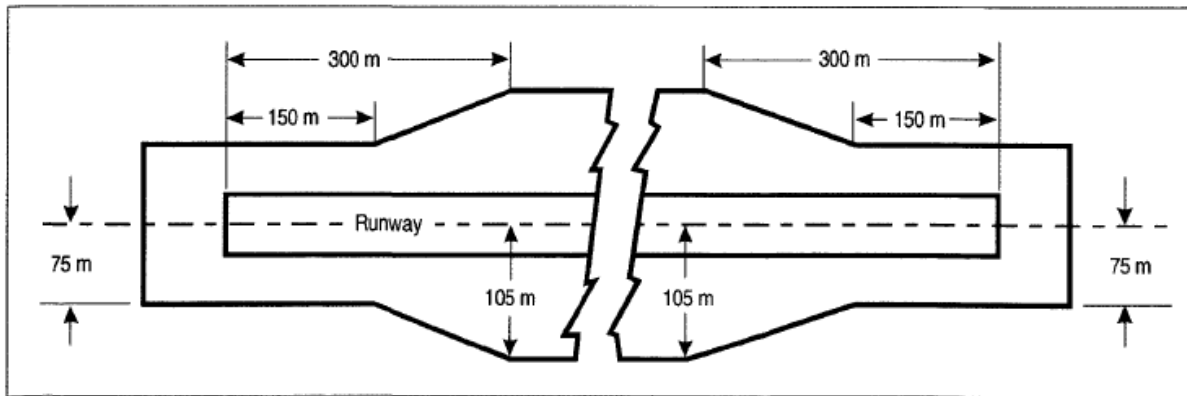


Fig. 3.1 – Clear and Graded Area

Per quanto concerne la CGA, l'annesso ICAO prescrive una pendenza longitudinale massima pari all' 1,5% e una pendenza trasversale massima del 2,5%, aumentabile fino al 5% nei primi 3m adiacenti ai bordi della pista per facilitare l'allontanamento delle acque meteoriche. Si prevede, inoltre, che la CGA sia raccordata alla pista ed in grado di sostenere l'aereo critico di progetto che al suo peso massimo al decollo deve poterla percorrere senza subire danni significativi. I valori di portanza possono diminuire gradualmente in direzione trasversale, verso l'esterno, per favorire l'arresto dell'aeromobile accidentalmente in svio. La valutazione di tale portanza tiene conto delle procedure di *risk assessment* adottate per uno specifico aeroporto.

### 3.1 Linee guida per adeguamento STRIP

Le caratteristiche geometriche e prestazionali delle strip, introdotte dall'ICAO nell'annesso 14, sono state recepite dall'ENAC e incluse nel testo fondamentale in materia di gestione aeroportuale, cioè il "Regolamento per la costruzione e l'esercizio degli aeroporti" del 2003, in cui sono riportate le caratteristiche necessarie affinché un aeroporto possa ottenere la certificazione ENAC.

Per quanto concerne le strip, le problematiche non sono tanto relative al rispetto delle dimensioni planimetriche stabilite, che solitamente vengono di per sé garantite, in quanto si tratta di aree limitrofe alle piste di volo, ma piuttosto si riferiscono alle caratteristiche che tali aree devono rispettare:

- Essere prive di ostacoli;
- Essere adeguatamente livellate;
- Garantire idonei valori di portanza.

Nel 2008 l'ENAC ha emanato una circolare chiamata: "Linee guida per l'adeguamento delle strip aeroportuali", rivolta a tutte le Società di Gestione degli aeroporti nazionali, invitandole a verificare la situazione attuale delle strip e a trasmettere i risultati delle valutazioni effettuate. In caso di non conformità con le prescrizioni del Regolamento veniva indicato di predisporre un progetto di adeguamento, in cui fossero indicate le modalità esecutive e i tempi di realizzazione degli interventi manutentivi.

Per quanto concerne il livellamento della strip viene semplicemente richiesto di verificare, attraverso un rilievo planoaltimetrico, che le superfici rispettino i valori di pendenza longitudinale e trasversale previsti nel Regolamento, con particolare attenzione a quanto previsto per il corretto funzionamento del radioaltimetro per l'avvicinamento di precisione.

In merito agli ostacoli si precisa che tutte le attrezzature per aiuti visivi, radio e radar, che si trovino attualmente all'interno delle strip devono essere spostati all'esterno, e quando ciò non sia possibile allora è necessario provvedere al loro interro. Ogni manufatto interrato, tra cui possiamo citare ad esempio i canali di drenaggio e i pozzetti di raccolta delle acque meteoriche, non deve costituire pericolo per il transito di un eventuale

aeromobile in svio. Viene prevista una profondità di interro per i nuovi manufatti non inferiore a 45 cm, mentre per i manufatti esistenti è accettata una profondità di 30 cm. In ogni caso devono essere privi di facce verticali interrato nel suolo non compatto, raggiungibili dalle ruote di un velivolo fuoriuscito dalla pista. Per eliminare tali facce verticali è necessario creare una rampa di raccordo che, dalla sommità del manufatto prosegue sotto il livello del suolo per una profondità minima di 30 cm. Nel caso vengano realizzati interventi manutentivi in tal senso, si raccomanda di prevedere zone di raccordo lungo il perimetro dell'intervento che delimita ciascuna area, al fine di garantire una capacità portante del terreno omogenea. Come metodo di verifica della bontà dell'intervento viene suggerito infine di effettuare una rullatura finale dell'intera superficie della strip, per evidenziare la presenza di aree singolari, che richiedano un ulteriore intervento manutentivo. Questa operazione potrebbe essere eseguita con un rullo gommato, in grado di trasmettere al suolo pressioni puntuali dell'ordine di 0,5-0,7 MPa, valori paragonabili a quelle che possono esercitare i mezzi di soccorso in transito.

Infine viene richiesta l'analisi della capacità portante della strip. Tale analisi viene condotta con il calcolo dei cedimenti massimi provocati dal transito dell'aereo critico per l'aeroporto in questione, utilizzando il modello del multistrato elastico. Per effettuare questo calcolo è necessario conoscere i valori di Modulo Elastico del terreno in sito, che sono desumibili attraverso campagne di indagini sperimentali. Ovviamente, variando le caratteristiche fisiche e meccaniche del terreno in sito, si avranno valori diversi di Modulo Elastico, per cui sarà necessario escludere i valori estremi a favore dei valori medi, rappresentativi di tutta l'area della strip. I valori di portanza richiesti non sono costanti su tutta la superficie, infatti è richiesta una portanza costante che rispetti le limitazioni imposte per i primi 75 m dall'asse pista, all'interno della CGA. All'esterno di tale striscia la portanza può avere valori gradualmente inferiori, fermo restando la necessità di garantire il transito dei mezzi di soccorso. Per verificare questa condizione le linee guida suggeriscono di effettuare prove dirette con i mezzi in dotazione ai Vigili del Fuoco, ad esempio l'Iveco-Magirus Super Dragon X8 a pieno carico, a diverse distanze dalle shoulders ed in diverse condizioni di umidità del terreno. Tale mezzo (Fig. 3.2) ha un peso di circa 44 tonnellate e una potenza di oltre 1000 CV. In tal modo sono identificabili i percorsi destinati ai mezzi di soccorso, che devono garantire l'accesso all'intera strip.



Fig. 3.2 – Iveco-Magirus Super Dragon X8

La CGA ha la funzione di minimizzare il danno relativo allo svio di un velivolo dalla pista. La sua superficie deve essere livellata e trattata in maniera tale da prevenire la rottura del carrello anteriore di un velivolo in svio. Il terreno superficiale deve trattenere il velivolo e favorirne il rallentamento, mentre, sotto la superficie il terreno deve fornire una portanza tale da evitare il danneggiamento dell'aereo stesso. Per conciliare queste esigenze contrapposte le linee guida ENAC si sono riferite all' *Aerodrome Design Manual (part 1. runways)* dell'ICAO. In tale documento (Cap. 5 – par 5.3.22.) si riporta che, i produttori di velivoli indicano in 15 cm la massima profondità di affondamento del carrello anteriore in un terreno, affinché non si verifichi il collasso della gamba di forza del carrello. Perciò si suggerisce di suddividere la strip in due strati:

- Uno strato superficiale di terreno vegetale dello spessore minimo di 10 cm, che può aumentare gradualmente con l'allontanarsi dell'area trattata dalle *shoulders*, arrivando fino a spessori di 15-17 cm, per le zone oltre i 75 m dalla *center line*.
- Uno strato di sottofondo, al di sotto del vegetale, con buona capacità portante, caratterizzata da valori di CBR compresi tra 15 e 20.

In tal modo un eventuale carrello in svio affonderebbe nel terreno vegetale, caratterizzato da bassissimi valori di CBR (attorno a 5-7), subendo un rallentamento, mentre sarebbe sostenuto dal sottofondo, garantendo così la sicurezza del velivolo.

Ovviamente l'umidità del terreno gioca un ruolo fondamentale nella valutazione della capacità portante e dell'indice CBR, pertanto le linee guida prescrivono di considerare un valore riferito all'umidità media stagionale. Per avere poi ulteriori dati sul comportamento del terreno, anche per quelli non coesivi, può essere utile effettuare alcune prove con terreno saturo, per meglio valutarne le variazioni stagionali e l'attendibilità dei dati progettuali.

La scelta delle prescrizioni ICAO di valutare i cedimenti del carrello anteriore, certamente meno carico rispetto a quello posteriore, può trovare due giustificazioni. La prima di carattere situazionale, in quanto in caso di svio di un velivolo in fase di atterraggio, il carrello anteriore, studiato per portare una percentuale minore di carico rispetto al posteriore, è certamente il primo a fuoriuscire dalla pista e, cedendo, provocherebbe l'urto e lo strisciamento della fusoliera sulla superficie della strip. La seconda motivazione è che il carrello anteriore è caratterizzato, normalmente, solo da una coppia di ruote gemelle (Fig. 3.3), mentre quello posteriore dipende dalle configurazioni: triciclo, quadri e penta ciclo, in cui si utilizzano soluzioni a tandem multiplo o tridem. In questi casi si presenta il cosiddetto effetto piastra, dovuto alla sovrapposizione dei bulbi di pressione dei carichi. Questo effetto, che in taluni casi può ridurre i cedimenti del terreno sotto l'azione del carrello, è assente per il carrello anteriore.



Fig. 3.3 – Carrello anteriore Airbus A380

Infine le linee guida suggeriscono per il trattamento delle aree che richiedano interventi, l'apporto di materiale anidro, granulometricamente stabilizzato e compattato, che verrà poi ricoperto con lo strato vegetale.

Nel proseguo di questo capitolo si presenterà il caso studio preso in esame, rappresentato dall'aeroporto di Milano Malpensa, in cui è stata adottata una metodologia alternativa a quella tradizionale per l'adeguamento della strip aeroportuale.

## 3.2 Metodologie innovative: il caso studio di Malpensa

L'aeroporto di Milano Malpensa è il principale aeroporto del nord Italia e il secondo scalo nazionale per importanza. Questo scalo, gestito dalla Società di Servizi Aeroportuali (SEA), funge da base d'armamento per numerose compagnie ed assieme agli scali di Milano Linate e Orio al Serio forma il sistema aeroportuale milanese, con oltre 33 milioni di passeggeri nel 2009.

Dal punto di vista infrastrutturale l'aeroporto occupa un sedime di oltre 10 km<sup>2</sup> (Fig. 3.4), è dotato di due piste parallele, lunghe entrambe 3920 metri e larghe 60 metri, orientate a 349° rispetto al nord magnetico, chiamate pertanto: 17L/R – 35R/L. Le piste sono dotate di ILS (*Instrumental Landing System*) ovvero un sistema di assistenza alla fase finale di avvicinamento strumentale di precisione, e di sistema luminoso PAPI (*Precision Approach Path Indicator*) per il mantenimento del sentiero di discesa corretto. Sono presenti due aree terminal, ognuna delle quali dotata di proprio piazzale (*Apron*), con circa 30 piazzole per il Terminal 2 (a Nord) e 95 per il Terminal 1 (a Ovest). Infine, non va dimenticata l'area adibita al trasporto merci chiamata *Cargo City*, situata nelle vicinanze del Terminal 1 (a Sud-Ovest), che nel suo complesso occupa una superficie di 50 mila m<sup>2</sup>.



Fig. 3.4 – Aeroporto di Milano Malpensa

L'oggetto dello studio è costituito dai lavori di manutenzione che, la SEA, a fronte delle richieste presentate dall'ENAC nelle linee guida, citate nel paragrafo precedente, ha deciso di eseguire sulle aree adibite a strip di entrambe le piste.

La particolarità di questi interventi manutentivi risiede nella modalità esecutiva con cui vengono effettuati, infatti, come si spiegherà in maniera diffusa e completa nei prossimi paragrafi, le aree della strip di Malpensa sono costituite da terreni con caratteristiche meccaniche e fisiche tali da non rendere per forza necessaria l'adozione della metodologia tradizionale. In sostanza si è cercato un modo per garantire il soddisfacimento delle caratteristiche geometriche e prestazionali, richieste dal Regolamento ENAC e riportate nelle linee guida, rinunciando all'ipotesi di sostituire il terreno in sito con materiale anidro idoneo, ma trattando direttamente il terreno presente in sito, al fine di garantire un comportamento delle strip adeguato alle prescrizioni ICAO in tutte le condizioni di esercizio possibili.



### 3.2.1 Descrizione del progetto esecutivo dell'intervento

Il progetto in questione riguarda la regolarizzazione delle superfici delle fasce di sicurezza delle piste di volo in ottemperanza a quanto prescritto dal Regolamento per la costruzione e l'esercizio degli aeroporti ENAC, e a uniformare le caratteristiche di portanza del terreno all'interno delle strip tramite una stabilizzazione del terreno con cemento e successiva rullatura.

Si tratta di opere di movimento terra per il riempimento di depressioni e regolarizzazioni superficiali compresa una rullatura finale da effettuare in zone puntuali, l'adeguamento (messa in quota) di alcune camerette dei sottoservizi presenti nelle aree, ed inoltre di una stabilizzazione del terreno con cemento dell'area compresa nella fascia di 35 metri dal limite della *shoulder* lungo ogni lato di entrambe le piste.

Dal punto di vista esecutivo dovranno generalmente essere compiute le seguenti operazioni:

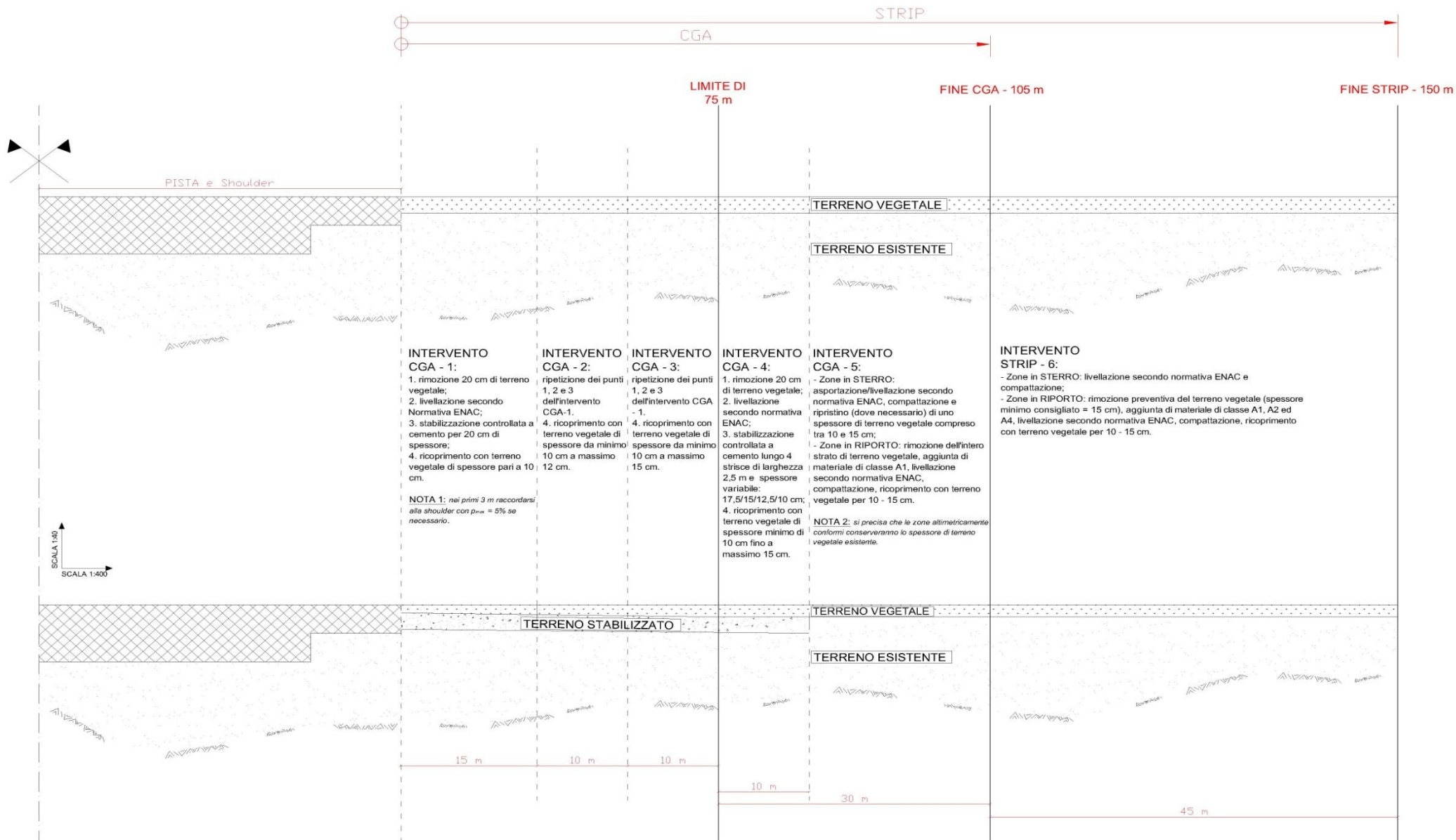
- Rimozione dello strato di terreno vegetale per uno spessore di 20 cm;
- Stabilizzazione del terreno in sito ottenuta mediante fresatura profonda e successivo apporto di cemento in proporzione a 1.50% in peso rispetto al terreno anidro, per uno spessore di 20 cm.
- Stesa, livellamento secondo le pendenze prestabilite e rullatura di 10 cm nei primi 15 m di CGA a 12 cm nei successivi 10 m ed infine a 15 cm nei successivi 10 m di terreno vegetale;
- Rullatura e idrosemina delle superfici trattate.

Per quanto concerne l'allontanamento degli ostacoli fissi si prevedono di norma le seguenti operazioni:

- Scavo generale di bonifica fino a 20 cm;
- Apporto di materiale di classe A1 A2 e A4 secondo normativa UNI 10006;
- Livellamento secondo normativa e compattazione del fondo dello scavo;
- Individuazione e adeguamento mediante demolizione e sostituzione della soletta dei pozzetti dei sottoservizi presenti all'interno delle aree di intervento ed

esecuzione di scivoli di sicurezza con pendenza di 1:2, fino ad una profondità di interrimento pari a 30 cm;

- Rinterro con terreno vegetale per lo spessore di 15 cm.



Nel seguito si analizzeranno le peculiarità delle fasi lavorative, indicando le relative modalità. Pertanto si procede a presentare le caratteristiche di ogni lavorazione che debba essere attuata nel cantiere.

