

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA EDILE, CIVILE E
AMBIENTALE**

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER
L'AMBIENTE E IL TERRITORIO**

**SULLA POSSIBILITÀ DI IMPIEGO DI PANNELLI
FOTOVOLTAICI FLESSIBILI SULLA COPERTURA DI
DISCARICHE CONTROLLATE**

Relatore: Prof. Ing. Marco Favaretti

Correlatore: Ing. Stefano Busana

Laureando: RICCARDO BUSON

ANNO ACCADEMICO 2011-2012

Premessa

La Tesi proposta tratta la progettazione della copertura di una discarica esaurita utilizzando una particolare geomembrana, che funge da supporto a pannelli fotovoltaici flessibili.

Lo sfruttamento economico dei siti di discarica nella fase di gestione post-operativa tramite l'installazione di sistemi a energia solare è una pratica che sta riscuotendo notevole successo negli ultimi anni. Molti gestori di discariche si trovano, infatti, a dover far fronte a periodi e costi di post-gestione maggiori di quelli preventivati in fase di progettazione della gestione operativa dell'impianto. L'installazione d'impianti in grado di sfruttare l'energia solare può risolvere questi problemi e rendere economicamente proficuo un sito "degradato".

Il caso sviluppato nella presente Tesi riguarda la discarica in località Pontesello nel comune di Montecchio Maggiore (VI) dove, al termine del periodo di gestione post-operativa di 11 anni inizialmente previsto, ci si trova nella necessità di proseguire la post-gestione a causa della persistente formazione di percolato e delle caratteristiche chimiche dello stesso che non rendono possibile la dismissione in sicurezza della discarica. L'intervento, in questo specifico caso, dovrà avere il duplice scopo di impermeabilizzare la copertura per ridurre la formazione di percolato e di generare introiti necessari al gestore per il proseguimento della post-gestione.

Trattasi di una soluzione innovativa, che non ha molti precedenti: per quanto si è potuto appurare, le uniche due applicazioni di questo tipo sono state attuate negli Stati Uniti. Pertanto la progettazione dell'intervento è stata condotta ponendo particolare attenzione all'interazione della geomembrana con la copertura della discarica.

L'articolazione della Tesi prevede, all'inizio, lo sviluppo dei capitoli riguardanti la scelta della tecnologia per lo sfruttamento dell'energia solare più adatta, attraverso confronti fra le varie possibilità presenti nel mercato. Si porrà l'attenzione particolarmente alla relazione tra l'impianto solare e la discarica, con riferimento ai cedimenti differenziali, alla gestione delle precipitazioni e al mantenimento dell'integrità della copertura. Verranno anche analizzati casi esistenti di parchi solari su discarica, "tradizionali" e non, illustrando in particolare un caso nel padovano e uno negli Stati Uniti.

Si affronterà poi la progettazione di una copertura con geomembrana esposta e pannelli flessibili a pellicola sottile, analizzando le problematiche riguardanti le geomembrane esposte. Anche su quest'argomento è stata svolta una breve ricerca dei casi storici in cui è stata applicata tale tecnologia per avere un background di conoscenza. Si passerà quindi all'analisi degli aspetti salienti nella realizzazione di un simile progetto, con particolare riferimento all'invarianza idraulica, al problema

del sollevamento da vento e alla progettazione di un pacchetto di copertura nel rispetto della normativa italiana.

Successivamente si affronterà la progettazione dell'impianto nel caso della citata discarica di Pontesello, rispetto alla quale saranno contestualizzati i problemi affrontati in precedenza in maniera generale. Infine, saranno trattati gli aspetti meramente impiantistici dell'installazione, talora affrontando argomenti di carattere elettrotecnico specialistico non attinente la preparazione accademica dello scrivente. Per questo motivo molte informazioni sono state desunte del know how di una società specializzata nel settore della progettazione d'impianti fotovoltaici. Parimenti, l'analisi economico-finanziaria dell'installazione, riportata in conclusione, ha richiesto l'ausilio di informazioni di carattere economico-estimativo ricavate dal prezioso confronto con tale azienda specializzata, che si ringrazia sin d'ora per l'aiuto.

Sommario

PREMESSA	3
SOMMARIO	5
1. LA DISCARICA DI PONTESELLO	7
1.1 CRONOSTORIA DELLA DISCARICA	7
1.2 IL PROGETTO GENERALE DI RECUPERO E SISTEMAZIONE AMBIENTALE	9
1.3 SITUAZIONE ATTUALE	11
2. COPERTURE CON PANNELLI FOTOVOLTAICI	13
2.1 SOLARE IN DISCARICA	14
2.2 SCELTA DEL TIPO DI PANNELLI	16
2.3 SFIDE PROGETTUALI	25
2.3.1 <i>Cedimenti</i>	25
2.3.2 <i>Interazione con la copertura</i>	26
2.3.3 <i>Altre considerazioni</i>	27
2.4 CASI DI COPERTURE DI DISCARICHE CON IMPIANTI FOTOVOLTAICI	29
2.4.1 <i>La discarica di Roncagette</i>	30
2.4.2 <i>Tessman Road landfill</i>	33
3. EXPOSED GEOMEMBRANE COVER SYSTEM	37
3.1 SFIDE DI PROGETTO NELLA REALIZZAZIONE DI UN EGCS CON PANNELLI FOTOVOLTAICI	39
3.1.1 <i>Rispetto della normativa italiana</i>	39
3.1.2 <i>Invarianza idraulica</i>	44
3.1.3 <i>Sollevamento da vento</i>	45
3.1.4 <i>Ancoraggio della geomembrana</i>	46
3.1.5 <i>Protezione dal gelo</i>	46
3.1.6 <i>Altre considerazioni</i>	47
3.2 EGCS CON ERBA SINTETICA	48
4. PROGETTO PER LA DISCARICA DI PONTESELLO	49
4.1 PACCHETTO DI COPERTURA	49
4.1.1 <i>Protezione dal gelo</i>	50
4.1.2 <i>Geocomposito drenante</i>	53
4.2 SCELTA DELLA GEOMEMBRANA	54
4.2.1 <i>Vita utile di una geomembrana</i>	60
4.2.2 <i>Descrizione e scheda della geomembrana scelta</i>	61
4.3 VALUTAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA	64
4.3.1 <i>Normativa di riferimento</i>	64
4.3.2 <i>Inquadramento territoriale</i>	65
4.3.3 <i>Metodologia di lavoro</i>	69

4.3.4	<i>Calcolo del volume da invasare</i>	74
4.3.5	<i>Sistema di smaltimento delle acque meteoriche in progetto</i>	76
4.3.6	<i>Determinazione della portata massima affluente al bacino di accumulo</i>	77
4.4	SOLLEVAMENTO DA VENTO	80
4.4.1	<i>Aspirazione causata dal vento</i>	80
4.4.2	<i>Analisi del sollevamento della geomembrana</i>	85
4.4.3	<i>Sollevamento della geomembrana con tensioni o deformazioni iniziali</i>	91
4.4.4	<i>Modifiche ai calcoli di Giroud nel caso di geomembrane con pannelli fotovoltaici</i>	92
4.4.5	<i>Calcoli per il sollevamento da vento</i>	93
4.5	PROGETTAZIONE DI ANCORAGGI CONTRO L'AZIONE DEL VENTO	97
4.5.1	<i>J. P. Giroud</i>	97
4.5.2	<i>Donald E. Hullings & Leonard J. Sansone</i>	101
4.5.3	<i>R. M. Koerner</i>	102
4.5.4	<i>P. Villard & B. Chareyre</i>	104
4.5.5	<i>Progettazione ancoraggi</i>	108
4.6	SCELTA DEL MODULO FOTOVOLTAICO	109
4.7	SISTEMAZIONE DELLA COPERTURA ESISTENTE	112
4.8	PLANIMETRIA DELL'IMPIANTO FOTOVOLTAICO	119
4.9	L'ELEMENTO DI COPERTURA RIOPOWER	121
4.10	PRODUZIONE ENERGETICA	122
4.11	PIANO FINANZIARIO	127
4.11.1	<i>Computo metrico</i>	127
4.11.2	<i>Business Plan</i>	131
5.	CONCLUSIONI	136
6.	INDICI	139
6.1	INDICE DELLE FIGURE	139
6.2	INDICE DELLE TABELLE	142
7.	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	143
7.1	LETTERATURA	143
7.2	SITI WEB	146
	RINGRAZIAMENTI	147

1. La discarica di Pontesello

La discarica in oggetto è situata in località Pontesello, al confine del territorio comunale di Montecchio Maggiore con i Comuni di Arzignano e di Trissino, in provincia di Vicenza. L'area è classificata, per la gran parte, dal Piano Regolatore Generale, come Zona Territoriale Omogenea di tipo F destinata ad insediamenti di interesse sovracomunale. Catastralmente il terreno è individuabile nella Sezione B - Foglio II° - Mappali n. 17, 21p, 22p, 23p, 37, 38, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 51, 52, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 67, 125, 138, 174, 175, 202, 395p del Comune di Montecchio Maggiore.

L'area della discarica, che ospitava precedentemente una cava di ghiaia, non ricade all'interno di nessuno degli ambiti per l'istituzione di parchi, riserve regionali, naturali e archeologiche o aree di tutela paesaggistica. Il sito della discarica si trova nell'ampio fondovalle dell'Agno-Guà e del Chiampo; qui il terreno si presenta pianeggiante, con una leggera pendenza verso Sud - Ovest.

Un ulteriore studio sulle caratteristiche idrogeologiche del sito è stato sviluppato nel capitolo riguardante la compatibilità idraulica¹.

1.1 Cronostoria della discarica

La discarica è stata costruita e gestita per lotti dalle A.I.M.² di Vicenza tra gli anni 1982 e 1991, con autorizzazione regionale: decreti n. 223 del febbraio 1982 per i primi due lotti e n. 60/AMB del marzo 1987 per i successivi due. I primi 3 lotti, oltre che costruiti, sono stati anche gestiti direttamente dalle A.I.M. e sono stati in esercizio nel periodo luglio 1982 - marzo 1991. Il lotto il n. 4, costruito dalle A.I.M., è stato gestito dalla società M.B.S.³, previo affidamento del Consiglio Comunale di Montecchio Maggiore con delibera n° 136 del 12.03.90. Con l'approssimarsi dell'esaurimento del 4° lotto della discarica, il Comune di Montecchio Maggiore ha incaricato la società M.B.S., con delibera di Giunta Comunale n.255 del 23 marzo 1994, di redigere un progetto di ribaulatura con il definitivo recupero ambientale dell'intera area. In data 13.04.1994 il Consiglio Comunale di Montecchio Maggiore, con delibera n° 38, ha approvato il *Progetto generale di recupero e sistemazione ambientale* della discarica e in data 11.05.1994, con delibera di C.C. n° 57, ha affidato alla Ditta M.B.S. S.p.A. la realizzazione e gestione della discarica in oggetto. In data 24

¹ Capitolo 4.3.2

² A.I.M.: Aziende Industriali Municipalizzate

³ M.B.S.: Montecchio Brendola Servizi S.P.A.

maggio 1999, la discarica veniva esaurita, mentre i lavori di ricomposizione ambientale sono stati completati il 30 giugno 2002.

Il 1° ottobre 2009 sono state completate le operazioni di gestione post-operativa della discarica. Queste ultime, secondo la comune accezione normativa, valida anche prima del D.Lgs 36/2003, possono ritenersi completate solo quando la discarica è idonea alla “dismissione in sicurezza”. In altri termini, l’invaso colmatato di rifiuti è “abbandonabile” solo quando sia attestata l’assenza di conseguenze per le matrici ambientali adiacenti, a seguito dell’interruzione delle attività di gestione post-operativa. Una tale situazione, normalmente, si verifica quando le principali emissioni di una discarica, il percolato e il biogas, cessano di prodursi e/o quando le loro caratteristiche chimico-fisiche siano compatibili con il rilascio incontrollato nell’ambiente.

Nell’autorizzazione al progetto di recupero e sistemazione ambientale, di cui alla DGRV n. 4698 dell’11.10.1994, si prevedeva, sulla scorta delle indicazioni del progetto, il completamento formale della gestione post-operativa della discarica al 1° ottobre 2009⁴. Alla data del 1° ottobre 2009, però, appariva necessario proseguire nella gestione post-operativa oltre la data prevista, stante il persistere della produzione di percolato e di biogas. Il percolato, inoltre, non aveva, alla data medesima, le caratteristiche chimiche per essere consegnato direttamente all’ambiente circostante.

Conseguenza di ciò è che le somme accantonate a bilancio per la gestione post-operativa fino al 30 settembre 2009 erano sostanzialmente esaurite e la prosecuzione della gestione richiedeva la disponibilità di nuove risorse economiche. Ovviamente, la prosecuzione delle attività di gestione post-operativa, oltre il termine previsto dai progettisti e dall’estensore della perizia giurata, di fatto pari a 8 anni, richiedeva la manutenzione straordinaria dell’impiantistica predisposta che, come del tutto logico, era stata concepita per una vita utile comparabile con la durata del periodo di gestione post-operativa indicato nel progetto.

In seguito il Comune ha ritenuto di differire il collaudo della discarica al compimento degli 11 anni previsti nel progetto per il completamento della fase di ricomposizione finale e gestione post-operativa, rispetto al più consueto termine dei lavori. Si rimanda alla lettura della relazione di collaudo⁵ per una più accurata cronistoria e per eventuali chiarimenti.

⁴ 11 anni a partire dalla data di inizio lavori di ricomposizione ambientale avvenuti in data 1° ottobre 1998, di cui 3 per la ricomposizione ambientale e 8 anni di effettiva post-gestione

⁵ La relazione di collaudo è stata redatta dal Dott. Ing. Stefano Busana

1.2 Il progetto generale di recupero e sistemazione ambientale

La progettazione della ribaulatura della discarica è avvenuta, a detta dei progettisti:

«... studiando un apposito modellamento morfologico al fine di ottenere una migliore integrazione paesaggistica con il territorio circostante.»⁶.

Nel progetto si legge anche: *«La forma definita per la baulatura, descritta in progetto, ha consentito di avere un fronte dolce verso il centro abitato di Montecchio Maggiore, mentre verso ovest si veniva a creare un controargine che si addossava all'esistente argine di golena del T. Poscola.»*. Nella Relazione dello studio Kipar, si legge inoltre che *«Alcune panchine invitano ad una sosta panoramica, sullo sfondo i due castelli di Giulietta e Romeo ... »*.

Per la ribaulatura è stato previsto e realizzato un argine perimetrale impermeabile esterno di contenimento dei rifiuti, realizzato sopra la massa di rifiuti interrata dei precedenti lotti, sopraelevato rispetto al piano campagna di circa 1,20 m. L'argine perimetrale risulta più arretrato, in corrispondenza del lotto 4, per una distanza variabile da 20 a 50 m; in questo modo è stato possibile dare una forma quanto più possibile omogenea alla risagomatura prevista. Questa, nel suo complesso, ha una pendenza del 5% da Est verso Ovest, mentre da Ovest verso Est la pendenza è del 25%. In tal modo il progetto consegue, nella parte più alta della discarica una sopraelevazione di circa 11 m rispetto al piano campagna. L'area interessata alla risagomatura, escludendo quindi la viabilità perimetrale, gli argini, le aree di rispetto e quelle destinate ad impianti, è di circa 74.500 m².

Le operazioni di predisposizione del sito hanno comportato la regolarizzazione del fondo sopra la massa dei precedenti rifiuti e la realizzazione di 9 lotti separati da arginelli, al fine di consentire una costante separazione delle acque meteoriche dal percolato e, contemporaneamente, favorire il deflusso delle acque di percolamento con pendenze dell'1%. Le acque di percolazione sono state convogliate, tramite tubazioni microfessurate, ai pozzettoni di raccolta del percolato. Lungo tutto il perimetro, all'esterno dell'argine di contenimento, è stata realizzata una scolina per la raccolta delle acque di ruscellamento dell'area della discarica. La discarica, secondo progetto, doveva essere dotata di un anello stradale, con funzioni anche di scolina perimetrale. La scolina doveva convogliare le acque meteoriche verso alcuni bacini d'acqua posti a Est della discarica, in lotti non interessati dallo smaltimento dei rifiuti, e da qui in percolazione defluire nel sottosuolo.

La ricomposizione finale dell'area doveva comprendere tutti quegli interventi che iniziano con la copertura della massa dei rifiuti messi a dimora e terminano con il recupero del sito all'uso previsto. Il recupero finale proposto, di tipo paesistico-

⁶ Citazione dalla relazione dello studio Kipar sul progetto di recupero e sistemazione ambientale

ambientale, come detto, mirava all'inserimento paesaggistico dell'area nel territorio circostante.

È stata altresì realizzata una barriera perimetrale arborea, per limitare durante la fase di gestione lo spostamento di polveri in aree esterne a quelle della discarica controllata. Completato il riempimento di ciascun settore della discarica, si è proceduto a realizzare la ricopertura finale, composta da uno strato di 30 cm di argilla, con caratteristiche di permeabilità dell'ordine di 10^{-7} cm/s, stesa e compattata a strati di spessore pari a 15 cm, per evitare fenomeni di percolazione delle acque meteoriche. La sistemazione finale dell'area, concepita dallo Studio Kipar di Milano, prevedeva la formazione di prato stabile sull'intera superficie e la successiva piantumazione di specie arbustive ed arboree secondo criteri compositivi differenziati, in relazione alle diverse quote ed esposizioni presenti sul rilievo.

La copertura della discarica, sopra il succitato strato di argilla di spessore pari a 0,30 m, prevedeva un secondo strato di materiali inerti "tipo macerie", di spessore pari a m 0,08-0,35 e un ultimo strato superiore di terreno di coltivo con spessore pari a:

- 1,40 m sulle aree a rimboschimento;
- 0,50 m sulle aree a inarbustimento;
- 0,32 m sulle aree a prato;

Il progetto di ricomposizione ambientale traeva origine dagli elementi che caratterizzano il paesaggio agricolo della valle del fiume Guà, quali i filari di alberi d'alto fusto, i prati e gli argini. L'area risulta infatti a cerniera tra la zona agricola vera e propria e la fascia agricola periurbana dell'edificato di Montecchio Maggiore. L'individuazione di un asse principale di fruizione, nell'arginatura del torrente Poscola, costituisce elemento d'unione dell'intera fascia degradata costituita dalla sequenza cava-discarica-cava, quale elemento visuale di riqualificazione e di futura fruizione del sito. L'andamento prescelto per la baulatura della discarica risultava idoneo alla creazione di un grande prato di affaccio verso le colline e i castelli, sottolineato dalla presenza dei meli giapponesi sulla sommità. L'utilizzo del filare di pioppi sul lato est aveva lo scopo primario di filtro e mascheramento immediato della discarica nel suo periodo di attività; al contempo, proprio l'utilizzo dei pioppi cipressini, sia sul lato est che sul lato ovest, avrebbe costituito un punto di riferimento visivo per i futuri fruitori del "parco", evidenziando altresì la continuità con le due zone limitrofe (cave) che il Comune di Montecchio intendeva allora recuperare a scopi ricreativo-naturalistici.

Nel progetto approvato è prevista una durata di gestione post-operativa della discarica di 11 anni: 3 anni dall'inizio della ricomposizione a partire dal 1999 con termine lavori 2001 e successivi 8 anni a partire dal 2002 e fino al 2009. In realtà, ciò può indurre a equivoci, giacché è chiaro che tale gestione è di 8 anni. Dalla Perizia asseverata del P.I.⁷ Claudio Vergerio del 24 settembre 1998 si evince che: «//

⁷ P.I.: Perito Incaricato

sottoscritto perito, dopo aver esaminato gli obblighi della M.B.S. Montecchio Brendola Servizi S.p.A. in ordine alla ricomposizione paesistico - ambientale della discarica e dopo aver analizzato il sistema di quantificazione dei costi utilizzato dalla medesima Società, che ha portato alla determinazione dell'importo di Lire 2.583.371.942 quale costo complessivo da sostenere per ricomposizione paesistico - ambientale della discarica, [...], attesta che a suo avviso risultano congrui sia la stima operata dalla Società che determina il Lire 2.583.371.942 il costo complessivo da sostenere per chiusura, bonifica, monitoraggio e manutenzione della discarica, sia il criterio di ripartizione complessivo in proporzione alla percentuale di riempimento della discarica stessa.».

1.3 Situazione attuale

Dall'analisi della relazione di collaudo stilata dal Dott. Ing. Stefano Busana in seguito alla fine del periodo di gestione post-operativa della discarica, si evince che la situazione attuale del sito differisce da quella di progetto sotto vari aspetti. Il più rilevante è sicuramente il già citato problema di produzione di percolato e biogas che rende necessario proseguire nella gestione post-operativa oltre la data prevista.

Si legge inoltre che «*Notevoli differenze fra i due scenari (progetto e realtà all'epoca del Collaudo) si riscontrano altresì nella morfologia della discarica. Tali differenze sono solo parzialmente spiegabili con l'effetto dei cedimenti da degradazione biologica dei RSU. È noto, infatti, che, laddove lo strato di rifiuti ha spessore maggiore, a parità di cedimento percentuale, le quote assolute tendono ad abbassarsi maggiormente, modificando la morfologia della copertura. Ciò, come detto, non pare l'unico motivo di talune notevoli differenze di "forma", quali:*

- *le scarpate attuali appaiono arretrate verso il piazzale del capannone, lato S-O;*
- *la base della discarica attuale evidenzia scarpate con pendenza maggiore negli ultimi 2-3 m circa;*
- *la linea di colmo non pare ben definita e sembra spostata da ovest verso est, con quote variabili da 9 a 10 m sul p.c. vicino ai pozzi del percolato dei vecchi lotti.*

Trattandosi, come detto, di variazioni morfologiche non tutte imputabili all'assestamento da degradazione dei rifiuti, è del tutto probabile che siano dovute a scelte del Direttore dei Lavori della ricomposizione, motivate da considerazioni non note allo scrivente.

In tutti i casi, non pare sussistano motivazioni di carattere tecnico che rendano la morfologia riscontrata "migliore" o "peggiore" di quella di progetto.

Ciò nondimeno, la morfologia della zona est, con le riferite concavità e, in ogni caso, assai poco pendente, unita alla situazione del drenaggio ipodermico di ampie zone a

sud-est, rende problematica la situazione di notevoli zone della copertura. Il Tecnico Responsabile Dott. Darteni ha già provveduto a rilevare questo problema, la cui risoluzione dovrà essere valutata nell'ambito dell'estensione del periodo di gestione post-operativa. Anche questi maggiori cedimenti locali, tuttavia, non configurano necessariamente difformità dalle prescrizioni progettuali, né dalle indicazioni del Direttore dei Lavori. Altre scelte del D.L. sono parse opportune, come quella di eliminare i bacini lacustri dalla copertura.»⁸

Riguardo l'assestamento del corpo rifiuti si legge che, dai rilievi topografici effettuati nel corso degli anni dal completamento della ricomposizione, è possibile desumere che il trend di consolidazione del corpo rifiuti volge verso il completamento.

Viene poi nuovamente sottolineato come « *il trend di produzione di percolato non tende a diminuire, come nelle previsioni dei progettisti. Pertanto, da questo punto di vista, la discarica non può essere dismessa, poiché il livello del percolato nel corpo rifiuti tenderebbe a salire. Per quanto attiene le caratteristiche chimiche del percolato e la sua eventuale conferibilità nell'ambiente circostante, sono disponibili anche dati molto recenti (29 giugno 2009 e 20 aprile 2010), derivanti dai controlli analitici sulla vasca di rilancio in fognatura[...]*Si noti come il percolato attuale presenti ancora valori di COD, di azoto ammoniacale (NH₄) e di cloruri e fosforo totale troppo alti per il rilascio sul suolo, ai sensi di Tabella 4 All. 5 Parte III D. Lgs. 152/2006. A titolo di confronto, si ricorda che i limiti per lo scarico in un ricevitore superficiale (D.Lgs 152/06), condizione, secondo la norma, per la dismissione della discarica, dei due fra i più significativi parametri analitici del percolato da discarica per RSU, il COD e l'azoto ammoniacale, sono i seguenti:

$$\text{COD} \leq 160 \text{ mg/l}; \quad \text{N-NH}_4 \leq 15 \text{ mg/l}$$

Anche da questo punto di vista, pertanto, appare impossibile la dismissione degli impianti di estrazione e scarico in fognatura del percolato della discarica, come previsto dal progetto.»

Più avanti, il collaudatore scrive: «*...Da questa analisi si evince altresì che lo sfruttamento del biogas non possa continuare ancora a lungo.[...]Per la soluzione del problema dell'innocuizzazione del biogas comunque prodotto è necessario predisporre un progetto per l'ulteriore periodo di gestione post-operativa, a cura del Gestore.[...]Anche dalla situazione del biogas testè illustrata si può concludere che la discarica non può essere dismessa in sicurezza dopo il periodo di gestione post-operativa prevista dal progetto. D'altronde, tuttavia, tale conclusione non sorprende, se solo si pensa ai periodi tipici di produzione di biogas nelle discariche di RSU, apprezzabile anche per qualche decennio dalla chiusura.[...]In conclusione di punto, si ribadisce, con motivazioni oggettive frutto di verifiche di Collaudo che la discarica non può essere dismessa in sicurezza e richiede un ulteriore periodo di gestione, da quantificare a cura del Tecnico Responsabile. »*

⁸ Citazione dalla Redazione di Collaudo della discarica redatta dal Dott. Ing. Stefano Busana

Riguardo poi l'aspetto estetico e la fruizione della zona come parco, il collaudatore conclude scrivendo che *«La fruizione ricreativa dell'area non è ancora possibile, alla luce della presenza di impianti attivi e di potenziale presenza di biogas. Ad avviso dello scrivente, tale fruizione è da evitare anche a discarica dismessa, sia per il protrarsi nel tempo della produzione, se pur minima, di biogas, sia per evitare danneggiamenti, volontari e non, della copertura. È bene quindi che le panchine e i cestini previsti dal progetto siano destinati dal Comune ad altri siti. »*

2. Coperture con pannelli fotovoltaici

Come visto si pone un grosso problema nella prosecuzione della post-gestione della discarica, in particolare dal punto di vista finanziario, in quanto il fondo accantonato dal gestore risulta esaurito. Una soluzione a tale problema può essere individuata nella realizzazione di una nuova copertura del sito con l'installazione di pannelli fotovoltaici. In questo modo le spese, da sostenere per la sistemazione della copertura e la continuazione della post-gestione, potranno essere reintegrate grazie alla vendita dell'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico.

Lo sviluppo di territori contaminati in generale e di discariche in particolare, per l'installazione di centrali a energia rinnovabile, è una pratica relativamente nuova e in crescita. I vantaggi che possono derivare da un'installazione di questo tipo sono molteplici: innanzitutto in questo modo si riutilizzano siti contaminati destinati altrimenti a essere improduttivi per molti anni; ciò consente anche di evitare lo spreco di terreno fertile che spesso viene usato per l'installazione di impianti solari. Si crea inoltre reddito per i proprietari delle discariche che spesso sono enti pubblici e quindi questo va a vantaggio di tutta la cittadinanza e, rispetto all'abbandono, si migliora anche l'aspetto estetico del sito contaminato.

Le discariche in particolare risultano essere particolarmente adatte a questo sviluppo in quanto solitamente sono poste vicino a linee elettriche e ciò fa sì che l'energia prodotta sia subito disponibile senza bisogno di nuove infrastrutture. Non tutte le discariche sono però adatte ad accettare un impianto solare, affinché ciò possa avvenire, bisogna che la discarica sia chiusa e con contenuto già stabilizzato; sarebbe preferibile un'area grande e soleggiata e non devono esserci prescrizioni di legge particolari. Oltre a ciò bisogna porre attenzione alla presenza di polvere, di possibili ombreggiature, di un facile accesso e di un'insolazione adeguata. Nonostante ciò, con una corretta progettazione, sono moltissime le discariche che possono essere interessate da un'installazione di questo tipo. La scarsità di

letteratura sul tema e i problemi progettuali cui si va incontro possono comunque creare notevoli disagi.

Di seguito si vuole fornire una panoramica degli aspetti da considerare nel collocare un impianto fotovoltaico su una discarica in post-gestione e fornire una soluzione per il caso in esame. A tale proposito sono stati sviluppati i capitoli seguenti, dove si è fatta un'analisi delle varie scelte che è possibile e necessario fare per realizzare un'opera di questo tipo. Prima su tutte la scelta del tipo di tecnologia di pannelli fotovoltaici e a tale proposito sono stati fatti dei confronti fra le varie possibilità presenti nel mercato, per trovare quale possa essere la scelta migliore a seconda delle condizioni del sito. Una volta scelto di sviluppare una copertura con geomembrana esposta e pannelli flessibili a pellicola sottile, si è proceduto con l'analisi delle problematiche relative alle geomembrane esposte e alla scelta della geomembrana più adeguata. Anche in questo caso è stata fatta una breve ricerca dei casi storici in cui si sia già sviluppata tale tecnologia per avere un background di conoscenza. Una volta effettuata anche questa scelta, si è passati all'analisi di quali sono le sfide nella realizzazione di un simile progetto e le si è affrontate con riferimento alla discarica di Pontesello. È stato infine redatto anche un piano energetico e finanziario.

2.1 Solare in discarica

In Italia, come in tutta Europa, negli ultimi anni ci si è posti il problema dell'uso del territorio. Vista la situazione economica senza precedenti che il mondo intero sta attraversando e visto che il territorio è una risorsa fondamentale e limitata, una valutazione più attenta sul suo uso, in particolare delle aree "marginali", diventa essenziale. Per aree marginali s'intendono aree non più in grado di attrarre investimenti, aree che hanno concluso la funzione cui erano adibite, aree che presentano caratteristiche che ne rendono difficile un utilizzo in futuro. Le discariche sono un classico esempio di aree marginali. In ogni città ci sono terreni non utilizzati che rappresentano una ricchezza non sfruttata.

L'installazione d'impianti fotovoltaici in questi terreni può essere una forma di risanamento e un modo per riabilitare anche socialmente una zona considerata senza valore, donandole una nuova utilità. L'Italia ha quindi, vista la scarsità di terreno verde ancora disponibile, la grande quantità di zone marginali e la sua posizione geografica favorevole, tutte le caratteristiche per diventare lo scenario di una rivoluzione energetica e ambientale centrata sullo sviluppo di fonti rinnovabili di energia.

In particolare, in Italia uno studio di Legambiente⁹ redatto nel 2008, ha censito più di 5.700 cave attive e oltre 10.000 cave esaurite. Solo in Veneto sono state censite 594 cave. Ovviamente non tutti questi siti possono dirsi adatti ad ospitare un impianto solare, ma ipotizzando di installare un impianto anche solo nel 5% di queste cave, uno studio di PVs in BLOOM¹⁰ stima che la potenza installata potrebbe essere di 250 MWp.

Comunque lo scenario più interessante in Italia sembra essere quello riguardante le discariche. Secondo un'analisi di Unioncamere¹¹ del 2009 in Veneto sono presenti ufficialmente 257 discariche di cui 117 attive, 24 riempite, 44 in post-gestione, 53 hanno terminato il periodo di post-gestione e 19 in altro stato. Di queste oltre la metà sono state considerate adatte ad ospitare un impianto fotovoltaico. Da un calcolo iniziale si è visto come, se su tutte le discariche fosse installato un impianto, la potenza di picco installata pareggierebbe la potenza installata in tutto il resto della nazione alla data dello studio¹². Dal più recente rapporto rifiuti 2011 redatto da ISPRA¹³, si evince che solo tra il 2004 e il 2009 sono state quasi 200 le discariche per rifiuti non pericolosi che sono state chiuse. Se si pensa che una discarica, dopo la chiusura, ha un periodo di post-gestione di 30 anni, si può facilmente immaginare il grande numero di discariche che possono incorrere negli stessi problemi finanziari di quella di Pontesello. Questa serie di discariche chiuse corrisponde a centinaia di ettari di terreno marginale che possono essere sfruttati.

Questo problema non esiste solo in Europa, ad esempio anche l'americana EPA¹⁴ sta incoraggiando il riuso dei terreni marginali per l'installazione di impianti di energia rinnovabile. Attraverso la campagna "Re-powering America's Lands Initiative" l'EPA, attraverso l'OSWER¹⁵, ha identificato diverse ragioni importanti per installare impianti di energia rinnovabile su terreni contaminati tra le quali:

- la riqualificazione di terreni altrimenti abbandonati;
- i terreni marginali offrono migliaia di acri di spazio aperto dove è meno probabile causare preoccupazioni nelle comunità per l'impatto estetico delle installazioni fotovoltaiche ;
- i terreni contaminati hanno minor valore rispetto a terreni non contaminati;

⁹ Legambiente, "Il punto sulle cave in Italia: I numeri, le leggi e ei piani, le buone e cattive pratiche", 2008

¹⁰ PVs in BLOOM "Marginal areas: Approach and methodology of location and classification", 2009

¹¹ Analisi redatta per il documento "matching marginal terrains with photovoltaics: a new challenge for the sustainable development of the european territory" di PVs in BLOOM

¹² Ci si riferisce all'anno 2009

¹³ ISPRA: Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale

¹⁴ EPA: Environmental protection agency

¹⁵ OSWER: Office of solid waste and emergency response

- lo sviluppo dei terreni contaminati può mitigare l'impatto attuale dell'installazione di impianti fotovoltaici su terreni agricoli;
- i terreni contaminati hanno condizioni ambientali che non sono adeguate allo sviluppo commerciale o residenziale e quindi resterebbero inutilizzati;
- l'energia prodotta da sistemi fotovoltaici non produce emissioni inquinanti.