➤ Scotico e scavi

Lo scotico costituisce l'operazione con cui si asporta lo strato più superficiale di terreno vegetale, nel nostro caso per una profondità di 20 cm. Tale valore è stato stimato grazie a prelievi compiuti in sito. Una volta scavato il materiale, con l'utilizzo di un dozer o di un macchinario simile, questo viene temporaneamente depositato a bordo scavo in quanto impiegato successivamente nelle operazioni di rinterro degli ultimi 15 cm circa, fino a raggiungere le quote del piano finito, nelle aree scavate. Nel caso invece di scavi a profondità maggiori, ad esempio per la realizzazione di pozzetti interrati, il terreno scavato dovrà essere vagliato, in quanto la parte di terreno vegetale con presenza anche di materiale grossolano verrà utilizzata per il rinterro mentre la restante parte di terreno dovrà essere allontanata e trasferita in un'apposita area di stoccaggio. In ogni caso grande cura deve essere prestata nelle operazioni di scavo per evitare il danneggiamento degli apparati visivi di aiuto alla navigazione e soprattutto degli apparati di controllo ENAV (Ente Nazionale Assistenza al Volo), che sovrintende la movimentazione dei velivoli. Infine risulta fondamentale assicurarsi che i rinterri vengano sempre eseguiti correttamente e che non vengano lasciati scavi aperti al termine delle operazioni.

➤ Stabilizzazione

La stabilizzazione concerne i primi 35 m dalla *shoulder* in senso trasversale alla pista. La tecnica di trattamento e consolidamento prevista non può considerarsi una tecnica di stabilizzazione "tradizionale", con cui si massimizza l'addensamento del terreno e conseguentemente la portanza dello stesso, bensì di tipo "controllata", al fine del raggiungimento dei requisiti di portanza previsti dal Regolamento ENAC e dalle norme internazionali ICAO, di seguito riportate in forma schematica (Tab. 3.1).

AREA		PORTANZA
CGA	< 75/105 m	- cedimenti del carrello anteriore < 15 cm - indice CBR compreso tra 15 e 20% (a 15 cm di profondità) - spessore terreno di ricoprimento compreso tra 10 cm e 15-17 cm alla fine dell'area in esame
	> 75/105 m	- transitabilità in sicurezza dei mezzi di soccorso - portanza gradualmente decrescente
STRIP	> 105 m	- transitabilità in sicurezza dei mezzi di soccorso in tutte le condizioni ed eventualmente seguendo percorsi definiti

Tab. 3.1 – Requisiti di portanza per la CGA e la restante parte di strip

La realizzazione del trattamento e consolidamento in sito a cemento si ottiene mediante idonee attrezzature (pulvimixer) che consentono di miscelare il terreno naturale presente in sito (già analizzato e risultato idoneo al trattamento) con l'apporto di cemento ed acqua, in quantità tale da modificarne le caratteristiche fisico-chimiche (granulometria, suscettività all'acqua, umidità) e meccaniche, così da renderlo idoneo per il compito a cui sarà soggetto. Tali lavorazioni non possono essere eseguite in caso di gelo.

Orientativamente il quantitativo di legante, inferiore a quello di una stabilizzazione classica, andrà adattato all'umidità relativa del terreno da trattare. L'apporto di cemento nei quantitativi prestabiliti e la sua distribuzione omogenea su tutta superficie da trattare avverrà con un macchinario spandilegante. In caso di forte vento tale operazione diventa impraticabile e pertanto non può essere eseguita.

#### ➤ Compattazione

Il terreno stabilizzato dovrà essere compattato con rulli, in modo da ottenere una densità in sito pari almeno al 95% di quella massima ottenuta in laboratorio con il sistema A.A.S.H.T.O. modificato. Una volta eseguita la compattazione a verifica delle prestazioni meccaniche ottenute con le lavorazioni si effettueranno delle prove in sito. Data la natura del cantiere e le caratteristiche da valutare, si potrebbero effettuare sia prove puntuali (prove di carico con piastra o misure di deflessione) sia prove ad elevato rendimento (tipo

FWD). Per valutare direttamente la densità in sito si possono eseguire prove con il volumometro a sabbia.

➤ Livellamento e rinterro

Il livellamento è l'operazione fondamentale al fine di garantire il rispetto dei valori di pendenza longitudinale e trasversale previsti dal Regolamento ENAC (Tab. 3.2). Viene eseguito con un moto grader prima di eseguire la stabilizzazione del terreno. Lo stesso macchinario viene utilizzato anche per eseguire le operazioni di rinterro, in quanto consente di livellare con precisione il piano di superficie finito.

AREA		REGOLARITA'
CGA	< 75/105 m	- pendenza longitudinale < 1,5 %
		- pendenza trasversale < 2,5 %
		- pendenza max. trasversale nei primi 3 m dalla shoulder pari al 5 %
	> 75/105 m	- pendenza longitudinale < 1,5 %
- pendenza trasversale < 2,5 %		
STRIP	> 105 m	- possibile pendenza trasversale crescente verso l'alto fino al 5 %

Tab. 3.2 - Requisiti di regolarità per la CGA e la restante parte di strip

➤ Finitura superficiale

Le operazioni finali consistono nella rullatura del piano superficiale e nell'idrosemina con sementi che garantiscano un radicamento vegetale, che favorisce una minima resistenza ad attriti tangenziali da rotolamento di pneumatici, con uno sviluppo prevalentemente orizzontale e superficiale in modo da non deteriorare nel tempo le caratteristiche fisiche del terreno. Tali operazioni consentono di garantire che la strip sia percorribile dai mezzi di soccorso e che non vi sia proiezione di materiale, a causa al getto dei motori che percorrono la pista.

➤ Adeguamento dei sottoservizi

L'adeguamento delle quote dei pozzetti esistenti di sottoservizi prevede la demolizione del manufatto in calcestruzzo e la successiva sostituzione di con una nuova soletta di tipo prefabbricato dotata di chiusino per accesso e ispezioni. Le solette sostitutive delle esistenti sono realizzate prefabbricate in calcestruzzo armato, dotate di scivoli laterali con pendenza di 1:2 a scendere intorno al manufatto fino ad una profondità di 30 cm.

Infine per quanto concerne le aree esterne alla CGA, ma comunque comprese nella strip, è previsto un intervento di livellamento, senza stabilizzazione. Il livellamento avviene con le stesse identiche modalità di quello delle aree interne alla CGA, a seconda che si tratti di aree di sterro o aree di riporto (Tab. 3.3).

Zone in STERRO	Zone in RIPORTO
1. asportazione e livellazione del terreno secondo le pendenze previste da normativa	1. rimozione terreno vegetale (15 cm)
	2. aggiunta materiale idoneo (A1, A2 , A4)
2. compattazione	3. livellazione del terreno secondo le pendenze previste da normativa
	4. compattazione
	5. rinterro con terreno idoneo per uno spessore di 10-15 cm

Tab. 3.3 – Descrizione intervento per aree di strip extra CGA

In quest'area non è prevista stabilizzazione, in quanto i requisiti ENAC per questa parte di strip sono solo relativi al transito dei mezzi di soccorso, che è possibile e garantito già allo stato di fatto.

La peculiarità del cantiere è certamente quella di trovarsi in ambito aeroportuale, pertanto si rendono necessarie alcune prescrizioni particolari al fine di garantire la sicurezza delle operazioni lavorative e dell'area aeroportuale stessa. Ad esempio, saranno definite precise aree di stoccaggio materiali ed aree di ricovero mezzi ed attrezzature, sarà regolamentato l'accesso ai varchi doganali e tutto il personale delle imprese esecutrici dovrà essere formato in merito alla viabilità nell'air side e, più in generale, alla security aeroportuale.

### 3.2.2 Il cronoprogramma

La localizzazione delle aree di intervento all'interno dell'area di movimento comporta il rispetto dei vincoli aeronautici e pertanto le attività sono svolte con le piste in condizioni d'uso che consentano le attività di cantiere. Le lavorazioni vengono eseguite in orario notturno, con completa chiusura della pista o con penalizzazioni stabilite dagli Enti preposti.

Al fine di tutelare le esigenze operative dello scalo, risulta fondamentale la programmazione delle attività da svolgere durante ogni singola notte di intervento all'interno delle strip. Le lavorazioni devono terminare per tempo in modo da consentire la riapertura della pista all'orario prestabilito, lasciando in tutti i casi una superficie livellata senza ostacoli, ad ogni mattina successiva alle notti lavorative. La durata complessiva dell'intervento è stata stimata in 420 giorni solari consecutivi, 300 giorni lavorativi effettivi.

Inoltre la riqualifica delle strip costituisce solo una delle attività manutentive che uno scalo richiede, pertanto è necessario coordinare con precisione tutte le lavorazioni al fine di garantire l'operatività dello scalo aeroportuale.

Di seguito si riporta la tabella esplicativa del cronoprogramma relativo alle lavorazioni oggetto di studio (Fig. 3.5).



ATTIVITA'	ORARIO																
	23.00	23.30	0.00	0.30	1.00	1.30	2.00	2.30	3.00	3.30	4.00	4.30	5.00	5.30	6.00	6.30	7.00
PISTA DI VOLO																	
<b>1° NOTTE - tracciamento</b>																	
INIZIO ATTIVITA'			✦														
Tracciamento capisaldi																	
FINE ATTIVITA'																	✦
<b>2° NOTTE - fascia GCA</b>																	
INIZIO ATTIVITA'			✦														
Scotico																	
Stabilizzazione																	
Livellamento																	
Compattazione																	
Rinterro																	
Semina e compattazione																	
Pulizia e sgombero cantiere																	
FINE ATTIVITA'																	✦
<b>3° NOTTE - fascia esterna</b>																	
INIZIO ATTIVITA'			✦														
Scavo e/o riporto puntuale																	
Rinterro in misto stabilizzato																	
Stesa terra da coltivo																	
Compattazione																	
Pulizia e sgombero cantiere																	
FINE ATTIVITA'																	✦

Fig. 3.5 – Cronoprogramma metodologia innovativa

Come si può osservare il cronoprogramma è stato suddiviso in tre “nottate tipo”, corrispondenti alle diverse fasi da compiere per svolgere tutte le lavorazioni previste.

La prima notte rappresenta essenzialmente l'operazione di tracciamento dei capisaldi, ovvero di individuazione delle aree che verranno successivamente tracciate. Questa operazione risulta fondamentale, visti i tempi ristretti in cui devono avvenire le lavorazioni vere e proprie. La dimensione delle aree di intervento debbono essere attentamente valutate, in quanto ogni area deve essere stabilizzata, livellata, compattata e rinterrata nell'arco delle 6 ore concesse per l'intervento. Pertanto in base alla produttività, alla tipologia di terreno e al numero di mezzi impiegati, si dovrà scegliere e delimitare la porzione di strip da trattare di volta in volta.

La seconda notte rappresenta il complesso di lavorazioni di stabilizzazione del terreno all'interno della CGA.

Infine, nella terza notte, sono descritte le operazioni di sistemazione dei sottoservizi eventualmente presenti in sito e di livellamento della superficie della strip esterna alla CGA con l'eventuale apporto o asporto di materiale a seconda che si stiano trattando aree in sterro o riporto.

Ai fini dell'analisi condotta in questo elaborato vengono considerate solo le operazioni inerenti alla CGA. Considerando che la durata complessiva dei lavori è di 300 giorni lavorativi per due piste, possiamo stimare che le lavorazioni di stabilizzazione delle strip dovrebbero occupare circa i 2/3 del tempo complessivo, pertanto circa 200 giorni. Da ciò si deduce che la stabilizzazione di una singola strip dovrebbe essere completata in 100 giorni circa.

### 3.2.3 La tecnica esecutiva

Le modalità esecutive delle lavorazioni presentate sono volte a garantire la massima produttività possibile dei mezzi e del personale impiegato, compatibilmente con le rigide tempistiche imposte dalla realtà aeroportuale.

Considerando i mezzi normalmente impiegati in lavorazioni di questo tipo, che verranno presentati nel dettaglio nel prossimo paragrafo, la finestra temporale concessa per l'intervento e l'estensione delle aree da trattare nei tempi previsti dal cronoprogramma, è verosimile che ogni notte si arrivi a stabilizzare un'area di circa 3000m<sup>2</sup>.

Per aumentare la produttività dei mezzi operanti in cantiere e ottimizzare le fasi realizzative, le aree d'intervento devono essere di forma rettangolare allungata disposte parallelamente all'asse pista, in modo tale che i mezzi possano eseguire lunghe strisciate senza dover compiere manovre di inversioni ripetute. La larghezza di tali strisciate è dettata dalla larghezza operativa dei mezzi operanti. Trattandosi di una stabilizzazione con l'impiego di legante idraulico si utilizzeranno spandilegante e pulvimixer. Entrambi questi macchinari hanno una larghezza operativa tipicamente di 2,5m, pertanto le aree d'intervento è auspicabile che abbiano una larghezza multipla di tale dimensione. Nello specifico si realizzeranno strisce larghe 5m per una lunghezza di 600m a ridosso del bordo pista, in modo tale da poter meglio raccordare la strip con la pista e impostare la pendenza longitudinale e trasversale richiesta, mentre le strisce successive saranno larghe 7,5m per una lunghezza di 400m. Pertanto la larghezza complessiva della CGA di 35m verrà realizzata con una striscia da 5m seguita da quattro da 7,5m disposte parallelamente all'asse pista.

Di seguito si riporta uno schema esemplificativo delle aree d'intervento (Fig. 3.6)

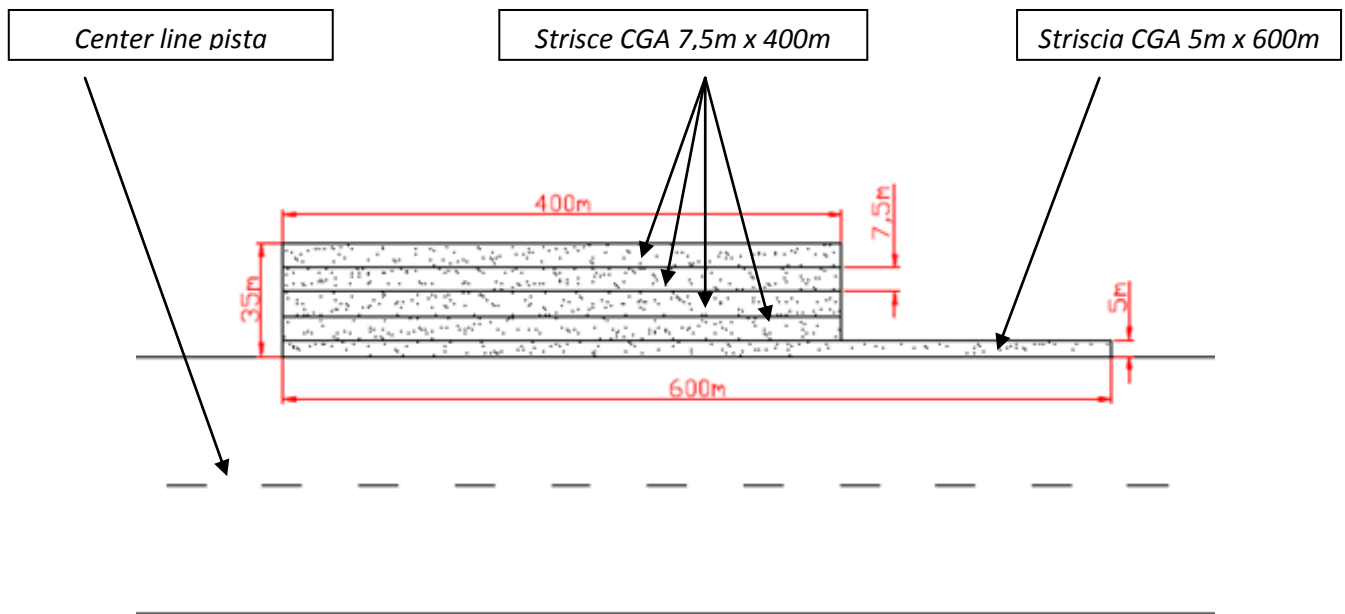


Fig. 3.6 – Schema aree d'intervento

Definita l'area di intervento da trattare ogni notte si descrivono in sequenza le lavorazioni compiute e le modalità esecutive:

➤ Scotico

Lo scotico viene eseguito in due fasi. Nella prima fase il pulvimixer esegue l'erplicatura del terreno per una profondità pari a quella dello strato vegetale da rimuovere. Tale operazione è necessaria affinché i mezzi di scavo che effettueranno lo scotico vero e proprio riescano a rimuovere solo lo spessore di terreno richiesto. L'erplicatura consiste nella frammentazione delle zolle del terreno, riducendone così la coesione e facilitando il successivo scavo. Nel caso in cui il terreno abbia un basso tenore di umidità è auspicabile che il pulvimixer sia connesso con un'autobotte, in modo tale da inumidire il terreno durante l'erplicatura. Questa operazione faciliterà lo scavo e migliorerà le condizioni di lavoro riducendo notevolmente la produzione di polvere.

La fase di scavo può essere realizzata con un dozer, oppure con un escavatore dotato di benna larga non dentata. In quest'ultimo caso è possibile far intervenire anche un mezzo caricatore, come una pala gommata, per facilitare la movimentazione del vegetale, che deve essere accumulato ai bordi della striscia di intervento, in quanto al termine delle lavorazioni dovrà essere utilizzato per il rinterro. Un ulteriore vantaggio dovuto all'impiego di un escavatore è che il mezzo, dotato di braccio e benna non dentata, percepisce la profondità a cui è avvenuta l'erpicazione, in quanto l'operatore avverte una netta differenza di consistenza del terreno. In sostanza già con l'erpicazione si stabilisce quota ed andamento del piano all'estradosso della stabilizzazione, non rendendo necessario il passaggio di un mezzo livellatore.

➤ Stabilizzazione

La stabilizzazione avviene longitudinalmente all'interno della striscia scoticata. Il primo mezzo impiegato è una spandilegante, che avanzando provvede a rilasciare il quantitativo previsto di legante idraulico. Nel nostro caso, avendo previsto un quantitativo di cemento pari all'1,5%, e considerando un peso specifico del terreno in sito pari a circa 1800 kg/m<sup>3</sup>, noto uno spessore di stabilizzazione di 20 cm, è immediato calcolare che dovranno essere stesi circa 5,4 kg di cemento al m<sup>2</sup>. Effettuata questa lavorazione ci sarà il passaggio del pulvimixer per la miscelazione con il terreno in sito. Entrambi i macchinari utilizzati, come detto precedentemente, hanno la medesima larghezza operativa, fissata in 2,5 m. Pertanto si eseguiranno due o tre passaggi paralleli all'interno della striscia scoticata a seconda che la larghezza della striscia sia di 5 m o 7,5 m.

➤ Compattazione

La compactazione avviene con il passaggio di due tipologie di rullo:

- 4 passaggi con rullo gommato da 20 tonnellate;
- 2 passaggi con rullo monotamburo da 15 tonnellate.

Solitamente i due passaggi con rullo monotamburo vengono eseguiti uno prima del passaggio del gommato, per preparare un piano più livellato, ed uno alla fine, per rifinire il piano una volta compattato lo strato che è stato stabilizzato.

➤ Rinterro

Il rinterro avviene con gli stessi mezzi che hanno eseguito lo scavo, ovvero con i dozer o con la pala gommata. Questi mezzi spingono il terreno momentaneamente accantonato ai bordi della striscia all'interno dello scavo, operando in senso ortogonale alla lunghezza della striscia. Dopodiché è necessario effettuare alcuni passaggi con il grader per creare un piano superficiale omogeneo e livellato con pendenze longitudinali e trasversali conformi alla normativa ENAC.

➤ Finitura

L'ultima fase consiste nel passaggio del rullo monotamburo per eseguire la finitura superficiale e nell'idrosemina. Quest'ultima operazione viene eseguita con il passaggio a bordo striscia di un piccolo veicolo da cantiere sul cui pianale è stato montato una piccola cisterna contenente l'idrosemina ed un compressore. Tale operazione è estremamente rapida, tuttavia la cisterna deve essere spesso ricaricata, costringendo il veicolo a continue soste.

Quella appena presentata costituisce la modalità di realizzazione standard; in realtà questa non è sempre applicabile per diversi motivi che si andranno brevemente ad evidenziare.

Innanzitutto le piste di volo presentano almeno su uno dei due lati, a volte anche su entrambi, i raccordi di uscita, che attraverso le taxiway, conducono ai piazzali e agli stalli di sosta. Nel caso di Malpensa una pista ha raccordi solo da un lato, mentre l'altra li ha da entrambi i lati. Ovviamente nel momento in cui si vanno a realizzare le strisce di stabilizzazione della strip bisogna considerare la presenza di tali raccordi, pertanto la configurazione delle lavorazioni a strisce parallele all'asse pista di lunghezza 400m o 600m a seconda della loro larghezza, subirà delle variazioni.

In secondo luogo vanno considerati i sistemi di assistenza al volo e la segnaletica presente. Tabelle luminose, sistema PAPI, e vari impianti devono essere tutelati nell'esecuzione della stabilizzazione. Pertanto può accadere che in alcune zone le lavorazioni proseguano a rilento per la presenza di cavi interrati oppure che si opti per non intervenire del tutto in alcune aree particolarmente complesse e sensibili per l'operatività dello scalo.

Infine non è sempre possibile terminare in una notte tutto il ciclo di lavorazioni. Nel caso dell'idrosemina, ad esempio, è possibile pensare che non venga eseguita ogni notte, in quanto è credibile che, per aumentare la produttività della lavorazione specifica, la si effettui per un periodo pari a tutta la finestra di lavorazione notturna (6 ore), trattando in tal modo un'area di notevoli dimensioni. Questo consente anche di dedicare più tempo a quelle lavorazioni di completamento, quali rinterro e finitura superficiale, che devono necessariamente essere effettuate al termine di ogni finestra di lavoro notturna.

### 3.2.4 I macchinari impiegati

Dopo aver analizzato le fasi esecutive e la tecnica realizzativa si presentano brevemente i macchinari menzionati in precedenza.

- Pulvimixer

Questo è un macchinario di concezione relativamente recente. Svolge notevoli funzioni sia come riciclatrice a freddo, che come macchina stabilizzatrice. Le funzioni che interessano le lavorazioni in questione sono quelle connesse alla presenza di un rotore, la cui posizione è regolabile in altezza, che gira in senso opposto alle ruote del mezzo ed è equipaggiato con palette o denti a seconda della tipologia di terra da trattare. Grazie al movimento di questo rotore avviene la frantumazione delle zolle e la miscelazione del terreno al passaggio del mezzo. La profondità di miscelazione varia normalmente tra i 20 cm e i 50 cm ed è inversamente proporzionale alla velocità di avanzamento. Al fine di ottenere una miscelazione ottimale è possibile connettere tale macchinario con un'autobotte, che consente di fornire al terreno un tenore di umidità idoneo alla miscelazione ed alla presa del legante. In tal caso l'autobotte verrà connessa, attraverso una o più aste metalliche, al pulvimixer e lasciata accesa in folle in modo tale che sia il macchinario stesso a spingere l'autobotte.



Fig. 3.7 – Pulvimixer Wirtgen



- Dozer

I dozer sono macchinari per lo scavo e il trasporto del materiale scavato (Fig. 3.8). Sono dotati anteriormente di una lama sagomata che, attraverso bracci meccanici può assumere differenti posizioni e angolazioni di incidenza rispetto al terreno. Lo scavo avviene affondando la lama nel terreno e avanzando, grazie alla notevole forza di trazione prodotta dal sistema di propulsione ed esercitata dai cingoli sul terreno. Una volta scavato il materiale è possibile movimentarlo a lato della striscia da stabilizzare e ripetendo tale manovra si effettua lo scotico di tutta la striscia. Analogamente il mezzo potrebbe essere utilizzato per il rinterro del materiale al termine della stabilizzazione. Nella parte posteriore del mezzo è possibile montare i rippers, ovvero denti di scarifica che sfruttando l'avanzamento del mezzo affondano nel terreno dissodandolo. Nell'ambito delle lavorazioni oggetto di studio tale accorgimento non risulta necessario.



Fig. 3.8 – Dozer Caterpillar

- Escavatore

Come alternativa allo scotico con i dozer è possibile utilizzare un escavatore cingolato, che monti una benna larga e non dentata. Grazie all'impiego di questa particolare tipologia di benna, con larghezza dell'ordine dei 2,5 m (Fig. 3.9), è possibile sfruttare il piano creato dal pulvimixer nella fase di erpicatura e contemporaneamente rendere molto rapide le operazioni di scotico della striscia di lavorazione in tutta la sua larghezza.



Fig. 3.9 – Benna non dentata per escavatore

Questo macchinario verrà poi presentato in un contesto differente parlando della modalità tradizionale di stabilizzazione. In quella circostanza infatti lo stesso apparecchio verrà utilizzato, oltre che per lo scotico, utilizzando una benna dentata, anche per lo scavo vero e proprio del terreno.

- Spandilegante

Questi macchinari sono costituiti da un mezzo di traino aventi uno spanditore a dosaggio volumetrico regolato in funzione della velocità di avanzamento e dotato di un dispositivo ponderale che regola il dosaggio volumetrico. All'inizio dell'attività e periodicamente tali dispositivi debbono essere tarati facendo transitare la macchina su di un telo e verificando la quantità di legante rilasciato su tale superficie. La dimensione della cisterna per il legante è variabile, solitamente si aggira tra i 10 m<sup>3</sup> e i 16 m<sup>3</sup>. Nel nostro caso, spandendo 5,4 kg di legante al m<sup>2</sup> e trattando un'area di circa 3000 m<sup>2</sup> a notte, verranno impiegati circa 13,5 m<sup>3</sup> di legante durante ogni finestra lavorativa. Questi macchinari hanno la capacità di spandere il legante da una distanza dal terreno estremamente ridotta, in tal modo diminuisce la possibilità che il legante appena sparso venga spostato dal vento. Tutto ciò fermo restando che in caso di condizioni di vento forte tale lavorazione non possa avvenire e debba essere posticipata.



Fig. 3.10 – Spandilegante Streumaster

- Rulli

Questi macchinari sono già stati presentati nel dettaglio nel paragrafo 2.1.3. Ci si limita a ricordare che ne vengono impiegate due differenti tipologie: un rullo gommato da 20 t e uno monotamburo da 15 t.

- Grader

Il grader è un macchina livellatrice che, grazie alla presenza di una lama orientabile posizionata tra gli assi anteriori e posteriori (Fig. 3.11), è in grado di movimentare il terreno scavato o il materiale granulare di riporto, impostando le pendenze desiderate. Nell'ambito delle lavorazioni in questione questo macchinario opera in numerosi fasi, infatti nell'arco della finestra temporale di lavorazione non si trova quasi mai fermo. Nella fase di scotico può contribuire, assieme ad un pala gommata all'accumulo del materiale a bordo striscia. Nella fase di rinterro imposta le pendenze definitive del terreno secondo le prescrizioni normative. In fase di finitura corregge i piani superficiali prima dell'idrosemina, intervenendo in eventuali piccole aree di sterro o riporto.



Fig. 3.11 – Grader Caterpillar

○ Macchinari aggiuntivi

Tra i macchinari aggiuntivi possiamo ricordare:

- le torri faro necessarie all'illuminazione, in quanto le lavorazioni avvengono sempre in notturna;
- I veicoli di trasporto del personale all'interno dell'area di cantiere;
- Un bilico (Fig. 3.12), necessario per la movimentazione di tutti i mezzi cingolati e del rullo gommato, in quanto non è pensabile che tali macchinari circolino sulle pavimentazioni aeroportuali;
- Un piccolo camion su cui installare la cisterna ed il compressore utilizzati per l'idrosemina (Fig. 3.13).



Fig. 3.12 – Bilico per movimentazione mezzi cingolati



Fig. 3.13 - Idrosemina

### 3.2.5 I costi

I costi delle lavorazioni in questione nel caso specifico sono sostenuti dall'ente gestore dello scalo. L'importo complessivo dei lavori può essere calcolato eseguendo computi metrici estimativi sulle singole lavorazioni oggetto dell'appalto e sommandovi infine gli oneri per la sicurezza. Trattandosi di lavorazioni comuni e quasi totalmente inerenti i movimenti di terra, è possibile utilizzare elenchi prezzi regionali oppure quelli redatti da gestori di infrastrutture stradali.

Nel caso specifico della riqualifica delle strip delle due piste di Malpensa, l'importo complessivo dei lavori si attesta ad una cifra di poco superiore ai 4 milioni di Euro.

L'importo complessivo può essere riferito alle singole lavorazioni o al loro ambito di competenza. Nel ambito delle lavorazioni oggetto di studio è possibile individuare le seguenti categorie di attività:

- Movimento di terra;
- Fornitura cemento;
- Opere edili.

Da una stima approssimativa si può ritenere che l'incidenza di ognuna di queste voci sull'importo complessivo dei lavori sia quella riportata nella seguente tabella (Tab. 3.4).

<b>Attività</b>	<b>% sull'importo dei lavori</b>
Movimento di terra	95%
Fornitura cemento	4%
Opere edili	1%
<b>Totale</b>	<b>100%</b>

Tab. 3.4 – Incidenza attività su importo lavori

### 3.3 Metodologie tradizionali

Quanto fin qui esposto riguarda il progetto di manutenzione delle strip di Malpensa in cui si è adottata una metodologia di stabilizzazione di tipo controllata con la miscelazione a legante idraulico. La tradizionale procedura di bonifica dei terreni delle strip aeroportuali risulta profondamente differente. In questo capitolo si presenterà in sintesi la tecnica tradizionale per incrementare la portanza di una strip, i materiali impiegati, i macchinari utilizzati e le fasi realizzative, creando così un confronto diretto con quanto precedentemente illustrato.

La stabilizzazione impiegata, nell'ambito delle metodologie tradizionali, è di tipo granulometrico anziché a legante idraulico. In tal caso, pertanto, non avviene la miscelazione del terreno presente in sito con un legante idraulico atto ad alterare le caratteristiche del terreno, inducendo reazioni che generino prodotti con particolari caratteristiche meccaniche, bensì si opta per sostituire il terreno in sito per poi procedere alla compattazione. Il progetto di tale metodologia di compattazione parte con l'analisi delle terre in sito e la loro classificazione, a cui segue la definizione di un "*fuso granulometrico*" di progetto, ovvero di un'area entro la quale si deve collocare la curva granulometrica degli inerti da impiegare. Il rispetto di tale prescrizione garantisce che gli inerti che compongono la terra abbiano un assortimento di pezzature tale da consentirne la compattazione ottimale.

Una volta definita la tipologia di terra, tipicamente una terra  $A_1$ , e la corrispondente granulometria da utilizzare, va individuato lo spessore di terreno da trattare, in modo tale da ottenere i risultati prescritti in termini di capacità portante. Infine andrà definita la modalità e l'entità della compattazione meccanica da applicare con i rulli in funzione dell'umidità ottima del terreno e i valori attesi di portanza ad intervento ultimato.

Si esamina ora quale dovrebbe essere l'intervento di adeguamento di una strip aeroportuale svolto con modalità tradizionale per soddisfare le prescrizioni ENAC.

➤ Progetto esecutivo dell'intervento

Al fine di garantire il rispetto delle prescrizioni ICAO in termini di affondamento al passaggio del carrello anteriore dell'aereo critico, nel caso di un aeroporto come quello di Malpensa, sarebbe ad esempio necessario realizzare le seguenti lavorazioni:

- Scotico dello strato vegetale (20 cm);
- Scavo e rimozione del terreno in sito per uno spessore di circa 30 cm;
- Riporto per uno spessore finito di 30 cm con terreno di idonee caratteristiche;
- Rinterro dello strato vegetale con uno spessore variabile tra i 10 e i 15 cm.

L'estensione delle aree da trattare è identica a quella citata in precedenza, tuttavia la lavorazione è profondamente diversa, pertanto si rende necessario approntare un cronoprogramma differente per ottimizzare le fasi realizzative necessarie a questa modalità esecutiva.

➤ Il cronoprogramma

Le lavorazioni condotte con la metodologia tradizionale sono più lunghe di quelle eseguite con la stabilizzazione a legante, che non richiede l'asportazione e conseguente sostituzione del terreno presente in sito. A fronte di ciò non risulta pensabile trattare ad ogni ciclo di lavorazione la stessa area considerata nel caso precedentemente esposto. Essendo inferiori la produttività in fase esecutiva, saranno necessarie più squadre di lavoro contemporanee per ultimare il lavoro con le stesse tempistiche della stabilizzazione in sito.

In questo ambito lavorativo la fase esecutiva più lunga è senza dubbio quella dello scavo del terreno e della movimentazione del materiale. Questa lavorazione definisce sostanzialmente l'entità della superficie trattabile per ogni ciclo lavorativo ed il numero di mezzi necessari, affinché sia possibile ottenere la produttività preventivata. Di seguito si riporta un possibile cronoprogramma per le lavorazioni con la metodologia "tradizionale" (Fig. 3.14).

ATTIVITA'	ORARIO																
	23.00	23.30	0.00	0.30	1.00	1.30	2.00	2.30	3.00	3.30	4.00	4.30	5.00	5.30	6.00	6.30	7.00
PISTA DI VOLO																	
<b>1° NOTTE - tracciamento</b>																	
INIZIO ATTIVITA'			✦														
Tracciamento capisaldi																	
FINE ATTIVITA'																	✦
<b>2° NOTTE - fascia GCA</b>																	
INIZIO ATTIVITA'			✦														
Scotico																	
Scavo e sostituzione terreno																	
Livellamento																	
Compattazione																	
Rinterro del vegetale																	
Semina e compattazione																	
Pulizia e sgombero cantiere																	
FINE ATTIVITA'																	✦
<b>3° NOTTE - fascia esterna</b>																	
INIZIO ATTIVITA'			✦														
Scavo e/o riporto puntuale																	
Rinterro in misto stabilizzato																	
Stesa terra da coltivo																	
Compattazione																	
Pulizia e sgombero cantiere																	
FINE ATTIVITA'																	✦

Fig. 3.14 – Cronoprogramma metodologia tradizionale



Come si può vedere ben 3 ore a notte sulle 6 complessive sono dedicate allo scavo del materiale in sito e alla sua sostituzione con quello prelevato da cava.

Nel seguito saranno descritte le fasi esecutive, tuttavia è possibile definire che, con il cronoprogramma riportato sopra, si può trattare un'area di CGA di circa 1500-1600 m<sup>2</sup> a notte. Pertanto la lavorazione, limitatamente alla CGA, complessivamente richiederebbe circa 180 notti.

Al fine di diminuire i tempi di esecuzione si richiede la presenza in cantiere di un numero di personale e mezzi estremamente superiore.

➤ I macchinari utilizzati

I macchinari utilizzati sono per la maggior parte gli stessi che sono stati descritti in precedenza. Ovviamente non saranno utilizzati le apparecchiature direttamente connesse con l'utilizzo di leganti idraulici, quali: spandilegante e pulvimixer.

La metodologia "tradizionale" richiede inoltre alcuni macchinari aggiuntivi che vengono impiegati in maniera specifica nello scavo del terreno, nella movimentazione dei materiali e nelle fasi di carico-scarico. Di seguito presentiamo i macchinari necessari a svolgere queste operazioni supplementari:

○ Escavatore

Per le operazioni di scavo, una volta eseguito lo scotico è indicato l'utilizzo di un escavatore gommato o cingolato (Fig. 3.15). Questo mezzo è dotato di una torretta girevole con un braccio articolato al termine del quale viene montata una benna escavatrice. Le dimensioni della benna sono variabili, anche se in lavorazioni come quella in esame è presumibile si utilizzi una benna della capacità di circa 1,5 m<sup>3</sup>. La capacità di rotazione della torretta unita alla manovrabilità del braccio consentono a questo mezzo di seguire sia lo scavo che il carico su di un mezzo di trasporto del materiale, in un'unica fase lavorativa. La scelta della versione su cingoli o di quella gommata dipende dal terreno su cui ci si trova ad operare e dalla stabilità richiesta al mezzo nello scavo e nella movimentazione, solitamente le versioni cingolate posseggono potenze e ingombri maggiori.



Fig. 3.15 – Escavatore cingolato New Holland

- Camion

Per il trasporto degli inerti nel cantiere vengono utilizzati i cosiddetti *trakkers*, ovvero camion a più assi dotati di cassone, solitamente ribaltabile, della capacità di circa 12 m<sup>3</sup> (Fig. 3.16). Non è pensabile né giustificato l'impiego di *dumpers* o mezzi di trasporto che non possano circolare in viabilità ordinaria, poiché eccedono la sagoma limite e richiederebbero l'adozione di un "trasporto eccezionale". Va infatti considerato che i mezzi di trasporto materiale, oltre che essere impiegati per movimentare i materiali all'interno del cantiere, vengano utilizzati per approvvigionare le gli inerti da porre in sito prelevandoli dalle cave e per allontanare il materiale di risulta. Nel caso specifico in esame verranno certamente utilizzati veicoli con cassone ribaltabile, in quanto è indispensabile contenere il più possibile i tempi di carico e scarico degli inerti. Trattandosi di un cantiere in area aeroportuale, non è richiesta la potenza necessaria ad esempio in cava, per affrontare livellette considerevoli; al contrario è fondamentale che il mezzo abbia caratteristiche tali da consentire velocità idonee alla circolazione stradale, per contenere i tempi di percorrenza dalle cave al sito del cantiere. Pertanto è auspicabile l'utilizzo di un mezzo a 3 o 4 assi.



Fig. 3.16 – Trakker Iveco

- Pala caricatrice

Questo mezzo è dotato di una benna frontale ed è in grado di movimentare il materiale inerte e di caricarlo direttamente nel cassone dei mezzi di trasporto (Fig. 3.17). Non trattandosi di un mezzo di scavo è spesso utilizzata nella versione gommata, anziché cingolata, in quanto in questa configurazione è più manovrabile, fermo restando che sono determinanti le condizioni del terreno su cui si va ad operare. Nel cantiere in questione sarebbe opportuno avere a disposizione una benna da circa 3 m<sup>3</sup>, in modo da poter caricare un mezzo di trasporto in tempi contenuti (4 minuti circa). La scelta di utilizzare una pala caricatrice di dimensioni medie, anziché piccole, consente di ridurre i tempi di carico e le manovre da compiere, in quanto, se i bracci articolati che sorreggono la benna non raggiungono una quota sufficiente per rovesciarne il contenuto all'interno del cassone del camion, è necessario realizzare delle rampe rialzate, che rendono meno agevoli le operazioni di carico, incrementando i tempi di manovra.



Fig. 3.17 – Pala gommata Caterpillar

➤ Le fasi esecutive

Anche nel caso di adozione di questa metodologia, come nel caso di quella precedentemente descritta, per ottimizzare le fasi lavorative ed incrementare il più possibile la produttività è auspicabile operare, in ogni finestra lavorativa notturna, su aree rettangolari di forma allungata. In tale circostanza non è la larghezza operativa dei mezzi di stabilizzazione, peraltro assenti, a suggerire tale modo di operare, bensì i vantaggi che derivano dalle fasi di scotico, rinterro e compattazione. Lavorando su una striscia di forma allungata tutti i mezzi riducono le manovre e la necessità di invertire di continuo il senso di marcia, ottimizzando la loro capacità produttiva. In questo caso l'estensione dell'area da trattare è direttamente connessa con la capacità di scavo e sostituzione del terreno in sito con quello fornito da cava.

Si può stimare che un escavatore con benna da  $1,5 \text{ m}^3$  (consideriamo  $1,3 \text{ m}^3$  per via del fattore di riempimento) e tempo di ciclo pari a 20 secondi, possa scavare e caricare sui camion  $4 \text{ m}^3$  di materiale al minuto. Dato che la normale capacità di un trakker da cantiere si aggira sui  $12 \text{ m}^3$ , allora si può ritenere che il tempo di carico  $T_{carico}$  sia pari a 4 minuti (3 minuti per il carico + 1 minuto per le manovre del mezzo). Ricordando che con questa metodologia, per garantire le prestazioni richieste dalle normative internazionali, è necessario creare uno strato di 30cm di misto granulare stabilizzato, allora si ha che con l'utilizzo di un escavatore si possono trattare circa  $600 \text{ m}^2$  all'ora.