Inoltre, ogni kWh prodotto da un impianto fotovoltaico permette di ridurre le emissioni in atmosfera di 540g di CO₂¹⁶. L'elettricità prodotta dagli impianti sui terreni contaminati può poi essere sfruttata in situ o venduta per un utilizzo altrove. Si noti che i picchi di produzione di energia da fonte solare coincidono con i picchi di domanda di energia elettrica. La produzione fotovoltaica può quindi andare a rispondere a questa sempre maggior richiesta di elettricità. Inoltre in Italia gl'incentivi per il fotovoltaico su discariche sono maggiorati del 5% rispetto ai classici impianti. In più anche l'economia locale può trarre benefici da un tale investimento vista la creazione di lavoro per aziende locali che ne consegue.

Il solare in discarica ha quindi un grosso numero di benefici, tuttavia le informazioni sul contesto tecnico e normativo, in particolare riguardo l'installazione su discariche in post-gestione, sono difficili da trovare e comunque poco dettagliate.

2.2 Scelta del tipo di pannelli

Nella progettazione di un impianto fotovoltaico su una discarica in post-gestione si rivelano fondamentali un'ampia serie di considerazioni. Per quanto riguarda le tecnologie solari disponibili, le considerazioni includono sia il solare a concentrazione¹⁷, sia il fotovoltaico con pannelli rigidi¹⁸, sia la copertura con pannelli flessibili a pellicola sottile. Alcuni dei più importanti fattori di scelta riguardano:

- l'efficienza
- il costo di produzione
- il peso
- lo stress che si applica sulla copertura della discarica
- il tipo di supporto necessario e in particolare la necessità o meno di infissioni
- il rapporto con l'erba che influisce nell'evapotraspirazione e quindi nel bilancio idrologico
- il rischio di rottura

¹⁶ Valore calcolato considerando l'attuale mercato energetico italiano secondo la GIFI, gruppo imprese fotovoltaiche italiane

¹⁷ Ci si riferirà in seguito al solare a concentrazione con la sigla CSP

¹⁸ Ci si riferirà in seguito al fotovoltaico con la sigla PV

- la resistenza a stress multi assiali dovuti ai cedimenti differenziali della discarica.

I sistemi classici montati a terra spesso hanno un telaio in acciaio galvanizzato fissato a una fondazione in calcestruzzo. Come fondazione si possono usare basamenti continui, cordoli o plinti in cemento armato o palificazioni metalliche infisse in profondità.



Figura 1: pannelli fotovoltaici rigidi ancorati con pilastri in cemento



Figura 2: pannelli fotovoltaici rigidi ancorati con infissioni



Figura 3: pannelli fotovoltaici rigidi ancorati con basamenti continui in cemento. Impianto di Castelceriolo (Al)



Figura 4: pannelli fotovoltaici rigidi ancorati con zavorre in cemento

Le strutture di montaggio più semplici sono costituite da montanti verticali in acciaio sui quali si fissa la base di appoggio per i pannelli fotovoltaici. I montanti in acciaio sono progettati della lunghezza adeguata per dare al pannello l'inclinazione che massimizza la ricezione di radiazione solare nell'anno a seconda della latitudine del sito.

Altre strutture possono avere assi mobili per l'inseguimento solare. Tali strutture, che posso avere uno o due assi mobili, permettono al pannello di ruotare e cambiare

inclinazione in modo da mantenere sempre la posizione migliore per la ricezione delle radiazioni solari. Gli inseguitori a doppio asse mobile sono quelli che massimizzano la produzione di energia, soprattutto nei mesi invernali quando il sole è vicino all'orizzonte. Di contro gli inseguitori a doppio asse mobile richiedono più spazio a causa dei loro movimenti e della difficoltà nell'impedire che un pannello ombreggi l'altro. Inoltre sono più costosi, richiedono maggior manutenzione e richiedono energia per far funzionare i due motori per il movimento. Questi svantaggi li rendono inappropriati per l'uso in discarica.



Figura 5: pannelli a inseguimento solare.
Impianto di Carbonia (CI)



Figura 6: impianto fotovoltaico
sulla discarica di Carbonia (CI)

Oltre al fotovoltaico, un altro modo per sfruttare l'energia solare che è possibile usare in una discarica è il CSP. Il componente alla base delle tecnologie e dei sistemi solari termici a concentrazione è un «collettore concentratore», vale a dire un dispositivo in grado di raccogliere e convogliare la radiazione solare verso un ricevitore. Il ricevitore può essere di tipo termico, ma anche fotovoltaico o termofotovoltaico. In relazione alla geometria e alla disposizione del concentratore rispetto al ricevitore si hanno i concentratori parabolici lineari, a torre con ricevitore centrale e i concentratori a disco. Le tecnologie solari a concentrazione utilizzano la radiazione diretta del sole, concentrandola tramite specchi. Attualmente sono quattro le principali tipologie di impianti a concentrazione, che di seguito vengono brevemente descritte:

- Impianti con collettori parabolici lineari, in cui specchi di forma parabolica, che ruotano su un solo asse, riflettono e concentrano i raggi del sole su un tubo ricevitore al cui interno scorre un opportuno fluido «termovettore». Questo fluido, generalmente costituito da oli sintetici, trasferisce il calore a un generatore di vapore per la successiva produzione di elettricità tramite un turboalternatore. Attualmente questa tipologia presenta la maggiore diffusione commerciale.
- Impianti a torre centrale, in cui un sistema di specchi indipendenti (eliostati) insegue il sole e concentra i suoi raggi su un ricevitore fisso posto alla sommità di una struttura a torre. Dal ricevitore un fluido opportuno trasferisce il calore a un generatore di vapore, che alimenta un

turboalternatore. Con questo sistema si possono raggiungere fattori di concentrazione, e quindi temperature, superiori rispetto ai collettori parabolici lineari.

- Impianti con collettori a disco parabolico, costituiti da un pannello riflettente di forma parabolica che insegue il sole, con un movimento di rotazione attorno a due assi ortogonali, e concentra la radiazione solare su un ricevitore montato nel suo punto focale. Il calore ad alta temperatura viene normalmente trasferito ad un fluido ed utilizzato in un motore, posizionato al di sopra del ricevitore, dove viene prodotta direttamente energia meccanica o elettrica.
- I sistemi a riflettori Fresnel, i quali sono simili ai concentratori parabolici, con movimentazione ad un solo asse e concentrazione su un tubo collettore. Qui la superficie riflettente è scomposta in un insieme di file di specchi che ruotano solidalmente.



Figura 7: CSP con collettori parabolici lineari



Figura 8: CSP con collettore a disco



Figura 9: CSP a torre centrale



Figura 10: CSP con collettori Fresnel.
Impianto di Liddell (AUS)

Il solare termico a concentrazione può vantare, rispetto al fotovoltaico, la realizzazione della più grande centrale solare termoelettrica al mondo. Nove impianti basati sulla tecnologia dei concentratori parabolici lineari, di taglie da 30 MW e 80 MW per complessivi 354 MW, sono stati progettati, costruiti e messi in esercizio tra il 1984 e il 1990 nel deserto del Mojave in California. Riguardo però il montaggio in una discarica, non ci sono studi che ne valutino l'impatto né impianti già realizzati.

Si possono fare però delle semplici considerazioni. La necessità di avere una produzione in larga scala per ottimizzare l'uso dei concentratori lineari e degli impianti a torre centrale, rende sostanzialmente infattibile una realizzazione di un impianto simile sulla maggior parte delle discariche, le quali non avrebbero la superficie adeguata ad ospitare tale impianto. Riguardo invece gli impianti collettori a disco parabolico o a riflettori Fresnel, questi sono più adatti alle piccole scale delle discariche, ma la necessità di zone piatte per il loro montaggio, può complicare l'applicazione in discarica. Ad oggi, i sistemi fotovoltaici sono stati sempre preferiti ai CSP e maggiormente usati e testati per le coperture di discariche.

Le caratteristiche di peso dei pannelli fotovoltaici e dei loro sistemi di supporto sono aspetti molto importanti per l'installazione su una copertura di discarica a causa delle limitazioni di carico che questa può sopportare. Ci sono vari tipi di pannelli fotovoltaici, con caratteristiche di peso molto diverse: monocristallino, policristallino e amorfo a film sottile. I pannelli monocristallini offrono la maggiore produzione di energia per unità di superficie, ma di contro sono costosi e pesanti. Sia i monocristallini che i policristallini sono rigidi e richiedono, come visto, il montaggio in un telaio metallico necessario per evitare flessioni che porterebbero alla rottura dei pannelli. I pannelli amorfi hanno invece una resa minore, ma sono più leggeri dei precedenti e possono essere realizzati su superfici flessibili. Per questo, nei casi, come la copertura di discariche, in cui il peso è un fattore limitante importante, i pannelli amorfi a film sottile possono essere la scelta migliore.

Nuove tecnologie emergenti di pannelli flessibili possono ridurre drasticamente il peso e offrire alte prestazioni per unità di peso e si candidano quindi per essere applicate direttamente alla copertura di una discarica. Questo nuovo tipo di pannelli elimina la necessità di avere un sistema di montaggio e di avere strutture di fondazione. D'altro canto alcuni pannelli monocristallini possono avere un maggior rapporto energia prodotta/peso vista la loro alta efficienza. Nei casi in cui lo spazio sia limitato, il peso non sia un grosso problema e si ricerchi il massimo di produzione elettrica la scelta può virare verso questa tipologia di pannelli.

Comunque, per tutti i tipi di pannelli fotovoltaici, è importante tenere a mente le considerazioni riguardanti l'ombreggiatura. Una progettazione ottimale richiede il posizionamento strategico dei pannelli ed è particolarmente importante per quanto riguarda i sistemi ad inseguimento solare. Oltre a questo, rilevante importanza va data alla progettazione dei sistemi di montaggio e di fondazione dei pannelli. Un sistema con pannelli a inseguimento solare a singolo o doppio asse sarà più pesante

di quelli fissi e ciò richiederà un approfondimento della fondazione. Tale aumento provocherà un maggior carico sulla copertura che potrebbe portare ad un instabilità della stessa e a problemi di tenuta. Anche per questo un impianto con sistema a inseguimento è difficile da realizzare sopra una copertura di discarica e a questo viene sempre preferito un sistema fisso.



Figura 11: impianto a pannelli flessibili



Figura 12: impianto a pannelli flessibili.
Discarica di Tessman Road (US-TX)

Un modo per descrivere ed evidenziare le differenze fra le diverse tecnologie di pannelli fotovoltaici è comparare le loro caratteristiche di funzionamento. A questo scopo è stata redatta la tabella¹⁹ seguente nella quale si classificano le caratteristiche funzionali di quattro diversi tipi di pannelli fotovoltaici dando a ognuno un voto in un range tra +2 e -2 dove i voti positivi indicano un punto di forza, i voti negativi un punto di inefficienza e lo zero indica che la tecnologia non presenta problemi con la specifica variabile ma non è neanche un suo punto di forza.

Technology	Crystalline Silicon	Triple-junction amorphous silicon	CdTe	CIGS
Conversion effect	2	1	-1	0
Dep. from temperature	0	2	1	0
Performance in time	2	1	1	1
Sensitivity to shadows	-1	1	1	1
Tilt & orientation	0	1	0	0
Diffused radiation	0	2	1	1
Low radiation	0	2	1	1
Spectrum sensitivity	0	1	1	1

Tabella 1: confronto fra diverse tecnologie di pannelli solari

¹⁹ La tabella è stata presa dalla tesi di laurea “Il solare fotovoltaico su terreni marginali. Valutazioni tecniche per guidare la scelta di tecnologia fotovoltaica e configurazione di un impianto in relazione alle condizioni dei siti marginali di destinazione” di David Tosin, 2009. Relatrice Prof.ssa Anna Stoppato, Università di Padova

Un'ulteriore tabella mostra una comparazione tra i tipi di siti marginali con i punti di forza o dei vari sistemi fotovoltaici.

PVPP SYSTEM TYPE	HIGH INSOLATION (1,400 - 1,600 kWh/mq/ year)				LOW INSOLATION (900 - 1,100 kWh/mq/ year)			
	LANDFILL	OPEN QUARRY	MINING AREA	AREA in PROXIMITY OF MARGINAL TERRAINS - FLAT AND REGULAR	LANDFILL	OPEN QUARRY	MINING AREA	AREA in PROXIMITY OF MARGINAL TERRAINS - FLAT AND REGULAR
A.1	NO	YES	YES	YES	NO	NO	NO	NO
A.2	NO	YES	YES	YES	NO	YES	YES	YES
A.3	NO	YES	YES	YES	NO	NO	NO	NO
A.4	NO	YES	YES	YES	NO	YES	YES	YES
A.5	NO	YES	YES	YES	NO	YES	YES	YES
A.6	YES	NO	NO	NO	YES	NO	NO	NO
B.1	NO	YES	YES	YES	NO	YES	YES	YES
B.2	NO	YES	YES	YES	NO	YES	YES	YES
B.3	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES	YES
C.1	NO	YES	YES	YES	NO	YES	YES	YES
C.2	NO	YES	YES	YES	NO	YES	YES	YES
C.3	YES	NO	NO	NO	YES	NO	NO	NO
D.1	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
E.1	NO	YES	YES	YES	NO	YES	YES	YES
E.2	NO	YES	YES	YES	NO	YES	YES	YES
E.3	NO	YES	YES	YES	NO	YES	YES	YES
E.4	NO	YES	YES	YES	NO	YES	YES	YES
E.5	NO	YES	YES	YES	NO	YES	YES	YES
E.6	YES	NO	NO	NO	YES	NO	NO	NO
F.1	NO	NO	NO	YES	NO	NO	NO	YES
G.1	NO	NO	NO	YES	NO	NO	NO	YES

Legend:	
NO	No matching
YES	Matching with reserve
YES	Good matching
A.1	Sylicon mono-policristalline - Fixed Panels (Stem ground screwed)
A.2	Sylicon mono-policristalline -Semifixed Panels (Stem ground screwed)
A.3	Sylicon mono-policristalline - Fixed Panels (Stem or support point on concrete base)
A.4	Sylicon mono-policristalline - Semifixed Panels (Stem or support point on concrete base)
A.5	Sylicon mono-policristalline - Sun tracking/ following panels
A.6	Sylicon mono-policristalline - PV Panels placed (e.g. on tanks) on the ground surface
B.1	Thin film Sylicon amorphous (RIGID) - Semifixed panels (Stem ground screwed)
B.2	Thin film Sylicon amorphous (RIGID) - Semifixed panels (Stem or support point on concrete base)
B.3	Thin film Sylicon amorphous (RIGID) - PV Panels placed (e.g. on tanks) on the ground surface
C.1	Thin film Sylicon (multijunction) (RIGID) - Fixed Panels (Stem ground screwed)
C.2	Thin film Sylicon (multijunction) (RIGID) - Fixed Panels (Stem or support point on concrete base)
C.3	Thin film Sylicon (multijunction) (RIGID) - PV Panels placed (e.g. on tanks) on the ground surface
D.1	Thin film Sylicon (multijunction) (FLEX) - Canvas placed on the ground surface
E.1	Thin film CaTe (RIGID) - Fixed Panels (Stem ground screwed)
E.2	Thin film CaTe (RIGID) - Semifixed Panels (Stem ground screwed)
E.3	Thin film CaTe (RIGID) - Fixed Panels (Stem or support point on concrete base)
E.4	Thin film CaTe (RIGID) - Semifixed Panels (Stem or support on concrete base)
E.5	Thin film CaTe (RIGID) - Sun Tracking/following panels
E.6	Thin film CaTe (RIGID) - PV Panels placed (e.g. on tanks) on the ground surface

Tabella 2: Possibilità di installazioni fotovoltaiche su siti marginali

Si noti come in discarica questo studio considera installabili solo impianti fissi montati a terra o impianti con tecnologia a film sottile flessibile.

Queste due sono tecnologie molto diverse tra loro sia come caratteristiche tecniche che come modalità di installazione. Da un punto di vista di efficienza, i pannelli monocristallini surclassano i pannelli a film sottile che però hanno il vantaggio di lavorare molto meglio a luce diffusa. Quindi, mentre i primi si adattano per realizzazioni che consentono una disposizione con inclinazione ottimale, i secondi sono molto più adattabili a casi in cui non sia possibile avere una pendenza orientata verso sud. Altra differenza palese è il peso: i pannelli cristallini sono molto più pesanti e necessitano di un sistema di sostegno anch'esso molto pesante. Contrariamente i pannelli a film sottile sono molto leggeri e possono essere applicati direttamente su una guaina. Questo rende i secondi molto più adatti a situazioni come la copertura di una discarica, dove il peso della struttura è un aspetto fondamentale. Inoltre, non avendo bisogno di strutture di sostegno, evitano di creare punti di carico sulla copertura. I pannelli a film sottile sono inoltre molto più resistenti agli urti e soprattutto alle deformazioni vista la loro flessibilità, mentre i pannelli cristallini sono rigidi e più fragili. Anche da questo punto di vista quindi i pannelli a film sottile sono più adattabili a una discarica, visto che non risentono dei cedimenti che possono avvenire, mentre i pannelli cristallini rischiano di rompersi se ci sono cedimenti eccessivi. Da un punto di vista estetico i pannelli cristallini possono risultare sgradevoli e soprattutto creare problemi al traffico aereo, in quanto riflettono la luce solare. I pannelli a film sottile non incorrono in questo rischio e risultano anche più gradevoli esteticamente. Altre considerazioni che portano poi a preferire i pannelli a film sottile sono: la loro maggior resistenza alla grandine, la maggior resa ad alte temperature, l'assenza di rischi di rilascio di agenti chimici o vetri in caso di rotture e la maggior facilità di riparazione. Resta comunque il fatto che, quando sia possibile avere una disposizione con pendenza e orientazione ottimali, la maggior resa dei pannelli cristallini e quindi la maggior produzione di energia e dunque di introiti, li renda preferibili a tutte le altre tecnologie. Contro ai pannelli flessibili a film sottile gioca inoltre, finora, un ruolo importante la mancanza di esperienza nel loro uso e la mancanza di dati a lungo termine sulla loro efficienza, nonostante tutti i test ne dimostrino la bontà. I pannelli cristallini invece sono usati da molti più anni e possono garantire una produzione che dopo 25 non sarà scesa più del 20%.

Esistono diverse tecnologie di pannelli flessibili a film sottile. Le principali sono:

- Silicio amorfo, in cui gli atomi di silicio vengono depositi chimicamente in forma amorfa, ovvero strutturalmente disorganizzata, sulla superficie di sostegno. Questa tecnologia impiega quantità molto esigue di silicio: spessori dell'ordine del micron. I moduli in silicio amorfo mostrano in genere un'efficienza potenziale tra il 10 e il 12%, mentre quella

commerciale varia tra il 7 e il 10%²⁰. I vantaggi nell'uso di questa tecnologia sono il basso costo delle materie prime necessarie al suo sviluppo e l'eccellente funzionamento a bassa esposizione di luce. Di contro l'efficienza è abbastanza bassa e il processo e le macchine necessarie alla produzione del pannello sono molto costose.

- Tellururo di cadmio (CdTe): sono i pannelli a film sottile più economici, ma anche questi hanno un basso rendimento termodinamico. Oltre all'economicità, un altro vantaggio deriva dalla bassa sensibilità alle alte temperature. A Maggio 2011, il Consiglio d'Europa ha confermato che non esiste alcun divieto di produzione o installazione di questi pannelli, allo scopo di rispettare gli obiettivi prefissati in termini di energie rinnovabili ed efficienza energetica; contestualmente, data la sua documentata tossicità, ha inserito il cadmio nella lista dei materiali vietati nelle produzioni elettriche o elettroniche. Il divieto di utilizzo nella produzione di celle fotovoltaiche parte dal 2013²¹.
- Solfuro di cadmio (CdS) microcristallino, che presenta costi di produzione molto bassi in quanto la tecnologia impiegata per la sua produzione non richiede il raggiungimento delle temperature elevatissime necessarie invece alla fusione e purificazione del silicio. Tra gli svantaggi legati alla produzione di questo genere di celle fotovoltaiche vi è la tossicità del cadmio ed il basso rendimento del dispositivo.
- Arseniuro di gallio (GaAs), una lega binaria con proprietà semiconduttive, in grado di assicurare rendimenti elevatissimi. Viene impiegata soprattutto per applicazioni militari o scientifiche avanzate, come missioni automatizzate di esplorazione planetaria o fotorivelatori particolarmente sensibili. Tuttavia il costo proibitivo del materiale monocristallino a partire dal quale sono realizzate le celle, lo ha destinato ad un impiego di nicchia.
- Diseleniuro di indio rame gallio (CIGS). Questa è la tecnologia di grande distribuzione con la maggior efficienza, infatti si arriva fino ad un 20% di efficienza potenziale e a un 14 % di efficienza commerciale. Altro vantaggio è legato all'ottimo comportamento in caso di scarsa luce. Di contro anche questa tecnologia richiede un processo di produzione molto complesso.

²⁰ Dati forniti da Global Solar Energy, Inc.

²¹ modifica alla Direttiva: *Restriction of Hazardous Substances Directive* del 24 Novembre 2010

2.3 Sfide progettuali

L'installazione di un sistema a energia solare sulla copertura di una discarica è complicato da una varietà di ostacoli ingegneristici. Si vogliono ora andare a analizzare i problemi più comuni che si possono incontrare nel progettare un impianto di questo genere.

2.3.1 Cedimenti

Una considerazione speciale quando si va a progettare sopra la copertura di una discarica, devono averla sicuramente i cedimenti, ovvero l'insieme delle deformazioni uniformi e non uniformi nella discarica causate dai processi fisici, biochimici e meccanici che cambiano le proprietà dei rifiuti nel tempo. Particolare importanza hanno i cedimenti differenziali, dati da una subsidenza localizzata risultante dalle eterogeneità nella conformazione dei rifiuti. I cedimenti possono dipendere dalla profondità del corpo rifiuti, dal tipo di rifiuti depositati, dalla loro età e dal metodo di posa. In termini geotecnici i cedimenti differenziali sono quelli che creano più problemi per l'integrità delle strutture poste sulla copertura delle discariche.

Nel tempo, a causa di questi, una discarica chiusa può essere soggetta a rotture della copertura superficiale, a danni al sistema di drenaggio delle acque, a danni al sistema di raccolta di percolato e biogas e anche a formazione di zone depresse dove l'acqua può ristagnare.



Figura 13: Cedimenti differenziali in una discarica in Pennsylvania (USA)



Figura 14: cedimenti differenziali in una discarica in Ohio (USA)

Riguardo poi l'interazione con le tecnologie solari, i cedimenti differenziali, provocano danni alla disposizione dei pilastri, alle fondazioni, alle linee elettriche e possono provocare un cambiamento nell'orientazione dei pannelli, il che può ridurre drasticamente l'efficienza degli stessi. Conseguentemente i cedimenti differenziali

vanno considerati con molta attenzione nel progettare un impianto a energia rinnovabile sulla copertura di una discarica. Oltre a questi, altri cedimenti che bisogna considerare sono quelli dovuti alla rapida compressione meccanica dei rifiuti quando sopra essi viene posato un peso, come può essere la fondazione, il telaio e il pannello stesso. Anche in fase di costruzione dell'impianto, i carichi dovuti ai mezzi o a impatti con terreno di materiale di costruzione, possono provocare cedimenti immediati.

Bisognerà quindi studiare un metodo di costruzione e un impianto che garantisca l'assenza di carichi eccessivi e bisognerà comunque utilizzare tecnologie e materiali che si adattino, in caso questi avvengano comunque. Sarà comunque consigliabile attendere qualche anno dalla conclusione del conferimento dei rifiuti nella discarica; dopo 2-5 anni infatti, si sarà già verificata la maggior parte dei cedimenti e saranno dunque minori i rischi di incorrere in cedimenti rilevanti.

Nella fase di progettazione bisognerà quindi tener conto della presenza dei cedimenti. La loro entità può essere stimata usando sia l'esperienza e l'osservazione sia modelli matematici semplici o più complessi per i quali si rimanda a una più approfondita trattazione in libri di geotecnica. Riguardo le scelte da effettuare per la progettazione dell'impianto fotovoltaico nei casi in cui ci siano cedimenti rilevanti, bisogna porre attenzione a vari particolari. La scelta di sistemi a inseguimento solare è senza dubbio rischiosa, i cedimenti possono andare a modificare l'orientazione del sistema e, di conseguenza, renderlo inefficiente. L'impatto dei cedimenti su un sistema solare fisso è inferiore, ma in ogni caso il sistema di supporto dovrà essere abbastanza flessibile da sopportare ogni cambiamento nell'elevazione che potrà essere indotto da un cedimento. In aggiunta, fondazioni troppo pesanti possono causare cedimenti immediati che possono danneggiare la fondazione stessa. Anche fondazioni troppo estese per superficie possono essere particolarmente vulnerabili a un danneggiamento.

Per questo motivo è consigliabile usare fondazioni poco profonde o zavorre per fissare i pannelli. Il peso dei pannelli può essere esso stesso considerato come possibile causa di cedimenti. Le varie tecnologie di pannelli solari hanno pesi molto differenti tra loro e bisognerà tener conto anche di questo aspetto nella scelta dei pannelli. Ci sono numerose misure che si possono adottare per ridurre i potenziali cedimenti di una discarica, per esempio con l'uso di geogriglie o andando a posizionare i carichi solo nelle zone più vecchie della discarica, essendo queste quelle meno soggette a cedimenti futuri.

2.3.2 Interazione con la copertura

Oltre ai cedimenti, un altro aspetto fondamentale nella progettazione di un impianto solare in discarica è l'integrità della copertura della discarica. Questo problema va tenuto in considerazione sia nella fase preliminare, quando, per massimizzare

l'efficienza dei pannelli, si progetta una sistemazione delle pendenze della discarica, sia quando si procede alla costruzione. Nella sistemazione la copertura, inizialmente bisognerà porre attenzione nel mantenere sempre e in ogni punto una copertura a norma che impedisca l'infiltrazione di acqua nel corpo rifiuti e che permetta di mantenere in funzione il sistema di raccolta del percolato e del biogas.

Il concetto fondamentale che sta alla base di queste precauzioni è che il sito dove si lavora è una discarica e che quindi la priorità è quella di mantenere efficiente la copertura e solo in secondo luogo di massimizzare l'efficienza dell'impianto solare.

La pendenza della copertura risulta un fattore decisivo nella scelta del tipo di sistemi solari da installare. Sistemi a inseguimento o CSP necessitano di zone piane, mentre i sistemi fissi possono essere adattati a zone a bassa pendenza con adeguati sistemi di montaggio. In ogni caso, per pannelli rigidi, costruire con pendenze oltre il 5% può essere rischioso: si possono avere problemi per la stabilità del pendio, vista la maggior erosione dovuta alle piogge in caso di maggior pendenza, inoltre ci può essere una riduzione della produzione di energia a causa dell'ombreggiamento. Di contro, le discariche con pendenze orientate verso sud sono ideali per massimizzare l'esposizione al sole e quindi la produzione di energia. Bisogna quindi fare un bilancio in fase di progettazione tra l'ottimizzazione della produzione di energia e il costo per assicurare l'efficienza della copertura e il montaggio dei pannelli, costi che aumentano proporzionalmente alla pendenza. I sistemi di montaggio sono infatti quelli che possono creare danni maggiori alla copertura. Le fondazioni, essendo fissate in profondità, possono creare vie preferenziali per l'acqua e soprattutto zone a maggior erosione, il che provoca il malfunzionamento del sistema di copertura. Più la pendenza della zona aumenta, più la fondazione dovrà essere grande e profonda e maggiori saranno i rischi di erosione o infiltrazione.

2.3.3 Altre considerazioni

Particolare attenzione andrà poi rivolta al rapporto con la copertura erbosa. Questa è fondamentale in una discarica con copertura classica, giocando un ruolo di primaria importanza nel bilancio idrico. Come dimostrato dagli studi di S. Melchior²², nella rimozione delle precipitazioni dalla copertura, ha un peso predominante l'evapotraspirazione. Questa si compone di evaporazione e traspirazione, la quale è demandata principalmente allo strato erboso e ha un potenziale di rimozione dell'acqua molto maggiore dell'evaporazione. I pannelli

²² Dati ricavati dallo studio: "Results from 18 Years of In Situ Performance Testing of Landfill Cover Systems in Germany" di Stefan Melchior; Volker Sokollek; Klaus Berger; Beate Vielhaber; and Bernd Steinert. 2010

interagiscono con l'erba, non solo andando a occupare parte della superficie prima coperta dal manto erboso, ma anche causando ombreggiamenti che ne riducono la capacità di traspirazione. Ciò può causare un drastico aumento della quantità di precipitazioni che può penetrare in profondità e creare percolato, il che è chiaramente da evitare.

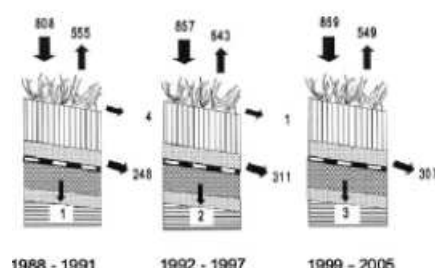


Figura 15: Bilancio idrico medio annuale in mm/anno, riferito a una copertura di discarica. Studio di S. Melchior nella discarica di Amburgo (Germania)

Da prendere poi in considerazione c'è il carico dato dal vento e dalla neve. La neve, nel caso cada sui pannelli, provoca un aumento del peso degli stessi. Bisognerà quindi tenerne conto sia nella progettazione della fondazione, sia nel calcolo dell'interazione tra il sistema e la copertura della discarica. Anche il vento può provocare un forte aumento di carico nella struttura del pannello. In zone molto ventose, si necessiterà quindi di considerare tale carico e di progettare fondazioni adeguate.

Il vento ha poi un ruolo fondamentale nella progettazione d'impianti con pannelli flessibili a film sottile, come verrà ampiamente discusso più avanti²³.

Oltre a questi, altri principali aspetti cui porre particolare attenzione in fase di progettazione sono:

- L'interazione con i sistemi di raccolta percolato e biogas
- La facilità di accesso; sarà quindi necessario prevedere dei percorsi di passaggio per i mezzi per la manutenzione
- La topografia della discarica che può influenzare il carico di vento e quindi il layout della disposizione dei pannelli
- La distanza delle zone urbane in quanto, più vicini si è ai possibili consumatori di energia, maggiore sarà l'efficienza del sistema di trasporto della stessa
- Gli effetti di ombreggiatura dovuti a agenti esterni all'impianto

²³ Capitolo 4.2

2.4 Casi di coperture di discariche con impianti fotovoltaici

Sono molteplici le realizzazioni già esistenti di impianti fotovoltaici su una copertura di discarica. Tra i tanti si possono citare in Italia:

- il progetto “sole a Carbonia” nel comune di Carbonia (CA), dove è stato installato un impianto a inseguimento solare da 1 MWp su un'area che si estende per 250 mila m² dove è attiva una discarica di rifiuti.
- La discarica di Oleggio (NO) dove è stato installato un impianto da 1 MWp e la discarica di Castelceriolo (AL) con un impianto di 2 MWp di pannelli monocristallini con supporto fisso. Questi sono stati fissati al terreno con fondazioni in calcestruzzo e sulla copertura è stato steso uno strato di ghiaia, impedendo quindi la crescita di vegetazione.
- La discarica di Vaiano (PO) dove, diversamente dai precedenti, la superficie è in pendenza. Anche in questo caso sono stati usati supporti fissi con fondazioni a pilastri.



Figura 16: Impianto fotovoltaico discarica di Oleggio (NO)



Figura 17: impianto fotovoltaico discarica di Vaiano (PO)

Come visto esistono quindi vari casi in cui le soluzioni progettuali sono tra loro molto diverse. In questo capitolo, senza citarli tutti, si è voluto evidenziarne due. Il primo riguarda la discarica di Roncavette (PD) e risulta interessante per la scelta effettuata sul metodo di fissaggio dei pannelli al suolo, in una discarica dove si prevedono rilevanti cedimenti differenziali; l'altro riguarda una realizzazione negli Stati Uniti d'America, dove è stata utilizzata una copertura con geomembrana esposta²⁴ e pannelli flessibili a film sottile.