A questo mezzo debbono essere affiancati dei mezzi di trasporto del materiale. Il numero di mezzi da impiegare è diretta conseguenza della distanza che tali mezzi devono percorrere. Questi veicoli è necessario che, una volta caricato il terreno scavato, si rechino in un'area di stoccaggio e, una volta scaricato il materiale, vengano caricati con il misto granulare da stendere in sito. A questo punto devono ritornare all'area di lavorazione e scaricare per poi riprendere il ciclo dal principio. Sostanzialmente i veicoli viaggiano sempre a pieno carico, ad una velocità che possiamo ritenere mediamente prossima ai 25 km/h, in quanto il tragitto si svolge sia su strade pavimentate che su aree sterrate. Dall'immagine sotto riportata (Fig. 3.18) si evidenzia il "percorso tipo" che il mezzo dovrebbe compiere. Ovviamente la distanza tra la posizione dell'area di lavorazione (variabile) e dell'area di stoccaggio (tendenzialmente fissa) è variabile, tuttavia si può considerare una area d'intervento in posizione baricentrica rispetto alla pista e da lì calcolare la distanza media rispetto alla posizione delle aree di stoccaggio concesse dall'ente gestore dello scalo.

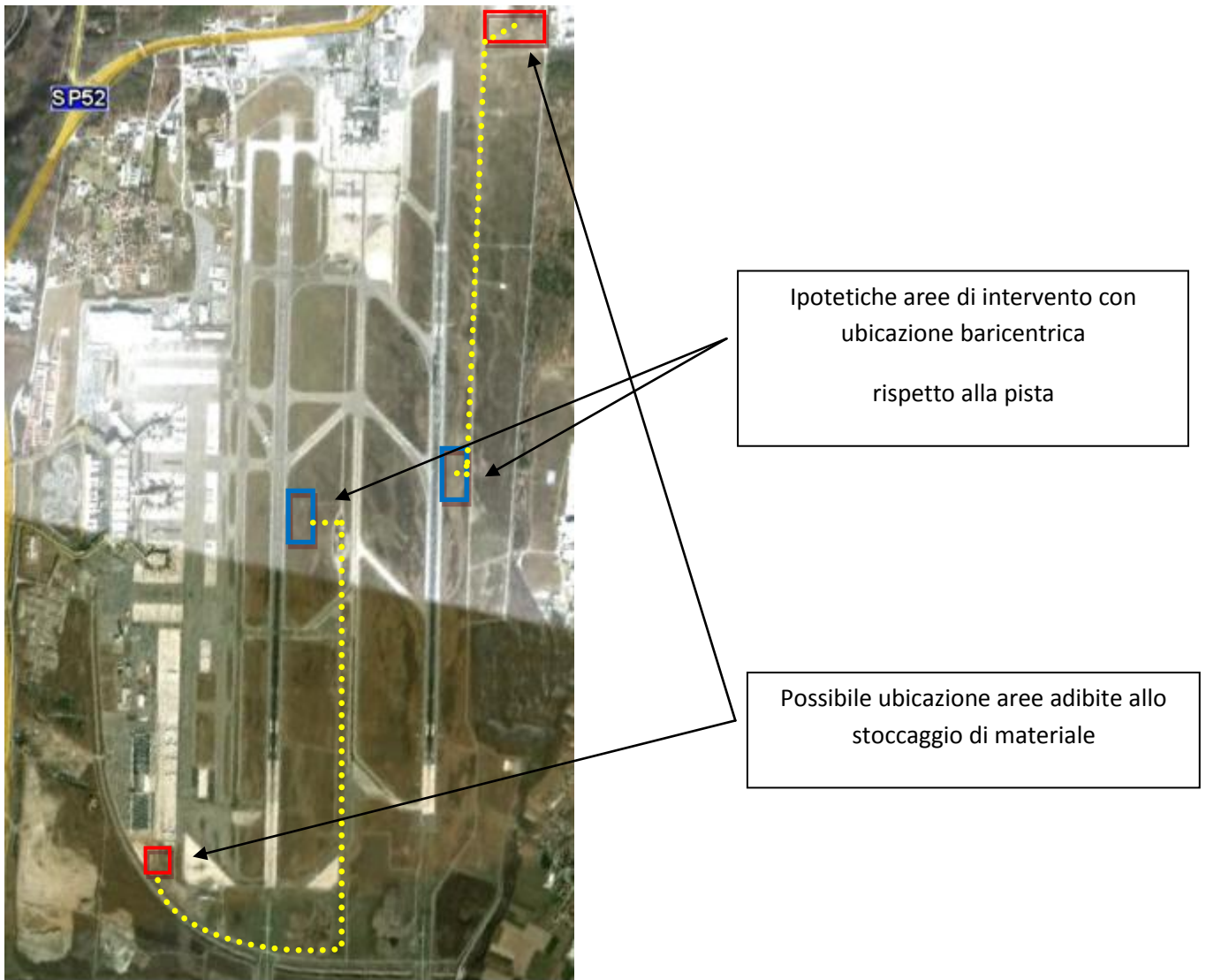


Fig. 3.18 – Schema percorsi aree di stoccaggio

In giallo sono stati evidenziati i percorsi, la cui lunghezza è di circa 2 km (circa 5 minuti).

Pertanto il ciclo che ogni mezzo deve compiere è costituito da:

- Carico materiale nell'area di lavorazione (4 min);
- Trasporto verso l'area di stoccaggio (5 min),
- Scarico materiale di risulta (1 min);
- Carico misto granulare (4 min);
- Trasporto verso l'area d'intervento (5min);
- Scarico materiale da porre in sito (1min).

Complessivamente pertanto il tempo di ciclo  $T_{ciclo}$  è pari a 20 minuti.

A questo punto risulta semplice calcolare il numero di mezzi di trasporto a servizio dell'escavatore con la seguente espressione:

$$N^{\circ} \text{ camion} = \frac{T_{\text{ciclo}}}{T_{\text{carico}}} = \frac{20 \text{ min}}{4 \text{ min}} = 5 \text{ camion}$$

Dal cronoprogramma si può osservare che, al fine di terminare tutta la lavorazione durante ogni finestra temporale notturna, l'attività di scavo e sostituzione del materiale può essere svolta per 3 ore a notte. Pertanto si ha una produttività di circa 1800 m<sup>2</sup> a notte, utilizzando un escavatore servito da 5 mezzi di trasporto.

In realtà va considerato che per ottenere uno strato finito di 30 cm di spessore è necessario stenderne uno di spessore maggiore, in quanto con la compattazione il volume dei vuoti si riduce e con esso lo spessore dello strato. Inoltre è buona norma realizzare strati di spessore superiore ai 25 cm in più stese, in modo da ottenere una compattazione ottimale. Infine va ricordato che lo scavo con escavatore a benna dentata non genera un piano omogeneo su cui stendere il misto granulare, pertanto è necessario eseguire ripetuti passaggi con macchine livellatrici al fine di ottenere una corretta giacitura e pendenza dei piani finiti. Per tali motivi la produttività oraria della lavorazione va ragionevolmente ridotta, per attestarsi ad un valore credibile attorno ai 1500 m<sup>2</sup> a notte. Dal punto di vista operativo le aree di lavorazione potrebbero essere ad esempio di 5 m di larghezza per 300 m di lunghezza.

Le fasi successive a quella di scavo e sostituzione del terreno in sito con il misto granulare di idonee caratteristiche, sono del tutto analoghe a quelle presentate nella modalità innovativa.

A questo punto sorge spontaneo effettuare un confronto tra le due modalità di lavorazione appena descritte sotto alcuni punti di vista particolarmente rilevanti.

In primo luogo si può analizzare il numero di mezzi impiegati. Il dettaglio dei macchinari e dei rispettivi consumi verrà presentato nel prossimo capitolo in cui si eseguirà l'analisi energetica ed ambientale, tuttavia appare evidente fin d'ora che la modalità tradizionale richiede un numero di mezzi maggiori. Precisamente le fasi di scavo e quelle successive alla compattazione saranno identiche tra le due modalità, la differenza è relativa alla modalità di stabilizzazione. Nel caso della metodologia innovativa sono sufficienti un pulvimixer ed una spandilegante, mentre nel caso della metodologia tradizionale sono necessari l'escavatore, i mezzi di carico, i mezzi di trasporto del materiale e i mezzi di

stesa del terreno. Pertanto da questo punto di vista la metodologia innovativa è certamente più conveniente. Considerazioni analoghe possono essere effettuate per il numero di persone impiegate nelle lavorazioni.

Dal punto di vista dei tempi di realizzazione abbiamo già calcolato che la metodologia innovativa consente una produttività di circa 3000 m<sup>2</sup> a notte, contro i circa 1500-1600 m<sup>2</sup> a notte della metodologia tradizionale. Questo si traduce nel fatto che, per eseguire le lavorazioni in tempi simili è necessario, nel caso della modalità tradizionale, lavorare su più lotti in contemporanea, con il conseguente maggiore impiego di mezzi e personale.

Per quanto concerne i costi, si può creare un confronto tra i costi delle materie prime, ovvero del cemento e del misto granulare. Nella tabella seguente (Tab. 3.5) è riportato il confronto sul totale dei costi e scorporato per ogni giornata di lavoro.

Materiali	Costo unitario [€/ton]	Quantità [ton]	Costo totale [€]	N° notti	Costo a notte [€]
Cemento	185	1481,76	€ 274.126	90	€ 3.046
Misto granulare	15	164.640	€ 2.469.600	180	€ 13.720

Tab. 3.5 – Confronto costi materie prime

Come si può osservare anche solo il confronto tra i costi delle materie prime, che peraltro su un cantiere ad altissima produttività come quello in questione incidono particolarmente, è nettamente appannaggio della metodologia innovativa.

Infine è bene sottolineare il grande vantaggio prodotto dall'impiego della metodologia innovativa in termini di qualità del risultato delle lavorazioni. Questa metodologia, agendo sul tenore di cemento in funzione dell'umidità, sulla profondità di stabilizzazione e sull'energia di compattazione, consente di ottenere il controllo della stabilizzazione del terreno e di generare una capacità portante il più simile possibile a quella prescritta. Al contrario con la metodologia tradizionale i parametri controllabili si riducono allo spessore dello strato di misto granulare e alla sua compattazione, che tuttavia deve produrre addensamenti tali da minimizzare deformazioni indesiderate. Questo produce una portanza che ben si adatta agli strati di sottofondo e fondazione dei rilevati stradali, ma non risulta ottimale per stabilizzazioni particolari quali quelle delle strip aeroportuali, che richiedono prestazioni molto specifiche di gradualità.

## 4 Analisi ambientale ed energetica

Nel capitolo introduttivo è stato presentato, da un punto di vista generale, quali siano le principali operazioni da compiere per eseguire una Life Cycle Impact Assessment. Tale organizzazione dell'analisi è assolutamente generale ed applicabile a qualsiasi contesto. In ambito aeroportuale, così come in numerosi altri, si possono distinguere due tipologie di lavorazioni: le attività ex novo e gli interventi manutentivi. Tale distinzione non è solo formale ma anche pratica. La tematica della sostenibilità aeroportuale ex novo è stata trattata parlando dei cosiddetti "green airports". In questo capitolo intendiamo presentare invece le prerogative dell'analisi di un intervento manutentivo. Una lavorazione di questo tipo deve sottostare alle esigenze di operatività dello scalo, avendo pertanto profondi vincoli realizzativi ed operativi che nell'esecuzione dell'analisi vanno presi in considerazione poiché da essi non è possibile prescindere.

Nello specifico si focalizzerà l'attenzione sul caso oggetto di studio e, più in generale, sulla metodologia innovativa di stabilizzazione dei terreni per il raggiungimento dei valori minimi di portanza delle strip. Approfondiremo le differenze tra la metodologia innovativa e quella tradizionale evidenziando quali siano i fattori maggiormente sensibili di variazione e l'entità della loro incidenza. Infine effettueremo un confronto e analizzeremo i risultati ottenuti.

Per quanto concerne l'analisi vera e propria sono stati considerati due aspetti fondamentali per valutare la sostenibilità di un intervento:

- L'analisi dell'impatto delle lavorazioni sull'ambiente in termini di emissioni;
- L'analisi dell'utilizzo di risorse energetiche per eseguire le lavorazioni.

Nel primo caso l'attenzione è rivolta all'esecuzione vera e propria della lavorazione, ovvero ai consumi dei mezzi operanti ed all'organizzazione del cantiere manutentivo. Nel secondo caso è stata analizzata la modalità di intervento scelta, i materiali impiegati e la loro disponibilità sul territorio. Quest'ultima, qualora risultasse assente o comunque insufficiente, richiederebbe il reperimento di materiali altrove con il conseguente trasporto fino al sito di realizzazione dell'intervento.



## 4.1 L'inquinamento prodotto dalle manutenzioni in ambito aeroportuale

Nel primo capitolo di questo elaborato si è analizzato quali siano le normative nazionali ed internazionali relative alla tutela dell'ambiente in ambito aeroportuale. È apparso fin da subito evidente come, tale ambito abbia innumerevoli sfaccettature, in quanto risultano moltissime e alquanto diversificate le interazioni di un' infrastruttura aeroportuale con l'ambiente.

Sono stati presentati alcuni tentativi, effettivamente realizzati, di progetto ed organizzazione sostenibile di un aeroporto, i cosiddetti “*green airports*”. Come si è visto, una progettazione che mira alla sostenibilità ambientale è condizione necessaria ma non sufficiente a garantire il risultato prefissatosi. Risulta fondamentale che la stessa sensibilità sia impiegata anche nelle fasi realizzative e di gestione dell'infrastruttura. Inoltre un aeroporto è per definizione il punto d'incontro tra due realtà: *l'air side* ed il *land side*. Il primo è caratterizzato dalle esigenze di circolazione e movimento in sicurezza dei velivoli, oltre alle operazioni di manutenzione e rifornimento e ai sistemi di assistenza e segnalamento per il volo. Il secondo è legato alle esigenze di spazi a misura d'uomo, confortevoli e nel contempo efficienti per l'espletamento di tutte le attività pre e post volo. Se si intende operare in ottica sostenibile si deve affrontare la problematica in entrambi questi ambiti.

In questo capitolo, tuttavia, intendiamo focalizzare la nostra attenzione solo su un settore particolare della gestione di un'infrastruttura aeroportuale e precisamente quello della manutenzione delle piste di volo e delle aree ad esse afferenti.

In generale, quando si analizza la sostenibilità di un intervento manutentivo, a prescindere dallo specifico ambito di riferimento, è necessario approfondire l'impatto prodotto dalle seguenti attività:

- Rimozione e gestione del materiale di risulta;
- Reperimento del materiale da impiegare nella manutenzione;
- L'esecuzione dell'attività manutentiva vera e propria.

Se ci si trovasse ad analizzare, ad esempio, le operazioni di manutenzione della pavimentazione della pista di volo, si dovrebbe considerare: lo smaltimento del conglomerato bituminoso fresato, l'impatto indotto dalla produzione del quantitativo di conglomerato da stendere in sito con il suo trasporto ed infine l'impatto dovuto alle lavorazioni, ovvero all'utilizzo dei macchinari per la scarifica, la stesa, la compattazione ecc. Ovviamente queste non sono le uniche voci che debbono essere considerate, tuttavia risultano essere le principali e certamente quelle da cui un'analisi di sostenibilità non può prescindere.

Il passo successivo è rappresentato dalla definizione della modalità di analisi della sostenibilità. Come descritto nel primo capitolo, parlando di Life Cycle Impact Assessment, è fondamentale stabilire gli indicatori per ogni categoria d'impatto, ovvero i parametri misurabili che consentano di analizzare, una volta scelta la categoria d'impatto che si vuole considerare, la variazione del dato.

Nelle lavorazioni di manutenzione in ambito aeroportuale oggetto di studio, è fondamentale scegliere categorie d'impatto semplicemente valutabili, in quanto l'ambiente di lavorazione non è confinato, come potrebbe essere ad esempio nel caso della semplice produzione del conglomerato bituminoso. Pertanto è auspicabile considerare categorie d'impatto quali:

- Emissioni gassose in atmosfera;
- Consumo energetico nelle fasi realizzative;
- Consumo energetico per la produzione dei materiali impiegati;

La scelta dell'indice di categoria è invece diretta conseguenza delle modalità di analisi utilizzate. In tal senso è evidente che, nel caso di lavorazioni eseguite su ampie superfici all'aperto, sia necessario utilizzare indici rappresentativi del fenomeno, misurabili con relativa semplicità e precisione. Inoltre, se ci si pone l'obiettivo di eseguire un confronto tra differenti modalità esecutive è necessario che tali indici siano rappresentativi in entrambe le modalità e che un'eventuale variazione dell'indice corrisponda ad una variazione apprezzabile della pratica esecutiva.

La misurazione della variazione dell'indice considerato risulta essenziale ai fini della precisione dell'analisi, pertanto la scelta di una valida modalità di analisi è essenziale. Considerando le ridotte finestre temporali in cui si svolgono le lavorazioni manutentive in ambito aeroportuale, e i numerosi vincoli che debbono essere rispettati per garantire

operatività allo scalo, risulta conveniente utilizzare indici che possano essere misurati anche in maniera indiretta, ovvero non durante le lavorazioni. Fatto salvo che l'esecuzione di misurazioni dirette, laddove possibile, è sempre utile come strumento di supporto e verifica dell'analisi eseguita.

Per via delle motivazioni appena esposte, si ritiene utile considerare indici di categoria quali:

- La quantità di anidride carbonica ( $CO_2$ ) prodotta dai mezzi d'opera;
- Il quantitativo di energia ( $MJ$ ) necessario a produrre un quantitativo unitario di materia prima da impiegare nella lavorazione;
- Emissioni ( $CO_2$ ) ed energie ( $MJ$ ) impiegate nel trasporto dei materiali;
- Emissioni ( $CO_2$ ) ed energie ( $MJ$ ) impiegate nel trattamento dei materiali di risulta.

Si vuole sottolineare come la scelta di tali categorie d'impatto e degli indici di categoria non risulti univoca, bensì dettata dallo scopo dell'analisi e dai mezzi a disposizione per svolgerla.

Un aspetto tra quelli sopracitati di grande importanza è quello del trattamento dei materiali di risulta. Al di là del fatto che, utilizzando i materiali in sito si risparmino le energie impiegate per la produzione ed il trasporto in loco di materiale nuovo, a fronte solo dell'impiego delle energie necessarie per l'eventuale trattamento del materiale esistente, va considerato un altro aspetto fondamentale. In moltissimi casi i materiali di risulta debbono essere allontanati dal sito in questione e trattati adeguatamente, pertanto oltre a non beneficiare di una materia già disponibile, è necessario accollarsi i costi, economici e non solo, del trattamento dei materiali di scarto.

## 4.2 Carbon footprints

Ci si appresta ora a presentare nel dettaglio gli indici considerati per le categorie d'impatto nell'analisi ambientale ed energetica.

Con il termine “*carbon footprints*”, ovvero “impronte di anidride carbonica”, si intende il quantitativo di gas serra emessi, direttamente o indirettamente, da una persona, un'operazione, una produzione o da un evento. In realtà i gas serra emessi sono molti e per semplicità si tende a riportare il dato in termini di emissioni di ossidi di carbonio equivalenti.

Un'impronta considera tutti i sei gas serra individuati dal Protocollo di Kyoto: ossidi di carbonio ( $CO_x$ ), metano ( $CH_4$ ), ossidi nitrici ( $N_2O$ ), idrofluorocarburi ( $HFC_s$ ), perfluorocarburi ( $PFC_s$ ) ed esafluoruro di zolfo ( $SF_6$ ). La particolarità di tali gas è che assorbono la radiazione infrarossa e pertanto possono avere effetti sul clima per tutto il tempo in cui restano nell'atmosfera.

Le carbon footprints si misurano in tonnellate di diossido di carbonio equivalente ( $tCO_2e$ ). Il diossido di carbonio equivalente ( $CO_2e$ ) consente di comparare gli effetti dei vari gas serra su base comparabile con un'unità di  $CO_2$ . Questo valore equivalente è possibile calcolarlo moltiplicando le emissioni di ciascun gas serra considerato per il suo GWP (*Global Warming Potential*) nell'arco di 100 anni.