²⁴ Ci si riferirà ai sistemi di copertura con geomembrana esposta con la sigla EGCS: exposed geomembrane cover system

2.4.1 La discarica di Roncajette

L'area della discarica di Roncajette a Ponte San Nicolò, di proprietà del Bacino Padova 2, è composta da due lotti esauriti nel novembre del 1999 e da allora in gestione post-operativa. L'impianto fotovoltaico realizzato è di circa 1MWp di potenza installata su circa 2 ettari di terreno sul versante sud del lotto C della discarica. La superficie occupata dall'impianto è di circa 19.500 mq, di cui circa 7.300 mq corrispondono alla superficie captante dei moduli. Il sistema consiste di circa 4.500 pannelli fotovoltaici policristallini con potenza specifica di 220 Wp ciascuno. Si calcola che la produzione elettrica media prevista per l'impianto, con un'efficienza di impianto dell'82 %, sarà pari a 1,175 MWh/anno, decrescente dello 0,5% annuo fino al trentesimo anno di vita dell'impianto.

L'aspetto più interessante è che i moduli fotovoltaici sono stati fissati a speciali "contenitori" in materiale plastico riciclato (PEAD) che sostengono i pannelli e danno loro un'inclinazione di 25°. I moduli sono stati disposti secondo file parallele sul terreno, rivolte a sud e distanti l'una dall'altra circa un metro e mezzo, in modo che l'ombra della fila antistante non interessi quella retrostante. Questa scelta è dovuta alla particolarità del terreno sul quale si è installato l'impianto fotovoltaico che sconsigliava l'impiego di strutture usualmente utilizzate in altre applicazioni, le quali impiegano prevalentemente basamenti continui, cordoli o plinti in cemento armato o palificazioni metalliche infisse in profondità. Per questo sono stati realizzati speciali contenitori, realizzati in plastica riciclata, posizionati direttamente a terra dopo un livellamento di strisce di terreno di larghezza pari a circa un metro e lunghezza pari ad una stringa elettrica di 22 moduli, ovvero circa 38 metri. Il contenitore ospita un singolo modulo assicurato ad esso tramite un telaio in alluminio. Il contenitore, dotato di fori di drenaggio, è stato riempito con uno strato di ghiaia drenante e quindi con la stessa terra rimossa dal livellamento del terreno. Si è ottenuto così un carico statico aggiuntivo pari al solo peso del cassone, del modulo e della ghiaia drenante, stimato in circa 40 chilogrammi per metro quadro. I vantaggi di questa particolare scelta nel tipo di supporto sono notevoli:

- Il supporto è stato costruito ad hoc per ottimizzare l'inclinazione dei pannelli
- Un supporto di questo tipo crea un aggravio di carichi statici e dinamici minimo sulla copertura
- Si assicura il massimo grado di libertà a ogni pannello per assecondare gli assestamenti differenziali del terreno
- Ogni pannello può essere posizionato in modo da evitare l'ombreggiamento
- Ogni pannello è facilmente rimovibile in caso necessità manutenzione
- Le vasche sono in materiale riciclato a basso costo e sono prive di cloro, sono inoltre adatte a resistere ai raggi UV senza problemi, sono ignifughe e non conducenti

- Dopo i 30 anni di utilizzo dell'impianto, la sua dismissione non prevederà costi aggiuntivi, basterà semplicemente rimuovere i moduli senza dover demolire alcuna struttura.



Figura 19: Impianto di Roncayette (PD): vasche per i pannelli fotovoltaici zavorrate

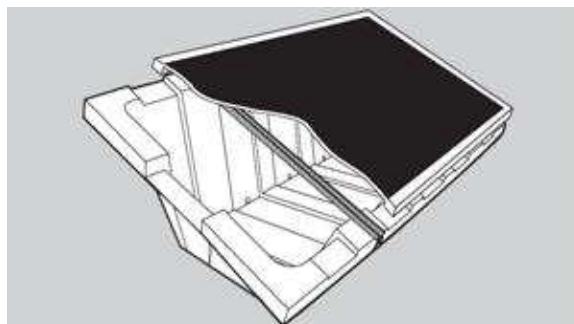


Figura 18: Impianto di Roncayette (PD): illustrazione del sistema di fissaggio dei pannelli fotovoltaici



Figura 20: Impianto di Roncayette (PD): impianto installato



Figura 21: discarica di Goro (FE). Sono stati progettati dei supporti per i pannelli fotovoltaici del tutto simili a quelli di Roncayette

Per la realizzazione dell'impianto sono state necessarie alcune opere civili: compattazione e spianamento del terreno, scavi per l'appoggio dei contenitori, stesa di un tessuto-non tessuto per evitare la crescita di vegetazione intorno ai pannelli, recinzione e viabilità interna e locale tecnico della centrale elettrica, per alloggio inverter e locale Enel.

La realizzazione dell'impianto fotovoltaico non ha interferito minimamente con la discarica di rifiuti in gestione post-operativa in quanto:

- Non comporta problemi alla rete di captazione del biogas;
- Non interferisce con i pozzi di estrazione del percolato essendo all'esterno dell'area;

- Consente la regolare manutenzione delle reti presenti e l'attività di sfalcio del verde grazie all'opportuna distanza mantenuta tra i pannelli o moduli;
- Non influisce sul naturale cedimento della discarica;
- Non crea modificazioni nella morfologia
- A detta dei progettisti non incide significativamente sul bilancio idrologico, anche se riduce notevolmente l'evapotraspirazione;
- Non incrementa la possibile formazione di avvallamenti e di eventuali spinte nei confronti degli argini di contenimento perimetrale.

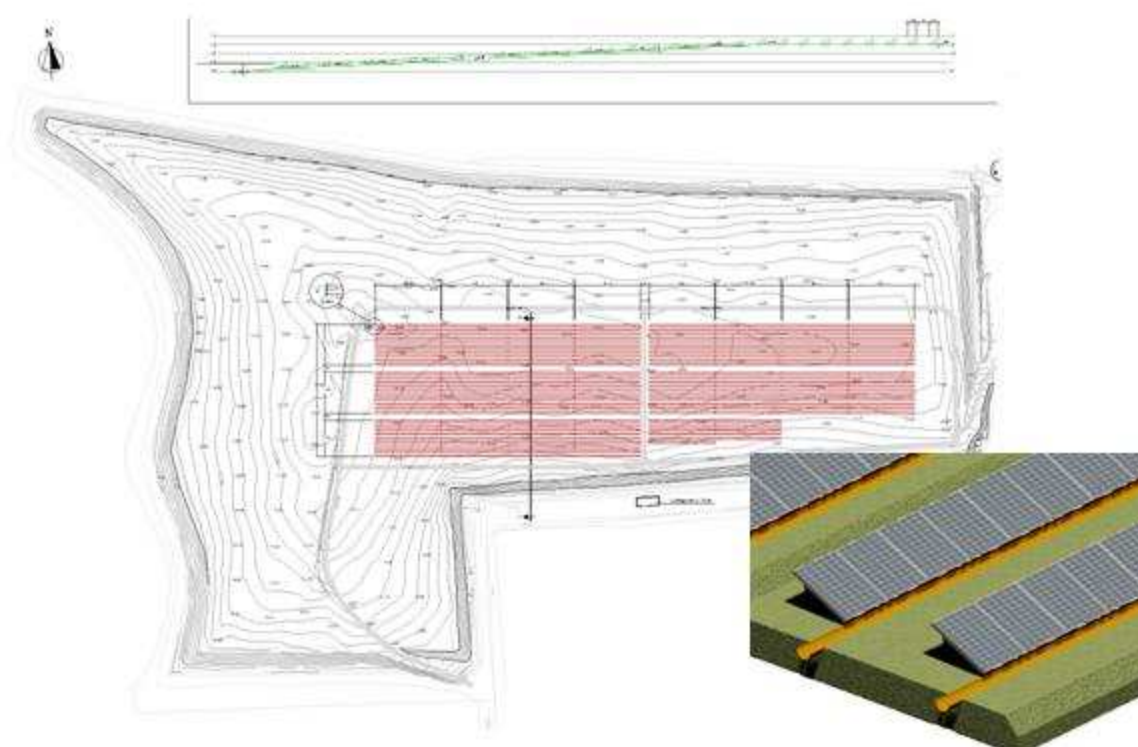


Figura 22: Impianto di Roncavette (PD): planimetria

L'impianto in totale è costato oltre 4,5 milioni di euro, di cui oltre 3 milioni sono stati spesi per l'acquisto degli oltre 4.500 moduli fotovoltaici a 60 celle da 220Wp l'uno. I supporti in HDPE riciclato sono costati 60 euro l'uno per un totale di 273 mila euro, mentre le altre voci di costo rilevanti riguardano gli inverter, la compattazione e sistemazione del terreno, il trasformatore, il tessuto-non tessuto, prove e collaudi e un 5% sul costo totale di imprevisti.

Interessante il metodo usato per progettare la zavorra, per il calcolo della quale si è considerata l'azione del vento che potrebbe spostare i pannelli. È stato usato un

vento di riferimento di 25 m/s come indicato dalle norme tecniche²⁵ per la zone del nord Italia e sono state calcolate due zavorre diverse per i pannelli perimetrali e per quelli che invece risentono dell'effetto schermo indotto dai pannelli vicini. Sono quindi stati trovati due pesi di riferimento pari a 100 e a 80 Kg, cui è stato sottratto il peso del pannello, trovando la zavorra necessaria. Il sistema zavorrato così creato crea una pressione sul terreno pari a 0,1 kg/cm², che è un carico che non crea alcun tipo di cedimento o problema alla copertura.

Un altro impianto del tutto simile a questo è stato realizzato anche in Germania a Frankenthal e conferma che questa soluzione progettuale può risultare una buona scelta quando ci sono le condizioni adeguate.

Alcuni dubbi su questa realizzazione si hanno in merito all'invarianza idraulica, in quanto l'evapotraspirazione si riduce notevolmente andando a togliere l'erba per posizionare i pannelli e, come illustrato precedentemente²⁶, ciò comporta un notevole aumento di deflusso ipodermico e percolazione. Altro problema che può verificarsi riguarda l'aumento di erosione localizzata che in caso di pioggia si sviluppa attorno ai supporti per i pannelli. Nonostante siano previste delle canalette in pvc per intercettare le acque di sgrondo dei pannelli, resta qualche dubbio sul rischio che a monte dei sostegni dei pannelli possa verificarsi un accumulo di acqua dovuto all'effetto diga che i sostegni stessi provocano. Questo può creare grossi problemi con l'infiltrazione e l'aumento di percolato.

2.4.2 Tessman Road landfill

Nella discarica di Tessman Road, a San Antonio in Texas, è stato sviluppato un progetto di copertura di discarica con pannelli solari flessibili nel 2008. È stata la prima realizzazione di una copertura di questo tipo ed è servita come progetto pilota per una realizzazione più grande che è stata poi realizzata nella discarica di Hickory Ridge in Georgia. La grossa novità introdotta da questo progetto è la scelta di coprire la discarica con un sistema di copertura con geomembrana esposta, sopra alla quale sono stati incollati pannelli fotovoltaici flessibili a film sottile.

Nel progetto pilota sono stati scelti pannelli di dimensioni pari a 3,93x5,48 m, con uno spessore di 0,63cm. Il peso è di 3,6 kg/m², il che consente di poter trascurare il carico dei pannelli sulla copertura della discarica, inoltre la flessibilità dei pannelli permette loro di adattarsi a qualsiasi tipo di cedimento. I pannelli sono amorfi, il che, come già visto, permette loro di lavorare molto bene a luce diffusa e anche quando

²⁵ decreto 16 gennaio 1996, norme tecniche relative ai "criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi", tabella 7.1

²⁶ Capitolo 2.3.3

non godono una buona orientazione, la resa però è più bassa nelle ore di massima insolazione. Dal punto di vista elettrico, ogni sottostringa di pannelli è stata costruita offsite e poi incollata in sito alla geomembrana esposta. Le varie sottostringhe, dopo essere state posizionate sono state connesse tra loro. Questo permette, in caso di manutenzione, di staccare dalla produzione una sola sottostringa continuando comunque a produrre con le altre.

Ciò che colpisce maggiormente rispetto alle classiche coperture di discariche è senza dubbio la scelta di usare un EGCS, Exposed Geomembrane Cover System, come copertura finale della discarica. La geomembrana scelta per questa copertura è un TPO²⁷ rinforzato con tela in nylon ad alta resistenza. Le considerazioni che hanno portato a questa scelta riguardavano in particolare:

- La resistenza alle degradazione a causa dell'esposizione alla luce diretta del sole;
- La resistenza a carichi e a urti dovuti a camminamenti, grandine, animali, ecc;
- La sicurezza del mantenimento dell'impermeabilità per tutti gli anni di esercizio;
- La possibilità di saldarci i pannelli sopra.

La geomembrana è stata stesa sopra un pacchetto di terreno composto da uno strato di copertura intermedio di 30cm posto sopra i rifiuti, sopra il quale è stato steso uno strato di terreno compattato di bilanciamento finale per avere la superficie liscia per la posa della geomembrana.



Figura 23: fase di incollaggio dei pannelli fotovoltaici sulla geomembrana.
Impianto di Tessman Road (US-TX)



Figura 24: Preparazione del terreno prima di posare la geomembrana. Impianto di Tessman Road (US-TX)

L'impermeabilità è stata completamente affidata alla geomembrana, togliendo completamente tutto il pacchetto composto dalla barriera impermeabile in argilla, gli strati drenanti e il metro di terreno per la vegetazione, il che sarebbe

²⁷ TPO: Poliolefine Termoplastiche

irrealizzabile in Italia in quanto andrebbe contro la normativa vigente. Il TPO è stato poi ancorato al terreno con delle trincee ancoranti di circa 1m di profondità e 1m di larghezza intervallate ogni 20 metri. Le trincee sono state esse stesse ricoperte poi con il TPO in modo da impedire all'acqua di infiltrarsi. Al loro interno sono stati fatti passare anche i cavi di collegamento tra i pannelli e gli inverter di modo da non avere nessun cavo scoperto.

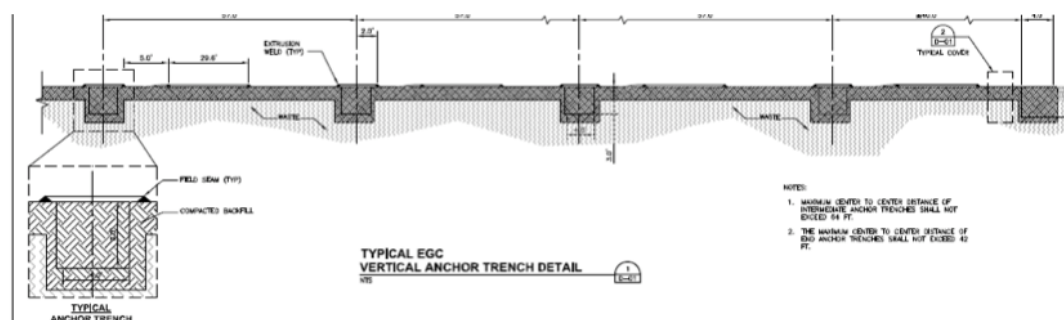


Figura 25: Impianto di Tessman Road (US-TX): sezioni delle trincee di ancoraggio



Figura 26: Impianto di Tessmann Road (US-TX): fase di costruzione delle trincee ancoranti

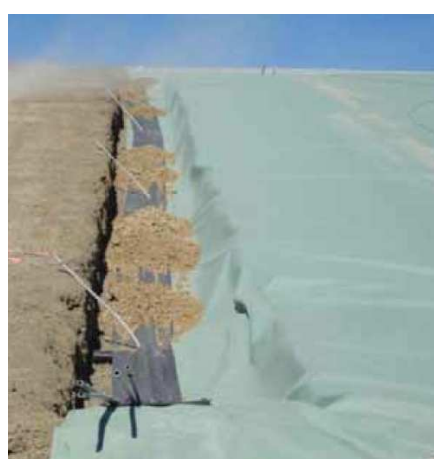


Figura 27: Impianto di Tessmann Road (US-TX): particolare delle condutture per i cavi elettrici



Figura 28: Impianto di Tessman Road (US-TX): particolare sulla copertura delle trincee con geomembrana



Figura 29: Impianto di Tessmann Road (US-TX): particolare delle saldatura attorno ai tubi del biogas



Figura 29bis: Impianto di Tessmann Road (US-TX): impianto ultimato

Il progetto in totale copre una superficie poco superiore ai 2 ettari sopra ai quali sono stati disposti 1.050 pannelli che si prevedeva producessero circa 200 mWh all'anno. Oltre al guadagno dato dalla produzione di energia, grazie al sistema a geomembrana esposta, si è previsto un risparmio di 50.000 \$ che sarebbero stati spesi per la copertura classica.

Questo progetto pilota di Tessman Road è stato poi ripreso, migliorato e ampliato nella realizzazione di Hickory Ridge. Qua sono stati apportati diversi cambiamenti per ovviare ai problemi riscontrati a Tessman Road che riguardavano:

- I pannelli incollati, a causa delle continue deformazioni delle geomembrana, dopo un po' rischiavano di staccarsi. Per questo invece di incollarli, i pannelli sono stati saldati ai bordi garantendo un'alta tenuta
- È stato cambiato il fornitore di geomembrana di modo da averne una che garantisse più resistenza e una miglior integrazione con i pannelli
- È stata cambiata la disposizione dei pannelli addensandoli per ottimizzare l'uso della superficie per la produzione di energia



Figura 29: Impianto di Hickory Ridge (US-GA)

3. Exposed Geomembrane Cover System

Come si è visto nelle realizzazioni nelle discariche di Tessman Road e di Hickory Ridge, esiste una nuova modalità di copertura delle discariche in sostituzione alla copertura tradizionale. La copertura classica si compone, partendo dall'alto, di:

- Uno strato superficiale di copertura vegetale
- Uno strato di protezione
- Uno strato drenante
- Una barriera a bassa permeabilità accoppiata a una geomembrana
- Uno strato di supporto e captazione del biogas.

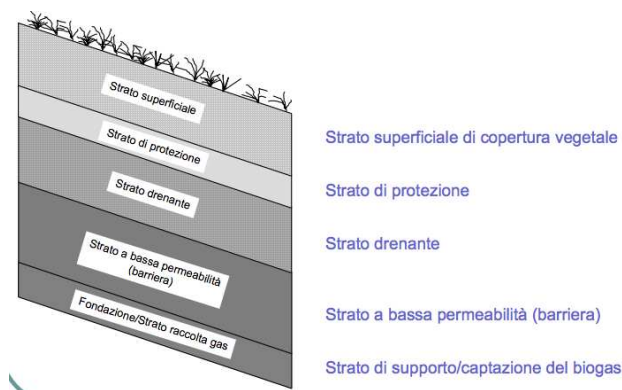


Figura 30: illustrazione del pacchetto di copertura di discarica tradizionale

La diversità sta nell'avere una geomembrana esposta evitando l'aggiunta dello strato drenante, dello strato di protezione e dello strato superficiale di copertura vegetale. Inoltre nelle realizzazioni viste in precedenza, i progettisti hanno demandato l'impermeabilizzazione esclusivamente alle geomembrana, togliendo lo strato argilloso sotto si questa.

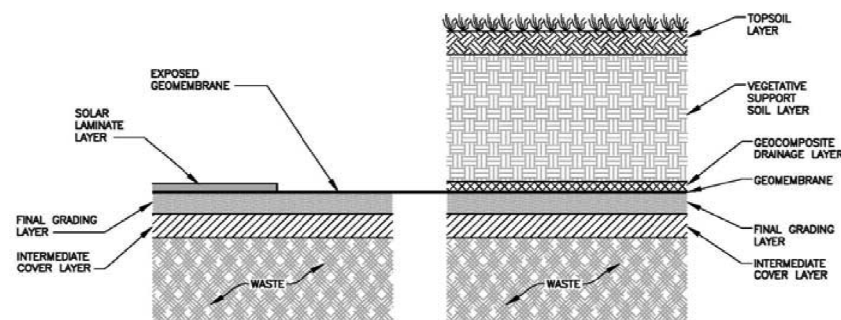


Figura 31: Confronto fra la copertura tradizionale e la realizzazione di Tessman Road (US-TX)

Il pacchetto di copertura usato dai progettisti statunitensi si compone quindi, partendo dall'alto, di:

- La geomembrana esposta;
- Uno strato di materiale di fondazione e per la raccolta del biogas;

- Uno strato opzionale di copertura intermedia, che viene usato per la temporanea chiusura della discarica.

Rispetto a una copertura tradizionale i vantaggi riscontrati dai progettisti americani che per primi hanno realizzato questa copertura riguardano:

- Il costo: infatti, scomparendo tutto il terreno sopra la geomembrana, si contengono i costi di quasi il 50%;
- Si ritiene che la geomembrana assicuri maggior protezione alla copertura in quanto non c'è il rischio che i cedimenti portino a rotture del pacchetto impermeabilizzante classico;
- Non c'è il problema dell'erosione del terreno, né nessun altro problema dovuto all'interazione tra terreni e agenti atmosferici, come ad esempio la perdita di nutrienti nel terreno;
- Non c'è il rischio che il terreno, saturandosi, crei problemi alla tenuta della copertura;
- Spesso le coperture classiche, dopo anni, hanno problemi di tenuta a causa del disturbo che la produzione di biogas ha sull'argilla. Questo rischio non c'è invece nel caso di un EGCS;
- Nelle coperture classiche c'è il rischio che forti tempeste possano erodere il terreno arrivando ad avere la geomembrana esposta che, in assenza del terreno sovrastante che fungeva da zavorra, può avere problemi di stabilità. Con un EGCS il problema non si pone, essendo la geomembrana già progettata per resistere senza alcuna zavorra;
- L'acqua in un EGCS ruscella immediatamente sopra la geomembrana fino alle canalette di raccolta e non ha la possibilità di infiltrarsi o ristagnare. Cosa che succede nelle coperture classiche e che porta un aumento di carico sul pacchetto di tenuta;
- C'è la possibilità a basso costo di aprire la copertura per ispezioni, cosa non fattibile con le coperture classiche;
- Il volume guadagnato dal non mettere il terreno sopra la geomembrana, può essere utilizzato per aumentare la quantità di rifiuti nella discarica se questa non è già chiusa, il che permette un aumento degli introiti;
- È necessaria una manutenzione molto minore e non è necessario lo sfalcio dell'erba.

Il sistema a geomembrana esposta non è comunque una novità in assoluto. Anche se non era mai stata applicata come copertura di una discarica, esistono molteplici realizzazioni passate di successo in altri campi. Ad esempio da anni le geomembrane esposte sono usate nelle dighe e nella copertura tetti. Da queste altre realizzazioni si possono ricavare fondamentali informazioni riguardanti il comportamento delle geomembrane esposte nel tempo, come si vedrà nei capitoli trattati più avanti²⁸.

²⁸ Capitolo 4.2.1

3.1 Sfide di progetto nella realizzazione di un EGCS con pannelli fotovoltaici

Anche nel caso di un EGCS sono valide le considerazioni già affrontate in precedenza riguardanti l'installazione di un qualsiasi impianto fotovoltaico su una copertura di discarica, che si riferiscono in particolare i cedimenti differenziali e all'interazione con la copertura della discarica, ma anche molti altri problemi che non possono essere considerati secondari. Oltre a queste, in questo particolare caso si presentano altre sfide progettuali particolari che verranno affrontate di seguito.

3.1.1 Rispetto della normativa italiana

Come si è visto in precedenza, le uniche realizzazioni di copertura con geomembrana esposta su una discarica sono state sviluppate negli Stati Uniti. In Italia esiste, per ora, solo una realizzazione a Malagrotta (Roma). Questa realizzazione ha poco valore come esempio per future realizzazioni, in quanto copre solo una porzione di un argine laterale della discarica. Inoltre, per rendere la superficie sopra la quale stendere la geomembrana più regolare possibile, è stato steso uno strato di calcestruzzo sopra il terreno. Restano quindi solo le realizzazioni americane come esempi per progettare una copertura simile in Italia. La legislazione americana in tema di discariche differisce però di molto rispetto a quella italiana alla quale bisogna fare riferimento. In questo capitolo si vuole quindi fare un breve riassunto della normativa vigente e delle prescrizioni che essa comporta, di modo da poter evidenziare quali sono gli aspetti dei progetti americani applicabili in Italia e quali aspetti vadano invece modificati o completamente ripensati.

La norma cui si fa riferimento in termini di discariche in Italia è la D.Lgs 36/2003²⁹. Riguardo la copertura superficiale finale, la norma è molto chiara nel definire quali devono essere le caratteristiche di tale copertura. Al capitolo 1.2.3 si legge: «*La copertura superficiale finale della discarica deve rispondere ai seguenti criteri:*

- *isolamento dei rifiuti dall'ambiente esterno;*
- *minimizzazione delle infiltrazioni d'acqua;*
- *riduzione al minimo della necessità di manutenzione;*
- *minimizzazione dei fenomeni di erosione;*
- *resistenza agli assestamenti ed a fenomeni di subsidenza localizzata.*

²⁹ Decreto Legislativo "Attuazione della direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti" pubblicato nella **Gazzetta Ufficiale** n. 59 del 12 marzo 2003

La copertura deve essere realizzata mediante una struttura multistrato costituita, dall'alto verso il basso, almeno dai seguenti strati:

- 1. strato superficiale di copertura con spessore $> 0 = 1$ m che favorisca lo sviluppo delle specie vegetali di copertura ai fini del piano di ripristino ambientale e fornisca una protezione adeguata contro l'erosione e consenta di proteggere le barriere sottostanti dalle escursioni termiche;*
- 2. strato drenante con spessore $> 0 = 0,5$ m in grado di impedire la formazione di un battente idraulico sopra le barriere di cui ai successivi punti 3) e 4);*
- 3. strato minerale superiore compattato di spessore $> 0 = 0,5$ m e di bassa conducibilità idraulica.*
- 4. strato di regolarizzazione per la corretta messa in opera degli elementi superiori e costituito da materiale drenante.».*

Riguardo le discariche di rifiuti pericolosi, la norma aggiunge altre prescrizioni al capitolo 2.4.3 :*«La copertura superficiale finale della discarica deve rispondere ai seguenti criteri:*

- isolamento dei rifiuti dall'ambiente esterno;*
- minimizzazione delle infiltrazioni d'acqua;*
- riduzione al minimo della necessità di manutenzione;*
- minimizzazione dei fenomeni di erosione;*
- resistenza agli assestamenti ed a fenomeni di subsidenza localizzata;*

La copertura deve essere realizzata mediante una struttura multistrato costituita, dall'alto verso il basso, almeno dai seguenti strati:

- 1. strato superficiale di copertura con spessore $> 0 = 1$ m che favorisca lo sviluppo delle specie vegetali di copertura ai fini del piano di ripristino ambientale e fornisca una protezione adeguata contro l'erosione e di proteggere le barriere sottostanti dalle escursioni termiche;*
- 2. strato drenante protetto da eventuali intasamenti con spessore $> 0 = 0,5$ m in grado di impedire la formazione di un battente idraulico sopra le barriere di cui ai successivi punti 3) e 4);*
- 3. strato minerale compattato dello spessore $> 0 = 0,5$ m e di conducibilità idraulica di $> 0 = 10$ m/s o di caratteristiche equivalenti, integrato da un rivestimento impermeabile superficiale per gli impianti di discarica di rifiuti pericolosi;*
- 4. strato di drenaggio del gas e di rottura capillare, protetto da eventuali intasamenti, con spessore $> 0 = 0,5$ m;*
- 5. strato di regolarizzazione con la funzione di permettere la corretta messa in opera degli strati sovrastanti. Poiché la degradazione dei rifiuti biodegradabili, incluse le componenti cellulosiche, comporta la trasformazione in biogas di circa un terzo della massa dei rifiuti, la valutazione degli assestamenti dovrà tenere conto di tali variazioni, soprattutto in funzione alla morfologia della copertura finale. La copertura superficiale finale come sopra descritta deve garantire l'isolamento della discarica*

anche tenendo conto degli assestamenti previsti ed a tal fine non deve essere direttamente collegata al sistema barriera di confinamento. La copertura superficiale finale della discarica nella fase di post esercizio può essere preceduta da una copertura provvisoria, la cui struttura può essere più semplice di quella sopra indicata, finalizzata ad isolare la massa di rifiuti in corso di assestamento. Detta copertura provvisoria deve essere oggetto di continua manutenzione al fine di consentire il regolare deflusso delle acque superficiali e di minimizzarne l'infiltrazione nella discarica. La copertura superficiale finale deve essere realizzata in modo da consentire un carico compatibile con la destinazione d'uso prevista.»

Analizzando le prescrizioni in normativa rispetto alla realizzazione di un EGCS si possono fare alcune osservazioni:

- L'isolamento dei rifiuti dall'ambiente esterno è garantito nella copertura con geomembrana esposta esattamente come nella copertura tradizionale. Infatti lo strato di regolarizzazione e la geomembrana posta sopra, fanno sì che i rifiuti non possano in nessun caso risultare scoperti. A meno di rotture dovute a un'errata progettazione, che però sono possibili anche con la copertura tradizionale, e che, anzi, sono più probabili con la copertura tradizionale, come visto in precedenza nell'analizzare le differenze tra quest'ultima e un EGCS³⁰;
- Le infiltrazioni d'acqua non vengono solo minimizzate ma, teoricamente, completamente annullate. La geomembrana viene progettata per far sì che tutte le precipitazioni ruscellino superficialmente. È necessario ricordare, però, che la geomembrana nel tempo può essere soggetta a forature. La presenza di buchi, per quanto piccoli e rari, può minare la funzione impermeabilizzante della geomembrana;
- La riduzione al minimo della necessità di manutenzione è di nuovo un punto di forza dell'EGCS rispetto alla copertura tradizionale;
- I fenomeni di erosione non hanno alcuna possibilità di svilupparsi sopra la geomembrana;
- La resistenza agli assestamenti e a fenomeni di subsidenza localizzata è garantita dalla flessibilità della geomembrana. Anche in questo caso l'EGCS risulta migliore della copertura tradizionale.
- La norma prescrive la presenza di uno strato superficiale di copertura con spessore ≥ 1 m che favorisca lo sviluppo delle specie vegetali di copertura ai fini del piano di ripristino ambientale. A questo proposito si sottolinea come il ripristino ambientale della discarica sia raggiunto grazie all'installazione dei pannelli solari che danno al sito una nuova

³⁰ Capitolo 3.

destinazione d'uso, riqualificando un sito altrimenti destinato a restare una zona marginale.

- La protezione adeguata contro l'erosione che lo strato vegetale dovrebbe fornire è inutile visto che l'acqua non può erodere nulla scorrendo sopra la geomembrana.
- La presenza di uno strato minerale superiore compattato di spessore $\geq 0,5$ m e di bassa conducibilità idraulica è una prescrizione che è necessario rispettare. Mentre in America, anche a detta degli ingegneri progettisti ³¹, la funzione impermeabilizzante viene demandata esclusivamente alla geomembrana, la normativa italiana prevede che la copertura non possa prescindere dalla presenza di uno strato minerale a bassa conducibilità idraulica, tipicamente argilla. Non si può quindi accettare un pacchetto con la sola presenza di terreno di regolarizzazione e geomembrana. Questa sembra essere una prescrizione corretta considerando che la geomembrana nel tempo è soggetta a forature che, per quanto piccole esse siano, ne minano la funzione impermeabilizzante. Bisogna quindi accoppiare la geomembrana a uno strato d'argilla.
- La protezione delle barriere sottostanti dalle escursioni termiche, demandata secondo la normativa allo strato di terreno vegetale classico, è una funzione quindi necessaria. Sarà quindi necessario prevedere uno strato di terreno sopra la barriera che la protegga del gelo.
- Lo strato drenante con spessore $\geq 0,5$ m in grado di impedire la formazione di un battente idraulico sopra le barriere non risulta necessario. Questo perché l'obiettivo di questo strato è quello di evitare che si formi un battente idraulico sulla classica accoppiata geomembrana-argilla. Questo problema non sussiste in quanto tutta l'acqua ruscella senza possibilità di creare battenti. Si provvederà comunque a stendere un telo in geocomposito drenante/impermeabilizzante sopra la barriera minerale, per evitare che, la pur minima quantità d'acqua che si dovesse infiltrare delle forature della geomembrana, crei un battente idraulico sopra l'argilla.
- Lo strato di regolarizzazione per la corretta messa in opera degli elementi superiori viene utilizzato anche nel caso di un EGCS.