Il GWP rappresenta una misura relativa del riscaldamento prodotto da un gas serra intrappolato nell'atmosfera. In sostanza rappresenta il confronto tra il riscaldamento causato da una certa quantità di tale gas presente in atmosfera e il riscaldamento causato dalla medesima quantità di  $CO_2$  intrappolata in atmosfera. Questo indice viene calcolato rispetto ad uno specifico intervallo temporale, solitamente 20, 100 o 500 anni. Alla fine l'espressione di GWP viene fornita come fattore rispetto all'ossido di carbonio, che per definizione ha un valore di GWP pari ad 1.

La determinazione di un certo GWP dipende dai seguenti fattori:

- La capacità di assorbimento di radiazione infrarossa di una certa sostanza;
- La localizzazione spettrale della sua lunghezza d'onda di assorbimento;
- La permanenza in atmosfera della sostanza.

Pertanto, un gas che avrà una lunga permanenza in atmosfera e una grande capacità di assorbimento delle radiazioni, avrà un valore di GWP elevato. Per quanto concerne la localizzazione spettrale della lunghezza d'onda di assorbimento il discorso è più complesso.

Anche se un gas assorbe in modo efficiente radiazioni ad una certa lunghezza d'onda, ciò potrebbe non avere effetti maggiori sul suo GWP, se l'atmosfera assorbe già più radiazioni a quella lunghezza d'onda. Questo perché, un gas ha il suo maggior effetto se il suo assorbimento avviene in una finestra di lunghezza d'onda in cui l'atmosfera è abbastanza trasparente.

Appare evidente, per i motivi appena citati, che i diversi gas serra abbiano impatti molto diversi sul clima, pertanto è utile definire il fattore moltiplicativo che consente di ottenere il valore di  $CO_2e$ . Il calcolo in questione risulta molto complesso ed i risultati debbono essere periodicamente aggiornati in virtù degli esiti di analisi eseguite sperimentalmente. Fortunatamente sono disponibili, da numerose ed autorevoli fonti, i fattori moltiplicativi calcolati sperimentalmente. Di seguito (Fig. 4.1), a titolo d'esempio, si riportano i fattori di conversione tratti dalle linee guida 2010 del DEFRA ( Department for Environmental, Food and Rural Affairs, UK).

<b>GHG</b>	<b>Multiply by the following figure to obtain the CO2e value:</b>
CO2	1
CH4	21
N2O	310
SF6	23,900
HFCs	140 - 11,700
PFCs	6,500 - 9,200

Fig. 4.1 – Fattori moltiplicativi per i gas serra (DEFRA)

Questi fattori sono stati calcolati su un periodo di permanenza in atmosfera dei gas serra pari a 100 anni. Tuttavia risulta fondamentale chiarire il ruolo del tempo di permanenza in atmosfera dei diversi gas considerati.

Appare logico che un gas, che venga rapidamente rimosso dall'atmosfera, possa avere sul breve periodo un'importanza rilevante, tuttavia sul lungo periodo la sua influenza è destinata a diminuire, in quanto la concentrazione di tale sostanza in atmosfera andrà riducendosi. Perciò il valore di GWP dipende in maniera sostanziale dalla velocità di decadimento della concentrazione del gas serra in atmosfera. Questo dato non è di facile valutazione, infatti vengono usualmente considerati orizzonti temporali molto ampi (20,100 e 500 anni) e comunque il dato non può essere ritenuto in tutti e per tutto esatto. Di seguito (Tab. 4.1), riportiamo la valutazione dei fattori moltiplicativi dei gas serra nei vari orizzonti temporali. Tali indici sono tratti dal 4<sup>th</sup> Assessment Report dell'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*).

GWP values and lifetimes from 2007 IPCC AR4	Lifetime (years)	GWP time horizon		
		20 years	100 years	500 years
Methane	12	72	25	7,6
Nitrous oxide	114	289	298	153
HFC-23 (hydrofluorocarbon)	270	12	14.800	12.200
HFC-134a (hydrofluorocarbon)	140	383	1.430	435
sulfur hexafluoride	3.200	163	22.800	32.600

Tab. 4.1 – Fattori moltiplicativi in diversi orizzonti temporali (IPCC)

Grazie alla conoscenza del GWP è possibile calcolare il valore corretto di  $CO_2$  equivalente. Nella tabella non è riportato alcun valore riferito al vapore acqueo, sebbene esso abbia capacità di assorbire le radiazioni infrarosse. Il motivo di tale scelta è dovuto al fatto che la presenza di vapore acqueo in atmosfera è assolutamente variabile con la temperatura dell'aria, pertanto risulta impossibile stimare un tempo di decadimento della concentrazione di tale gas. Qualora il gas considerato fosse un composto dei gas serra riportati è necessario eseguire un'analisi approfondita, in quanto non è pensabile applicare nessuna forma di interpolazione lineare utilizzando i dati riferiti ad altri gas.

## 4.3 Embodied energies

Dopo aver valutato nel dettaglio l'analisi ambientale, ci si occupa ora dell'aspetto prettamente energetico dell'analisi di sostenibilità.

L' "*embodied energy*", ovvero "energia inglobata", è definita come quell'energia commerciale (combustibili fossili, nucleare, ecc.) che è stata utilizzata nel processo di realizzazione e messa a disposizione di un qualsiasi prodotto.

L'obiettivo dell'*embodied energy* è di fornire un metodo consuntivo di rappresentazione dell'energia totale delle energie necessarie nell'intero ciclo di vita di un prodotto. Con l'espressione "ciclo di vita" di un prodotto si intende:

- L'estrazione delle materie prime necessarie alla produzione;
- Le trasformazioni delle materie prime;
- Gli assemblaggi;
- Le installazioni;
- Le fasi di dismissione e smantellamento;
- Tutte le fasi di trasporto che il prodotto e/o i suoi componenti necessitano.

Il ciclo di vita si ritiene concluso con la fine della vita utile del prodotto.

Esistono diverse metodologie per il calcolo delle energie inglobate, in quanto risulta determinante il fine per il quale tale analisi debba essere svolta. Normalmente lo scopo del calcolo è di definire quali energie sia necessarie per consentire il consumo di un certo prodotto, in modo tale da poter assegnare alla domanda finale tutto il corrispondente ammortamento energetico.

Differenti metodologie di analisi utilizzano diverse scale di dati nel calcolo delle energie inglobate in un prodotto o in un servizio utile all'ambiente o all'uomo. Attualmente non esiste consenso unanime a livello internazionale sulle metodologie di calcolo e la scala dei dati. Tutto ciò conduce ad avere, per un dato materiale, diverse possibili valutazioni della corrispondente energia inglobata in esso.

Quello dell'*embodied energy* è un tema su cui la comunità scientifica non è ancora riuscita a giungere ad un'assoluta convergenza, a causa delle moltissime variabili che vanno

considerate nella loro definizione e nel rispettivo calcolo. Tuttavia è generalmente accettato l'utilizzo del metodo delle embodied energies per paragonare diversi prodotti, servizi o metodologie realizzative. Ad esempio l'Università di Bath (UK) ha elaborato un elenco interattivo, chiamato ICE (*Inventory of Carbon and Energy*), in grado di fornire l'embodied energy di un notevole numero di materiali utilizzati in edilizia. Anche l'Università di Berkeley (California) ha elaborato un software chiamato PaLATE (*Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects*), con cui è possibile eseguire la valutazione dell'impatto ambientale delle lavorazioni di pavimentazione, utilizzando anche il calcolo delle embodied energies. In realtà esistono molte liste contenenti valori medi assoluti utilizzabili per il calcolo delle embodied energies, in cui sono spiegati di volta in volta i fattori presi in considerazione per redigere la lista in questione.

A titolo d'esempio si riportano (Tab. 4.2) i valori di embodied energy, tratti dall'ICE, per alcuni materiali di frequente utilizzo in edilizia.

Material	Specific energy [MJ/Kg]	Density at STP [g/cm <sup>3</sup> ]	Volumetric energy [GJ/m <sup>3</sup> ]	Principle inputs
Aluminium	220	2,7	590	bauxite
Asphalt concrete	2,4	2,3	5,5	gravel, bitumen
Concrete	0,95	1,1	1,0	rock, sand, Portland cement
Copper	70	8,9	630	chalcopryrite
Glass	16	2,5	40	sand
Plastic (LDPE)	80	0,92	74	petroleum
Steel	35	7,8	270	iron ore

Tab. 4.2 – Valori di energia per materiale (ICE)

Come si può vedere una tipica unità di misura per l'embodied energy è quella del  $MJ/Kg$ , ovvero i MJ di energia necessaria per produrre 1Kg di prodotto. Un'altra unità di misura utilizzata è quella delle  $tCO_2/Kg$ , ovvero le tonnellate di anidride carbonica emessa per produrre 1Kg di prodotto. In realtà la conversione tra queste due unità di misura non è diretta, in quanto diversi tipi di energia (eolica, solare, nucleare, da combustibili fossili, ecc.) producono diverse quantità di anidride carbonica. Perciò l'ammontare reale di  $CO_2$  emessa nella produzione dipende dal tipo di energia impiegata nel processo produttivo.



## 4.4 Metodologia di calcolo delle emissioni relative alle fasi di esecuzione

Per quanto concerne il caso oggetto di studio, si presenta ora la metodologia di calcolo delle emissioni, fatto salvo quanto appena indicato a riguardo dell'analisi ambientale.

L'obiettivo dell'analisi è quello di definire la quantità di gas serra, ed in particolare di anidride carbonica, emessa nel complesso delle lavorazioni di stabilizzazione di una strip aeroportuale, effettuate con la stabilizzazione a legante idraulico del terreno in sito.

La base di partenza dell'analisi è costituita dalla conoscenza del numero e tipologia di macchinari presenti ed utilizzati in cantiere. Questo dato è desumibile da un'analisi di produttività, in quanto risultano note, per ogni finestra lavorativa, le operazioni da eseguire ed il tempo disponibile per ogni fase esecutiva. Si riporta di seguito (Tab. 4.3) una tabella riassuntiva del numero e tipologia di mezzi utilizzati nel caso oggetto di studio, al fine di garantire il rispetto del cronoprogramma e dei vincoli operativi, imposti dal contesto aeroportuale.

Macchinari	N° di mezzi
Escavatore	1
Pulvimixer	1
Spandilegante	1
Grader	1
Pala gommata	1
Rulli	1 gommato 1 monotamburo
Veicolo per idrosemina	1

Tab. 4.3 – Tipologia e numero di mezzi impiegati

Nel calcolo delle emissioni non sono stati considerati i mezzi di supporto (torri faro, veicoli per movimento del personale, ecc.). Non è stata nemmeno considerata la presenza di autobotti, in quanto l'utilizzo di tale mezzo avviene solo in determinate condizioni ambientali.

Definite le tipologie di macchinari impiegati è possibile, conoscendo il cronoprogramma delle lavorazioni ed effettuando un'analisi di produttività in base alle caratteristiche proprie

dei mezzi, calcolare il tempo di impiego, per ogni finestra temporale, del singolo macchinario (Fig. 4.5).

Macchinari	Impiego a notte [h]
Escavatore	2
Pulvimixer	3,5
Spandilegante	1
Grader	5
Pala gommata	4
Rullo gommato	2
Rullo monotamburo	1,5
Veicolo per idrosemina	1,5

Tab. 4.4 – Tempo d’impiego di ogni macchinario

Ovviamente il tempo d’impiego di ogni mezzo a notte è comprensivo di tutte le fasi operative in cui il macchinario risulta impiegato.

Per poter conoscere l’emissione prodotta da ognuno di questi macchinari è fondamentale reperire i dati relativi al sistema di propulsione utilizzato da ciascun mezzo d’opera. Questa operazione è fortemente agevolata dalla disponibilità delle schede tecniche dei mezzi, in cui si riportano i dati relativi ai motori endotermici montati dal macchinario. A titolo d’esempio si riporta (Fig. 4.2) la scheda relativa al pulvimixer *Wirtgen 2500 S*.

	Riciclatrice WR 2500 S Largh. di fresatura 2.438 mm	Riciclatrice WR 2500 S Largh. di fresatura 3.048 mm
Max. larghezza di fresatura	2.438 mm	3.048 mm
Profondità di fresatura**	0 – 500 mm	0 – 500 mm
Rullo di fresatura		
Interlinea	30 mm	37 mm
Numero denti di fresatura	216	216
Diametro di taglio	1.480 mm	1.480 mm
Motore		
Produttore motore	Deutz AG	Deutz AG
Modello	TCD 2015 V08	TCD 2015 V08
Raffreddamento	Acqua	Acqua
Numero cilindri	8	8
Potenza	500 kW/670 HP/680 PS	500 kW/670 HP/680 PS
Numero giri	2.100 min <sup>-1</sup>	2.100 min <sup>-1</sup>
Cilindrata	15.874 cm <sup>3</sup>	15.874 cm <sup>3</sup>
Consumo carburante a pieno carico	142 l/h	142 l/h
Consumo carburante a 2/3 carico	95 l/h	95 l/h
Caratteristiche di avanzamento		
1° velocità di avanzamento	0 – 15 m/min	0 – 15 m/min
2° velocità di avanzamento	0 – 40 m/min	0 – 40 m/min
3° velocità di avanzamento	0 – 80 m/min	0 – 80 m/min
4° velocità di avanzamento	0 – 200 m/min	0 – 200 m/min
Pendenza teorica	57 %	57 %
Inclinazione trasversale max.	8°	8°
Luce da terra	370 mm	370 mm

Fig. 4.2 – Pulvimixer WR 2500 S (Wirtgen)

Una volta note le caratteristiche del motore è possibile utilizzare i relativi diagrammi di caratteristiche meccaniche. Questi diagrammi sono costituiti da curve nello spazio (Coppia – Velocità di rotazione) o (Potenza – Velocità di rotazione) e consentono di conoscere il regime di funzionamento del motore in base alla sua velocità di rotazione. Si precisa che da un punto di vista prettamente fisico sarebbe necessario parlare di velocità angolare del motore, misurata pertanto in  $[rad/sec]$ , tuttavia risulta più pratica e assolutamente diffusa l'abitudine a considerare il numero di giri al minuto  $[rpm]$  (*revolution per minute*) quale unità di misura della velocità di rotazione del motore. Di seguito si riporta la caratteristica meccanica del propulsore relativo al pulvimixer precedentemente considerato (Fig. 4.3).

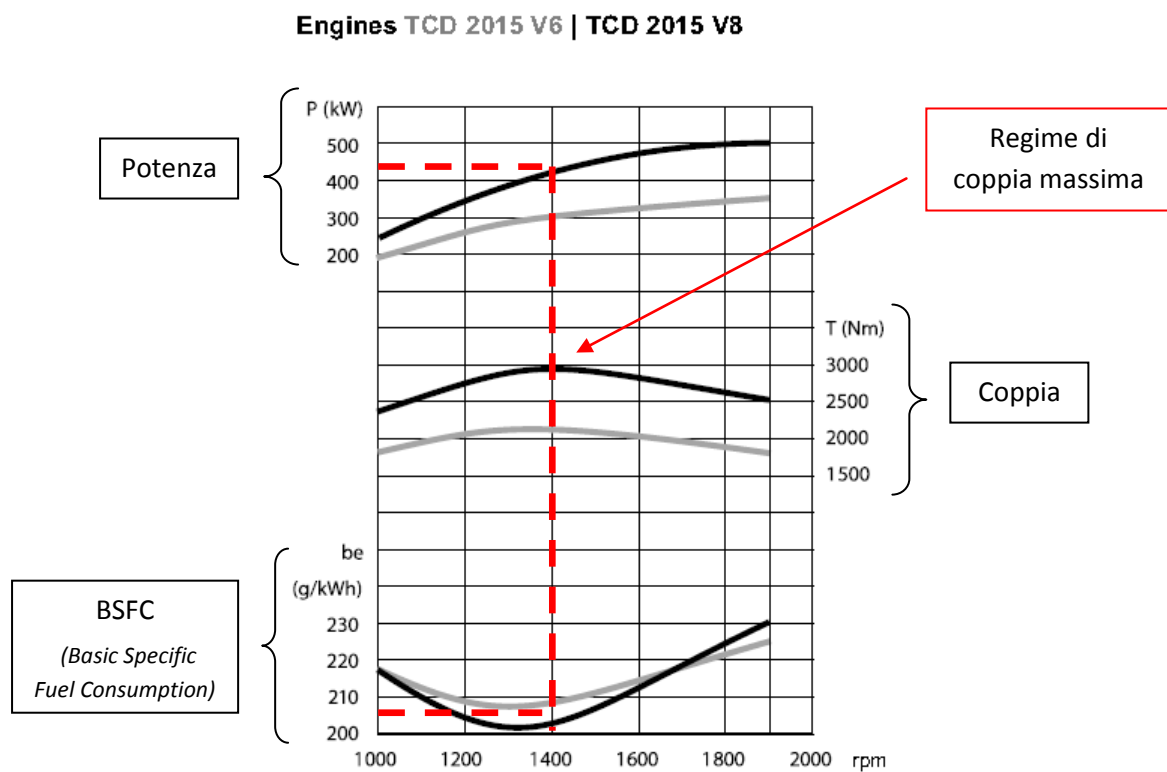


Fig. 4.3 – Caratteristica meccanica: TCD 2015 V8 (Deutz)

Dalla caratteristica meccanica è possibile risalire al regime di coppia massima, ovvero al valore della potenza di funzionamento del motore in corrispondenza della produzione della massima coppia motrice. Tale potenza nel caso dei motori endotermici risulta sempre minore di quella massima erogabile dal motore.

Una volta definito il regime di coppia massima resta da calcolare il consumo specifico di carburante del motore (BSFC) a quel regime di funzionamento. Se, come nel caso sopra riportato, la casa produttrice del motore fornisce, assieme alla caratteristica meccanica del motore, anche l'andamento del consumo di carburante, l'operazione risulta banale, in quanto è sufficiente leggere il valore di BSFC sul grafico, in corrispondenza del regime di coppia massima. Tuttavia, non tutte le case produttrici rendono disponibile tale andamento; in tal caso è possibile utilizzare il valore di BSFC fornito nella scheda tecnica del motore, che corrisponde per definizione, salvo diverse indicazioni della casa costruttrice, al valore del consumo di carburante in corrispondenza della massimo valore di coppia erogabile. Ad esempio, si riporta un estratto dalla scheda tecnica del motore *Deutz TCD 2012 L04-L06* (Fig. 4.4).

<b>EU Stage III A / US-EPA Tier 3 Power ratings for mobile construction machines<sup>1)</sup></b>			
Power output to ISO 14396	kW   hp	103   138	155   208
At engine speed	rpm	2400	2400
At mean, effective pressure	bar   psi	12.8   186	12.8   186
Max. torque	Nm   lb-ft	520   384	810   597 <sup>4)</sup>
At engine speed	rpm	1600	1600
Minimum idle speed	rpm	650	650
Specific fuel consumption <sup>3)</sup>	g/kWh   lb/hp-hr	215   0.35	215   0.35
Weight acc. to DIN 70020, Part 7A <sup>3)</sup>	kg   lb	400   882	510   1125

Fig. 4.4 – Scheda tecnica motore: TCD 2012 L04-L06 (Deutz)

A questo punto, definito il valore di BSFC del motore in questione al regime di coppia massima, è possibile calcolare il quantitativo di carburante impiegato nella produzione dell'energia meccanica da impiegare, con la seguente espressione:

$$Diesel [g] = BSFC \left[ \frac{g}{KWh} \right] \cdot Potenza_{coppia\ max} [KW] \cdot Tempo\ impiego\ mezzo [h]$$

Il motivo della scelta del calcolo del quantitativo di carburante impiegato al regime di coppia massima è dettato dall'osservazione pratica delle lavorazioni in cantiere. In una finestra temporale estremamente ridotta, come quella di un cantiere ad alta produttività, i mezzi operano sfruttando al massimo la propria capacità motrice, sia negli spostamenti che nelle fasi operative vere e proprie. Perciò è ragionevole pensare che il regime di funzionamento del propulsore, durante le fasi operative di utilizzo del macchinario, coincida con il regime di coppia massima. Inoltre si può notare che, dal punto di vista

ambientale, tale circostanza risulta auspicabile, in quanto, come si può osservare nella caratteristica meccanica riportata in precedenza, l'andamento del BSFC presenta un minimo in corrispondenza di tale regime. Ciò è dovuto al fatto che, i motori endotermici presentano il valore massimo di coppia per un regime di velocità di rotazione intermedio rispetto ai valori limite, in corrispondenza dei quali la combustione del carburante può avvenire solo in maniera parziale. Pertanto il regime di coppia massima rappresenta anche il regime di funzionamento del motore più efficiente, ovvero in grado di produrre la coppia maggiore con un consumo di carburante minore.