Ancora, il D.Lgs 36/2003, in ambito di gestione post-operativa, nell'articolo 13 dice:

«Nella gestione e dopo la chiusura della discarica devono essere rispettati i tempi, le modalità, i criteri e le prescrizioni stabiliti dall'autorizzazione e dai piani di gestione operativa, post-operativa e di ripristino ambientale di cui all'articolo 8, comma 1, lettere g), h) e l), nonché le norme in materia di gestione dei rifiuti, di scarichi idrici e

³¹ È stato contattato Arthur Mohr Jr.: direttore dell'area "Landfill Solution" della Carlisle Energy Services che ha progettato la discarica di Hickory Ridge. In una mail allo scrivente, egli esprime esplicitamente: « The geomembrane provides the impermeability. »

tutela delle acque, di emissioni in atmosfera, di rumore, di igiene e salubrità degli ambienti di lavoro, di sicurezza, e prevenzione incendi; deve, inoltre, essere assicurata la manutenzione ordinaria e straordinaria di tutte le opere funzionali ed impiantistiche della discarica.

La manutenzione, la sorveglianza e i controlli della discarica devono essere assicurati anche nella fase della gestione successiva alla chiusura, fino a che l'Ente territoriale competente accerti che la discarica non comporta rischi per la salute e l'ambiente. In particolare, devono essere garantiti i controlli e le analisi del biogas, del percolato e delle acque di falda che possano essere interessate.

I rifiuti pericolosi devono essere depositati in appositi settori, celle o trincee della discarica, individuati con apposita segnaletica dalla quale devono risultare i tipi e le caratteristiche di pericolo dei rifiuti smaltiti in ciascuno dei citati settori, celle, o trincee.»

Da quanto finora emerso dal D.Lgs. 36/2003, non compare un'indicazione della durata del periodo di gestione post-operativa. Il riferimento a un periodo effettivamente quantificato si ha all'art.8 "Domanda di autorizzazione", laddove, in riferimento ai documenti progettuali, si dice:

«m) il piano finanziario che preveda che tutti i costi derivanti dalla realizzazione dell'impianto e dall'esercizio della discarica, i costi connessi alla costituzione della garanzia finanziaria, di cui all'articolo 14, i costi stimati di chiusura, nonché quelli di gestione post-operativa per un periodo di almeno trenta anni, siano coperti dal prezzo applicato dal Gestore per lo smaltimento, tenuto conto della riduzione del rischio ambientale e dei costi di post-chiusura derivanti dalla adozione di procedure di registrazione ai sensi del regolamento (CE) n. 761/2001 del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 19 marzo 2001;...»

Anche in una precedente Deliberazione Regione Veneto del 15.2.2000 relativa al Piano Regionale per la gestione dei rifiuti urbani, a proposito di gestione post-chiusura, si dice:

*«Articolo 13 – Gestione degli impianti successivamente alla loro chiusura o dismissione
2. La gestione ad avvenuto esaurimento delle discariche per rifiuti urbani deve essere garantita, ai sensi della direttiva 1999/31/CE del 26 aprile 1999, per un periodo di almeno trenta anni.»*

Riguardo alle prescrizioni di durata della gestione post-operativa bisognerà porre attenzione nella scelta della geomembrana di modo da poter garantire una corretta operatività della stessa per il periodo prescritto per legge.

Riguardo poi la manutenzione, un sistema EGCS permette una manutenzione ben più semplice rispetto a un classico sistema di copertura. Infine riguardo al rapporto con i sistemi di raccolta di biogas e percolato, questi risultano perfettamente compatibili e integrabili con il sistema a geomembrana esposta.

Ecco quindi che, con i dovuti accorgimenti, una copertura di discarica con geomembrana esposta può essere progettata in modo da risultare “equivalente” a quella prevista dalla normativa italiana.

3.1.2 Invarianza idraulica

Un aspetto particolare che assume un ruolo fondamentale nella realizzazione di un EGCS è il rispetto dell’invarianza idraulica. Per valutarne la correttezza, viene redatta la valutazione di compatibilità idraulica, la quale è necessaria ogniqualvolta si progettano opere che modifichino la destinazione d'uso del suolo o che comportino variazioni all'idraulica del territorio. Questi interventi, anche se realizzati su aree di estensione ridotta, possono comportare un aggravio sulle potenzialità di drenaggio delle reti esistenti, al punto da creare criticità idrauliche dove prima non ve ne erano. Come indicato in normativa³², al fine di consentire una più efficace prevenzione dei dissesti idrogeologici, ogni nuovo strumento urbanistico dovrebbe contenere una valutazione, o studio, di compatibilità idraulica che valuti, per le nuove previsioni urbanistiche, le interferenze che queste hanno con i dissesti idraulici presenti e le possibili alterazioni del regime idraulico che possono causare. Questo perché, ogni trasformazione antropica del suolo, come ad esempio la realizzazione di una copertura con pannelli fotovoltaici e geomembrana esposta, ha come effetto la regolarizzazione e impermeabilizzazione del suolo, il che causa un ovvio incremento del coefficiente di deflusso e conseguentemente del coefficiente udometrico³³. Sostanzialmente, impermeabilizzando e regolarizzando il terreno, la modifica attuata va a incidere sia sulla massima portata di piena, essendo maggiore la frazione d'acqua che ruscella, sia sulla riduzione del tempo di esaurimento dei deflussi, dovuta alla regolarizzazione dei percorsi di deflusso.

La progressiva impermeabilizzazione dei suoli rappresenta dunque, in molti contesti, una minaccia per la sicurezza idraulica del territorio e, per questo, si è resa necessaria una regolamentazione dell'uso e della modifica del territorio che tenesse conto di tali aspetti. Per rispondere a questa esigenza, la normativa ha previsto che l'approvazione di un nuovo strumento urbanistico sia subordinata al parere della competente autorità idraulica su un apposito Studio di Compatibilità Idraulica. Successivamente la normativa ha introdotto anche il concetto di “Invarianza idraulica” definito come segue: *“Per trasformazione del territorio ad invarianza idraulica si intende la trasformazione di un'area che non provochi un aggravio della portata di piena del corpo idrico ricevente i deflussi superficiali originati dall'area stessa.”*

³² La normativa viene esposta nei dettagli nel capitolo 4.3.1

³³ Con coefficiente udometrico si intende la portata drenata per unità di superficie

Si intende quindi che ogni piano di modifica del territorio dovrà contenere interventi atti a mantenere invariato il contributo specifico dell'area interessata rispetto alla situazione antecedente.

3.1.3 Sollevamento da vento

È noto il problema, nel caso di geomembrane esposte, riguardante il sollevamento da vento. Generalmente tale sollevamento non crea danni alla membrana, ma in alcuni casi la stessa può essere lacerata o venire strappata via dagli ancoraggi. Inoltre la geomembrana, dopo essere stata sollevata, spesso non si riappoggia al terreno disponendosi nello stesso stato in cui era prima del sollevamento. In conseguenza di ciò, essa risulta, dopo il sollevamento, increspata in alcune zone e sotto tensione in altre. Per questi motivi si cerca di evitare, o almeno ridurre, il sollevamento da vento. È necessario quindi uno studio di tale problema.

Il sollevamento della geomembrana può essere prevenuto ponendo uno strato di materiale zavorrante sopra la stessa, o anche un carico d'acqua può svolgere la stessa funzione. Nel caso in esame però, queste soluzioni sono impraticabili, in quanto sopra la geomembrana andranno disposti i moduli fotovoltaici che non rispondono ai criteri richiesti. Anche la possibilità di zavorrare con sacchi di sabbia viene esclusa in quanto studi precedenti³⁴ ne dimostrano la scarsa affidabilità. Altro fattore che può essere considerato è la scelta della geomembrana; è dimostrato che il peso della stessa influisce sul sollevamento nei casi di vento a bassa velocità. Quando però il vento assume velocità più rilevanti, il peso della geomembrana influisce molto meno sul sollevamento. Ecco quindi che la scelta della geomembrana, per quanto rilevante, non risulta determinante riguardo la protezione dal sollevamento. Andrà dunque progettata una corretta configurazione degli ancoraggi di modo da assicurare, oltre alla tenuta degli stessi, anche un ridotto sollevamento della geomembrana in caso di vento.



Figura 32: Esempio di sollevamento di geomembrana a causa del vento

³⁴ Riferimento all'articolo "case history of exposed geomembrane cover for bioreactor landfill" di R. Thiel, S. Purdy and R. Yazdani

3.1.4 Ancoraggio della geomembrana

La progettazione degli ancoraggi gioca un ruolo di primaria importanza nello sviluppo di un sistema a geomembrana esposta. Oltre ad impedire lo sfilamento della geomembrana, essi dovranno essere disposti in modo da evitare un eccessivo sollevamento della geomembrana a causa del vento. Bisognerà quindi porre attenzione non solo a progettarli, ma anche a disporli correttamente. Esistono molti tipi di ancoraggi e molti diversi modi per progettarli, ma la metodologia che più si adatta in questo caso è la predisposizione di trincee di ancoraggio. Questo perché le trincee potranno poi essere coperte esse stesse da uno strato di geomembrana di modo da garantire anche sopra di esse l'impermeabilità³⁵. Inoltre le trincee sono poi utilizzabili per il passaggio dei cavi dell'impianto fotovoltaico³⁶ e, essendo interrate, sono a livello col terreno, dando la possibilità di creare un piano continuo dove l'acqua possa scorrere senza vie preferenziali.

3.1.5 Protezione dal gelo

Il congelamento del suolo e, ancor più, i cicli di gelo e disgelo, possono produrre radicali modifiche nelle caratteristiche di taluni terreni. In particolare, le argille risentono dell'espansione di volume d'acqua, una volta trasformata in ghiaccio, contenuta nei pori: ciò accade nel caso l'acqua non riesca ad estrudere liberamente verso l'esterno in fase di congelamento. Con il gelo possono verificarsi notevoli aumenti della conducibilità idraulica, da 2 a 6 volte quella prima del congelamento, causata dalla dilatazione dei pori. I cicli alternati, invece, generano "affaticamento" del materiale, con maggior depauperamento delle caratteristiche geotecniche: pochi cicli di gelo-disgelo possono produrre un considerevole aumento della conducibilità idraulica dell'argilla compattata, come si evince dal seguente grafico, riferito ad una serie di prove effettuate su campioni d'argilla di vari siti:

³⁵ Si veda la Figura 28

³⁶ Si veda la Figura 27

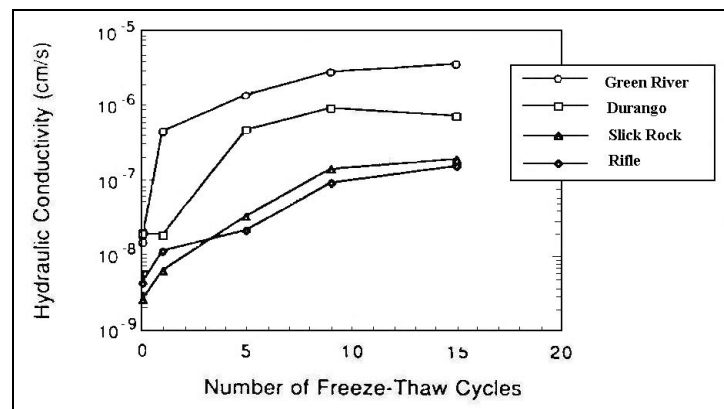


Figura 33: aumento della conducibilità idraulica di un argilla, dovuto a cicli di gelo-disgelo

Per evitare ciò, è necessario che le onde termiche, giornaliera e annuale, si attenuino nell'ambito dello strato vegetale, affinché non si manifestino temperature al di sotto dello 0°C negli strati sottostanti. Bisognerà quindi prevedere uno strato di terreno sovrastante la barriera impermeabile d'argilla che permetta di impedire che questa raggiunga temperature che ne compromettano la funzione impermeabilizzante.

3.1.6 Altre considerazioni

Particolare attenzione andrà posta anche sul metodo di saldatura dei fogli di geomembrana tra loro, in quanto, oltre a garantire l'impermeabilità, dovranno resistere alle tensioni indotte dal sollevamento da vento e dagli agenti esterni. Anche a questo riguardo esistono vari modi per saldare le geomembrane per l'analisi dei quali si rimanda a più completi libri di geotecnica.

Altre considerazioni da fare nello sviluppo di un EGCS riguardano:

- La riduzione al minimo della presenza di tubi che buchino la geomembrana, per questo i cavi dei pannelli andranno fatti passare dentro la trincea ancorante. Nei casi in cui non si possa evitare la penetrazione dei tubi, bisognerà saldare la geomembrana di modo da evitare l'infiltrazione dell'acqua, come avviene ad esempio nei punti di emersione dell'impianto di raccolta del biogas e del percolato. In questi casi, vengono prefabbricati dei raccordi con i tubi, ai quali viene incollata la geomembrana. La stessa andrà poi saldata con la membrana di copertura in situ³⁷.
- Porre particolare attenzione a non lasciare lembi di geomembrana liberi vicino alle saldature in quanto attirano gli uccelli che beccandoli possono portare alla rottura della geomembrana stessa.

³⁷ Si veda la Figura 29

3.2 EGCS con erba sintetica

Una particolare soluzione sviluppata con geomembrana esposta prevede di coprire la stessa con uno strato fine di erba sintetica. Questo apporta notevoli vantaggi, mantenendo comunque tutte le caratteristiche dell'EGCS come l'alta capacità di drenaggio delle acque e l'adattamento ai cedimenti.

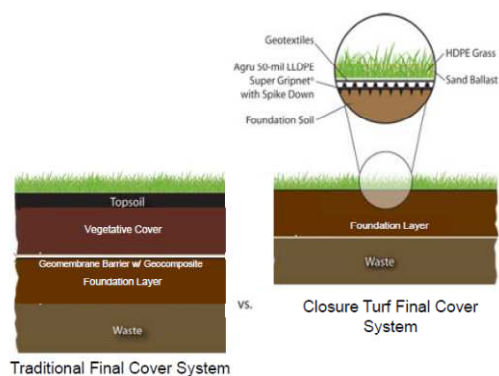


Figura 34: confronto fra pacchetto di copertura tradizionale e pacchetto di copertura con geomembrana coperta da un manto di erba sintetica

Infatti l'erba sintetica permette di:

- Migliorare il fattore estetico dell'installazione
- Migliorare l'accesso e la pedonabilità
- Diminuire gli ancoraggi, visto che svolge una funzione di zavorra
- Proteggere la geomembrana dai raggi UV
- Proteggere la geomembrana dagli impatti fisici
- Diminuire l'effetto di sollevamento del vento grazie alla creazione di flussi non laminari vicino alla superficie grazie alle irregolarità dell'erba

La copertura, denominata "ibrida" è perfettamente compatibile con l'installazione di moduli fotovoltaici, come illustrato in figura ed è stata progettata e realizzata nella discarica di Crazy Horse in California³⁸



Figura 35: copertura di discarica con erba sintetica.
Discarica di Crazy Horse (US-CA)



Figura 36: copertura di discarica con erba sintetica e pannelli solari.
Impianto nella discarica di Crazy Horse (US-CA)

³⁸ I risultati dell'applicazione sono stati presentati al "40th Annual SWANA Western Regional Symposium", nel maggio 2011

4. Progetto per la discarica di Pontesello

Visti i problemi economici nella prosecuzione della gestione post-operativa della discarica di Pontesello analizzati precedentemente³⁹, è stata progettata una soluzione con l'installazione di un impianto fotovoltaico sulla copertura della discarica. Si vogliono così risolvere le problematiche economiche riscontrate dai gestori della discarica, permettendo loro, tramite la produzione di energia, di ricevere introiti da poter utilizzare nella continuazione della post-gestione. Dopo aver analizzato le diverse possibilità e aver relazionato ognuna con le caratteristiche del sito, si è scelto di realizzare un sistema di copertura con geomembrana esposta e con un impianto a pannelli fotovoltaici flessibili a film sottile.

I capitoli seguenti illustreranno le scelte fatte e le progettazioni eseguite per la realizzazione di tale soluzione.

4.1 Pacchetto di copertura

Viste le prescrizioni di legge riguardo le coperture delle discariche esposte precedentemente⁴⁰, si è progettato un particolare pacchetto per la copertura della discarica diverso sia dal pacchetto classico sia da quello usato nelle realizzazioni statunitensi. In particolare si è posta l'attenzione sulla necessità di avere uno strato di terreno impermeabile da accoppiare alla geomembrana come protezione per le infiltrazioni. Questo strato, che risulta assente nelle realizzazioni statunitensi, dovrà essere poi protetto dal gelo per poter mantenere integre le sue caratteristiche di impermeabilità. Bisogna quindi progettare un pacchetto di copertura ad hoc che preveda, sotto la geomembrana esposta, uno strato di terreno a protezione del gelo e uno strato di materiale impermeabile. Tra questi due strati bisogna prevedere anche la presenza di un geocomposito drenante per evitare di avere battenti idraulici sullo strato di argilla.

Si ricorda comunque come la discarica di Pontesello sia stata da poco collaudata. Nel collaudo è stata riscontrata la presenza di un'adeguata barriera d'argilla in ogni punto della copertura. In questo particolare caso quindi, questa non dovrà essere rifatta, bensì solo protetta dal gelo in quei punti in cui si sia evidenziata l'assenza di uno spessore di terreno adeguato a tale scopo. Dal collaudo si legge anche come non sia chiara la situazione del sistema di drenaggio. Ci si dovrà quindi assicurare, in fase di progettazione, della presenza di un adeguato drenaggio e, in caso contrario,

³⁹ Capitolo 1.3

⁴⁰ Capitolo 3.1.1

prevedere la sua installazione tramite la posa del geocomposito drenante sopra lo strato d'argilla nei punti in cui quello esistente non sia adeguato.

4.1.1 Protezione dal gelo

Nel presente paragrafo è stato analizzato il fenomeno della penetrazione dell'onda termica annuale nella copertura, utilizzando uno studio condotto nel sito di Lonigo⁴¹ (VI), del tutto simile, come condizioni climatiche, a quello di Montecchio Maggiore (VI).

La relazione che regola la trasmissione di un'onda termica in regime monodimensionale, all'interno di uno strato limitato dalla superficie $x = 0$ e infinitamente esteso nel verso delle x positive, è l'equazione di Fourier:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (1)$$

con la condizione ai limiti:

$$t_s = t_0 + A \sin \omega \tau \quad \text{per } x = 0 \quad (2)$$

Nella (2) A rappresenta l'ampiezza della variazione superficiale di temperatura e

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau_0} = 2\pi f \quad (3)$$

rappresenta la pulsazione, essendo τ_0 il periodo e f la frequenza di oscillazione.

L'integrazione di tale equazione porta alla seguente equazione:

$$t = t_0 + A e^{-\gamma x} \sin (\omega \tau - \gamma x) \quad (4)$$

Il termine

$$\gamma = \sqrt{\omega / 2a} = \sqrt{\pi / a \tau_0} \quad (m^{-1}) \quad (5)$$

è denominato costante di smorzamento, mentre il fattore $e^{-\gamma x}$ è definito fattore di smorzamento, dove con a (m^2 / h) è rappresentata la diffusività termica. La suddetta

⁴¹“Sull'analisi di stabilità globale e sul comportamento ai cicli di gelo-disgelo del sistema di copertura della discarica di RSU di Lonigo (VI)” Laureando Luca Pigaiani. 2002; Relatore Prof. Marco Favaretti; Correlatore: Ing. Stefano Busana

equazione indica che la variazione di temperatura all'interno dello strato di terreno è ancora di tipo sinusoidale, ma con ampiezza ridotta rispetto alla variazione superficiale, nel rapporto $e^{-\gamma x}$ e con uno sfasamento dato da γx radianti e $\gamma x / \omega$ unità di tempo, come riportato nel seguente grafico.

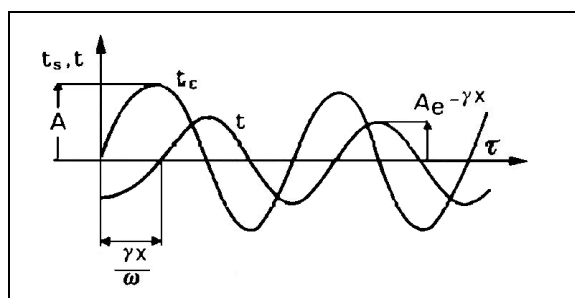


Figura 37: confronto fra la variazione di temperatura in superficie e la variazione di temperatura smorzata all'interno dello strato di terreno

La riduzione di ampiezza e lo sfasamento, a parità di diffusività termica, sono tanto maggiori quanto maggiore è la distanza x e quanto maggiore è la frequenza della pulsazione. Una variazione periodica, che non sia di tipo sinusoidale puro, ma sia sviluppabile in serie di Fourier, si trasmette parimenti deformata all'interno dello strato. La relazione analitica che governa l'abbattimento dell'ampiezza dell'onda termica in funzione della profondità, è rappresentata nel seguente grafico.

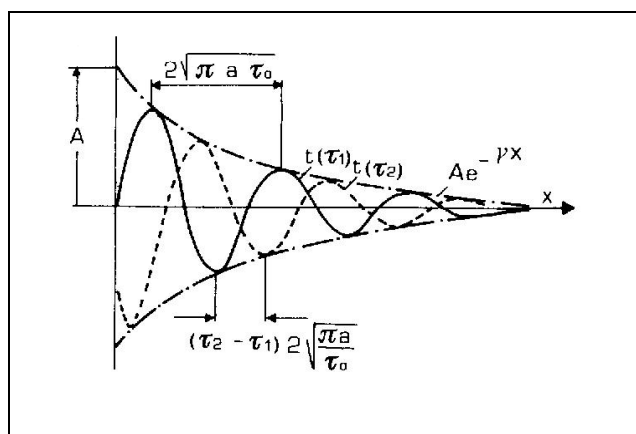


Figura 38: rappresentazione dell'abbattimento dell'ampiezza d'onda termica in funzione della profondità (x)

Dalle suddette considerazioni si può giungere ad una prima conclusione: l'onda termica di alta frequenza, ovvero giornaliera, riduce la sua ampiezza dopo l'attraversamento di uno spessore assai limitato, dell'ordine di qualche centimetro; l'onda termica a bassa frequenza, ovvero annuale, invece, fa sentire i suoi effetti entro spessori molto maggiori.

Per quantificare tali ultimi spessori, è necessario valutare le variazioni di temperatura superficiali. Tali dati per il sito di Lonigo sono sotto quest'aspetto del tutto simili a quelli relativi a Montecchio Maggiore, dove è situata la discarica di Pontesello e sono riferiti al periodo di osservazione 1968 – 1994.

Sono stati elaborati i valori minimi e massimi giornalieri della temperatura, unitamente alla temperatura media del mese e dell'anno cui si riferiscono le osservazioni e le corrispondenti medie del periodo. In tal guisa è stata ricostruita la sinusoide rappresentativa di ogni anno del periodo di osservazione. Il successivo grafico mostra la ricostruzione della sinusoide di calcolo per un singolo anno.

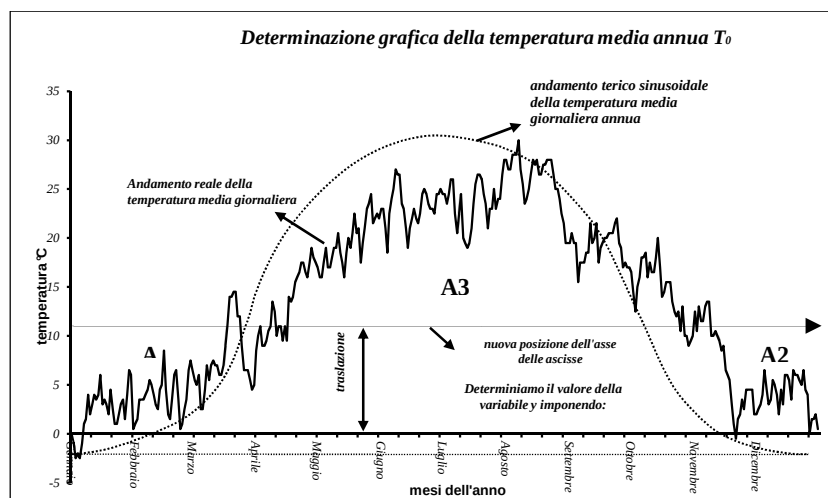


Figura 39: Ricostruzione della sinusoide delle variazioni di temperatura superficiali annuali

Una volta determinata l'ampiezza dell'onda, imponendo la diffusività tipica di un terreno vegetale fine, è stata determinata la riduzione dell'ampiezza dell'onda termica in funzione della profondità di penetrazione dell'onda stessa, per tutti gli anni del periodo.

Ciò è riassunto nel seguente grafico.

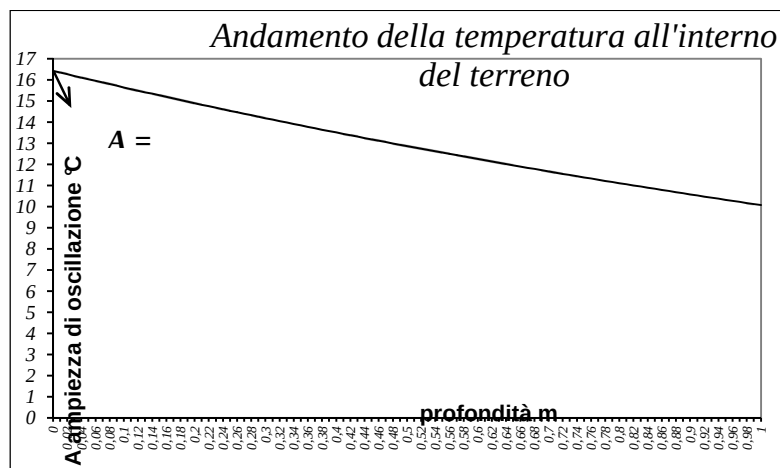


Figura 40: riduzione dell'ampiezza d'onda termica in funzione della profondità

La massima profondità di penetrazione dell'effetto del gelo nel terreno in oggetto, avvenuta nel 1985, ha interessato uno spessore di 59,53 cm.

Bisognerà quindi assicurare uno strato di terreno di almeno 60 cm che protegga l'argilla dal gelo. Tale strato sarà posto direttamente sotto la geomembrana e non dovrà avere particolari caratteristiche di impermeabilità. Si potrà usare ad esempio un terreno limoso a basso costo, visto che il suo unico scopo è la protezione dell'argilla dal gelo.

4.1.2 Geocomposito drenante

Sotto lo strato di terreno, nei punti in cui non sia già presente e collaudato uno strato drenante funzionante, andrà disposto un geocomposito drenante per evacuare le eventuali infiltrazioni che si potrebbero verificare in caso di foratura della geomembrana. In questo caso si è deciso di usare un prodotto di qualità di cui si ha esperienza positiva di utilizzo. È stato quindi scelto il Pozidrain, prodotto dalla ABG Geosynthetics Ltd⁴².

Questo è un geocomposito drenante/impermeabilizzante costituito da un'anima cuspidata flessibile in polietilene ad elevata resistenza alla compressione con

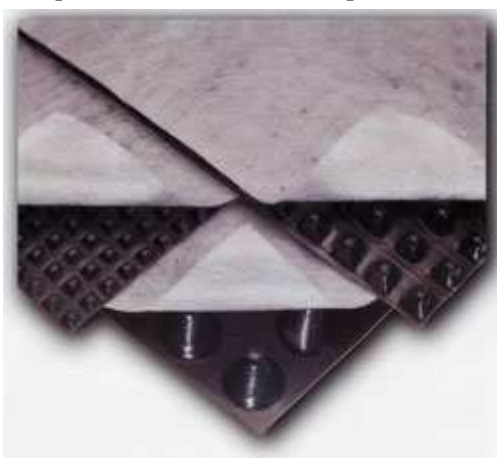


Figura 41: Illustrazione del geocomposito drenante impermeabilizzante Pozidrain

funzione drenante e impermeabilizzante, accoppiata ad un geotessile non tessuto, posto sulla cima delle cuspidi, con funzione filtrante. Il geotessile in polipropilene viene legato saldamente all'anima e, oltre ad avere ottime proprietà filtranti, possiede buone caratteristiche meccaniche. In questo modo viene limitato l'effetto di compenetrazione del geotessile nel nucleo a causa della pressione del terreno, evitando così la diminuzione della

capacità drenante del geocomposito. Il geotessile permette il passaggio dell'acqua nell'anima trattenendo, al tempo stesso, il terreno di riempimento. L'acqua che viene raccolta è trasportata attraverso l'anima verso un tubo collettore di scarico. L'anima cuspidata su un unico lato, realizzata in HDPE, conferisce al materiale elevate prestazioni drenanti in ogni direzione; lo spazio tra le cuspidi è stato studiato in modo da fornire un eccellente supporto al geotessile filtrante. La resistenza alla compressione ed alla deformazione per "creep" dell'anima sottoposta ad uno sforzo

⁴² <http://www.abg-geosynthetics.com/>

di compressione permanente, garantiscono la continuità della capacità drenante a lungo termine del geocomposito. L'anima, inoltre, costituisce un'ulteriore barriera all'acqua rafforzando l'azione impermeabilizzante della membrana, in quanto l'acqua che supera la geomembrana viene captata e smaltita dal geocomposito.

4.2 Scelta della geomembrana

Parte importante dello sviluppo del progetto in esame riguarda la scelta della geomembrana. Risulta evidente come la geomembrana giochi un ruolo fondamentale, se non il principale, per la buona riuscita del progetto. È necessario quindi fare uno studio approfondito delle geomembrane in commercio per confrontarne le caratteristiche e scegliere quella più idonea. Tale scelta sarà di importanza vitale per tutto il lavoro e andrà fatta preliminarmente alle progettazioni. Infatti, a seconda della geomembrana selezionata varieranno le caratteristiche meccaniche, chimiche, i costi e la compatibilità con i pannelli fotovoltaici. Il seguente capitolo servirà per dare brevemente una visione d'insieme delle possibilità che offre il mercato.

Le caratteristiche principali sulla base delle quali è possibile fare un confronto fra le diverse geomembrane sono:

- **Resistenza a trazione e flessibilità:** una geomembrana usata per una copertura EGCS deve avere una resistenza a trazione tale da resistere ai carichi imposti dal sollevamento da vento. Per questo motivo si è portati a optare per una geomembrana rinforzata, come ad esempio LDPE, ovvero geomembrane rinforzate con un tessuto interno di polietilene ad alta densità che costituisce l'armatura interna sulla quale è laminato, a caldo su entrambi i lati, un doppio strato di polietilene a bassa densità, stabilizzato ai raggi UV. La strutturazione aumenta la resistenza alla trazione e perforazione senza compromettere la flessibilità. In alternativa si può valutare la scelta di una membrana non rinforzata con ancoraggi addizionali. Riguardo agli ancoraggi, se ne possono pensare di vari tipi, ma l'unica scelta efficace è la costruzione di una serie di trincee ancoranti parallele e trasversali al pendio. Il costo della costruzione di queste trincee aggiuntive andrà comparato col risparmio dato dall'uso di una geomembrana non rinforzata per effettuare la scelta migliore.
- **Resistenza allo strappo,** la quale è molto importante nel caso di EGCS. Bisogna comparare non solo la resistenza allo strappo, ma anche la sua tenuta alla propagazione dello stesso.
- **Resistenza nell'esposizione ai raggi UV, temperature estreme, vento e agenti chimici:** è molto importante che le caratteristiche meccaniche, fisiche e chimiche della geomembrana non si modifichino a causa

dell'esposizione ai raggi UV, al calore o al ghiaccio e al vento. Ad esempio geomembrane con plasticizzanti che possono decadere nel corso del tempo sono inaccettabili. È necessario conoscere il comportamento delle membrane per lunghi periodi di esposizione al sole e a cicli di gelo-disgelo per almeno 20 anni. Spesso i produttori danno garanzie ventennali, ma sarebbe meglio possedere dati e misurazioni su applicazioni precedenti e test di lunga durata. Particolare attenzione va poi data alle temperature estreme. Come illustrato nel capitolo riguardante il sollevamento da vento, la temperatura ha un impatto considerevole nella deformabilità della geomembrana.