Resta ora da calcolare l'emissione prodotta dalla combustione della quantità di diesel appena ottenuta.

Le linee guida dell'IPCC, riportate dall'EPA (*Environmental Protection Agency*), ovvero l'agenzia federale statunitense per la protezione dell'ambiente, richiedono che nel calcolo delle emissioni di  $CO_2$  prodotte dal funzionamento di un motore, venga considerato un fattore di ossidazione. Questo fattore serve a restituire il fatto che non tutto il combustibile venga realmente ossidato nel processo di combustione di un motore endotermico. Gli studi compiuti dall'OTAQ (*Office of Transportation and Air Quality*), ufficio dell'EPA, suggeriscono di considerare per tutti i motori che utilizzano petrolio o suoi derivati, un fattore di ossidazione pari a 0,99. Tale fattore sta a significare che si presume una combustione effettiva del 99% del carburante impiegato.

Va altresì considerato il quantitativo di carbonio presente nel combustibile diesel. Questo quantitativo può variare, ma mediamente (*fonte EPA*) si può considerare che, per il gasolio ed il diesel, il valore si attesti attorno ai:

- Gasolio: 2,421 *grammi al gallone*
- Diesel: 2,778 *grammi al gallone*

Ricordando che la massa molecolare del  $CO_2$  è pari a 44 e quella del carbonio  $C$  è pari a 12, si può calcolare, in definitiva, la quantità di  $CO_2$  emessa con la combustione di una data quantità di diesel, con la seguente espressione:

$$Emissioni\ di\ CO_2 = 2,778g \cdot 0,99 \cdot \frac{44}{12} = 10,084 \frac{g}{gallone} = 2,6639\ kg/l$$

Pertanto bruciando 1 litro di diesel vengono emessi 2,6639 kg di  $CO_2$ . Grazie a questo fattore, avendo calcolato in precedenza i consumi di ogni macchinario in grammi di diesel,

sarà sufficiente convertire l'unità di misura del diesel in litri ( $\gamma_{diesel} = 0,85 \text{ kg/litro}$ ) e moltiplicare il valore ottenuto per il fattore di emissione appena trovato.

Eseguendo la suddetta operazione per tutti i macchinari considerati è possibile calcolare le emissioni giornaliere totali della lavorazione di stabilizzazione del terreno della strip.

Di grande interesse è il valore complessivo, ovvero il totale delle emissioni su tutta la durata dell'intervento. Questo valore risulta dipendere direttamente dalla produttività del cantiere, ovvero, se si immagina di utilizzare il doppio dei mezzi d'opera, la durata della lavorazione risulta dimezzata, ma la produttività ed il valore di emissioni complessive del cantiere risultano invariati.

Per quanto esposto precedentemente, parlando di "carbon footprints", sarebbe necessario trasformare il calcolo dalla  $CO_2$  in  $CO_2e$ , con le modalità presentate nel paragrafo corrispondente. Tuttavia questa operazione presenta nella pratica delle difficoltà, in quanto risulta molto complesso definire quale sia lo spettro di emissioni gassose prodotte dalla combustione del diesel e soprattutto va sottolineato che le emissioni finali dipendono da numerosi fattori quali:

- La vita utile del motore;
- La sua tipologia costruttiva e funzionamento specifico;
- I sistemi di filtraggio dei gas di scarico predisposti;
- La combustione del carburante nel propulsore.

Questi dati potrebbero essere forniti dalle case costruttrici di motori solo fornendo l'identificativo di uno specifico propulsore, in quanto esso è stato testato su banco di prova prima della sua messa in vendita. Anche in tal caso andrebbe comunque considerato il fatto che il comportamento ed il rendimento di un motore endotermico variano nel corso della sua vita utile.

Per di più, i fattori di conversione per ottenere il valore di  $CO_2e$ , come già stato esposto nel relativo paragrafo, sono definiti e diversi, in quanto dipendono dal GWP del composto chimico. Pertanto sarebbe necessario conoscere la quantità precisa di ogni tipo di composto chimico prodotto dal ciclo combustione ed emesso dal motore.

Per tutti questi motivi, in questo elaborato abbiamo considerato solo il calcolo delle emissioni in termini di  $CO_2$ , che rappresentano comunque il contributo maggiore delle emissioni inquinanti ai fini di un'analisi ambientale.

## 4.5 Metodologia di calcolo delle energie relative alle fasi di esecuzione

La metodologia di esecuzione dell'analisi energetica delle fasi esecutive, rispetto all'analisi ambientale delle emissioni appena condotta, risulta più immediata, in quanto si utilizzano i fattori di calcolo disponibili in letteratura.

Considerando il caso oggetto di studio, l'analisi energetica è stata condotta rispetto a due ambiti molto precisi, rappresentati da:

- Le materie prime utilizzate in cantiere;
- Il trasporto del materiale fino al sito di lavorazione.

Per poter disporre dei fattori di calcolo delle embodied energies è stata eseguita una ricerca bibliografica rispetto a fonti diverse, dopodiché si è calcolato il valore medio tra tutti i fattori trovati. Questo valore è stato quello utilizzato poi nei calcoli delle energie necessarie a reperire le materie prime e trasportarle dal sito d'origine fino in cantiere.

Si riportano di seguito le tabelle con il calcolo dei fattori moltiplicativi (Tab. 4.5; Tab. 4.6; Tab. 4.7).

Cement	
Sources	Energy [MJ/t material]
IVL (SW)	4976
PCA	6640
Victoria Univ. (NZ)	6084
<b>Mean</b>	<b>5900,00</b>

Tab. 4.5 – Embodied energy: cemento

Truck Transportation	
Sources	Energy [MJ/t-Km material]
IVL - Athena	0,9
IVL (SW)	0,459375
IVL (SW)	0,935714286
www.Biograces.net	0,94
<b>Mean</b>	<b>0,81</b>

Tab. 4.6 – Embodied energy: trasporto

Crushed Aggregates	
Sources	Energy [MJ/t material]
IVL (SW)	40
Athena (CA)	40
Athena 2006	40
Häkkinen and Mäkelä	52
WRAP (UK)	21,1
Victoria Univ. (NZ)	40
<b>Mean</b>	<b>38,85</b>

Tab. 4.7 – Embodied energy: misto granulare

Per ottenere il valore di impatto energetico di ogni ambito considerato è sufficiente moltiplicare il fattore appena ottenuto, calcolato in *MJ* rispetto a grandezze unitarie, per il valore complessivo di materia prima impiegata o entità del trasporto effettuato.

Come materie prime sono stati considerati il cemento impiegato nella stabilizzazione del terreno ed il misto granulare che, nella metodologia innovativa di trattamento delle strip viene utilizzato solo per eventuali zone in sterro che andrebbero ripianate. Al contrario, nella metodologia tradizionale di lavorazione, il misto granulare costituisce il materiale di base della bonifica. Anche il trasporto del materiale, come si vedrà in maniera dettagliata nei prossimi paragrafi, va considerato in entrambe le metodologie di stabilizzazione, ma avrà incidenze alquanto differenti sull'impatto energetico complessivo della lavorazione.



## 4.6 Analisi dei risultati

Presentiamo ora i risultati ottenuti per quanto concerne l'analisi energetica ed ambientale del caso oggetto di studio, ovvero le operazioni di stabilizzazione del terreno delle strip aeroportuali di Malpensa. Sebbene l'intervento in realtà riguardi le strip di entrambe le piste, per conferire a questa analisi maggiore generalità, abbiamo condotto i calcoli considerando la CGA della strip di una sola pista di volo.

L'analisi ambientale, condotta con la modalità illustrata precedentemente, ha fornito i seguenti risultati (Tab. 4.8.):

Macchinari	Impiego a notte [h]	Tot CO <sub>2</sub> prodotta [Kg]	Incidenza sul totale
Escavatore	2	16.769	8,4%
Pulvimixer	3,5	86.243	43,3%
Spandilegante	1	8.187	4,1%
Grader	5	28.136	14,1%
Pala gommata	4	29.109	14,6%
Rullo gommato	2	10.916	5,5%
Rullo monotamburo	1,5	12.280	6,2%
Veicolo per idrosemina	1,5	7.616	3,8%
<b>TOTALE</b>		<b>199.254</b>	<b>100,0%</b>

Tab. 4.8 – Risultati analisi ambientale

Pertanto, la stabilizzazione della CGA di una strip aeroportuale con la metodologia innovativa proposta, produce l'emissione di circa 200 tonnellate di CO<sub>2</sub>. Di queste la maggior frazione è generata dall'impiego del pulvimixer (43,3%), che tuttavia si ricorda essere impiegato sia nella fase preliminare di scotico, che durante la miscelazione del terreno con il legante idraulico. La fase meno impattante risulta essere invece quella relativa all'idrosemina (3,8%).

L'analisi energetica condotta ha fornito i seguenti risultati (Tab. 4.9):

Materiali	Quantità [ton]	Energia [MJ/ton]	Energia produzione [MJ]
Cemento	1481,76	5900,00	8.742.384

Trasporto [MJ/ton-Km]	Entità trasporto [Km]	Energia trasporto [MJ]	Energia totale [MJ]
0,81	20	23.968	8.766.352

Tab. 4.9 – Risultati analisi energetica

In questa analisi sono stati considerati sia l'embodied energy dovuta alla produzione del cemento che quella relativa al suo trasporto dal cementificio, la cui ubicazione è stata supposta essere a 20 km dall'aeroporto. Tuttavia ci preme sottolineare fin da subito come, con questa metodologia realizzativa, l'impatto energetico del trasporto sia irrisorio, rispetto all'energia impiegata nella produzione del cemento. Complessivamente, i materiali impiegati nella stabilizzazione della CGA ed il loro trasporto in sito, comportano l'impiego di circa 8766 mila MJ di energia.

I calcoli completi, relativi ad entrambe le analisi, sono riportati nell'Appendice A.

Nel prossimo paragrafo verranno analizzate, con le stesse modalità, le lavorazioni compiute con la metodologia tradizionale ed effettueremo un'analisi critica dei risultati ottenuti in entrambi i casi.

## 4.7 Confronto con le metodologie tradizionali

Prima di presentare i risultati ottenuti dall'analisi delle lavorazioni svolte con la metodologia tradizionale di stabilizzazione dei terreni in sito aeroportuale, si ritiene necessario esprimere alcune considerazioni in merito a tale metodologia operativa, anche in relazione a quanto esposto precedentemente trattando la metodologia innovativa.

L'esecuzione delle fasi lavorative con la metodologia tradizionale è certamente più lenta rispetto a quella innovativa, tant'è che, utilizzando un numero di mezzi d'opera e un personale comparabile con quello previsto nel caso della stabilizzazione a legante idraulico, si ottiene una produttività sul ciclo lavorativo notturno praticamente dimezzata. Pertanto tutti i mezzi d'opera dovranno lavorare per un periodo di tempo all'incirca doppio, rispetto al caso precedente, oppure, in maniera del tutto equivalente, sarà necessario impiegare un numero doppio di mezzi d'opera per un tempo paragonabile a quello impiegato nell'esecuzione con metodologia innovativa.

Nel nostro caso si è ritenuto più semplice considerare l'impiego di un numero di mezzi simile a quello impiegato con la metodologia innovativa, ovviamente ampliando gli orizzonti temporali di lavorazione. Infatti si può ritenere che, con l'impiego dei mezzi sotto riportati (Tab. 4.10), operando in cicli lavorativi di 6 ore a notte, come nel caso precedente, le lavorazioni vengano completate in circa 180 giorni. Con la metodologia innovativa, invece, è possibile ritenere che il tempo necessario sia di circa 90 giorni.

Macchinari	N° di mezzi
Escavatore	1
Dozer	1
Camion (cava- cantiere)	5
Camion (in cantiere)	5
Grader	1
Pala gommata (notte)	2
Pala gommata (giorno)	1
Rullo gommato	1
Rullo monotamburo	1
Veicolo per idrosemina	1

Tab. 4.10 – Metodologia tradizionale: tipologia e numero di mezzi impiegati

Si può evidenziare, rispetto al caso precedente, che alcuni mezzi sono stati considerati sotto due voci distinte. Tutto ciò è dovuto al fatto che, come ampiamente spiegato in precedenza, tale metodologia lavorativa richiede la sostituzione del terreno presente in sito con inerti da cava. Affinché ciò possa avvenire è fondamentale che vi sia l'approvvigionamento ed il trasporto del materiale da cava fino nell'area di stoccaggio predisposta nel cantiere aeroportuale. Questa operazione si ritiene possa avvenire durante il giorno, utilizzando per il trasporto gli stessi camion utilizzati in cantiere di notte e con l'ausilio di una pala gommata per gestire l'accumulo del materiale scaricato dai mezzi di trasporto nell'area di stoccaggio. Dato che tali operazioni sono indispensabili ai fini della produttività del cantiere sono state considerate direttamente nelle analisi ambientali ed energetica.

Effettuando l'analisi ambientale con le modalità presentate in precedenza, si sono ottenuti i seguenti risultati (Tab. 4.11).

Macchinari	Impiego a notte [h]	Tot CO <sub>2</sub> prodotta [Kg]	Incidenza sul totale
Escavatore	3	50.306	8,0%
Dozer	3	49.121	7,8%
Camion (cava- cantiere)	7	191.802	30,5%
Camion (in cantiere)	3	63.934	10,2%
Grader	5	56.271	8,9%
Pala gommata (notte)	4	116.435	18,5%
Pala gommata (giorno)	4	58.217	9,3%
Rullo gommato	1,5	16.374	2,6%
Rullo monotamburo	1	16.374	2,6%
Veicolo per idrosemina	1	10.154	1,6%
<b>TOTALE</b>		<b>628.987</b>	<b>100,0%</b>

Tab. 4.11 – Metodologia tradizionale: risultati analisi ambientale

Una precisazione fondamentale va fatta sul calcolo delle emissioni prodotte dai camion, in quanto sono state calcolate in maniera diversa da quanto presentato nel paragrafo 4.4. Quanto esposto sulla metodologia di calcolo delle emissioni di CO<sub>2</sub> e fin qui adottato nelle analisi ambientali, è appropriato per i mezzi d'opera che, si può ragionevolmente ritenere, operino quasi costantemente in regime di coppia massima, per ottenere dal motore endotermico le massime prestazioni erogabili. Tuttavia, un mezzo di trasporto come il camion non opera costantemente in tali condizioni. Nelle fasi di trasporto materiale in cantiere è lecito ritenere che i consumi di carburante siano maggiori di quelli necessari per compiere il percorso cava-cantiere, che si sviluppa su viabilità ordinaria, ma considerare che il mezzo operi per tutta la durata della fase lavorativa al regime di coppia massima

risulta eccessivo. Inoltre non va dimenticato che i mezzi di trasporto nelle fasi di carico del materiale sono sostanzialmente fermi, perciò i consumi in tali circostanze risultano minimi, poiché minimo sarà il regime di funzionamento del motore.

Per tali motivi si è ritenuto opportuno calcolare i consumi di carburante dei camion non facendo riferimento al BSFC, come per tutti gli altri mezzi d'opera, ma ad un dato sperimentale relativo al consumo di diesel per chilometro percorso. Sono stati adottati due valori di consumo, relativamente al trasporto in cantiere e su viabilità ordinaria:

- Percorrenza su viabilità ordinaria: 3 km con 1 litro di diesel;
- Percorrenza su viabilità di cantiere: 1,5 km con 1 litro di diesel.

I calcoli eseguiti sono riportati per esteso nell'Appendice A.

Per quanto concerne l'analisi energetica è stata svolta in modo del tutto analogo a quanto già esposto nell'analisi della metodologia innovativa, pertanto ci si limita a riportare i risultati ottenuti (Tab. 4.12)

Materiali	Quantità [ton]	Energia [MJ/ton]	Energia produzione [MJ]
Misto granulare	164.640	38,85	6.396.264

Trasporto [MJ/ton-Km]	Entità trasporto [Km]	Energia trasporto [MJ]	Energia totale [MJ]
0,81	15	1.997.344	8.393.608

Tab. 4.12 – Metodologia tradizionale: risultati analisi energetica

Per eseguire questa analisi si è supposto che la cava di prestito degli inerti si trovi ad una distanza di 15 km dal sito aeroportuale. Tale dato è veritiero nel caso oggetto di studio relativo all'aeroporto di Malpensa, tuttavia, per garantire all'analisi un valore generale, è stata effettuata un'analisi di sensitività alla distanza di trasporto degli inerti. Rispetto alla metodologia innovativa si vuole evidenziare fin da subito che, tale aspetto, assume un'importanza sostanziale, in quanto il trasporto del materiale è una delle voci a maggior incidenza nella valutazione energetica ed ambientale della metodologia tradizionale di stabilizzazione.

Il confronto dei risultati dell'analisi ambientale svolta per ciascuna tipologia esecutiva rivela i vantaggi notevoli conseguibili con la tecnica innovativa. La tabella seguente (Tab. 4.13) mostra il confronto tra i valori di  $CO_2$  prodotta nell'uno e nell'altro caso.

Metodologia esecutiva	Tot CO <sub>2</sub> prodotta [Kg]
Tradizionale	628.987
Innovativa	199.254

Tab. 4.13 – Confronto ambientale tra le metodologie realizzative

Si può notare come la metodologia tradizionale produca più del triplo (3,16 volte) di emissioni di anidride carbonica rispetto alla metodologia innovativa. Per comprendere l'incidenza delle varie fasi esecutive su questo risultato si possono osservare i seguenti grafici.

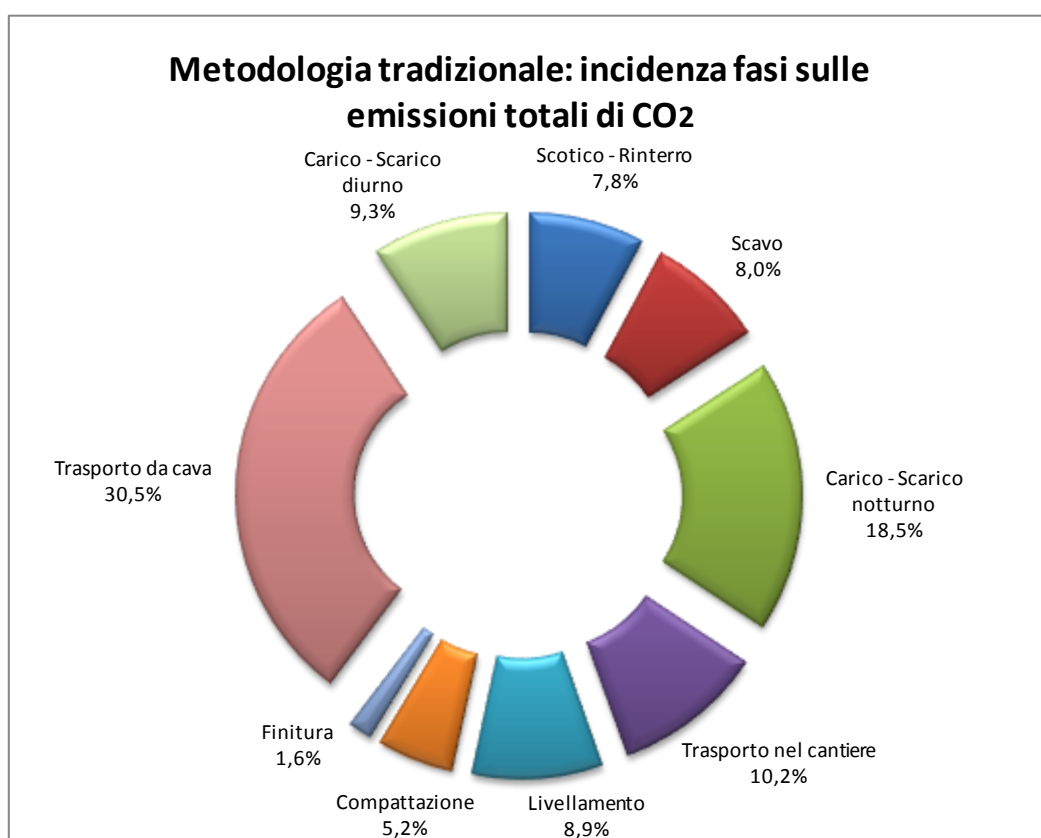


Fig. 4.5 – Metodologia tradizionale: incidenza delle fasi sulle emissioni totali

Si può notare come la fase di trasporto del materiale dalla cava al sito del cantiere costituisca da sola oltre il 30% delle emissioni di anidride carbonica. Le operazioni di movimentazione del materiale all'interno del cantiere, intese come somma delle fasi di carico-scarico e trasporto, costituiscono complessivamente l'altra voce fondamentale delle emissioni inquinanti dovute alla lavorazione (28,7%). Come ci si poteva attendere le fasi di finitura superficiale risultano invece le meno impattanti (1,6%).