- Coefficiente di espansione termica: questo coefficiente indica quanto la geomembrana tende a dilatarsi o ritirarsi in caso rispettivamente di un aumento o di una diminuzione di temperatura. Espansioni e contrazioni della geomembrana in lunghi periodi di tempo, possono portare a uno scivolamento della stessa. Ciò causa un aumento di tensione negli ancoraggi. Un coefficiente di espansione termica basso dà un potenziale minore di stress alla copertura ed è quindi una caratteristica richiesta per l'applicazione della geomembrana.
- Angolo d'attrito: un maggior angolo d'attrito nell'interfaccia tra geomembrana e terreno riduce le tensioni cui sono sottoposti gli ancoraggi e riduce il rischio di scivolamento.
- Riparabilità: è importante che la geomembrana, che dopo anni di servizio probabilmente potrà subire qualche danno, sia facilmente riparabile. Questo esclude quelle geomembrane non compatibili con saldature che ne permettano la riparazione dopo la stesa. Ciò risulta importante anche in caso di necessità di ispezioni.
- Resistenza a stress multi assiale: in caso si prevedano importanti cedimenti differenziali in discarica, come nei casi di discariche appena chiuse, è consigliabile l'uso di geomembrane non rinforzate. Queste sono più flessibili e si adattano meglio ai cedimenti. Ciò può risultare determinante anche se la discarica si trova in zona sismica.
- Resistenza a impatti fisici e a perforazione: la geomembrana deve resistere agli stress connessi all'installazione, ai carichi dovuti a possibili camminamenti, ai possibili detriti presenti nell'aria, ai possibili danni da grandine o altri eventi atmosferici. Un problema importante è anche quello dei gabbiani, contro i quali bisogna usare particolare precauzioni. Oltre a scegliere una geomembrana con elevata resistenza alla perforazione, bisognerà evitare che nel montaggio della stessa vengano lasciati lembi scoperti, i quali si è visto attraggono molto i gabbiani.

- Densità e quindi di conseguenza il peso: questa caratteristica diventa determinante nella progettazione degli ancoraggi e va perciò a incidere anche nel costo dell'intero progetto.
- Compatibilità con una chiusura a lungo termine: la durata della vita utile di una geomembrana varia significativamente in base alle sue condizioni di esposizione. Chiaramente tale durata per geomembrane esposte si prevede sia minore rispetto al caso geomembrane sepolte. Varia però molto anche a seconda del tipo di geomembrana. Un capitolo a parte sarà sviluppato riguardo questo argomento⁴³.
- Costo: ovviamente il costo influenza in maniera rilevante la scelta della geomembrana.
- Colore: è spesso molto importante impattare il meno possibile dal punto di vista ambientale e paesaggistico e dare un appeal estetico al lavoro. Inoltre una geomembrana dal colore chiaro riduce l'onda termica indotta su di essa dall'esposizione al sole, il che riduce l'espansione termica e porta notevoli vantaggi. D'altro canto però un colore più chiaro fa sì che la geomembrana abbia meno resistenza ai raggi UV.
- Performance dimostrate in applicazioni precedenti: come detto precedentemente, avere a disposizione dati di applicazioni già sviluppate da maggior sicurezza sulle performance della geomembrana.

Per prima cosa è necessario fare una selezione delle numerose tipologie di geomembrane disponibili, per poi, una volta scelta la tecnologia da usare, cercare nel mercato l'azienda che offre il prodotto migliore.

Geomembrane in polietilene lineare a bassa densità⁴⁴ e in polietilene ad alta densità⁴⁵ vengono spesso utilizzate in applicazioni esposte, come ad esempio rivestimenti di canali o di stagni. Le geomembrane in LDPE sono molto flessibili, con un allungamento prima della rottura maggiore dell'HDPE e, inoltre, maggiore capacità di mantenere integrità in caso di cedimenti differenziali localizzati senza rompersi o lacerarsi o bucarsi. D'altro canto l'HDPE ha una resistenza chimica e ai raggi UV eccellente, anche se ha minore resistenza alla foratura e minore elasticità dell'LDPE. L'HDPE ha inoltre una densità e, quindi, un peso maggiore. L'LDPE è meno resistente a ossidazione e gli antiossidanti al suo interno si consumano prima rispetto all'HDPE. Però studi dimostrano che, dopo l'esaurimento degli anti ossidanti, l'LDPE invecchia più lentamente. Test di invecchiamento in laboratorio indicano che la vita di servizio utile di una geomembrana in HDPE spessa 1,5mm e di una in LDPE spessa 1mm, esposte a condizioni climatiche come in Texas, va oltre i 28 anni. L'HDPE ha un punto di snervamento nella curva tensione/deformazione al 12 % di deformazione, sopra il quale possono verificarsi continue deformazioni

⁴³ Capitolo 4.2.1

⁴⁴ Ci si riferirà a queste geomembrane con la sigla LDPE

⁴⁵ Ci si riferirà a queste geomembrane con la sigla HDPE

senza variazioni di carico. L'LDPE ha un punto di snervamento molto più distante, al 40%. Né l'LPDE né l'HDPE sono soggette, tranne in rari casi rotture fragili in condizioni di tensione minori di quelle di snervamento.

Altra geomembrana usata in altri casi è il polipropilene rinforzato⁴⁶ che viene stato preferito all'HDPE perché possiede:

- Un'ottima resistenza all'esposizione a UV e a temperature estreme, come d'altronde anche l'HDPE;
- Eccellente resistenza a impatti fisici, meglio dell'HDPE,
- Buona resistenza a strisciamenti, meglio dell'HDPE,
- Eccellente resistenza a danni da sollevamento del vento
- Ottima riparabilità, meglio dell'HDPE.

Punti di vantaggio per l'HDPE derivano invece dall'enorme esperienza nell'uso di questa membrana e dai numerosi casi di studio, inoltre ha una struttura superficiale che permette il camminamento e costa meno.

Il polipropilene flessibile rinforzato con una tela in poliestere⁴⁷ è stato usato anche in una discarica in Delaware. Le considerazioni che hanno portato a tale scelta possono essere riprese per un qualsiasi caso di EGCS e danno un'ottima visione di insieme sulle scelte che si possono effettuare. È stato scelto l'FPP-R per la sua resistenza ai raggi UV, per l'alta resistenza alla tensione e per la sua capacità a resistere a grandi cambiamenti di temperatura senza incorrere in danneggiamenti o eccessive deformazioni. Inizialmente erano state considerate anche altre geomembrane possibili: PVC, HDPE, polietilene clorosolfato rinforzato, come CSPE-R o Hypalon, e una lega di etilene rinforzato interpolimero⁴⁸. Il PVC è stato escluso in quanto resiste poco ai raggi UV, a tensione e al perforamento. L'HDPE, come già detto precedentemente, ha un'ottima resistenza ai raggi UV ma, oltre a avere gli stessi altri problemi del PVC, ha un alto coefficiente di espansione e contrazione termica. FPP-R ha la resistenza e la bassa elasticità adatta per resistere al sollevamento del vento, allo strisciamento dovuto alla pendenza e alla perforazione. La grande resistenza a trazione permette di mantenere grandi distanze tra gli ancoraggi e quindi notevoli risparmi. Anche l'EIA-R è stata considerata come una valida alternativa.

Oltre a FPP, HDPE, EIA, un altro tipo di geomembrana che si può usare come EGCS è la geomembrana bituminosa prefabbricata⁴⁹. I PBGM sono stati usati per molti anni per impermeabilizzare le dighe, nelle miniere, per autostrade, ferrovie ecc. I PBGM

⁴⁶ Ci si riferirà a queste geomembrane con la sigla FPP

⁴⁷ Ci si riferirà a queste geomembrane con la sigla FPP-R

⁴⁸ Ci si riferirà a queste geomembrane con la sigla EIA-R

⁴⁹ Ci si riferirà a queste geomembrane con la sigla PBGM

sono essenzialmente materiali multistrato appositamente progettati che consistono in: una pellicola di poliestere, uno strato di bitume impregnato di fibre di vetro rinforzanti, uno strato di bitume impregnato di un nucleo di poliestere geotessile non tessuto, un bitume ossidato e modificato elastomericamente, uno strato di superficie sabbiato per la frizione e per facilitare l'installazione.

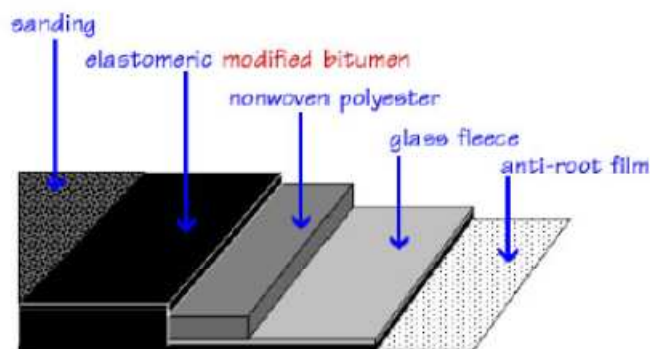


Figura 42: Composizione di una geomembrana bituminosa prefabbricata

La modifica elastomerica è raggiunta con stirene-butadiene-stirene. La geomembrana è spessa 3-5 mm per tollerare danni meccanici durante l'installazione, pesante 3-6 kg/m² così da richiedere poca zavorra per il vento, non ha espansione termica, può essere saldata termicamente, può essere incollata a strutture in cls e, vista la sua viscoelasticità può in un certo senso autoripararsi e tollera piccoli cedimenti differenziali senza subire effetti alla durata a lungo termine. L'espansione termica, alta ad esempio nell'HDPE, crea grossi problemi perché il continuo dilatarsi e ritirarsi crea instabilità, rotture e problemi con gli ancoraggi, si creano rughe che possono creare problemi al deflusso dell'acqua e facilitano il sollevamento da vento. I PBGM non hanno questi problemi in quanto hanno un'espansione termica circa 200 volte inferiore all'HDPE. RPP e EIA hanno anche loro bassa espansione termica. Essendo più pesante il PBGM aderisce meglio allo strato di argilla sottostante e minimizza l'infiltrazione d'acqua, inoltre previene meglio l'uscita di gas. Il PBGM in più ha migliori proprietà di duttilità e simili capacità di resistenza a perforazioni rispetto alle altre geomembrane. Il PBGM inoltre, al contrario di HDPE, EIA e RPP, non contiene additivi che si consumano nel proteggere i polimeri dalla degradazione termica e da raggi UV, affidandosi alla stabilità inerte del bitume è stato usato esposto per oltre 30 anni. Il PBGM si candida quindi ad essere un'ottima scelta in caso di EGCS.

Riguardo però la possibilità di saldare sopra a questo dei pannelli fotovoltaici, non si hanno esperienze e permangono dei dubbi sulla fattibilità.

Scelte diverse sono da farsi invece quando ci sono grandi cedimenti differenziali. In questi casi si preferisce usare LLPDE, o al limite PVC, vista la sua abilità a deformarsi senza danneggiamenti locali e vista la capacità di sopportare tensioni per lunghi periodi.

Altre alternative molto interessanti sono le gomme EPDM (Ethylene-Propylene Diene Monomer)⁵⁰ e le geomembrane in poliolefine termoplastiche⁵¹. Le geomembrane in lega di poliolefine flessibili:

- sono estremamente flessibili e deformabili anche a bassa temperatura, con un allungamento a rottura molto elevato.
- hanno caratteristiche di elevata resistenza meccanica e resistenza all'impatto e anche alla perforazione;
- ottima durata nel tempo;
- elevata stabilità bidimensionale;
- resistenza a raggi UV, ad agenti atmosferici, ad agenti chimici e ai microorganismi;
- assenza di plastificanti e di cloruri, il che le rende anche ecologiche in quanto sono completamente smaltibili e riciclabili.

Hanno quindi caratteristiche tali da potersi candidare come la miglior scelta per un EGCS, tant'è che sono già stati usati per realizzazioni di questo tipo in Texas e in Georgia.

Le geomembrane in EPDM sono membrane elastomeriche vulcanizzate in gomma sintetica con una struttura polimerica incrociata (Etilene, Propilene e un Diene Monomero non coniugato) che producono un telo con caratteristiche estremamente interessanti per un EGCS. Infatti la geomembrana in EPDM:

- ha un comportamento elastico essendo una gomma;
- è estremamente flessibile anche a basse temperature, anche fino a -45°C,
- è molto elastica: non ha sostanzialmente punto di snervamento sotto allungamento, al contrario delle altre geomembrane, arrivando a rottura dopo deformazioni tra il 150 e il 500% a seconda dei modelli
- ha un'elevata resistenza a trazione
- ha inoltre elevata resistenza a pressione: ha proprietà viscoelastiche e quindi resiste a carichi quasi illimitati: a carichi bassi dominano le proprietà elastiche mentre a carichi alti quelle viscosi
- ha stabilità bidimensionale,
- ha resistenza al calore,
- ha resistenza alla perforazione
- offre una maggiore durata di vita utile rispetto agli altri concorrenti.
- ha resistenza ai raggi UV, agenti chimici quali ozono, alcali, piogge acide, nitrati, fosfati, alcoli, condizioni atmosferiche e microorganismi;

⁵⁰ Ci si riferirà a queste gomme con la sola sigla EPDM

⁵¹ Ci si riferirà a questa geomembrana con la sigla TPO

- non contiene plastificanti che potrebbero causare crepe o rotture della membrana;
- è facilmente riparabile ed è ecologica. Infatti è chimicamente stabile e non contiene additivi inquinanti e non rilascia nell'ambiente sostanze nocive; le vecchie installazioni in EPDM possono essere bruciate per la produzione di energia poiché non producono diossine, o anche riciclate per la produzione di nuovi EPDM.
- La stessa Greenpeace indica l'EPDM come miglior alternativa al PVC.
- dà la possibilità di usare teli di grosse dimensioni (fino a 15x61 m), il che implica un minor numero di saldature che, insieme a una posa in opera più rapida, porta ad un abbattimento dei costi.

Un problema relativo all'EPDM è che vanno evitati i contatti con idrocarburi, benzine, grasso industriale, oli e bitume caldo. Va sottolineato inoltre come i teli in EPDM siano sul mercato già dagli anni '60 e ci siano già migliaia di impermeabilizzazioni già realizzate che forniscono un grosso bagaglio di studi e di esperienze.

4.2.1 Vita utile di una geomembrana

Le geomembrane su applicazioni esposte sono sottoposte a stress fisici e chimici che le portano a degradarsi e a perdere le loro capacità e funzionalità. Diventa quindi indispensabile per un'applicazione a lungo termine, stimare la durata della vita utile di una geomembrana sotto tali condizioni. Tale predizione ha seguito due diversi percorsi: performance in campo e test in laboratorio.

Riguardo gli studi in campo, ci sono molte informazioni derivanti da due fonti principalmente: applicazioni di geomembrane esposte per l'impermeabilizzazione di dighe in Europa e per la copertura di tetti in America. Riguardo l'uso nelle dighe, inizialmente si usò poli-iso-butilene direttamente a contatto con la diga ma da queste applicazioni si riscontrarono molti problemi⁵². Esperienze simili seguirono con il PVC, la prima nel 1980 a Lago Nero. La cosa ebbe successo e oltre 50 dighe con problemi furono in questa maniera rimesse in condizioni di servizio e operano regolarmente da oltre 30 anni in tutta Europa. Da questa esperienza si può dedurre quindi che il PVC sia durevole. Rispetto a questo argomento si possono visionare i dati pubblicati da Caffuzzi⁵³, Miller⁵⁴ e Hammond⁵⁵ dove si mostra l'importanza delle differenze tra i PVC relative alla durabilità.

⁵² Un'analisi dettagliata si trova in vari articoli di A. M. Scuero

⁵³ "Comportamento di geomembrane esposte su dighe in calcestruzzo e muratura" di Daniele Caffuzzi, 1998 e "Long-Term Performance of Exposed Geomembranes on Dams in the Italian Alps," Proc. 6th Intl. Conf. on Geosynthetics, IFAI, 1998, pp. 1107-1114.

Riguardo le esperienze sviluppate in America, si è usato soprattutto EPDM e FPP che hanno di solito garanzia del produttore di 20 anni. Tutte queste geomembrane hanno dato risultati positivi su applicazioni oltre i vent'anni.

Per ciò che attiene gli studi in laboratorio, invece di utilizzare il complesso di strutture di laboratorio che sono necessarie per lo studio delle geomembrane coperte, la vita di una geomembrana esposta può essere affrontata utilizzando dispositivi di laboratorio per l'accelerazione atmosferica. Uno studio del Geosynthetic Institute del 2005⁵⁶ ha portato ad un fattore di correlazione di 1200 ore di luce pari a un anno di prestazioni in un clima caldo. Utilizzando questa correlazione sul comportamento di incubazione di sette geomembrane comunemente usate si è giunti alla seguenti conclusioni:

- per geomembrane in HDPE si prevede di avere durata superiore a 36 anni di vita utile;
- per geomembrane in LDPE si prevede di avere durata di circa 36 anni di vita utile;
- geomembrane in EPDM si prevede di avere durata superiore a 27 anni di vita utile;
- per geomembrane in FPP si prevede di avere durata di circa 30 anni di vita utile.
- le geomembrane in PVC sono molto dipendenti dai loro tipi elasticizzanti. La formulazione del Nord America ha una durata di circa 18 anni, mentre la formulazione europea è ancora in uso dopo 32 anni.

4.2.2 Descrizione e scheda della geomembrana scelta

Dopo aver analizzato le diverse possibilità offerte dal mercato, è stata scelta una geomembrana in TPO della Flagon⁵⁷. In particolare, tra le soluzioni offerte da quest'azienda si è optato per un manto sintetico realizzato in poliolefina modificata TPO in versione bicolore grigio sabbia/nero, ottenuto per co-estrusione con inserimento di rete in poliestere. Lo strato superiore grigio sabbia, a vista, è caratterizzato da una altissima resistenza ad agenti atmosferici e raggi U.V., mentre

⁵⁴ Miller, L. V., Koerner, R. M., Dewyea, J. and Mackey, R. E., "Evaluation of a 30 mil PVC Liner and Leachate Collection System," Proc. 29th Annual GRCA/SWANA Conf., Cincinnati, OH, 1991

⁵⁵ Hammon, M., Hsuan, G., Levin, S. B. and Mackey, R. E., "The Re-examination of a Nine-Year-Old PVC Geomembrane Used in a Top Cap Application," 31st Annual SWANA Conference, San Jose, CA, 1993, pp. 93-108.

⁵⁶ Geomembrane Lifetime Prediction: Unexposed and Exposed Conditions by Robert M. Koerner, Y. Grace Hsuan and George R. Koerner. Geosynthetic Institute 475 Kedron Avenue Folsom, PA 19033 USA

⁵⁷ <http://www.flag.it/>

lo strato inferiore nero, è resistente al punzonamento. Il prodotto è certificato UNI EN ISO 9001:2000⁵⁸ e UNI EN ISO 14001⁵⁹.

Le caratteristiche tecniche sono riportate nella scheda seguente così come le curve di tensione-deformazione.

MANTI SINTETICI FLAGON
CARATTERISTICHE FISICO-CHIMICHE E SCHEDE TECNICHE

FLAGON EP/P R

CARATTERISTICHE CHIMICO-FISICHE

		Metodo di prova
Spessore (mm)	$2.0 \pm 5\%$	UNI EN 1849-2
Peso (kg/m ²)	$1.85 \pm 10\%$	UNI EN 1849-2
Carico a rottura (N / 5cm)	≥ 1100	UNI EN 12311-2
Allungamento a rottura (%)	≥ 15	
Resistenza alla lacerazione (N)	≥ 300	UNI EN 12310-2
Resistenza all'impatto (mm)	≥ 1000	UNI EN 12691
Piegatura a freddo (°C)	≤ -40	UNI EN 495-5
Resistenza alla pressione idrostatica (6 h a 0.5 Mpa)	nessuna perdita	UNI EN 1928 met. B
Stabilità dimensionale (%)	$\leq 0,5$	UNI EN 1107-2
Resistenza all'invecchiamento accelerato (UV)	nessuna fessurazione	UNI EN 1297
Resistenza alla grandine (m/s) (supporto rigido)	≥ 25	UNI EN 13583
Resistenza al punzonamento statico (kg)	≥ 20	UNI EN 12730

Figura 43: Scheda tecnica del TPO Flagon EP/PR

⁵⁸ sistema di qualità aziendale

⁵⁹ sistema ambientale

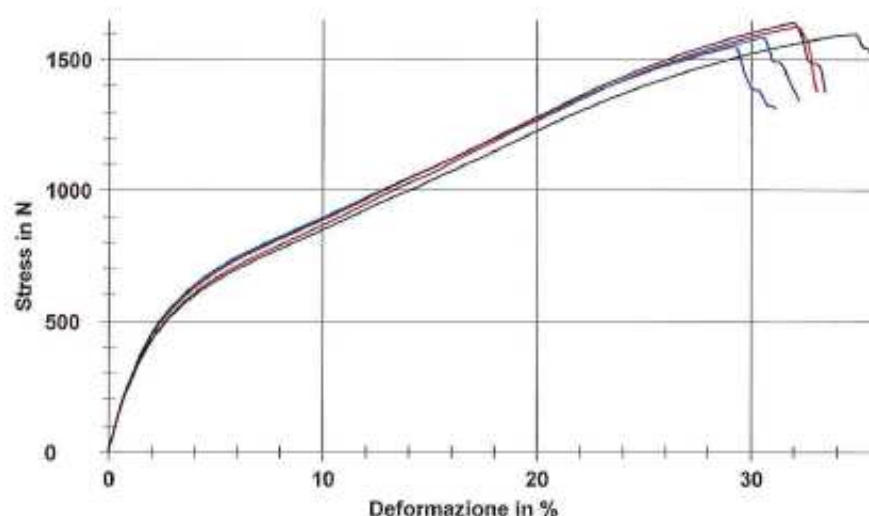


Figura 44: Curva tensioni-deformazioni del TPO Flagon EP/PR

La scelta è ricaduta su questo particolare tipo di geomembrana, non solo perché questa disponeva di tutte le caratteristiche necessarie per l'applicazione in oggetto, ma anche perché si presta ad una saldatura ottimale con i moduli fotovoltaici. Infatti questo TPO risponde alle richieste effettuate nel capitolo precedente per l'utilizzo in un sistema a geomembrana esposta. In particolare il Flagon EP/PR si caratterizza per:

- Resistenza ad agenti atmosferici e raggi U.V.
- Resistenza alle sollecitazioni causate dall'azione del vento
- Imputrescibilità
- Resistenza meccanica ed al punzonamento
- Adattabilità ai movimenti strutturali
- Flessibilità alle basse temperature
- Ottima saldabilità
- Manto ad elevata compatibilità ambientale

Come verrà poi illustrato, questo TPO si presta in modo particolare alla saldatura con i moduli fotovoltaici, grazie a un brevetto sviluppato dalla ditta Energyka⁶⁰ Srl.

⁶⁰ <http://www.energyka.com/>

4.3 Valutazione di compatibilità idraulica

La seguente valutazione di compatibilità idraulica è stata redatta seguendo le linee guida realizzate dal Commissario Delegato concernente gli eccezionali eventi meteorologici del 26 settembre 2007 che hanno colpito parte del territorio della Regione Veneto e le linee guida per lo studio di compatibilità idraulica rilasciate dal consorzio di bonifica Alta pianura veneta, in quanto il terreno in esame ricade nel territorio da questo gestito. In questo studio sono state calcolate, in termini di portata affluente, le variazioni dovute all'intervento di impermeabilizzazione in esame e si è studiata una possibile soluzione per rispettare il concetto di invarianza idraulica sopra descritto.

4.3.1 Normativa di riferimento

L'obbligo di redazione di una valutazione di compatibilità idraulica, nella regione Veneto, viene inserito per la prima volta con la deliberazione n. 3637 del 13 dicembre 2002. Tale deliberazione comincia ricordando come l'antropizzazione del territorio e la sua fragilità idrogeologica siano tra loro interconnesse, come dimostrato dai noti disastri idrogeologici degli ultimi anni, e prosegue citando le leggi n.183 del 18 maggio 1989⁶¹ e n.267 del 3 agosto 1998⁶² le quali introducono e definiscono il PAI⁶³. Dopodiché la norma va a introdurre l'obbligo che l'approvazione di un nuovo strumento urbanistico, ovvero di varianti a uno strumento urbanistico vigente, sia subordinata al parere della competente autorità idraulica individuata dalla Regione e che a tal fine debba essere redatto un apposito studio di compatibilità idraulica che, al fine di evitare l'aggravio delle condizioni di dissesto idraulico del bacino, preveda una valutazione dell'alterazione del regime idraulico provocata dalle nuove previsioni urbanistiche, nonché idonee misure compensative. La deliberazione sottolinea poi come tale norma vada applicata da subito a tutto il territorio regionale.

Successivamente, nel 2006, la regione Veneto ha deliberato la DGRV n. 1322 del 10 maggio 2006, nella quale si vanno a ridefinire le "Modalità operative e indicazioni tecniche" relative alla "Valutazione di compatibilità idraulica per la redazione degli strumenti urbanistici" che sostituiscono la precedente versione allegata alla DGR 3637/2002. Questo per aggiornarle a:

- le modifiche nel frattempo avvenute nell'assetto del territorio;

⁶¹ "norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo. ecologia."

⁶² "conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 11 giugno 1998, n. 180, recante misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico ed a favore delle zone colpite da disastri franosi nella regione campania. ecologia."

⁶³ Piano stralcio di bacino di Assetto Idrogeologico

- all'esperienza maturata negli anni di applicazione della norma precedente;
- alle variazioni contenute nel Piano di Tutela delle Acque⁶⁴, con il quale la procedura di "Valutazione di compatibilità idraulica" deve essere coerente;
- alla modifica del piano delle competenze attivata con DGR 3260/2002;
- all'entrata in vigore della L.R. 23.04.2004 n. 11⁶⁵, la quale ha infatti modificato sensibilmente l'approccio per la pianificazione urbanistica.

È in questa DGRV che viene introdotto il concetto di invarianza idraulica citato precedentemente⁶⁶.

Dopo i particolari eventi meteorologici che hanno colpito parte della regione Veneto, in particolare la fascia costiera centro-meridionale del Veneto compresa tra la zona del Piovese nel Padovano, il Veneziano centrale e il basso Trevigiano, il 26 settembre 2007, con Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n.3621 del 18 ottobre 2007, è stato nominato "Commissario Delegato per l'emergenza concernente gli eccezionali eventi meteorologici del 26 settembre 2007 che hanno colpito parte del territorio della Regione Veneto". Il 3 agosto 2009, il Commissario Delegato ha pubblicato le Linee guida per la valutazione di compatibilità idraulica con riferimento ai comuni che hanno subito l'emergenza del 2007. Tali linee guida sono state prese come riferimento principale per lo sviluppo del seguente studio, insieme a quelle pubblicate dal consorzio di bonifica Alta pianura veneta.

4.3.2 Inquadramento territoriale

Il sito è ubicato in un'ex-cava in località Pontesello, nella zona ovest del comune di Montecchio Maggiore, subito a ovest rispetto al percorso della nuova tangenziale. Il sito si trova, nel particolare, alle coordinate 45°30'20" N, 23°22'20" E del sistema di riferimento WGS84. La cava è raggiungibile da due strade sterrate che si congiungono a poche centinaia di metri rispettivamente a via Pontesello e a via Longa, la quale poi si ricongiunge alla strada provinciale.

⁶⁴ Il Piano di Tutela delle Acque è stato adottato dalla regione Veneto con deliberazione n. 4453 del 29 dicembre 2004, di cui all'art. 44 del D.Lgs. 11.05.1999 n. 152

⁶⁵ "Nuova disciplina regionale per il governo del territorio"

⁶⁶ Capitolo 3.1.2

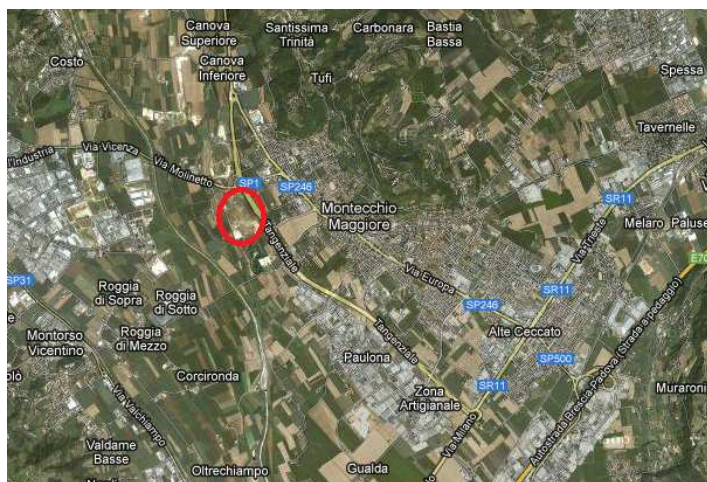


Figura 45: inquadramento del dito della discarica di Pontesello. Google Maps



Figura 46: inquadramento del dito della discarica di Pontesello. Google Maps

Il comune di Montecchio maggiore ricade per il totale della sua superficie, 3.076 Ha, all'interno del territorio di competenza del consorzio di bonifica "Alta Pianura Veneta"⁶⁷. Sotto il profilo idrologico di scolo, il comprensorio del consorzio è diviso in due grandi aree ricadenti nel bacino di rilievo nazionale del fiume Adige e nel bacino di rilievo nazionale dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione, bacino nel quale ricade il sito interessato. Tralasciando la descrizione dettagliata del bacino idrografico, si sottolinea come gli affluenti del suddetto bacino siano il fiume Fratta-Gorzone, il fiume Agno Guà, il fiume Bacchiglione e affluenti, i torrenti Astico-Tesina e il fiume Astichello. Il comprensorio consortile presenta un aspetto idraulico veramente articolato e un'estensione della rete in manutenzione superiore ai 3000 Km. In particolare il sito in esame ricade nel bacino del Fiumicello Brendola, questo è formato da aree pianeggianti e collinari della parte nord occidentale dei Colli Berici. In esso sono presenti 20 canali per un estensione

⁶⁷ www.altapianuraveneta.eu

complessiva di 55 Km, confluenti per gravità dapprima nel fiume Brendola e successivamente nell'Agno-Guà. Il bacino ha un'estensione di 6.614 Ha e comprende al suo interno 19 sottobacini.

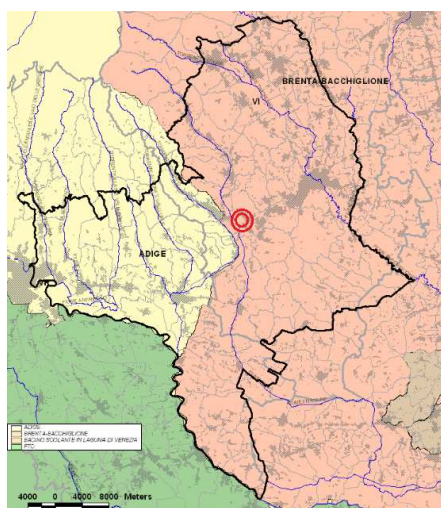


Figura 47: localizzazione della discarica di Pontesello all'interno del macrobacino Brenta-Bacchiglione

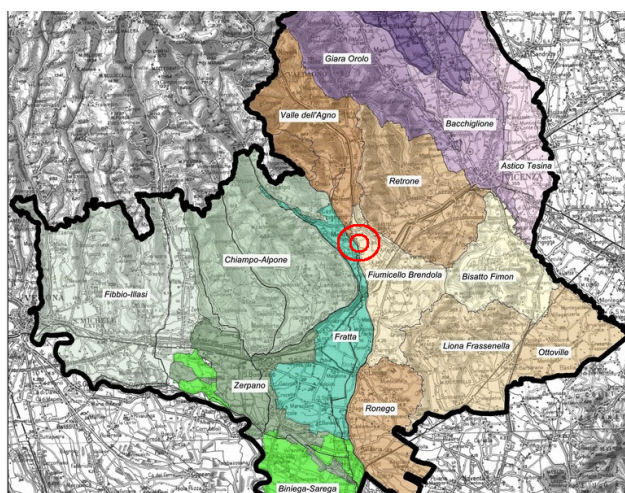


Figura 48: Localizzazione della discarica di Pontesello all'interno del bacino del Fiumicello Brendola

Il sito oggetto di questo studio, da un punto di vista altimetrico, si posiziona a quota 80 m s.l.m.

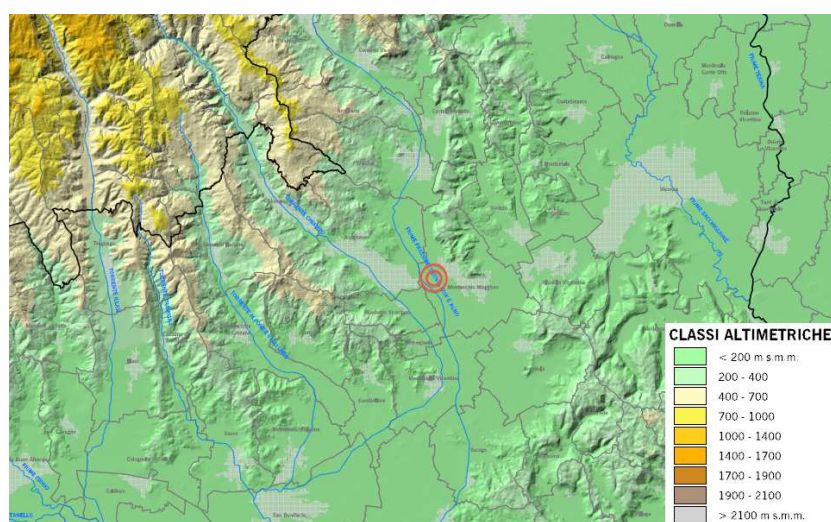
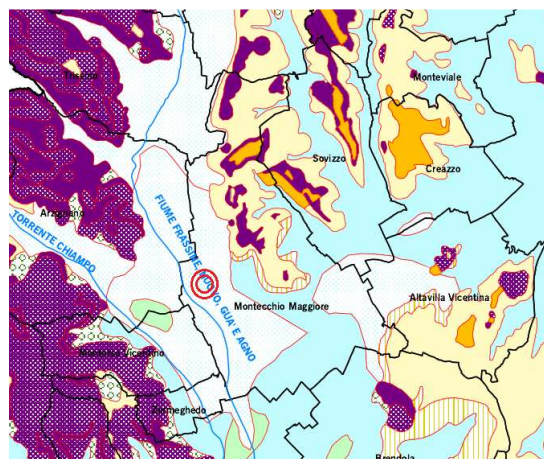


Figura 49: Localizzazione della discarica di Pontesello nella classe altimetrica <200 m s.m.m.