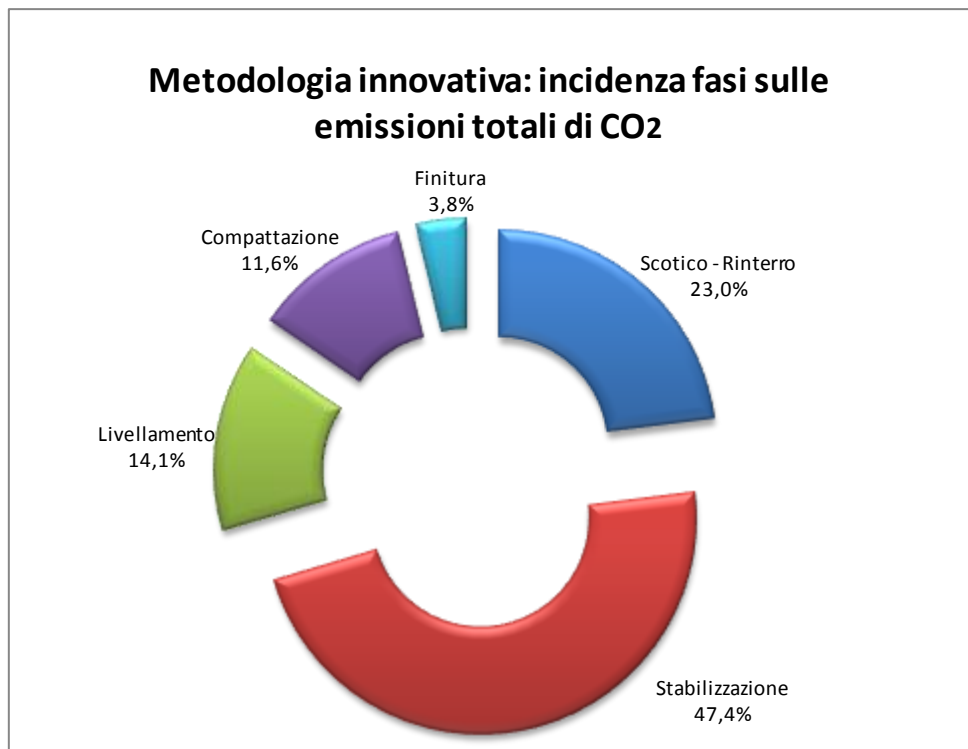


Fig. 4.6 – Metodologia innovativa: incidenza delle fasi sulle emissioni totali

Nel caso della metodologia innovativa la fase più impattante è senza dubbio quella di stabilizzazione del terreno in sito (47,4%), seguita dalla fase di scotico e rinterro (23%). È opportuno evidenziare che sia nella stabilizzazione che nello scotico si è utilizzato il pulvimixer, che rappresenta il macchinario a maggior incidenza a livello di emissioni di anidride carbonica in tutta la fase lavorativa.

Nell' Appendice A sono riportati anche i grafici di incidenza di ogni macchinario sulle emissioni di anidride carbonica, tali dati sono direttamente desunti dalle tabelle 4.8 e 4.11.

Dal punto di vista energetico il confronto tra le due metodologie di stabilizzazione risulta più equilibrato, come mostra la seguente tabella (Tab. 4.14).

Metodologia	Energia produzione [MJ]	Energia trasporto [MJ]	Energia totale [MJ]
Innovativa	8.742.384	23.968	8.766.352
Tradizionale	6.396.264	1.997.344	8.393.608

Tab. 4.14 – Confronto energetico tra le metodologie realizzative

Si osserva che le differenze riscontrate nell'analisi ambientale non si ripetono nell'analisi energetica, infatti i dati finali in termini di energia totale utilizzata per eseguire la

lavorazione risultano del tutto comparabili. Questo si verifica poiché il quantitativo di inerti necessario per la stabilizzazione granulometrica (164.600 tonnellate) è moltiplicato per un fattore di consumo energetico in fase di produzione molto basso (38,8 MJ/ton). Al contrario il quantitativo di legante idraulico impiegato per la stabilizzazione innovativa è decisamente ridotto rispetto a quello degli inerti (1482 tonnellate), ma viene moltiplicato per un fattore di conversione estremamente elevato (5900 MJ/ton). Tutto ciò fa sì che complessivamente l'energia impiegata nella produzione del cemento risulti perfino maggiore di quella degli inerti. Non va però tralasciato il contributo del trasporto del materiale dal sito di produzione al cantiere.

Come si può facilmente intuire dalla tabella 4.14, l'incidenza del trasporto dei due materiali sul totale di energia impiegata nella lavorazione è assai diversa. La seguente tabella (Tab. 4.15) e i grafici riportati in Appendice A, chiariscono l'incidenza del trasporto sul consumo energetico.

Fattore	Metod. Innov.	Metod. Tradiz.
Produzione	99,73%	76,20%
Trasporto	0,27%	23,80%

Tab. 4.15 – Confronto incidenza trasporto tra le metodologie realizzative

Per la metodologia innovativa il trasporto del legante idraulico in sito complessivamente ha un'incidenza del tutto trascurabile, al contrario di quanto avviene nel caso degli inerti, per i quali il trasporto di 15 km rappresenta circa il 24% dell'energia totale impiegata nell'esecuzione della stabilizzazione.

A fronte di tale differenza si è deciso di eseguire un'analisi di sensitività della distanza di trasporto degli inerti tra cava e sedime aeroportuale rispetto all'energia impiegata e alle emissioni prodotte complessivamente dalla stabilizzazione.

Per quanto concerne le emissioni di anidride carbonica, l'incidenza del trasporto degli inerti è ben rappresentata nel seguente grafico (Fig. 4.7), in cui si può apprezzare l'andamento pressoché costante dell'incidenza del trasporto di cemento, rispetto alla crescita lineare di quella del trasporto di inerti.



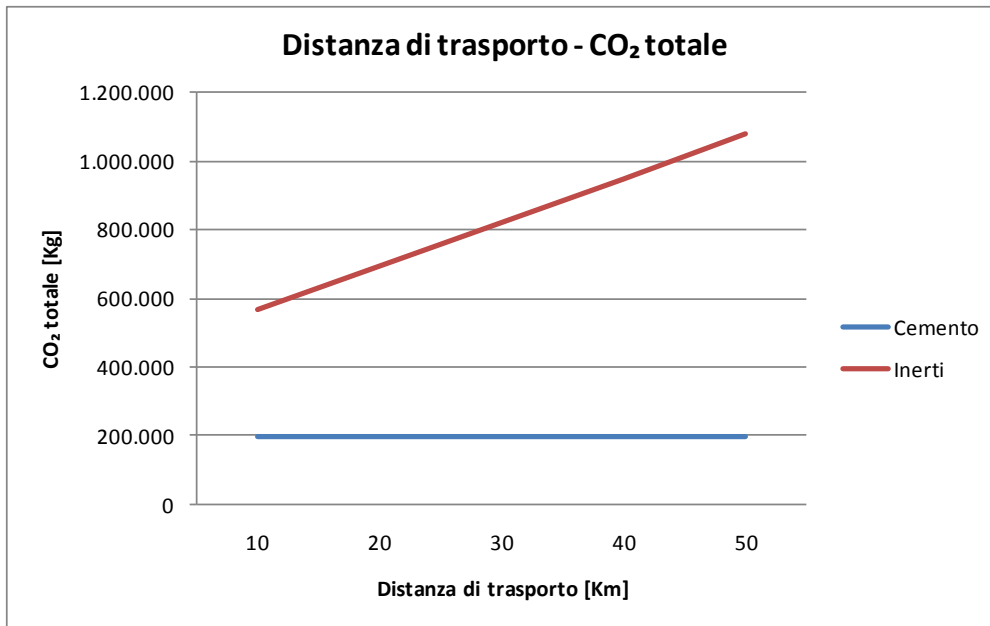


Fig. 4.7 – Sensitività del trasporto materiali sulle emissioni totali

Si può dedurre pertanto che, se la cava di prestito è ubicata ad una distanza di 10 km dal sedime aeroportuale, l'anidride carbonica prodotta con il trattamento tradizionale è circa il triplo di quella prodotta con la stabilizzazione innovativa. Se questa distanza diventa di 50 km, l'inquinamento prodotto con la metodologia tradizionale diviene circa 5,5 volte quello prodotto con la stabilizzazione a legante idraulico.

Analoga considerazione può essere sviluppata in termini di produzione di energia (Fig. 4.8).

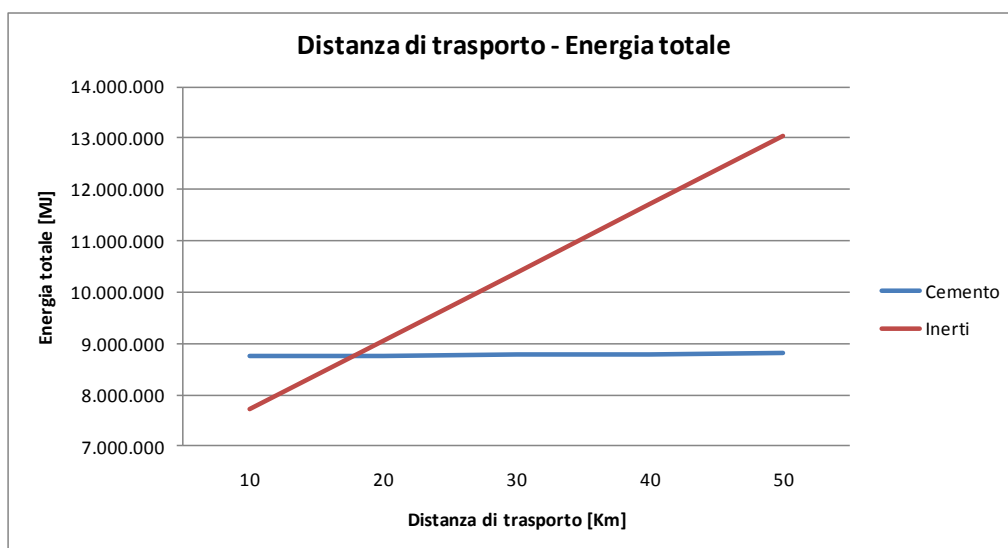


Fig. 4.8 – Sensitività del trasporto materiali sull'energia totale

Si può notare che, per distanze tra cava e sedime aeroportuale inferiori ai 18 km, l'energia impiegata per stabilizzare il terreno in sito granulometricamente è inferiore a quella impiegata per la stabilizzazione a legante idraulico. Per distanze superiori a questa l'incidenza del trasporto del materiale farebbe sì che l'energia necessaria alla stabilizzazione granulometrica delle CGA risulti maggiore di quella eseguita con la metodologia innovativa.

I calcoli relativi all'analisi di sensitività sia dal punto di vista energetico che ambientale sono riportati nell'Appendice A.

A fronte di quanto sopra esposto si può pertanto concludere che:

- Dal punto di vista ambientale, ovvero delle emissioni di  $CO_2$  prodotte dai mezzi d'opera, la metodologia innovativa risulti sempre più sostenibile di quella tradizionale;
- Dal punto di vista energetico, ovvero dell'energia impiegata nel trasporto e nella produzione delle materie prime impiegate, la metodologia innovativa risulta più sostenibile di quella tradizionale se la lunghezza del percorso che collega la cava di prestito degli inerti ed sedime aeroportuale risulta maggiore di 18 km;
- Con l'incremento della distanza tra cava e aeroporto la sostenibilità della metodologia innovativa rimane pressoché costante, mentre si riduce notevolmente quella della lavorazione tradizionale.

## 5 Conclusioni

Il trasporto aereo è in continua evoluzione; la mole di persone e merci viaggianti è in aumento, nuovi aeroporti vengono realizzati e con essi una complessa struttura di gestione viene predisposta non solo per far fronte alla domanda di mobilità crescente, ma anche per far sì che l'offerta prodotta risulti sostenibile.

Il concetto di sostenibilità è stato espresso in termini di uno sviluppo tale da consentire che le generazioni future possano continuare a godere dei beni che l'ambiente naturale mette oggi a nostra disposizione.

Applicando questo concetto al trasporto aereo numerosi enti, governativi e non, in accordo con la crescente attenzione che le normative internazionali attribuiscono agli aspetti di mitigazione d'impatto ambientale, hanno operato per progettare, gestire e mantenere l'infrastruttura aeroportuale in un'ottica sostenibile. Nell'elaborato, in tal senso, sono stati presentati alcuni degli interventi adottati dai cosiddetti "*green airports*".

Questo studio ha riguardato un aspetto particolare della manutenzione di uno scalo aeroportuale, ovvero il consolidamento dei terreni delle strip relative alle piste di volo. Come è stato ampiamente esposto, tali particolari aree dell'*air side* devono rispettare precise prescrizioni normative in termini di livellamento, capacità portante e presenza di ostacoli, al fine di garantire la sicurezza delle operazioni di decollo e atterraggio degli aerei e, in casi particolari, la sicurezza dei velivoli in svio.

Per garantire i requisiti prestazionali imposti dagli standard internazionali, il terreno che costituisce la strip e soprattutto la sua parte più prossima alla pista, ovvero la CGA, deve essere idoneamente trattato.

Per consentire di comprendere quali fattori incidano sulle prestazioni di un terreno e quali operazioni risultino necessarie eseguire per migliorarne le caratteristiche, è stato affrontato il tema della stabilizzazione dei terreni, esponendo alcune possibili modalità esecutive in relazione alle caratteristiche intrinseche del terreno in sito. Si è poi approfondito il ruolo che la compattazione meccanica svolge nell'esecuzione delle stabilizzazioni.

I concetti precedentemente esposti sono stati quindi applicati al caso specifico oggetto di studio, relativo all'aeroporto di Milano Malpensa. Sono state proposte due metodologie

differenti per poter realizzare la stabilizzazione e, relativamente a ciascuna di esse, sono state presentate le fasi esecutive, le tempistiche e le tecnologie impiegate.

Nota la produttività di ogni metodologia realizzativa si è passati all'analisi dell'impatto ambientale che le suddette lavorazioni avrebbero complessivamente prodotto nell'esecuzione della stabilizzazione della CGA relativa ad una pista di volo. L'analisi è stata condotta considerando due aspetti fondamentali: il calcolo delle emissioni prodotte dai mezzi d'opera (*carbon footprints*) e l'impiego di energia necessaria a fornire le materie prime ed il loro trasporto dal sito di produzione fino in cantiere (*embodied energies*). Vista l'incidenza della distanza di trasporto dei materiali sui risultati ottenuti è stata eseguita in tal senso un'analisi di sensitività. Nel corso della trattazione è stata presentata e discussa la modalità di analisi utilizzata, la scelta degli indici e delle categorie d'impatto considerate e le fonti dei dati iniziali su cui sono stati impostati i calcoli.

Valutando i risultati ottenuti dalle analisi effettuate, alla luce di quanto precedentemente esposto, è stato possibile confrontare, dal punto di vista della sostenibilità ambientale, il trattamento dei terreni aeroportuali eseguito granulometricamente (metodologia tradizionale) con quello eseguito a legante idraulico (metodologia innovativa).

Si è concluso che la metodologia di stabilizzazione a legante idraulico risulta, dal punto di vista ambientale (emissioni di anidride carbonica in atmosfera), senza dubbio più vantaggiosa. Nel caso esaminato si sono ottenuti valori di emissioni più che triplicati procedendo con la sostituzione del terreno con materiale proveniente da cava.

Dal punto di vista energetico le due metodologie realizzative richiedono consumi equiparabili. Questo si spiega considerando che in un caso si utilizza un quantitativo notevolissimo di inerti, caratterizzati da un fattore di impiego energetico per la produzione bassissimo, nell'altro caso viene impiegato un quantitativo di legante idraulico certamente contenuto, che tuttavia è caratterizzato da un elevatissimo dispendio energetico in fase di produzione.

L'analisi di sensitività dell'incidenza della distanza di trasporto delle materie prime, dal sito di produzione al cantiere aeroportuale, ha mostrato che la metodologia innovativa è sostanzialmente invariante rispetto al crescere di tale distanza, mentre l'impatto prodotto con la metodologia tradizionale aumenta linearmente con la distanza di trasporto.

Pertanto la metodologia di stabilizzazione a legante idraulico, oltre che risultare più facilmente adattabile, variando il quantitativo di legante e lo spessore dello strato da stabilizzare alle diverse caratteristiche dei terreni riscontrabili in sito, e consentire produttività maggiori, risulta con certezza complessivamente più sostenibile della lavorazione tradizionale.

Futuri sviluppi ed approfondimenti di questa analisi di sostenibilità potrebbero essere rivolti allo studio delle emissioni in termini di anidride carbonica equivalente, in modo tale da poter considerare, attraverso il *global warming potential (GWP)*, anche l'incidenza degli altri gas di scarico prodotti dalla combustione del diesel. Per far ciò tuttavia risulta necessario poter conoscere esattamente le caratteristiche meccaniche dei motori impiegati sui mezzi d'opera ed il loro *basic specific fuel consumption (BSFC)* reale, ovvero il consumo specifico di combustibile dei propulsori impiegati, che tende a variare nel corso della vita utile del motore in funzione del suo utilizzo. Sarebbe possibile ad esempio installare dei rilevatori delle emissioni direttamente sui mezzi d'opera, monitorando così le emissioni reali dei motori durante fasi esecutive.

Più in generale la ricerca proseguirà certamente nello studio delle *embodied energies*, rispetto alle quali non esiste ancora un parere scientifico univoco. Al fine di rendere le analisi confrontabili a livello globale è auspicabile la definizione di un'unica banca dati, universalmente adottabile, dei fattori di conversione e di calcolo delle energie, in modo tale che si superino le difficoltà attuali rappresentate dall'esistenza di moltissime ricerche che hanno prodotto numerosi elenchi di fattori di conversione diversi e non universalmente accettati e standardizzati.

# **BIBLIOGRAFIA**

## ➤ Capitolo 1:

- AEA - Strategic Plan 2010-2014;
- ACRP – Sustainable airports construction practices;
- Centrair Green-report 2006;
- D. Wilmot – The importance of stabilisation techniques for pavement construction, ARRB Conference October 2006;
- Di Mascio, Domenichini, Ranzo - Infrastrutture Aeroportuali;
- F. Collins – Life cycle carbon emission by built concrete infrastructure (2010);
- FAA - Airport Environmental Program;
- G. Rebitzer et al. – Life cycle assessment Part 1 and Part 2, 2003;
- Green Flight Times, 09-11/2010;
- HKIA - Green report 09-10;
- <http://provincie.drenthe.nl/gsa/>;
- <http://www.cleanairports.com/>;
- <http://www.iso.org/iso/home.html>.
- <http://www.kald.co.jp/>;
- <http://www.mlit.go.jp/>;
- <http://www.ndiaproject.com/>;
- ICAO – Environmental Report 2010;
- P. Paige-Green – The use of natural resources for sustainable roads 1998;
- W. Steyn, P. Paige-Green – Evaluation of issues around road material for sustainable transport;

## ➤ Capitolo 2:

- A. Bucchi, C. Costa, V. Vignali – Studi preliminari per la costruzione della terza corsia, Strade & Autostrade 3/2009;
- E. Cattani, N. De Marzi, G. Gerrini – Una strada risanata con calce e cemento, Le strade 7-8/2002;
- Ferrari, Giannini - Ingegneria stradale;
- G. Manganelli – Studio sperimentale delle terre stabilizzate con leganti idraulici, 2009;
- Garbin, Ridolfi - Geologia e geotecnica stradale;
- K. Tsunokawa, C. Hoban – Roads and environment handbook, World bank technical paper n° 376;
- Lime-treated soil construction manual – National Lime Association 01-2004;
- W. Spencer Guthrie, J.E. Michener, B.T. Wilson, D.L. Eggett – Effect of environmental factors on construction of soil-cement pavement layers;

➤ Capitolo 3:

- ENAC – Regolamento per la costruzione e l'esercizio degli aeroporti 2003;
- <http://europe.construction.newholland.com>;
- <http://web.iveco.com/>;
- <http://www.bomag.com/>;
- <http://www.cat.com/>;
- <http://www.cummins.it/>;
- <http://www.deutz.de/>;
- <http://www.dynapac.com/>;
- <http://www.wirtgen.it/>;
- ICAO – Aerodrome Design Manual.

➤ Capitolo 4:

- Global Warming Potentials. *Climate Change 1995, The Science of Climate Change: Summary for Policymakers*. U.S. Energy Information Administration.
- Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007;
- G.P.Hammond and C.I.Jones (2006) *Inventory of (Embodied) Carbon & Energy (ICE)*, Department of Mechanical Engineering, University of Bath, United Kingdom;
- Häkkinen T./Mäkelä K. (2006) - Environmental adaptation of concrete environmental impact of concrete and asphalt pavements - Technical Research Centre of Finland.
- <http://www.carbontrust.co.uk>;
- <http://www.defra.gov.uk>;
- <http://www.eea.europa.eu>;
- <http://www.epa.gov>;
- Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete by Medgar L. Marceau, Michael A. Nisbet, and Martha G. VanGeem - 2007
- Matthew Elrod, (1999) "Greenhouse Warming Potential Model";
- Pearce, J.M., Johnson, S.J., & Grant, G.B., 2007. "3D-Mapping Optimization of Embodied Energy of Transportation";
- Wiedmann, T. and J. Minx (2008). A Definition of 'Carbon Footprint'. *Ecological Economics Research Trends*;
- World Energy Council Report (2004). *Comparison of energy systems using life cycle assessment*;
- S. Maiini – Calculation from embodied energy of raw materials, Auroville Earth Institute, 2008.

## Appendice A – Tabelle riassuntive e grafici

PISTA	lung. [m]	largh. [m]
17L / 35R	3.920	80
17R / 35L	3.920	80

le zone indicate con questo colore sono escluse dai computi totali e sono riportate solo per completezza

ZONE DI INTERVENTO	lung. [m]	largh. [m]	area [m <sup>2</sup> ] per ogni pista
CGA - 1	3.920	15	117.600
CGA - 2	3.920	10	78.400
CGA - 3	3.920	10	78.400
CGA - 4	3.920	10	78.400
CGA - 5	3.920	20	156.800
STRIP - 6	3.920	45	352.800
TOT CGA			274.400
TOT largh. CGA da c.l.	105		
TOT largh. STRIP da c.l.	150		

c.l. sta per "center line" pista

Tab. A.1 – Dati relativi all'aeroporto di Malpensa



ZONE DI INTERVENTO	OPERAZIONI			
	profondità scotico [m]	livellazione	profondità di stabilizzazione [m]	spessore di ricoprimento [m]
CGA - 1	0,20	SI	0,20	0,10
CGA - 2	0,20	SI	0,20	0,12
CGA - 3	0,20	SI	0,20	0,15
CGA - 4	0,20	SI	0,20	0,15
CGA - 5	0,10 - 0,15	SI	NO	0,10 - 0,15
STRIP - 6	0,10 - 0,15	SI	NO	0,10 - 0,15

ZONE DI INTERVENTO	VOLUMI TOTALI PER OGNI PISTA			
	volume scotico [m <sup>3</sup> ]	volume ricoprimento terreno vegetale [m <sup>3</sup> ]	volume da stabilizzare [m <sup>3</sup> ]	quantità di cemento [Kg]
CGA - 1	23.520	11.760	23.520	635.040
CGA - 2	15.680	9.408	15.680	423.360
CGA - 3	15.680	11.760	15.680	423.360
CGA - 4	15.680	11.760	15.680	423.360
CGA - 5	variabile	variabile	NO	NO
STRIP - 6	variabile	variabile	NO	NO
TOTALE CGA	54.880	32.928	54.880	1.481.760

TOT MOVIMENTI TERRA [m <sup>3</sup> ]	87.808
TOT MOVIMENTI TERRA [ton]	158.054

Tab. A.2 – Dati relativi alle lavorazioni con metodologia innovativa

ZONE DI INTERVENTO	OPERAZIONI			
	profondità scotico [m]	livellazione	profondità di stabilizzazione [m]	spessore di ricoprimento [m]
CGA - 1	0,20	SI	0,30	0,10
CGA - 2	0,20	SI	0,30	0,12
CGA - 3	0,20	SI	0,30	0,15
CGA - 4	0,20	SI	0,30	0,15
CGA - 5	0,10 - 0,15	SI	NO	0,10 - 0,15
STRIP - 6	0,10 - 0,15	SI	NO	0,10 - 0,15

ZONE DI INTERVENTO	VOLUMI TOTALI PER OGNI PISTA				
	volume scotico [m <sup>3</sup> ]	volume ricoprimento terreno vegetale [m <sup>3</sup> ]	volume da stabilizzare [m <sup>3</sup> ]	volume totale scavo [m <sup>3</sup> ]	volume totale di riporto [m <sup>3</sup> ]
CGA - 1	23.520	11.760	35.280	58.800	47.040
CGA - 2	15.680	9.408	23.520	39.200	32.928
CGA - 3	15.680	11.760	23.520	39.200	35.280
CGA - 4	15.680	11.760	23.520	39.200	35.280
CGA - 5	variabile	variabile	NO	variabile	variabile
STRIP - 6	variabile	variabile	NO	variabile	variabile
TOTALE CGA	54.880	32.928	82.320	137.200	115.248

TOT MOVIMENTI TERRA [m <sup>3</sup> ]	252.448
TOT MOVIMENTI TERRA [ton]	470.870
TERRA DA CAVA [ton]	164.640

Tab. A.3 – Dati relativi alle lavorazioni con metodologia tradizionale

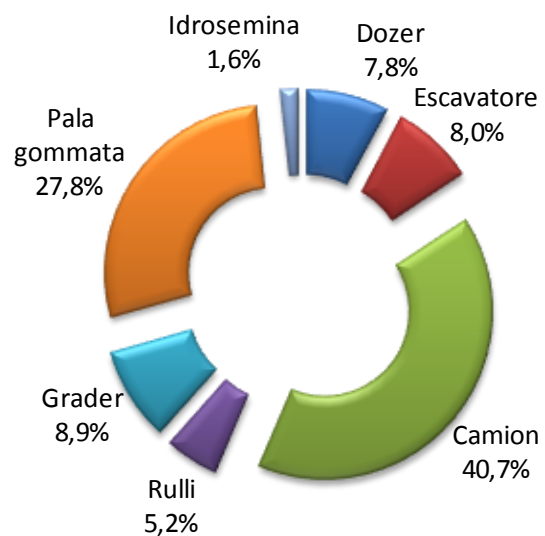
Macchinario	Motore	Impiego a notte [h]	Consumo Diesel [Kg]	Consumo Diesel [l]	CO <sub>2</sub> emessa [Kg/l]	CO <sub>2</sub> prodotta [Kg]	N° mezzi	Tot CO <sub>2</sub> prodotta [Kg]	% sul totale
<b>Escavatore</b> New Holland E385B	HINO EB-JO8E-TM	2	5.351	6.295	2,6639	16.769	1	16.769	8,4
<b>Pala gommata</b> Caterpillar 950 H	CAT C 7	4	9.288	10.927	2,6639	29.109	1	29.109	14,6
<b>Grader</b> Caterpillar 120 M	CAT C 6.6	5	8.978	10.562	2,6639	28.136	1	28.136	14,1
<b>Spandilegante</b> Wirtgen SW 16 TA	Deutz TCD 2012 L6	1	2.612	3.073	2,6639	8.187	1	8.187	4,1
<b>Pulvimixer</b> Wirtgen WR 2500	Deutz TCD 2015 L8	3,5	27.518	32.375	2,6639	86.243	1	86.243	43,3
<b>Rullo monotamburo</b> Hamm 3516 16 ton	Deutz TCD 2012 L6	1,5	3.918	4.610	2,6639	12.280	1	12.280	6,2
<b>Rullo gommato</b> Hamm GRW 280 20 ton	Deutz TCD 2012 L4	2	3.483	4.098	2,6639	10.916	1	10.916	5,5
<b>Veicolo idrosemina</b> Iveco Daily	ECO Daily 3,0 litri Common Rail	1,5	2.430	2.859	2,6639	7.616	1	7.616	3,8
<b>CO<sub>2</sub> complessiva [Kg]</b>								<b>199.254</b>	<b>100,0</b>

Tab. A.4 – Metodologia innovativa: calcoli analisi ambientale

Macchinario	Motore	Impiego a notte [h]	Consumo Diesel [Kg]	$\gamma$ Diesel [Kg/l]	Consumo Diesel [l]	CO <sub>2</sub> emessa [Kg/l]	CO <sub>2</sub> prodotta [Kg]	N° mezzi	Tot CO <sub>2</sub> prodotta [Kg]	% sul totale
<b>Dozer</b> Komatsu D65EX-16	Deutz TCD 2012 L6	3	15.674	0,85	18.439	2,6639	49.121	1	49.121	7,8
<b>Escavatore</b> New Holland E385B	HINO EB-JO8E-TM	3	16.052	0,85	18.884	2,6639	50.306	1	50.306	8,0
<b>Pala gommata (notte)</b> Caterpillar 950 H	CAT C 7 (147kW)	4	18.576	0,85	21.854	2,6639	58.217	2	116.435	18,5
<b>Pala gommata (giorno)</b> Caterpillar 950 H	CAT C 7 (147kW)	4	18.576	0,85	21.854	2,6639	58.217	1	58.217	9,3
<b>Grader</b> Caterpillar 120 M	CAT C 6.6 (103kW)	5	17.955	0,85	21.124	2,6639	56.271	1	56.271	8,9
<b>Rullo monotamburo</b> Hamm 3516 16 ton	Deutz TCD 2012 L6	1	5.225	0,85	6.146	2,6639	16.374	1	16.374	2,6
<b>Rullo gommato</b> Hamm GRW 280 20 ton	Deutz TCD 2012 L4	1,5	5.225	0,85	6.146	2,6639	16.374	1	16.374	2,6
<b>Veicolo idrosemina</b> Iveco Daily	ECO Daily 3,0 litri Common Rail	1	3.240	0,85	3.812	2,6639	10.154	1	10.154	1,6
Macchinario	Motore	Impiego a notte [h]	Km percorsi con 1 litro	$\gamma$ Diesel [Kg/l]	Consumo Diesel [l]	CO <sub>2</sub> emessa [Kg/l]	CO <sub>2</sub> prodotta [Kg]	n° mezzi	Tot CO <sub>2</sub> prodotta [Kg]	% sul totale
<b>Camion (cantiere)</b> IVECO AD 260 T41 (6x4)	Cursor 13 (301kW)	3	1,5	0,85	4.800	2,6639	12.787	5	63.934	10,2
<b>Camion (cava-sito)</b> IVECO AD 260 T41 (6x4)	Cursor 13 (301kW)	7	3,0	0,85	14.400	2,6639	38.360	5	191.802	30,5
<b>CO<sub>2</sub> complessiva [Kg]</b>							<b>628.987</b>		<b>100,0</b>	

Tab. A.5 – Metodologia tradizionale: calcoli analisi ambientale

### Metodologia tradizionale: incidenza macchinari sulle emissioni totali di CO<sub>2</sub>



### Metodologia innovativa: incidenza macchinari sulle emissioni totali di CO<sub>2</sub>

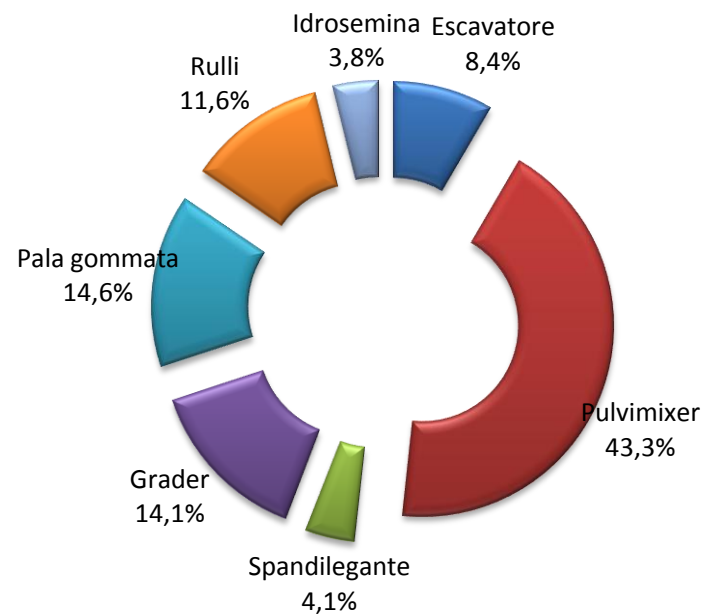


Fig. A.1 – Incidenza dei macchinari sulle emissioni totali in entrambe le metodologie

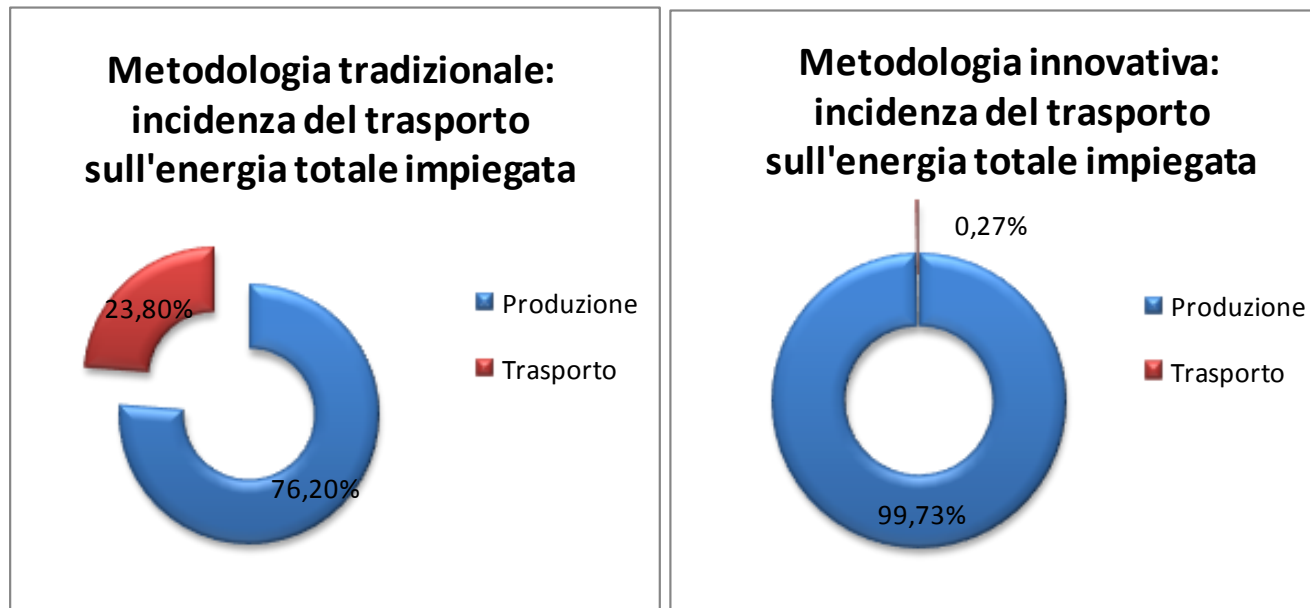


Fig. A.2 – Incidenza del trasporto sull'energia totale in entrambe le metodologie

Analisi sensitività del trasporto degli inerti sull'energia totale			
Entità trasporto [Km]	Energia trasporto [MJ]	Energia totale [MJ]	Incidenza trasporto
10	1.331.563	7.727.827	17,2%
20	2.663.126	9.059.390	29,4%
30	3.994.688	10.390.952	38,4%
40	5.326.251	11.722.515	45,4%
50	6.657.814	13.054.078	51,0%

Tab. A.6 – Analisi di sensitività del trasporto degli inerti sull'energia totale

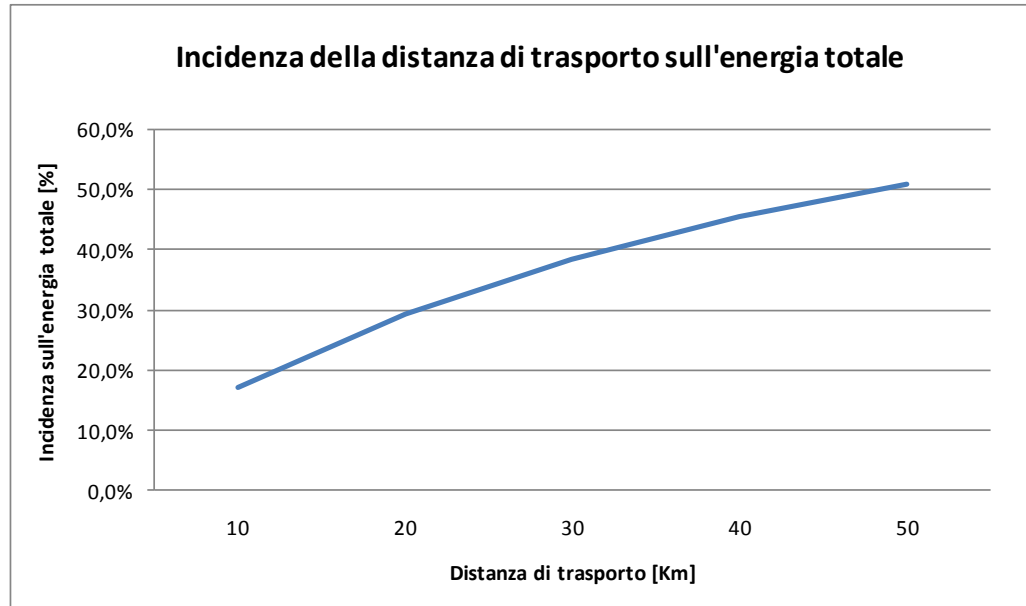


Fig. A.3 – Incidenza della distanza di trasporto sull'energia totale

Analisi sensitività della distanza della cava dal sito in relazione alle emissioni totali						
Distanza cava [Km]	Viaggio [Km]	Km percorsi con 1 litro	Consumo Diesel [l]	Tot CO <sub>2</sub> prodotta [Kg]	% sul totale	CO <sub>2</sub> complessiva [Kg]
10	160	3,0	9.600	127.868	22,6	565.053
20	320	3,0	19.200	255.736	36,9	692.921
30	480	3,0	28.800	383.603	46,7	820.789
40	640	3,0	38.400	511.471	53,9	948.657
50	800	3,0	48.000	639.339	59,4	1.076.525

Tab. A.7 – Analisi di sensitività del trasporto degli inerti sulle emissioni totali