Per quel che riguarda le caratteristiche del suolo, l'analisi dei dati forniti dall'ARPAV nella Carta dei Suoli del 2006 permette di evincere che il terreno in oggetto è un deposito alluvionale composto prevalentemente da ghiaie. Nei dati ARPAV, definiti

fine⁶⁸ e un substrato moderatamente fine⁶⁹.



discarica di Pontesello.

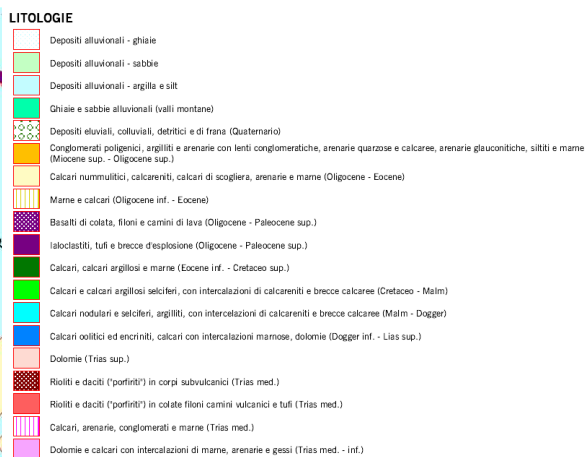


Figura 51: legenda della carta delle litologie

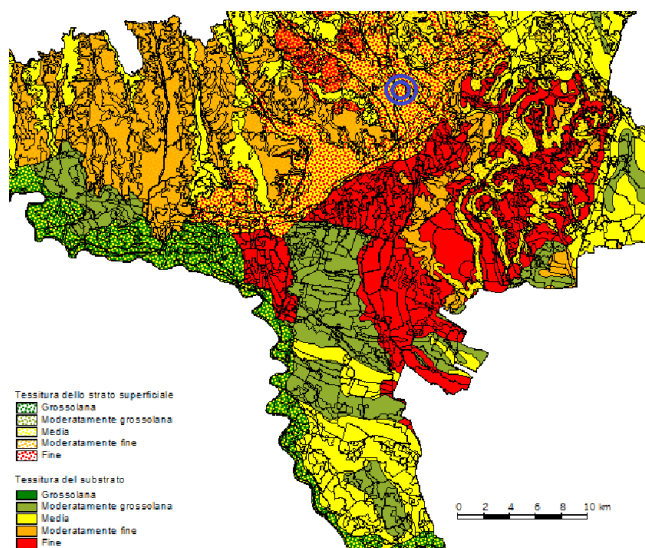


Figura 52: Localizzazione della discarica di Pontesello nella carta della tessitura del suolo

⁶⁸ Uno strato fine viene definito con tessitura argillosa, argillosa sabbiosa, argillosa limosa

⁶⁹ Uno strato moderatamente fine viene definito con tessitura franco sabbiosa argillosa, franco argillosa, franco limosa argillosa

Per quanto riguarda il grado di permeabilità del suolo, sempre dai dati ARPAV, si ricava che il suolo considerato ha una permeabilità che ricade in un range tra 10^{-7} e 10^{-6} m/s.

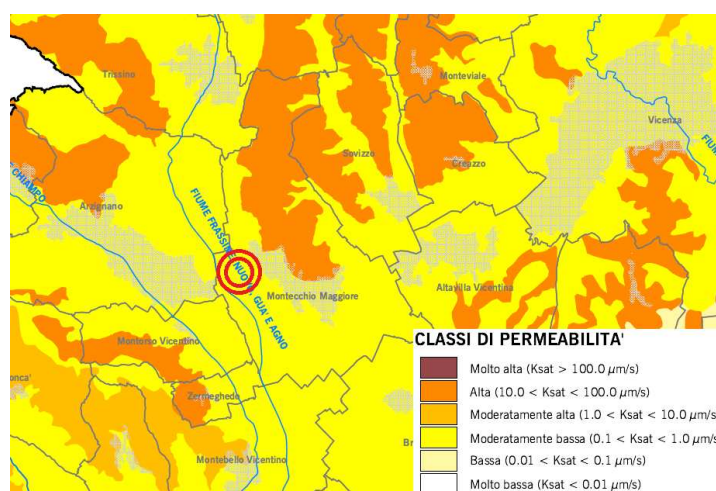


Figura 53: Localizzazione della discarica di Pontesello nella carta delle permeabilità

Infine un'analisi dell'uso del suolo rivela come il sito sia classificato come area estrattiva, essendo un ex-cava, e un'analisi delle aree protette della zona si evince che il sito si trova distante da queste e quindi non è vincolato ai limiti delle stesse.

Riguardo il rischio idraulico, si sottolinea come il comune di Montebelluna Maggiore non abbia ancora redatto un PAT⁷⁰ o un PAI. Nel documento preliminare del PAT, redatto nel settembre 2008, si dice comunque: "relativamente al P.A.I. si rileva che il territorio comunale è inserito nel Bacino Idrografico del fiume Brenta-Bacchiglione. Dall'esame della cartografia non risulta che il territorio comunale sia interessato né da pericolosità idraulica, né da pericolosità e rischio geologico, né da pericolosità da valanga."

4.3.3 Metodologia di lavoro

Per il calcolo dei volumi d'invaso necessari al rispetto dell'invarianza idraulica, così come da normativa, si è fatto riferimento alle sopracitate linee guida realizzate dal Commissario Delegato concernente gli eccezionali eventi meteorologici del 26 settembre 2007 che hanno colpito parte del territorio della Regione Veneto e alle linee guida per la redazione dello studio di compatibilità idraulica del consorzio di bonifica Alta Pianura Veneta.

⁷⁰ PAT: Piano Assetto Territoriale

Seguendo queste disposizioni, il tempo di ritorno dell'evento di progetto, il quale è definito come

$$Tr = \frac{1}{1 - p} \quad (6)$$

dove P è la probabilità di non superamento dell'evento, è stato assunto pari a 50 anni.

Come indicato dalla DGR n. 102 del 26 gennaio 2010 per il calcolo del deflusso superficiale a seguito di un evento di precipitazione si prende come riferimento il "Documento propedeutico ai piani generali di bonifica e tutela del territorio dei consorzi di bonifica del Veneto" in cui viene applicato il metodo CN⁷¹ per la caratterizzazione idraulica dei bacini idrografici principali della regione Veneto. Si rimanda pertanto al documento propedeutico la descrizione della metodologia di analisi. Di seguito si riportano le osservazioni, relative all'analisi effettuata nel documento propedeutico, caratterizzanti l'area in oggetto.

Per le elaborazioni idrologiche si fa riferimento alle misure del Centro Meteorologico di Teolo, gestito dall'ARPAV⁷². L'elaborazione statistica⁷³ dai valori massimi di precipitazione consente di individuare una relazione analitica che per ciascuna stazione e per ciascuna durata associ ad un'altezza di precipitazione il tempo di ritorno che le è proprio, e viceversa a ciascun tempo di ritorno la misura di pioggia relativa. In particolare la stazione di interesse per il sito in oggetto è quella di Brendola. Per tale stazione i parametri delle CPP⁷⁴ sono dati sia in versione italiana a due parametri, sia in versione più generale a tre parametri. Si ricorda che l'espressione delle CPP a tre parametri permette una migliore interpolazione dei dati per le varie durate di pioggia considerate.

Riguardo il metodo di calcolo da usare, il testo di riferimento divide i possibili casi in 5 classi, a seconda dell'estensione superficiale dell'intervento in progetto, come illustrato nella tabella seguente

Riferimento	Classificazione intervento	Soglie dimensionali
Ordinanze	Trascurabile impermeabilizzazione potenziale	$S^* < 200 \text{ mq}$
	Modesta impermeabilizzazione	$200 \text{ mq} < S^* < 1.000 \text{ mq}$
D.G.R. 1322/06	Modesta impermeabilizzazione potenziale	$1.000 \text{ mq} < S < 10.000 \text{ mq}$
	Significativa impermeabilizzazione potenziale	$10.000 \text{ mq} < S < 100.000 \text{ mq}$
	Marcata impermeabilizzazione potenziale	$S > 100.000 \text{ mq e } \Phi < 0,3$ $S > 100.000 \text{ mq e } \Phi > 0,3$

Tabella 3: Classificazione degli interventi in base alla superficie di intervento

⁷¹ CN: Curve Number

⁷² <http://www.arpa.veneto.it>

⁷³ Per l'elaborazione statistica si è usata la distribuzione probabilistica di Gumbel

⁷⁴ Curve di Possibilità Pluviometrica

L'intervento in esame ricade nel caso di "significativa impermeabilizzazione potenziale" essendo la superficie maggiore di 10mila m² e minore di 100mila m². Per questa classe di intervento il metodo proposto è basato sul concetto del coefficiente udometrico calcolato con il metodo esposto nel testo "Sistemi di fognatura. Manuale di progettazione"⁷⁵, detto anche "metodo delle piogge". La valutazione del volume di invaso si basa sulla curva di possibilità pluviometrica, sulle caratteristiche di permeabilità della superficie drenante e sulla portata massima, supposta costante, imposta in uscita dal sistema. La risposta idrologica del sistema è quindi estremamente semplificata. Si fanno inoltre le seguenti ipotesi semplificative:

- Che sia trascurabile l'effetto della trasformazione afflussi-deflussi operata dal bacino e dalla rete drenante
- Che lo scarico in uscita avvenga a portata costante
- Che lo istogramma della pioggia, uniformemente distribuita nello spazio, sia rettangolare, ovvero che l'intensità della pioggia sia costante per tutta la durata dell'evento

Tali ipotesi implicano che le portate in ingresso al sistema d'invaso siano sovrastimate e di conseguenza anche i volumi di laminazione risulteranno sovrastimanti e cautelativi.

In tali condizioni, in occasione di una precipitazione di durata t , il volume di pioggia in arrivo è pari a:

$$V_{in} = S \varphi h(t) \quad (7)$$

Dove: φ è il coefficiente di afflusso medio, imposto costante, del bacino drenato a monte della vasca; S è la superficie del bacino drenato a monte della vasca; h è l'altezza di pioggia, funzione della durata secondo le curve di possibilità pluviometrica.

Nel criterio proposto possono essere utilizzate sia le CPP a due che a tre parametri.

Il volume in uscita sarà invece pari a:

$$V_{out} = Q_{out} * t \quad (8)$$

Il massimo volume di invaso, per una data durata t viene calcolato come differenza fra il volume entrato nella vasca ed il volume uscito dalla stessa nel periodo della durata della precipitazione.

$$V_{invasato} = V_{in} - V_{out} \quad (9)$$

⁷⁵ csdu -HOEPLI, Milano, 1997

Il volume da assegnare alla vasca è pari al massimo volume invasato, che si verifica in corrispondenza della durata di pioggia critica t_{cr} del sistema. La determinazione della durata critica per il volume d'invaso, ossia la durata per la quale si ha il massimo volume invasato, si ottiene imponendo nulla la derivata prima del volume d'invaso in funzione della durata e ottenendo quindi, per il caso di CPP a due parametri:

$$t_{cr} = \left(\frac{Q_{out}}{S \varphi a n} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (10)$$

ne consegue che il massimo volume che dovrà essere contenuto dal serbatoio è dato dalla:

$$V_{inv\ cr} = S \varphi a \left(\frac{Q_{out}}{S \varphi a n} \right)^{\frac{n}{n-1}} - Q_{out} \left(\frac{Q_{out}}{S \varphi a n} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (11)$$

Tale metodo può essere sviluppato similmente anche con le CPP a tre parametri, dove però la soluzione del volume di invaso critico andrà trovata in modo iterativo, essendo impossibile esplicitare il valore del tempo critico.

In questa sede si è scelto di illustrare e utilizzare anche il metodo dell'invaso, usato per bacini minori, per valutarne le differenze con il metodo precedentemente illustrato. In particolare si vuole brevemente presentare la generalizzazione di tale metodo per le curve di possibilità pluviometrica a tre parametri. Infatti il metodo dell'invaso è quasi sempre proposto in riferimento alle CPP a due parametri. A questo riguardo si fa riferimento alla pubblicazione "Riscrittura delle equazioni del metodo dell'invaso per curve di possibilità pluviometrica a tre parametri" dell'Ing. Martino Cerni⁷⁶.

Il metodo dell'invaso tratta il problema del moto vario in modo semplificato, assegnando all'equazione del moto la semplice forma del moto uniforme, considerando la superficie come un invaso lineare e assumendo l'equazione dei serbatoi, in luogo dell'equazione di continuità delle correnti unidimensionali, per simulare l'effetto dell'invaso. L'equazione del moto viene quindi espressa come

$$Q = k_s R_H^{2/3} A \sqrt{i} = c A^\alpha \quad (12)$$

⁷⁶ L'articolo è reperibile all'indirizzo http://www.acquerisorgive.it/public/file/Metodo_invaso.pdf

che rappresenta la scala delle portate, con α che varia a seconda della geometria della sezione: 1,5 se sezioni aperte, 1 se sezioni chiuse. Questa viene associata all'equazione dei serbatoi scritta nella forma

$$\text{per } t \leq \tau \quad \frac{dV}{dt} = P(t) - Q(t) \quad (13)$$

$$\text{per } t > \tau \quad \frac{dV}{dt} = -Q(t) \quad (14)$$

dove P è la pioggia netta definita come

$$P = \varphi j S \quad (15)$$

τ è la durata della precipitazione e Q la portata uscente.

Le due equazioni forniscono la relazione tra Q e t e trattano in sostanza il processo di riempimento e di vuotamento di un ideale serbatoio controllato da una speciale luce di scarico che trae dal moto uniforme la sua legge di deflusso.

All'equazione del moto uniforme e a quella dei serbatoi si aggiungono altre ipotesi semplificative che sono:

- Funzionamento autonomo e a sincrono della rete idraulica: durante la piena, tutti gli elementi della rete raggiungono contemporaneamente lo stesso stato idraulico. Inoltre il deflusso tra i singoli tronchi della rete non è influenzato dai livelli idrometrici a valle.
- Rete inizialmente vuota
- Pioggia di intensità costante.

Con i dovuti calcoli, per i quali si rimanda alla trattazione dell'articolo citato precedentemente, si arriva alla definizione del coefficiente udometrico u in relazione alle CPP a tre parametri:

$$u = (v_0 z \xi_a(z) + b u)^{\frac{c}{c-1}} (a \varphi z)^{\frac{1}{1-c}} \quad (16)$$

La (16) permette di calcolare il coefficiente udometrico assegnate le caratteristiche pluviometriche dell'area (coefficienti a , b e c) e le caratteristiche idrologiche e geometriche del bacino e della sua rete (φ e v_0); resta unicamente da definire il valore di z . La soluzione va cercata in modo iterativo, essendo l'espressione implicita, scegliendo il valore di z che rende massimo il coefficiente udometrico u , ovvero ponendo la condizione

$$\frac{du}{dz} = 0 \quad (17)$$

Per sfruttare la teoria dell'invaso nel calcolo dei volumi per assicurare l'invarianza idraulica, bisognerà usare tale metodo secondo uno schema logico "inverso" rispetto a quello consueto. Infatti, nella prassi quotidiana, è noto da principio il volume di invaso disponibile e il metodo viene usato per il calcolo della portata di picco. Nel calcolo dell'invarianza idraulica invece è nota a priori la portata massima che si vuole scaricare, mentre il volume di invaso è l'incognita da determinare. Esplicitando dalla (16) il volume di invaso si ha:

$$v = \frac{u^{\left(\frac{c-1}{c}\right)} (\alpha \varphi z)^{\left(\frac{1}{c}\right)} - b u}{z \xi_a(z)} \quad (18)$$

A questo punto, noti i parametri delle CPP e il coefficiente φ , si può stimare il volume di invaso specifico necessario perché il sistema scarichi al massimo la portata corrispondente al coefficiente udometrico imposto. Dopodiché, nota la superficie di intervento, si calcola il volume complessivo da realizzare.

Le linee guida suggeriscono, una volta eseguito il calcolo del volume necessario, di depurare il valore di v_o del volume che si invasa nelle caditoie e nelle superfici irregolari, secondo la seguente tabella.

coefficiente di afflusso	0,10	0,2	0,30	0,4	0,50	0,6	0,70	0,8	0,90	1
velo idrico [mc/ha]	25	23	22	20	18	17	15	13	12	10
caditoie ecc. [mc/ha]	10	13	16	18	21	24	27	29	32	35
piccoli invasi [mc/ha]	35	36	37	38	39	41	42	43	44	45

Tabella 4: Volume invasato dalle caditoie a seconda del coefficiente di allusso

4.3.4 Calcolo del volume da invasare

Riguardo al caso in esame i parametri scelti sono stati i seguenti:

- $\varphi = 0,9$ [-] in quanto per la determinazione del coefficiente di deflusso medio dell'intera area sono stati presi in esame i valori di φ di riferimento indicati nella DGRV n. 2948
- I parametri della CPP sono stati presi dallo studio sopra citato usando le CPP a tre parametri e sono: $a=32,7$ [$mm \min^{c-1}$], $b=11,6$ [min], $c=0,79$ [-]. Tali valori non si riferiscono allo studio effettuato dal consorzio di bonifica Alta Pianura Veneta, ma a quello effettuato dal Commissario Allagamenti. Questo studio però non interessa il territorio di Montecchio

Maggiore, ma, per comodità e per la mancanza di ulteriori dati, si è proceduto per similitudine pluviometrica considerando le CPP dei comuni nord dello studio del Commissario Allagamenti. Tale considerazione è a favore di sicurezza in quanto è stato verificato che le precipitazioni nei comuni considerati sono maggiori rispetto al comune di Montecchio Maggiore.

- Esponente della scala delle portate $\alpha = 1,5$ in quanto si ipotizzano canalette a sezione aperta
- Coefficiente udometrico imposto allo scarico $u = 10 \left[\frac{l}{s \cdot ha} \right]$ come indicato nelle linee guida
- Superficie di intervento pari a 60.700 m^2

Si è inoltre ritenuto di non ridurre il volume trovato come indicato dalle linee guida, essendo la superficie in esame regolare.

Grazie a un semplice foglio excel sviluppato dal consorzio di bonifica Dese Sile e liberamente utilizzabile, è stato così possibile calcolare il volume necessario all'invarianza idraulica con i due metodi. I risultati ottenuti mostrano che il metodo più cautelativo risulta essere il metodo dell'invaso dal quale risulta un volume necessario pari a 5.895 m^3 ; il metodo delle piogge, utilizzato sia con le CPP a due parametri che con quelle a tre parametri, richiede invece rispettivamente volumi pari a 4.538 m^3 e 4.690 m^3 .

Si è scelto quindi di progettare gli accorgimenti per l'invarianza idraulica mantenendosi a favore di sicurezza, escludendo però dalle considerazioni il metodo dell'invaso, considerato troppo cautelativo per bacini di così grandi dimensioni dalle stesse linee guida. Il volume scelto è quindi quello con il metodo delle piogge usando le CPP a tre parametri, ovvero 4.690 m^3 .

Si ricorda, inoltre, come la norma⁷⁷ afferma che in caso di terreni ad elevata capacità di accettazione delle piogge, ovvero con coefficiente di filtrazione maggiore di 10^{-3} m/s e frazione limosa inferiore al 5% , in presenza di falda freatica sufficientemente profonda e di regola in caso di piccole superfici impermeabilizzate, è possibile realizzare sistemi di infiltrazione ricorrendo all'invarianza idraulica per il solo 50% dell'aumento di portata. Il caso in esame non possiede però queste caratteristiche, come già descritto in precedenza.

⁷⁷ Ci si riferisce all' allegato A al DGR 1322

4.3.5 Sistema di smaltimento delle acque meteoriche in progetto

È necessario progettare un bacino di accumulo in grado di invasare i volumi d'acqua precedentemente calcolati. Esiste già una vasca per le acque bianche nella zona sud-est della discarica. Tale vasca risulta essere però sottodimensionata. Da un'analisi della planimetria della discarica, si nota come la vasca in oggetto abbia una superficie di 1.522 m^2 e una profondità massima di 3 m. Con questa configurazione la vasca non sarebbe in grado di accogliere il volume necessario all'invarianza idraulica.

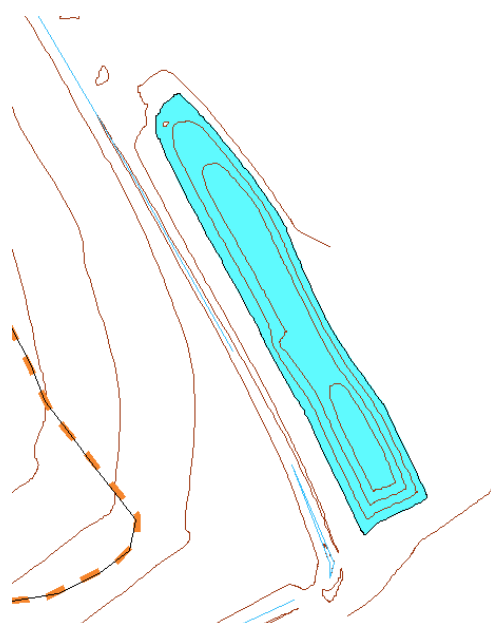


Figura 54: planimetria della vasca esistente

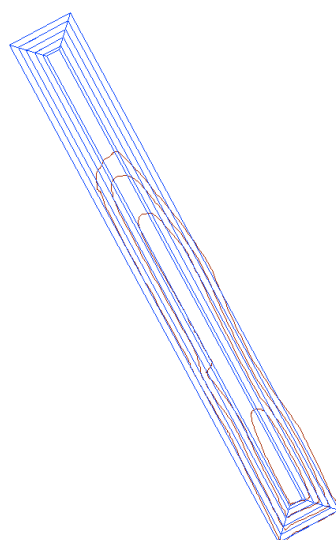


Figura 55: confronto in planimetria tra la vasca di progetto e quella esistente

Si rende quindi necessario un ampliamento della vasca. Si procederà allungando la vasca e sistemandone le sponde. La vasca allargata si presenterà con fondo piano a una profondità rispetto al piano campagna di 4,5 m di modo da avere un livello idrico di 4 m con 0,5 m di franco. Si è ipotizzato che il fondo e le pareti siano realizzate in terreno avente coefficiente di permeabilità k pari a 10^{-7} m/s , in quanto nella carta delle permeabilità rilasciata dal Consorzio di bonifica al terreno locale viene assegnato un k variabile tra 10^{-7} e 10^{-6} , si prende quindi in considerazione il valore che permetta la minima infiltrazione per restare a favore di sicurezza.

Le dimensioni del fondo della vasca sono 126,5 m in lunghezza e 3,5 m in larghezza. Le pareti si alzano con scarpa 3:2 e quindi a livello del piano campagna le dimensioni della vasca saranno di 140x17 m. A livello di massimo invaso la superficie d'acqua sarà di 138,5x15,5 m. Il volume massimo che la vasca può invasare risulta quindi di 4.752 m^3 , superiore al volume minimo necessario.

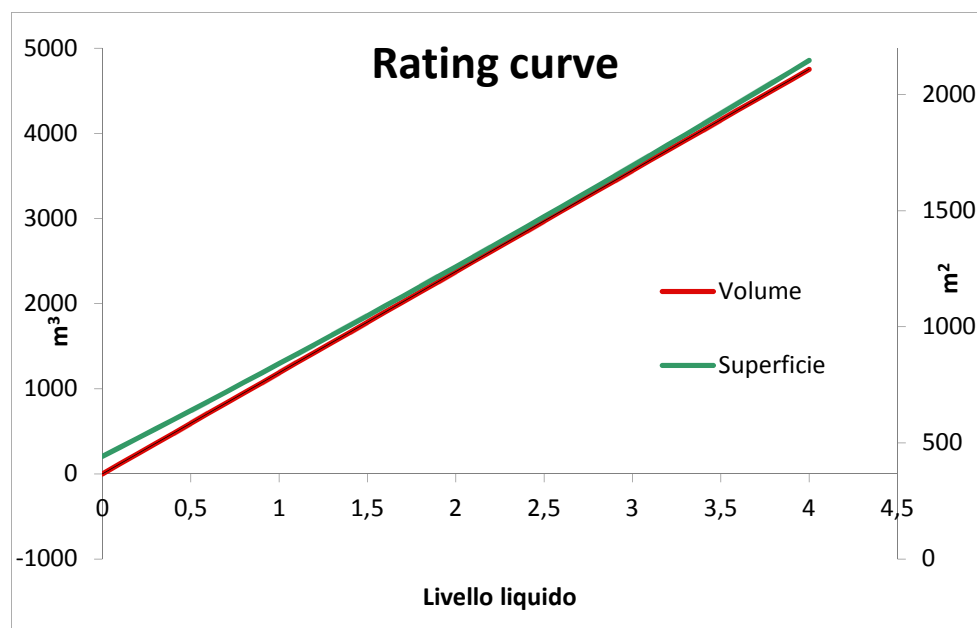


Figura 56: Rating curve della vasca

4.3.6 Determinazione della portata massima affluente al bacino di accumulo

Per la determinazione della portata massima confluita al bacino di accumulo si è fatto riferimento al sistema di convogliamento delle acque nella canaletta perimetrale. Il metodo adottato è il metodo cinematico della corrivazione. Il metodo cinematico, largamente usato per il calcolo della portata conseguente ad una assegnata precipitazione, è detto nella letteratura tecnica internazionale, *metodo razionale*, e noto in Italia anche come metodo del *ritardo di corrivazione*. Esso si

presta ad essere utilizzato in molti casi, ma generalmente è applicato a bacini scolanti di limitata estensione.

Se in un bacino di superficie S cade, per una durata di pioggia τ , una precipitazione di altezza h , solo una frazione φ del volume meteorico risulta efficace agli effetti del deflusso, perdendosi per varie ragioni come vaporazione, filtrazione nel terreno, ecc. la frazione $(1-\varphi)$. La portata massima, col modello adottato, si ha per un tempo di precipitazione pari al tempo di corrivazione del bacino $\tau = t_c$ e l'idrogramma di piena presenta una forma di triangolo isoscele, caratterizzato quindi da un valore della portata massima doppio di quello medio.

$$Q_{max} = \varphi \frac{Sh}{t_c} \quad (19)$$

Con S espressa in $[m^2]$, h in $[m]$ e t_c in $[s]$. Varie formule empiriche sono state proposte per il calcolo di t_c . Un'espressione consigliata per cunette e fossi di guardia, al servizio quindi di superfici scolanti di modesta estensione, è la seguente

$$t_c = 26.3 \frac{(L/K_s)^{0.6}}{j^{0.4} i^{0.3}} \quad (20)$$

Con L = lunghezza dell'asta principale della superficie scolante

E i= pendenza media della superficie scolante.

Tale formula, suggerita nel 1971 dal Civil Engineering Department dell'Università di Maryland, si può esplicitare anche come

$$t_c = [26.3 \frac{(L/K_s)^{0.6}}{3600^{(1-n)0.4} a^{0.4} i^{0.3}}]^{1/(0.6+0.4n)} \quad (21)$$

Altre formule consigliate per il calcolo di t_c sono:

$$\text{Turazza} \quad t_c = 1.085\sqrt{S} \quad (22)$$

$$\text{Ventura} \quad t_c = 0.315\sqrt{S} \quad (23)$$

$$t_c = 0.053 \sqrt{\frac{S}{i}} \quad (24)$$

Giandotti

$$t_c = 4\sqrt{S} + \frac{1.5\sqrt{L}}{0.8\sqrt{i_{bac}}} \quad (25)$$

Di seguito vengono riportate le tabelle con i valori dei parametri scelti e dei risultati ottenuti nell'applicazione di tali metodi al caso in esame.

S [m ²]	60.700	Metodo Turazza	Tc scelto: Metodo Turazza
i [%]	0,04	tc [h] 6,415571145	tc [min] 384,9343
Ks [m ^{1/3} /s]	80		tc [s] 23096,06
a [mm*min ⁻ⁿ]	22,4	Metodo Ventura 1	
n	0,265	tc [h] 1,862585171	h [mm] 108,4864
L [m]	150		φ 0,9
		Metodo Ventura 2	Qmax [m ³ /s] 0,256607
Metodo università del Maryland		tc [h] 1,566936731	
tc [h] 3,902478058			Qmax [m ³ /s] 0,256607
		Metodo Giandotti	Qmax [l/s] 256,6072
		tc [h] 1,542452793	

Tabella 5: parametri e risultati di portata

Riguardo le dimensioni della canaletta, non conoscendo le dimensioni di quella già esistente, si scelta una canaletta a sezione trapezia di base 0.8m, fonda 0.6m e con pareti che salgono 2:1 così da avere una larghezza in superficie pari a 1.4m. Si è proceduto poi con la verifica che tale canaletta fosse adeguata al contenimento delle portate precedentemente calcolate. Per questo calcolo si è ipotizzato nella canaletta un regime di moto uniforme

$$Q = K_s R_h^{2/3} A \sqrt{i} \quad (26)$$

Imponendo la portata nota si è esplicitata la pendenza:

$$i = \left(\frac{Q}{K_s R_h^{2/3} A} \right)^2 \quad (27)$$

La pendenza risultante è molto minore rispetto a quelle in progetto in ogni punto e la progettazione della canaletta risulta dunque accettabile.

4.4 Sollevamento da vento

4.4.1 Aspirazione causata dal vento

Quando il vento soffia, la pressione dell'aria varia localmente a seconda della geometria dell'ostacolo che incontra. Un classico esempio di ciò è dato dall'incontro tra il flusso d'aria e un oggetto cilindrico sviluppato da Goldstein⁷⁸ nel 1938. La variazione di pressione dell'aria e di velocità del vento, obbediscono alla classica legge di Bernoulli

$$p_\omega + \rho V_\omega^2 / 2 = p + \rho V^2 / 2 \quad (28)$$

Dove ρ è la densità dell'aria, p_ω la pressione dell'aria a un dato angolo, V_ω la velocità del vento a un dato angolo, p la pressione dell'aria iniziale, V la velocità del vento iniziale.

La figura 58 illustra i risultati ottenuti da Goldstein, i quali mostrano come il vento abbia il duplice effetto di aumentare la pressione dell'aria sull'oggetto e soprattutto di creare depressione, con ω compresi tra i 40° e i 140° , dove ω è inteso come l'angolo tra il punto di misurazione della depressione e il centro del semicilindro.

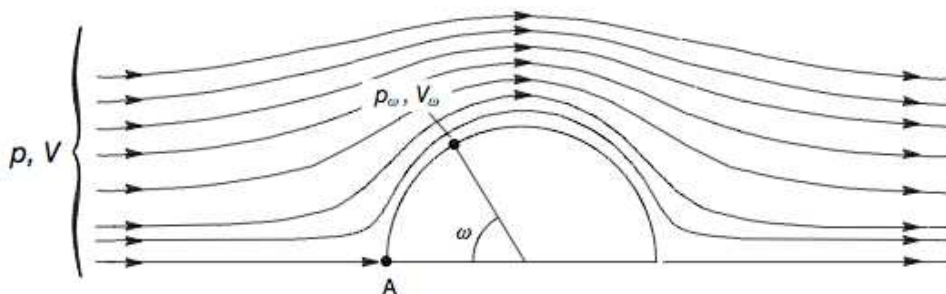


Figura 57: illustrazione della distribuzione di pressione attorno a una superficie cilindrica (adattata da goldstein 1938)

⁷⁸ Goldstein, S., 1938, "Modern Developments in Fluid Dynamics", Vol. 2, Oxford Engineering. Science Series, Oxford University Press, United Kingdom, 702 p.

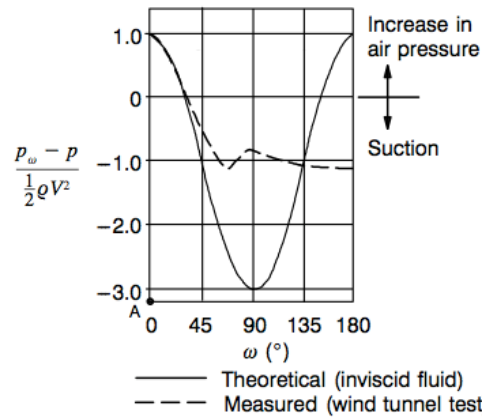


Figura 58: variazione di pressione sulla superficie dell'ostacolo

Effetti di depressione si possono avere anche con ostacoli con geometrie simili, quali ad esempio berme o pendii, come quelli ai quali viene applicata la geomembrana. Per calcolare la variazione di pressione, è necessario innanzitutto conoscere la densità dell'aria e la pressione atmosferica, le quali variano con l'aumentare dell'altitudine secondo le seguenti relazioni:

$$\rho = \rho_0 e^{-\rho_0 g z / p_0} \quad (29)$$

$$p = p_0 e^{-\rho_0 g z / p_0} \quad (30)$$

dove g è l'accelerazione di gravità, z è l'altitudine sul livello del mare e ρ_0 e p_0 sono i valori riferiti al livello del mare. Si ricorda che $p_0 = 101,325$ Pa e che, a una temperatura di 0°C e considerando aria secca, $\rho_0 = 1,293$ kg/m³. La densità dell'aria diminuisce all'aumentare dell'umidità e all'aumentare della temperatura.

Per il calcolo della variazione di pressione di riferimento in funzione della velocità del vento e dell'altitudine, si può usare semplicemente la formula che segue, dove la velocità del vento è indicata in km/h e la variazione di pressione in Pa

$$\Delta p_r = 0,050 V^2 e^{-(1,252 \cdot 10^{-4})z} \quad (31)$$

La variazione positiva di pressione non crea alcun problema nel caso di geomembrane esposte in quanto essa varia in un range molto basso, minore della stessa pressione atmosferica e sempre minore alle pressione cui possono resistere le geomembrane. Riguardo la depressione invece, come già accennato, è necessario quantificarla e determinarne gli effetti nelle geomembrane per verificare

l'adeguatezza delle stesse. Tale depressione verrà da ora indicata con S^{79} secondo la seguente relazione

$$S = -\Delta p \quad (32)$$

Il rapporto tra la depressione e la variazione di pressione, detto fattore di aspirazione viene definito come segue

$$\lambda = S/\Delta p_r \quad (33)$$

Da una modellazione in tunnel a velocità del vento costante e da considerazioni per aumentare la sicurezza, sono stati calcolati i fattori da usare a seconda delle condizioni considerate:

- $\lambda = 1,00$ se si considera solo il piano sulla cima del pendio;
- $\lambda = 0,70$ se si considera l'intero pendio;
- $\lambda = 0,85$ se si considera il terzo superiore del pendio
- $\lambda = 0,70$ se si considera il terzo centrale del pendio
- $\lambda = 0,55$ se si considera il terzo inferiore del pendio
- $\lambda = 0,4$ al fondo

Tali risultati sono riassunti nella figura seguente

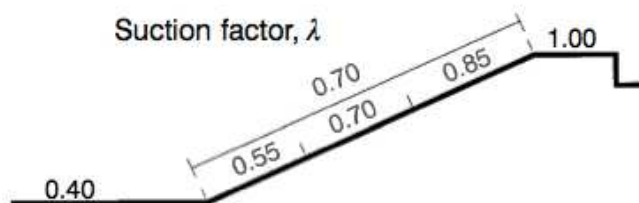


Figura 59: Fattore di aspirazione a seconda del punto considerato nel pendio

Viene però ricordato che in caso di geometrie inusuali il valore di λ va aumentato del 30% e in caso di progetti nei quali danni indotti dal vento possono creare alti costi di sistemazione, bisogna effettuare test in tunnel con modelli in scala ridotta.

Una geomembrana resiste al sollevamento da vento da sola grazie al suo peso se tale peso⁸⁰ per unità di area⁸¹ è superiore o uguale all'aspirazione a cui è sottoposta. Il peso per unità di area di una geomembrana è espresso dalla relazione

$$W/A = \mu_{GM} g \quad (34)$$

⁷⁹ S: abbreviazione di Suction

⁸⁰ Ci si riferirà al peso della geomembrana con il simbolo W

⁸¹ Ci si riferirà all'area della geomembrana con il simbolo A

dove μ_{GM} è la massa per unità di area della geomembrana, calcolata a partire dalla sua densità ρ_{GM} e dal suo spessore t_{GM} tramite la relazione

$$\mu_{GM} = \rho_{GM} * t_{GM} \quad (35)$$

Nei casi in cui la geomembrana sia esposta e pensata come copertura finale per la discarica e ci sia la presenza di un pendio a forte pendenza, la scomposizione delle forze dovuta alla direzione non può ortogonale alla forza gravitazionale andrà presa in considerazione. Va sottolineato come la geomembrana esposta sia spesso presa in considerazione come copertura finale al posto della copertura classica, proprio perché capace di dare stabilità anche con forti pendenze, cosa spesso difficile da realizzarsi con le coperture classiche.

Indicando con β l'angolo di pendenza del pendio al quale viene applicata la geomembrana e scomponendo le forze lungo tale direzione, l'equilibrio risulta essere:

$$(W/A)\cos\beta \geq S \quad (36)$$

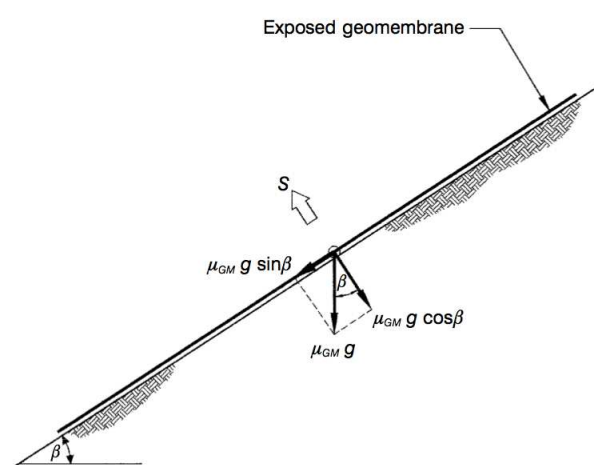


Figura 60: forze in gioco nel caso di geomembrana esposta su un pendio a inclinazione β e soggetta all'aspirazione del vento

Il termine $\cos\beta$ risulta influente quando si considerino pendii a pendenza molto modesta. Ha invece particolare importanza nei casi a pendenza rilevante e nei casi di geomembrane con massa elevata.

È facile, a questo punto, calcolare la massa per unità di area richiesta affinché la geomembrana resista da sola all'aspirazione del vento.

$$\mu_{GM} \geq \mu_{GMreq} = \lambda \frac{\rho_0 V^2}{2g \cos\beta} e^{-\rho_0 g z / p_0} \quad (37)$$

usando i valori di pressione e densità dell'aria citati in precedenza si arriva a una relazione di più immediata applicazione

$$\mu_{GMreq} = 0,005085 \frac{\lambda V^2}{\cos\beta} e^{-(1,252 \cdot 10^{-4})z} \quad (38)$$

dove le grandezze sono espresse come segue: μ_{GM} (kg/m²), V (km/h), z (m).

Risulta semplice poi lavorare sulle equazioni per andare a calcolare la velocità del vento minima che crea un sollevamento della geomembrana. La condizione per evitare il sollevamento della geomembrana può essere scritta come segue:

$$V \leq V_{up} = \left[\frac{2g\mu_{GM}\cos\beta}{\lambda p_0 e^{-\frac{p_0 g z}{p_0}}} \right]^{1/2} \quad (39)$$

Che, con le consuete unità di misura, può essere riscritta come

$$V \leq V_{up} = 14,023 e^{(6,259 \cdot 10^{-5})z} \sqrt{\mu_{GM} \cos\beta / \lambda} \quad (40)$$

Il sollevamento della geomembrana può essere evitato ponendo uno strato di materiale protettivo sopra la geomembrana. Nelle applicazioni classiche questo strato di intende di terra, ma nel caso in esame può essere considerata invece la possibilità di uno strato di erba sintetica come zavorra e il peso dei pannelli. Lo spessore richiesto per questo strato protettivo viene calcolato tramite un equivalenza tra la pressione esercitata dal peso di questo strato più il peso della geomembrana stessa e la depressione causata dal vento.

$$(\rho_p g D + \mu_{GM} g) \cos\beta \geq S \quad (41)$$

Dove ρ_p e D sono rispettivamente la densità e lo spessore del materiale considerato. Si possono quindi combinare le equazioni precedenti e esplicitare lo spessore minimo richiesto (D_{req})

$$D_{req} \geq \frac{1}{\rho_p} \left(-\mu_{GM} + \lambda \frac{\rho_0 V^2}{2g \cos\beta} e^{-\frac{\rho_0 g z}{p_0}} \right) \quad (42)$$

$$D_{req} = \frac{1}{\rho_p} \left(-\mu_{GM} + 0,005085 \frac{\lambda V^2}{\cos \beta} e^{(-1,252 \cdot 10^{-4})z} \right) \quad (43)$$

4.4.2 Analisi del sollevamento della geomembrana

Per andare a studiare nel dettaglio il comportamento di una geomembrana esposta all'azione del vento, si devono innanzitutto fare delle assunzioni e a studiare alcuni parametri preliminari. Il primo di questi è la lunghezza L del pezzo di geomembrana soggetto all'aspirazione da vento. Si assume che la membrana sia ancorata alle estremità di tale lunghezza, ad esempio con delle trincee alla sommità e al fondo del pendio considerato. Alcune possibili configurazioni sono illustrate in figura.

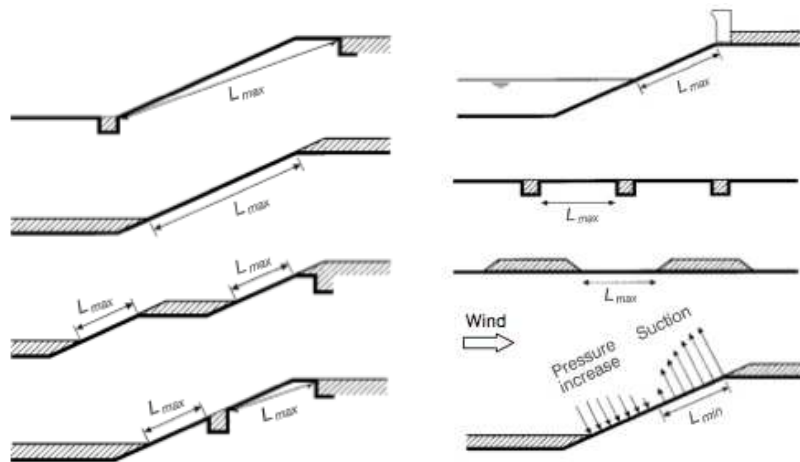


Figura 61: configurazioni tipiche di geomembrane esposte al vento

Si assume che gli ancoraggi siano adeguatamente progettati di modo che il vento non possa estrarne la geomembrana e che la stessa sia esposta e non coperta da strati di altro materiale, non incollata a un supporto rigido, non zavorrata con sacchi di sabbia. Inoltre si assume che non ci siano bocchette di aspirazione o altri meccanismi che stabilizzino la membrana togliendo la pressione sotto di essa quando soffia il vento, ma si suppone che la stessa sia fissata al terreno su ogni lato, impedendo che il vento possa passare sotto di essa sollevandola. In altre parole si assume che la geomembrana sia libera di muoversi per la lunghezza L . Riguardo l'aspirazione, si assume che non cambi quando, a causa di essa, la geomembrana si sollevi cambiando quindi la sua pendenza e che sia uniforme su tutta la lunghezza L . Anche se questo non corrisponde al vero, ponendo attenzione al valore di L e di λ utilizzati, tale assunzione può essere fatta. Inoltre in questo studio il problema è assunto come bidimensionale.

Le caratteristiche essenziali della geomembrana in questo studio sono la tensione e la deformazione ammissibili, rispettivamente indicate con T_{all} e ε_{all} . Questi due parametri sono calcolabili a partire dalla curva tensione-deformazione della geomembrana scelta, evitando che essa raggiunga lo snervamento. È importante ricordare come le membrane non rinforzate abbiano caratteristiche dipendenti dalla temperatura.

L'aspirazione effettiva (S_e), alla quale sarà sottoposta la geomembrana, è data dalla relazione

$$S_e = S - \mu_{GM} g \cos\beta \quad (44)$$

Che, date le unità di misura usate in precedenza, diventa

$$S_e = 0,050\lambda V^2 e^{-(1,252 \cdot 10^{-4})z} - 9,81\mu_{GM}\cos\beta \quad (45)$$

La S_e risulta quindi composta da due forze, una dovuta al vento e con direzione normale alla geomembrana e una dovuta al peso della stessa e con direzione non normale. La seconda risulta comunque piccola rispetto alla prima e quindi la S_e risulta avere direzione sostanzialmente normale alla geomembrana. Essendo l'aspirazione uniforme sulla lunghezza L , la forza F di aspirazione dovuta alla S_e risulta dalla relazione

$$F = S_e L \quad (46)$$

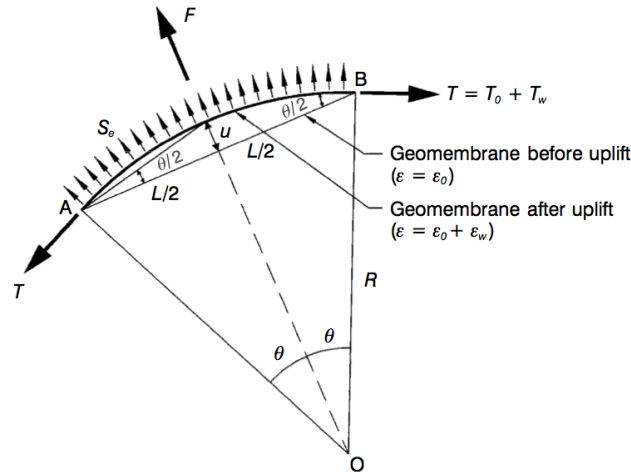


Figura 62: rappresentazione schematica di una geomembrana sollevata

La forza F è bilanciata dalle tensioni alle due estremità della geomembrana. Proiettando queste sulla normale alla corda AB risulta:

$$F = 2T\sin\theta \quad (47)$$

E combinando questa con l'equazione precedente si arriva a

$$\frac{T}{S_e L} = \frac{1}{2 \sin \theta} \quad (48)$$

Essendo S_e uniformemente distribuita, la geomembrana si deforma e tale deformazione può essere calcolata come segue:

$$1 + \varepsilon = \frac{\text{arc} AB}{L} = \frac{2R\theta}{2R \sin \theta} \quad (49)$$

$$\varepsilon = \frac{\theta}{\sin \theta} - 1 \quad (50)$$

Eliminando θ che viene esplicitato nell'equazione precedente, si arriva alla relazione tra la deformazione e la tensione normalizzata ($T/S_e L$)

$$\varepsilon = \frac{2T}{S_e L} \sin^{-1} \left[\frac{S_e L}{2T} \right] - 1 \quad (51)$$

Questa relazione, rappresentata dalla figura seguente, è la relazione fondamentale per il problema del sollevamento della geomembrana. Si noti come non è possibile esprimere la tensione normalizzata analiticamente come funzione della deformazione.

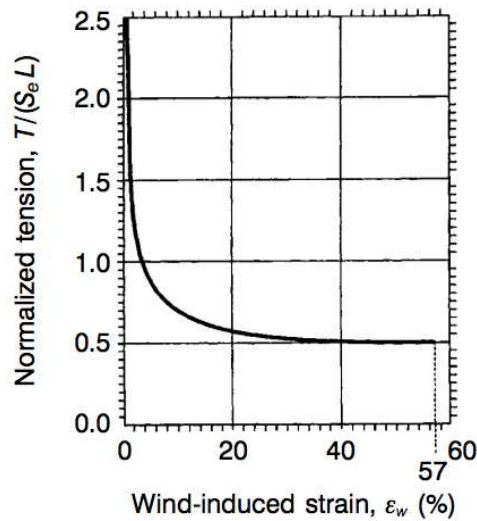


Figura 63: relazione tra la tensione da sollevamento normalizzata e la deformazione

Per determinare se la geomembrana considerata è accettabile per la resistenza al sollevamento da vento, la sua curva tensioni-deformazioni dev'essere comparata con la relazione sopracitata. Questo può essere fatto plottando nello stesso grafico le due curve, ponendo attenzione a normalizzare la curva relativa alla geomembrana dividendola per il termine $S_e L$. L'intersezione tra le due dà la tensione normalizzata e la deformazione nella geomembrana quando essa è sollevata dal vento considerato, sulla lunghezza L considerata.

Per il calcolo della tensione cui è sottoposta la geomembrana, si dovrà ipotizzare una deformazione, trovare la tensione relativa con la relazione n.51, verificare poi la deformazione relativa alla tensione trovata nella curva tensioni-deformazioni della geomembrana specifica. A questo punto la deformazione trovata andrà reinserita nella relazione 51 iterando il sistema fino a giungere a una convergenza.

Sulla base di ciò, una geomembrana è accettabile il punto dato dalla sua tensione normalizzata ammissibile e dalla deformazione ammissibile sta sopra la curva, ovvero se il suo valore è maggiore di quello dato dall'intersezione. La tensione normalizzata ammissibile è definita come:

$$T'_{all} = T_{all}/(S_e L) \quad (52)$$

Per evitare di dover plottare la curva di tensioni normalizzate-deformazione di ogni geomembrana considerata, si possono utilizzare le curve riportate nella figura seguente.

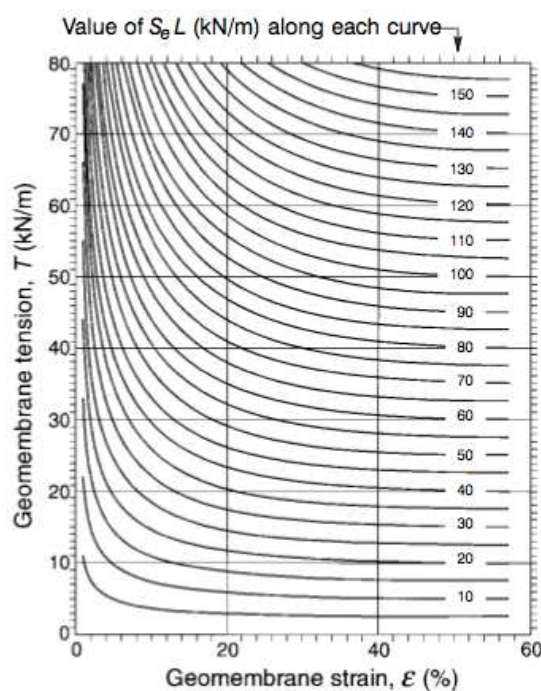


Figura 64: famiglia di curve tra di tensione-deformazione, a seconda del valore di $S_e L$

Una volta nota la deformazione che si verifica nella geomembrana, è possibile calcolare il sollevamento (u). Da una semplice considerazione geometrica si può scrivere che

$$\sin\theta = \frac{2}{\frac{2u}{L} + \frac{L}{2u}} \quad (53)$$

Che combinata con l'equazione 50 dà

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(\frac{2u}{L} + \frac{L}{2u} \right) \sin^{-1} \left[\frac{2}{\frac{2u}{L} + \frac{L}{2u}} \right] - 1 \quad (54)$$

Combinando poi la 48 con la 53

$$\frac{T}{S_e L} = \frac{1}{4} \left(\frac{2u}{L} + \frac{L}{2u} \right) \quad (55)$$

L'equazione 55 è un'equazione quadratica in u/L e quindi diventa

$$\frac{u}{L} = \frac{T}{S_e L} - \sqrt{\left(\frac{T}{S_e L} \right)^2 - 1/4} \quad (56)$$

E dalla 53 trovo

$$\frac{u}{L} = \frac{1 - \cos\theta}{2\sin\theta} = \frac{1}{2} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (57)$$

E quindi la 48 può essere riscritta esplicitando l'angolo

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{S_e L}{2T} \right) \quad (58)$$

Calcolare θ è molto utile in quanto dà l'orientazione della tensione alle estremità della geomembrana, la quale è necessaria per progettare le trincee di ancoraggio. La geometria della geomembrana sollevata è caratterizzata da tre parametri: la deformazione ε , l'angolo della tensione θ e il sollevamento u . Ci sono nove relazioni che legano queste tre grandezze e con loro anche la tensione normalizzata e sono riportate nella tabella seguente.

Parameters	Relationship
$T/(S_e L)$ and u/L	$\frac{T}{S_e L} = \frac{1}{4} \left(\frac{2u}{L} + \frac{L}{2u} \right)$
$T/(S_e L)$ and θ	$\frac{T}{S_e L} = \frac{1}{2 \sin \theta}$
ϵ and $T/(S_e L)$	$\epsilon = \frac{2T}{S_e L} \sin^{-1} \left(\frac{S_e L}{2T} \right) - 1$
ϵ and u/L	$\epsilon = \frac{1}{2} \left(\frac{2u}{L} + \frac{L}{2u} \right) \sin^{-1} \left[\frac{2}{\frac{2u}{L} + \frac{L}{2u}} \right] - 1$
ϵ and θ	$\epsilon = \frac{\theta}{\sin \theta} - 1$
θ and $T/(S_e L)$	$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{S_e L}{2T} \right)$
θ and u/L	$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{2}{\frac{2u}{L} + \frac{L}{2u}} \right] = 2 \tan^{-1} \left[\frac{2u}{L} \right]$
u/L and $T/(S_e L)$	$\frac{u}{L} = \frac{T}{S_e L} - \sqrt{\left(\frac{T}{S_e L} \right)^2 - \frac{1}{4}}$
u/L and θ	$\frac{u}{L} = \frac{1 - \cos \theta}{2 \sin \theta} = \frac{1}{2} \tan \left(\frac{\theta}{2} \right)$

Tabella 6: Relazioni tra le varie grandezze del problema

Il punto chiave nel risolvere il problema del sollevamento da vento della geomembrana esposta è, come detto precedentemente, la determinazione della deformazione della geomembrana sollevata. Questo si può fare sovrapponendo le curve come già indicato, o con un metodo iterativo usando l'equazione 51.

Tutte le geomembrane hanno un comportamento dipendente dalle temperature, specialmente quelle non rinforzate. Per questo, dove si renda necessario, si dovrà entrare in possesso di curve tensione-deformazione delle varie geomembrane alle varie temperature e poi fare le dovute scelte a favore di sicurezza.

In tutti i calcoli presentati precedentemente, si è implicitamente supposto che la geomembrana fosse ben stesa e non sottoposta a tensioni prima del sollevamento. In realtà, ad alte temperature, la geomembrana può mostrare grinze e a basse temperature può risultare in tensione. Entrambi i casi possono essere studiati facilmente spostando lateralmente la curva di tensione-deformazione di una quantità ϵ_T calcolata come segue

$$\epsilon_T = \alpha(\Gamma - \Gamma_{base}) \quad (59)$$

Dove α è il coefficiente di espansione-contrazione termica della geomembrana, Γ è la temperatura al momento del sollevamento, Γ_{base} è la temperatura della geomembrana quando è stata stesa e si considera senza tensioni o grinze.

4.4.3 Sollevamento della geomembrana con tensioni o deformazioni iniziali

Finora, si è vista e studiata la deformazione causata alla geomembrana dal vento. Esistono però altre possibili cause di deformazione della geomembrana i quali effetti vanno sommati a quelli del vento per uno studio più completo del fenomeno. A questo proposito, per evitare confusione, si userà da ora la notazione ε_w per riferirsi alla deformazione fin qui studiata e il simbolo ε verrà invece riferito alla deformazione totale.

Tra le molteplici cause di possibile tensione presente sulla geomembrana prima del sollevamento del vento, come ad esempio un'errata posa della stessa, quelle più rilevanti sono sicuramente l'espansione termica e la forza di gravità. Tensioni indotte da forze sismiche o sforzi di trazione indotti dall'acqua non vengono considerati in quanto appare molto improbabile che il vento di progetto si sviluppi contemporaneamente a eventi sismici. La deformazione e la tensione iniziale (ε_0 e T_0) prima del sollevamento, possono essere stimate come:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_T + \varepsilon_g \quad (60)$$

$$T_0 = T_T + T_g \quad (61)$$

Dove con i pedici T e g ci si riferisce rispettivamente agli effetti di espansione e contrazione termica e gravità. La deformazione indotta dalla contrazione termica può essere calcolata tramite l'equazione 59 precedentemente illustrata e da questa, nel caso la geomembrana abbia un comportamento lineare, si può calcolare la tensione ad essa associata tramite la relazione

$$T_T = J \varepsilon_T \quad (62)$$

Dove J è la rigidità alla trazione della geomembrana, altrimenti si dovrà usare il metodo grafico. La componente di tensione indotta dalla gravità è la componente di peso della geomembrana e di un eventuale strato protettivo nella direzione del pendio. Assumendo che la geomembrana sia adeguatamente ancorata nella parte alta del pendio, la tensione aumenta da zero, partendo dal fondo del pendio, a un massimo che si raggiunge nella cresta. La parte più sotto sforzo subirà quindi una tensione pari a

$$T_g = \mu_{GM} g L \sin\beta \quad (63)$$

Essendo questa l'espressione per il massimo della tensione che si raggiunge, nonostante un valore medio sia più indicativo dello stato di tensione generale, si userà questa relazione nei calcoli essendo questa la situazione più critica. La deformazione derivante da tale tensione può essere calcolata, similmente a prima, come

$$\varepsilon_g = \frac{T_g}{J} \quad (64)$$

Una volta che lo stato iniziale di tensione e deformazione è stato definito, le componenti indotte dal vento possono essere calcolate. Se la geomembrana ha un comportamento in parte lineare, ε_w può essere calcolata tramite la seguenti relazioni

$$\frac{S_e L}{2(T_0 + J \varepsilon_w)} = \sin \left[\frac{S_e L}{2(T_0 + J \varepsilon_w)} (1 + \varepsilon_w) \right] \quad (65)$$

$$\frac{S_e L}{2J (\varepsilon_0 + \varepsilon_w)} = \sin \left[\frac{S_e L}{2J (\varepsilon_0 + \varepsilon_w)} (1 + \varepsilon_w) \right] \quad (66)$$

Usando un metodo iterativo. Dopo aver calcolato ε_w si trova la tensione, sempre nel caso la geomembrana abbia comportamento lineare, tramite la relazione

$$T_w = J \varepsilon_w \quad (67)$$

Infine, combinando gli effetti possiamo trovare la tensione e deformazione totale dopo il sollevamento da vento:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_w \quad (68)$$

$$T = T_0 + T_w \quad (69)$$

4.4.4 Modifiche ai calcoli di Giroud nel caso di geomembrane con pannelli fotovoltaici

Nel caso in cui ci siano dei moduli fotovoltaici installati insieme alla geomembrana, bisognerà apportare particolari accorgimenti ai calcoli visti finora. In particolare bisogna porre attenzione sul fatto che, essendo i pannelli saldati con la geomembrana, questi andranno a subire delle tensioni e a collaborare nella risposta dell'intero sistema alle tensioni indotte dal vento. Innanzitutto, essendo i pannelli

infinitamente più rigidi della geomembrana, il fatto che essi siano saldati su questa, fa sì che la parte di geomembrana che resta coperta dai moduli fotovoltaici, sia esclusa dalla risposta del sistema alle tensioni. Inoltre si può considerare che, essendo la geomembrana infinitamente più deformabile rispetto ai pannelli, la parte di questa non coperta assorba da sola tutte le tensioni. Questo fa sì che, nel calcolo dell'aspirazione effettiva e nel calcolo della tensione ammissibile, non vada considerata l'intera lunghezza del tratto di pendio considerato, ma solo quella parte nella quale la geomembrana non viene coperta dai moduli. Mentre nei calcoli di u e θ e nel calcolo della tensione indotta dalla gravità, andrà considerata la lunghezza del pendio totale. Questo porta a fare importanti considerazioni sulla disposizione dei pannelli, in quanto questi andranno disposti in modo che ci sia abbastanza superficie di geomembrana libera di deformarsi e di reagire alle tensioni. Riguardo poi la sopracitata tensione indotta dalla gravità, sarebbe dovuto considerare anche il peso dei pannelli che coprono la superficie considerata. Tale peso non viene considerato nel calcolo del sollevamento da vento restando così a favore di sicurezza.

4.4.5 Calcoli per il sollevamento da vento

È stato sviluppato un foglio di calcolo grazie al quale, dopo aver inserito i dati necessari, sarà possibile calcolare la tensione cui è sottoposta la geomembrana nei punti di ancoraggio e tutto ciò che riguarda il sollevamento da vento. In particolare, essendo il calcolo della tensione e della deformazione iterativo, è stato sviluppato nel foglio di calcolo un breve programma con macro che permette di svolgere l'iterazione e arrivare al risultato.

I dati di input necessari per il calcolo sono:

- Altitudine in m.s.l.m.: la discarica di Pontesello si trova a un'altitudine di circa 80 m.s.l.m.. ovviamente la discarica non ha un'altitudine costante in tutti i suoi punti. Le quote della discarica variano, dal fondo al punto sommitale, di 10 metri; si è quindi scelto un valore medio di altitudine pari a 80 m.s.l.m.
- Velocità del vento in km/h: secondo le norme tecniche per le costruzioni per le zone del nord-italia, bisogna usare un vento di riferimento di 25 m/s; pari quindi a 90 km/h;
- Il fattore di aspirazione λ , discusso nel capitolo precedente, in questo caso viene posto pari a 0,7
- La densità della geomembrana in g/cm³: il TPO Flagon EP-PR 200 ha una densità pari a 0,925 g/cm³
- Lo spessore della geomembrana in mm: il TPO Flagon EP-PR 200 ha uno spessore pari a 2 mm

- La tensione ammissibile dalla geomembrana in kN/m: in questo caso non si ritiene corretto usare la tensione ammissibile a rottura. Si preferisce usare invece la tensione oltre la quale la geomembrana esce dal regime elastico. Questa, anche se più bassa, assicura che la geomembrana, dopo la deformazione torni alla situazione iniziale, evitando snervamenti. Per il TPO Flagon EP-PR 200, vista la curva tensioni-deformazioni, si è scelta una tensione ammissibile pari a 10 kN/m
- La deformazione ammissibile in percentuale: anche in questo caso si è scelta una deformazione massima che non faccia uscire le geomembrana dal regime elastico. Per il TPO Flagon EP-PR 200 si è scelta una deformazione ammissibile del 2,6 %
- Tensile stiffness: che si calcola come la pendenza della curva tensioni-deformazioni nella parte elastica. Nel caso del TPO Flagon EP-PR 200 questa è pari a 400 kN/m
- La temperatura massima in °C: per il calcolo della temperatura massima a cui può essere sottoposta la geomembrana, si è fatto riferimento ai dati degli ultimi 40 anni verificando che la temperatura massima è stata raggiunta il 5 Agosto 2003 con una temperatura di 38.2 °C
- La temperatura standard in °C: la temperatura di riferimento è stata posta pari a 20°C
- Il coefficiente di espansione termica della geomembrana: per il TPO Flagon EP-PR 200 è pari a 0,00012
- Inclinazione del pendio: il pendio della discarica, dopo la sistemazione, avrà una pendenza leggermente superiore al 3%. Viene quindi usata nel calcolo una pendenza del 4% a favore di sicurezza

Segue poi la richiesta di alcuni dati relativi ai pannelli e alla loro distribuzione. Questo per calcolare quale sarà la parte di geomembrana che si deformerà e quale sarà invece coperta dal pannello. Bisognerà quindi fornire:

- Le dimensioni del pannello in m: come si vedrà in seguito nel capitolo dedicato alla scelta del pannello fotovoltaico, il pannello scelto è di dimensioni 5,74*0,49 m
- Il peso del pannello in kg/m²: in questo caso il peso è di 3,5 kg/m²
- Numero di pannelli tra due ancoraggi: nel caso in esame la disposizione dei pannelli prevede di posizionare due pannelli messi trasversalmente alla direzione delle trincee ogni zona delimitata dai due ancoraggi.

Infine il dato di input che riguarda la disposizione degli ancoraggi, ovvero la distanza coperta dalla geomembrana tra due di questi. Questo dato andrà inizialmente ipotizzato, per poi verificare, con le dovute considerazioni, che l'ipotesi sia corretta.

La maschera dei dati di input si presenterà come segue:

PARAMETRI		
altitudine	z	80 mslm
velocità Vento	V	90 km/h
suction factor	λ	0,70
densità gm	ρ_{gm}	0,925 g/cm ³
spessore gm	t_{gm}	2 mm
tensione accettabile	T_{all}	10 Kn/m
deformazione acc	ϵ_{all}	2,6 %
tensile stiffness	J	422,55 KN/m
temperature	t_{max}	38,2 °c
	$t_{standard}$	20 °c
coef. Espansione e contrazione termica	α	0,00012
inclinazione pendio	β	4 %
larghezza pannello		0,49 m
lunghezza pannello		5,74 m
peso specifico pannello		2,5 kg/m ²
lunghezza tratto		12,5 m
numero di pannelli per zona		2

Tabella 7: parametri per il sollevamento da vento

Per l'utilizzo del programma sarà necessario essere in possesso della curva tensioni-deformazioni della geomembrana che si intende utilizzare. Essendo improbabile che si sia in possesso della funzione che descrive questa curva, bisognerà ricrearla tramite un'interpolazione. Per fare ciò bisogna discretizzare la curva il più possibile andando a vedere a ogni tensione che deformazione corrisponde e poi trovare una polinomiale che la rappresenti più correttamente possibile.

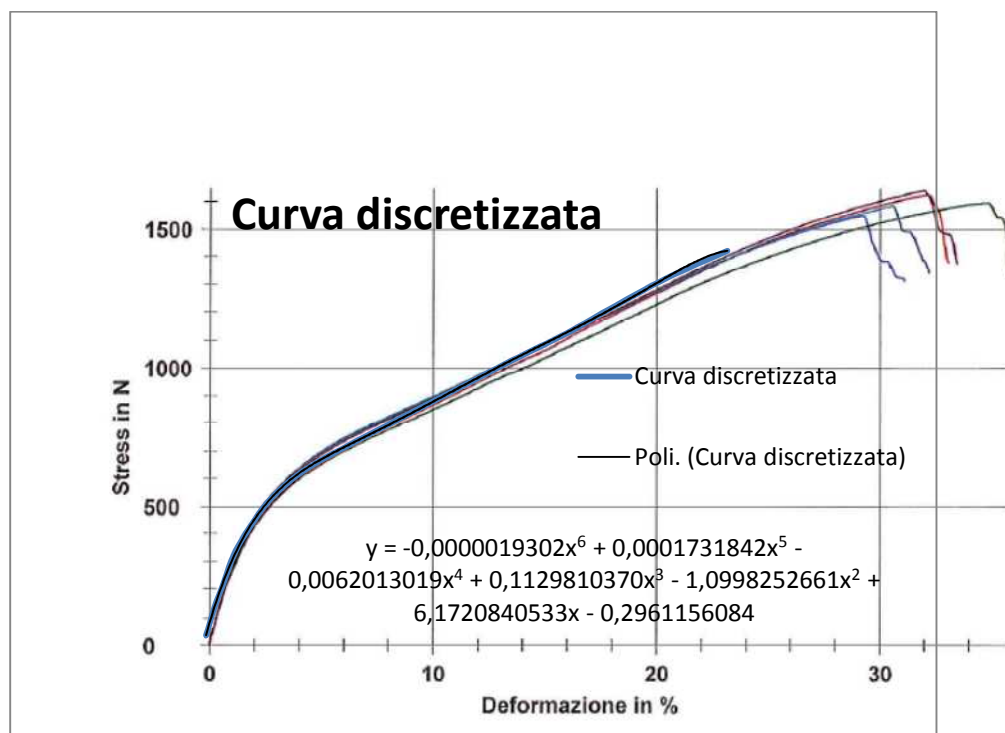


Figura 65: confronto tra la curva tensioni-deformazioni della geomembrana e la sua interpolazione polinomiale

Una volta ordinato al programma di risolvere il problema, verranno forniti i seguenti risultati:

Risultati:		
La geomembrana è accettabile?	SI	
Deformazione	ϵ	1,501762 %
Tensione indotta dal vento	T_w	6,023312 KN/m
Tensione totale	T	6,910104 KN/m
Angolo di sollevamento	θ	15,80806 °
Sollevamento massimo	u	0,867707 m
Lunghezza coperta da geomembrana		1,02 m
Lunghezza coperta pannelli		11,48 m
Lunghezza pendio tra i due ancoraggi		12,5 m

Tabella 8: risultati del sollevamento da vento

I risultati qui illustrati nella tabella si riferiscono a una disposizione con ancoraggi ogni 12,5 m tra i quali sono posati due pannelli trasversalmente.



Figura 66: disposizione dei pannelli solari e degli ancoraggi come da progetto

La geomembrana risulta accettabile in quanto la tensione e la deformazione accettabile non vengono superate. La tensione totale trovata pari a quasi 7 kN/m sarà quella che si userà nella progettazione di adeguati ancoraggi. Il sollevamento massimo è ritenuto accettabile in quanto non crea danni alla membrana né al pannello. Il pannello infatti può flettere senza problemi.

4.5 Progettazione di ancoraggi contro l'azione del vento

4.5.1 J. P. Giroud

Esistono molti tipi di ancoraggi usati per le geomembrane nelle discariche: trincee, banchine, trincee a V e molti metodi per progettarle, nessuno dei quali fa però riferimento all'azione del sollevamento da vento. Giroud, con un articolo del 1999⁸² illustra invece il seguente metodo per il calcolo di ancoraggi per geomembrane esposte.

In questo metodo si considerano solo casi in cui l'ancoraggio è assicurato a gravità tramite il peso del materiale che va a formare la trincea o la banchina, non vengono

⁸² Design Of Geomembrane Anchorage against Wind Action” Technical Paper By J.P. Giroud, M.H. Gleason And J.G. Zornberg “Design Of Geomembrane Anchorage against Wind Action”

quindi considerate le altre forze che potrebbero fornire resistenza, come ad esempio, nel caso della trincea, le forze agli angoli e le pressioni attiva e passiva del terreno contro il lato verticale della trincea.

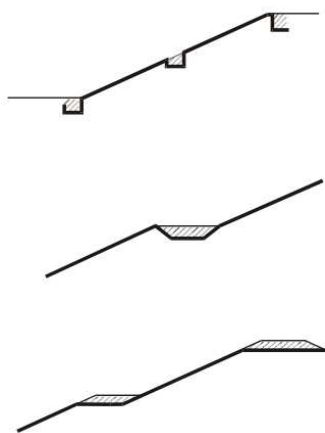


Figura 67: Configurazioni tipiche di ancoraggi

Nel progettare gli ancoraggi, bisogna porre attenzione a tre possibili meccanismi di rottura del sistema: la geomembrana può scivolare lungo il pendio, in alcuni casi anche trascinando con sé anche il terreno posto come zavorra di ancoraggio. Ciò può avvenire anche nel senso opposto alla pendenza del pendio, e quindi in salita, anche se risulta più difficile, nel caso in cui il vento provochi una forte tensione in tal senso. Infine può avvenire che il vento provochi il sollevamento della geomembrana e dell'intero sistema di ancoraggio, quando questo si sottodimensiona.

In questo studio si considera un ancoraggio a banchina. Si assume quindi

- che la geomembrana sia continua sotto il terreno di zavorra;
- che la forza di taglio nell'interfaccia tra la geomembrana e il terreno sottostante sia puramente attritiva, cioè caratterizzata da un angolo d'attrito δ e con adesione del terreno pari a zero;
- che la pendenza del terreno dove viene costruito il sistema di ancoraggio sia minima ($\tan\beta_a \sim 2\%$).

Ipotizzando un ancoraggio al centro del pendio, con geomembrana da entrambi i lati, si configura il seguente scenario:

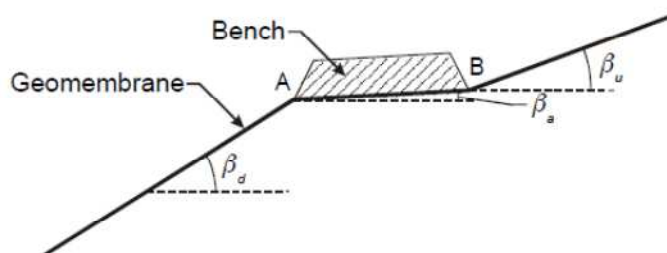


Figura 68: configurazione tipica di un banchina di ancoraggio

Quando non c'è vento, le sole forze interessate sono il peso (W) dell'ancoraggio e la reazione (R) del terreno. R è uguale e opposta a W e l'angolo α tra la direzione perpendicolare alla base dell'ancoraggio e la reazione R è uguale a β_a . Essendo ovviamente β_a minore di δ , l'ancoraggio non rischia di scivolare in assenza di vento. Quando soffia il vento, la geomembrana viene sollevata e va in tensione. Le forze in gioco diventano: il peso W dell'ancoraggio, la reazione R del terreno, le tensioni delle geomembrana T_d e T_u rispettivamente applicate dalla parte del pendio in discesa e dalla parte in salita. L'orientazione della geomembrana è caratterizzata dagli angoli θ_d e θ_u .

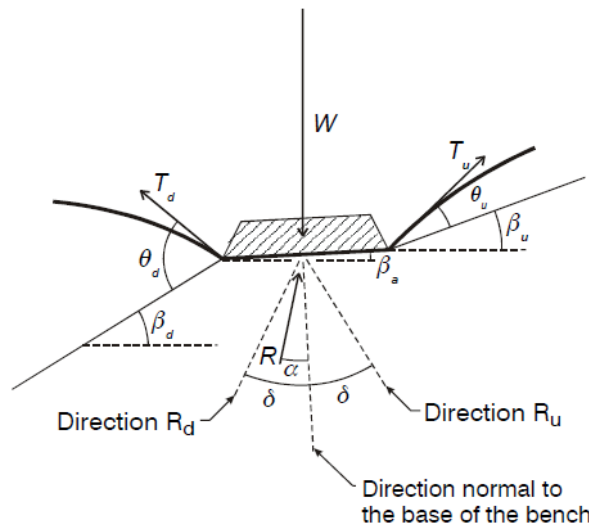


Figura 69: bilancio delle forze

In figura 70, le direzioni delle R_d e R_u indicano le due direzioni limite della risultante. Finché α sarà minore di δ non ci sarà scivolamento. Nel caso in cui la risultante formasse con la normale alla base della banchina un angolo maggiore δ , si assisterebbe allo scivolamento della membrana e quindi il sistema di ancoraggio risulterebbe mal dimensionato. Per progettare correttamente il peso richiesto dell'ancoraggio, sono state sommate le forze scomposte lungo la direzione di R e la sua normale, di modo da escludere R , che è ignota, dall'equilibrio. L'equilibrio così trovato è espresso dalle seguenti relazioni che indicano rispettivamente il peso minimo per evitare lo scivolamento giù dal pendio e il trascinamento su per il pendio:

$$W_{\min \text{ downslope}} = \frac{T_d \cos(\theta_d - \beta_d - \delta + \beta_a) - T_u \cos(\theta_u + \beta_u + \delta - \beta_a)}{\sin(\delta - \beta_a)} \quad (70)$$

$$W_{\min upslope} = \frac{-T_d \cos(\theta_d - \beta_d + \delta + \beta_a) + T_u \cos(\theta_u + \beta_u - \delta - \beta_a)}{\sin(\delta + \beta_a)} \quad (71)$$

Riguardo invece il caso di sollevamento dell'ancoraggio, andranno bilanciate le sole forze W e T e si ipotizzerà coesione del terreno pari a zero. Così facendo l'equilibrio sarà dato dalla relazione seguente:

$$W_{\min uplifting} = T_d \sin(\theta_d - \beta_d) + T_u \sin(\theta_u - \beta_u) \quad (72)$$

Questi equilibri non includono fattori di sicurezza. Si possono usare due metodi per introdurre un fattore di sicurezza. Il primo approccio consiste nell'usare un fattore di sicurezza globale (di solito $FS=1.5$) da applicare a $W_{\min}$

$$W_{factored} = FS W_{\min} \quad (73)$$

Il secondo approccio consiste nell'usare fattori di sicurezza parziali per tutti i parametri affetti da incertezza, ovvero le tensioni e i loro angoli. Tali forze sono però tra loro dipendenti, quindi i fattori dovrebbero andare applicati alle variabili che le governano, cioè velocità del vento, caratteristiche della geomembrana, temperatura. Infine assumendo che l'ancoraggio sia continuo in direzione perpendicolare al piano della sezione trasversale, l'area della sezione trasversale richiesta per l'ancoraggio è data dalla relazione:

$$A_{req} = W_{factored} / \gamma \quad (74)$$

Il rapporto tra la larghezza e l'altezza dell'ancoraggio dovrà essere di minimo 0.25.

Questo metodo risulta particolarmente conservativo riguardo all'uso, al posto di ancoraggi a banchina, di trincee di ancoraggio. Infatti l'unico meccanismo di resistenza allo scivolamento laterale considerato è l'attrito di interfaccia fra il terreno e la geomembrana. Nel caso di trincee invece, la pressione passiva nella trincea, che va in direzione opposta allo scivolamento, aggiunge resistenza allo scivolamento. Riguardo invece la rottura per sollevamento, non ci sono differenze.

Particolare attenzione dovrà essere posta però nella costruzione della trincea, essa dovrà avere le pareti verticali, in questo modo si assicura che la pressione applicata sulla geomembrana dalla trincea sia uniforme. Anche nel caso di ancoraggio a banchina si sottolinea come esso debba agire come un unico blocco, quindi durante la sua costruzione bisognerà aver cura di fare in modo che esso crei un carico più uniforme possibile sulla geomembrana.

4.5.2 Donald E. Hullings & Leonard J. Sansone

Delle equazioni classiche per la progettazione degli ancoraggi furono riassunte da Hullings e Sansone in un articolo scientifico del 1997⁸³. Tali formule, qui riportate, non sono adeguate per il calcolo di trincee nel caso di geomembrana esposta, ma possono comunque risultare utili per un confronto dei risultati. Le formule calcolano, a partire dai parametri riguardanti l'ancoraggio, la tensione massima che può tenere la geomembrana prima di cedere per scivolamento. Tali valori andranno confrontati con la tensione di progetto precedentemente calcolata.

- Ancoraggio semplice

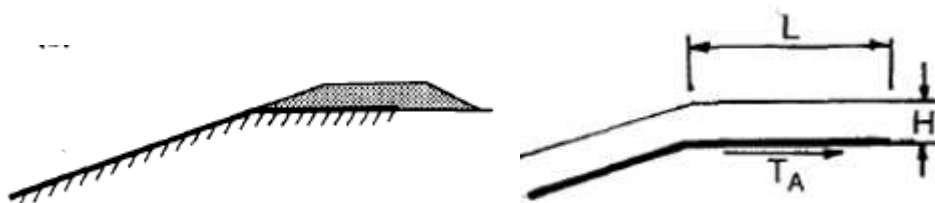


Figura 70: ancoraggio a banchina

$$T_a = L H \gamma_{soil} (\tan \delta_l) \quad (75)$$

- Trincea a V

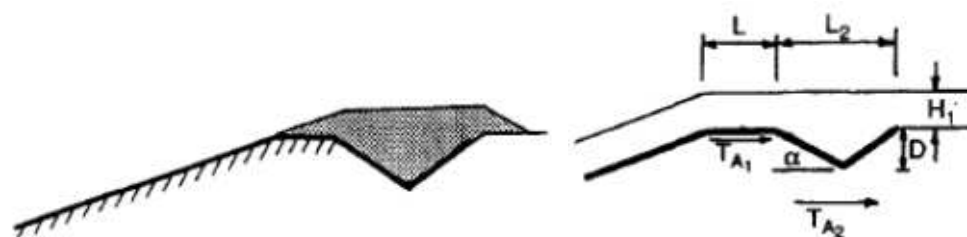


Figura 71: ancoraggio con trincea a V

La resistenza è la minore delle due calcolate con le seguenti relazioni:

$$T_a = L H \gamma_{soil} (\tan \delta_l) + \left[L_2 H_1 + \frac{L_2 D}{2} \right] \gamma_{soil} (\tan \delta_l + \tan \delta_u) \quad (76)$$

⁸³ "Design Concerns and Performance of Geomembrane Anchor Trenches" Donald E. Hullings* & Leonard J. Sansone. EMCON Associates, Inc. 1921 Ringwood Avenue, San Jose, CA 95131, USA

$$T_a = L H \gamma_{soil}(\tan\delta_l) + \left[L_2 H_1 + \frac{L_2 D}{2} \right] \gamma_{soil} (\cos\delta \tan\delta_l + \sin\alpha) \quad (77)$$

- Trincea rettangolare

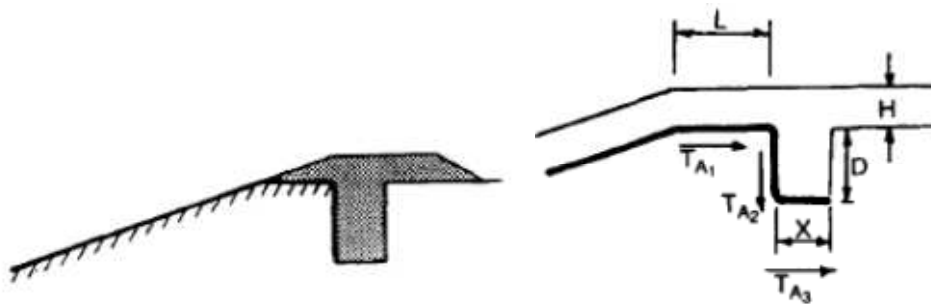


Figura 72: ancoraggio con trincea rettangolare

$$T_a = L H \gamma_{soil}(\tan\delta_l) + \left[(1 - \sin\phi) \gamma_{soil} \left(H + \frac{D}{2} \right) \right] (\tan\delta_l + \tan\delta_u) D + [X(H + D) \gamma_{soil}(\tan\delta_l + \tan\delta_u)] \quad (78)$$

4.5.3 R. M. Koerner

Uno degli approcci più utilizzato è quello di Koerner. Il metodo di Koerner si basa sull'analisi dell'equilibrio statico del problema.

Geomembrane

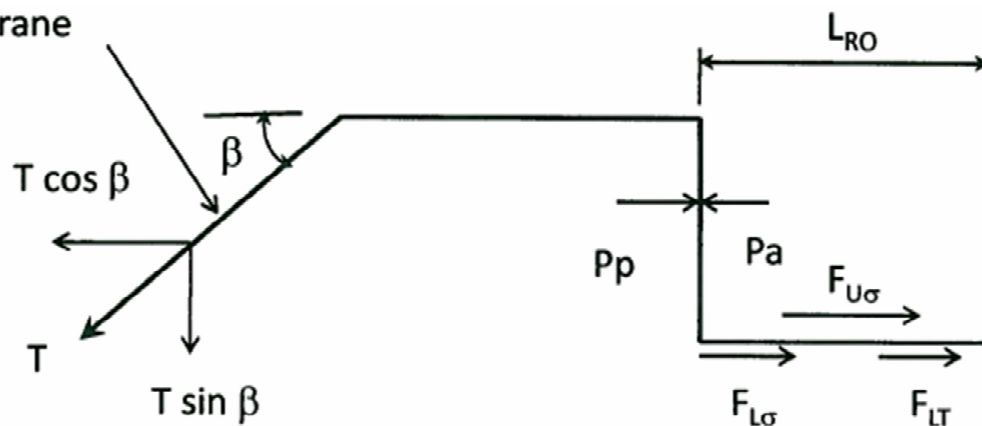


Figura 73: bilancio delle forze, metodo di Koerner

L'equazione per la determinazione della tensione ammissibile per evitare il fallimento dell'ancoraggio è:

$$\sum F_x = 0 \quad (79)$$

$$T_{allow} \cos\beta = F_{U\sigma} + F_{L\sigma} + F_{LT} - P_A + P_P \quad (80)$$

Con

- β = angolo della forza di tensione
- $F_{U\sigma}$ = sforzo di taglio sopra la geomembrana dovuto al terreno di copertura.
Definito come:

$$F_{U\sigma} = \sigma_n \tan\delta L_{RO} \quad (81)$$

Dove

$$\sigma_n = \gamma_t D_t \quad (82)$$

E con

- o δ = angolo di frizione nell'interfaccia geomembrana-terreno
- o L_{RO} = lunghezza della trincea
- $F_{L\sigma}$ = sforzo di taglio sotto la geomembrana dovuto al terreno di copertura, definito come

$$F_{L\sigma} = \sigma_n \tan\delta L_{RO} \quad (83)$$

- F_{LT} = sforzo di taglio sotto la geomembrana dovuto alla componente verticale della tensione, definito come

$$F_{LT} = T_{allow} \sin\beta \tan\delta \quad (84)$$

- P_A = pressione attiva del terreno contro il lato verticale della trincea, definita come

$$P_A = 0.5\gamma_t D_t^2 K_a \quad (85)$$

Con

$$K_a = \left[\tan \left(45deg - \frac{\phi}{2} \right) \right]^2 \quad (86)$$

- P_p = pressione passiva del terreno contro il lato verticale della trincea, definita come

$$P_p = 0.5 \gamma_t D_t^2 K_p \quad (87)$$

Con

$$K_p = \left[\tan \left(45deg + \frac{\phi}{2} \right) \right]^2 \quad (88)$$

Essendo F_{LT} funzione di T_{allow} , l'equilibrio si può semplificare come segue

$$T_{allow} = \frac{(F_{U\sigma} + F_{L\sigma} - P_A + P_p)}{\cos \beta - \sin \beta \tan \delta} \quad (89)$$

La tensione così trovata andrà confrontata con quella di progetto e andranno calibrati i parametri di modo che la risulti maggiore della stessa.

4.5.4 P. Villard & B. Chareyre

Molti dei metodi per progettare le trincee di ancoraggio considerano solo la resistenza al taglio lungo la superficie piana della trincea e si assume che non ci siano sforzi di frizione negli angoli. Col seguente metodo invece, si tengono in considerazione anche gli sforzi agenti negli angoli, questo permette di migliorare da un punto di vista ingegneristico il calcolo, andando a diminuire le dimensioni necessarie e quindi i costi. È intuitivo dire che più angoli ci saranno nella trincea, migliore sarà la sua resistenza. Il metodo migliore per la progettazione delle trincee è stato sviluppato da Villard & Chareyre nel 2004 usando una combinazione di ragionamenti analitici, modellazioni agli elementi finiti e test in laboratorio. Tale metodo è basato sull'equazione di Euler-Eytelwein, detta anche formula dell'attrito della corda, per l'attrito di una corda che scivola attorno a un cilindro. Il metodo che verrà di seguito illustrato, sviluppato da R. Thiel, è un completamento e miglioramento del metodo di Villard & Chareyre.

Per lo sviluppo del modello analitico di studio per una trincea a V si usano i seguenti diagrammi al corpo libero

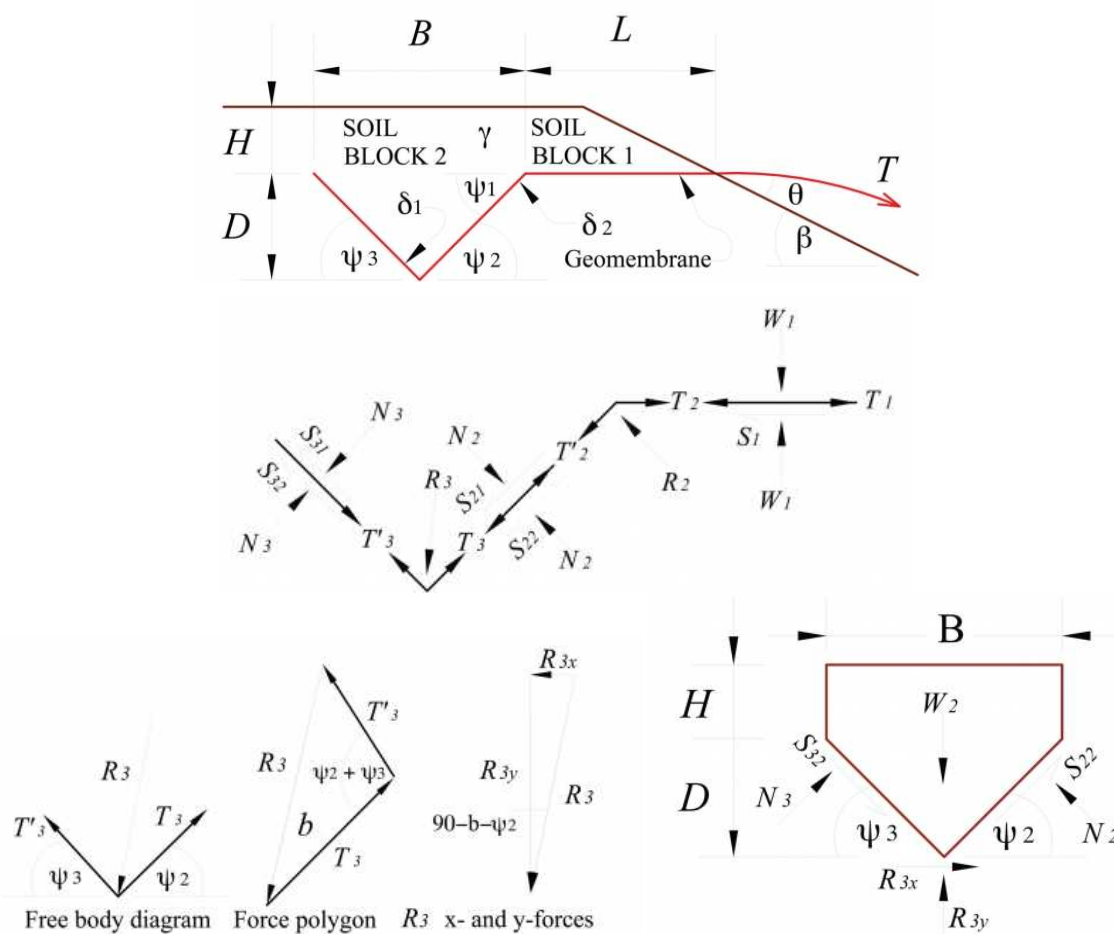


Figura 74: Diagrammi a corpo libero, R. Thiel

L'obiettivo è quello di calcolare T_1 , la quale andrà poi confrontata con la tensione di progetto. Le seguenti nomenclature sono state usate per le varie forze:

- W_i = peso del terreno sopra la geomembrana
- S_i = sforzo di taglio lungo l'interfaccia geomembrana-terreno
- R_i = forza risultante nell'angolo
- N_i = forza normale rispetto alla geomembrana
- T_i = tensione nel segmento di geomembrana
- δ_1 e δ_2 gli angoli di frizione nell'interfaccia geomembrana-terreno rispettivamente superiore e inferiore

La tensione T_3 alla fine della geomembrana può essere espressa come:

$$T'_3 = S_{31} + S_{32} = N_3(\tan\delta_1 + \tan\delta_2) \quad (90)$$

Si è tentati di pensare che N_3 possa essere direttamente calcolata dal peso del blocco di suolo numero 2. Si tratta di un presupposto errato che viene fatto in altri metodi

semplificati in letteratura. Una valutazione più rigorosa dell'equilibrio statico rivela una relazione più complicata. Dall'equazione di Euler-Eytelwein abbiamo che la relazione tra le forze agli angoli è:

$$T_3 = T'_3 e^{(\psi_2 + \psi_3) \tan \delta_1} \quad (91)$$

Che, posto

$$K_3 = e^{(\psi_2 + \psi_3) \tan \delta_1} \quad (92)$$

Diventa

$$T_3 = K_3 T'_3 \quad (93)$$

La risultante R_3 può essere risolta usando la legge dei coseni come segue:

$$R_3 = T'_3 C_3 \quad (94)$$

Dove

$$C_3 = [1 + K_3^2 - 2K_3 \cos(\psi_2 + \psi_3)]^{0.5} \quad (95)$$

L'angolo b può essere risolto usando l'equazione dei seni:

$$b = \sin^{-1}[\sin(\psi_2 + \psi_3)/C_3] \quad (96)$$

A questo punto si possono trovare le componenti di R_3

$$R_{3x} = T'_3 C_3 \sin(90 - b - \psi_2) \quad (97)$$

$$R_{3y} = T'_3 C_3 \cos(90 - b - \psi_2) \quad (98)$$

Facendo ora gli equilibri lungo x e lungo y si arriva a:

$$N_2 \sin \psi_2 = S_{21} \cos \psi_2 + S_{31} \cos \psi_3 + N_3 \sin \psi_3 + R_{3x} \quad (99)$$

$$N_2 \cos \psi_2 + N_3 \cos \psi_3 + R_{3y} + S_{21} \sin \psi_2 = W_2 + S_{31} \sin \psi_3 \quad (100)$$

Lavorando sulle equazioni si può arrivare a scrivere

$$N_2 = T'_3 C_5 \quad (101)$$

Dove

$$C_5 = \left(\frac{1}{\sin\psi_2 - \tan\delta_1 \cos\psi_2} \right) \left[\left(\frac{\tan\delta_1 \cos\psi_3}{\tan\delta_1 + \tan\delta_2} \right) + \left(\frac{\sin\psi_3}{\tan\delta_1 + \tan\delta_2} \right) + C_3 \sin(90 - b - \psi_2) \right] \quad (102)$$

E

$$T'_3 = W_2 C_6 \quad (103)$$

Dove il peso del blocco di terreno (W_2) si può facilmente calcolare dalla geometria del problema e dove

$$C_6 = \left[C_5 \cos\psi_2 + \frac{\cos\psi_3}{\tan\delta_1 + \tan\delta_2} + C_3 \cos(90 - b - \psi_2) + C_5 \tan\delta_1 \sin\psi_2 - \left(\frac{\tan\delta_1 \sin\psi_3}{\tan\delta_1 + \tan\delta_2} \right) \right]^{-1} \quad (104)$$

Una volta quindi calcolati T'_3 e T_3 e N_2 , e allo stesso modo S_{21} e S_{22} , si può arrivare a T_2

$$T'_2 = T_3 + S_{21} + S_{22} \quad (105)$$

Ora, come effettuato prima per l'angolo 3, dato

$$K_2 = e^{\psi_1 \tan\delta_2} \quad (106)$$

Si ottiene

$$T_2 = K_2 T'_2 \quad (107)$$

Il che permette di arrivare al calcolo di T_1

$$T_1 = T_2 + S_1 = T_2 + W_1 \tan\delta_2 \quad (108)$$

Il peso del blocco di terreno 1 (W_1) si può facilmente calcolare usando il peso specifico del terreno e la geometria. In realtà esiste un altro angolo che fornisce resistenza, quello tra la direzione della tensione e l'orizzontale (Θ), ma, a favore di sicurezza, viene considerato pari a β cosicché non offra alcuna resistenza. Il valore di T così trovato andrà confrontato con la tensione cui è sottoposta la geomembrana, calcolata tramite il metodo di Giroud.

4.5.5 Progettazione ancoraggi

Per progettare gli ancoraggi per la geomembrana in oggetto, è stato realizzato un foglio di calcolo dove vengono calcolate le tensioni massime che possono sopportare gli ancoraggi calcolati con tutti i metodi esposti precedentemente.

Escludendo l'ipotesi di costruire banchine di ancoraggio, si sono quindi cercate le dimensioni delle trincee che assicurassero la tenuta alla tensione di progetto di 7 kN/m con tutti i metodi di calcolo.

È stata ipotizzata una trincea rettangolare, di profondità 1 m e larghezza 0,5 m

Progettazione ancoraggi	
Dimensioni	
Larghezza	1 m
Profondità	0,5 m
Tensioni massime	
Trincea con Giroud	6,95 kN/m
Banchina con Hullings e Sansone	7,18 kN/m
Trincea a V con Hullings e Sansone	9,13 kN/m
Trincea rettangolare con Hullings e Sansone	16,3 kN/m
Trincea rettangolare con Koerner	39,7 kN/m
Trincea a V con Richard Thiel	7,08 kN/m

Tabella 9: parametri e risultati della progettazione degli ancoraggi

Come già visto in precedenza però, i calcoli di Giroud per il calcolo degli ancoraggi, nel caso di una trincea, sono troppo cautelativi. Scegliendo una trincea rettangolare, i metodi di calcolo più corretti da usare sono quelli di Hullings e di Koerner. Si è quindi progettata una trincea di larghezza 1m e profondità 0,5 m.

4.6 Scelta del modulo fotovoltaico

La trattazione di questo capitolo e delle parti di capitoli precedenti e successivi di carattere elettrotecnico specialistico non attinente la mia preparazione universitaria, è stata desunta da informazioni ottenute da una società specializzata nel settore della progettazione di impianti fotovoltaici.

Riguardo la scelta del pannello, dopo aver fatto tutte le considerazioni illustrate nei capitoli precedenti⁸⁴, si è optato per dei pannelli flessibili a film sottile CIGS denominati PowerFLEX Module⁸⁵. Questi sono pannelli, i quali offrono le performance migliori tra i pannelli a film sottile. Questi pannelli hanno un'efficienza del modulo del 15,45% e del 13,2% della stringa e pesano solo 2,5 kN/m². Hanno inoltre dimostrato, in applicazioni precedenti, ottime performance anche rispetto ad altre tecnologie come illustrato nei grafici seguenti, dove si mostra che la produzione di energia rispetto a un pannello in silicio amorfo è sostanzialmente nulla:

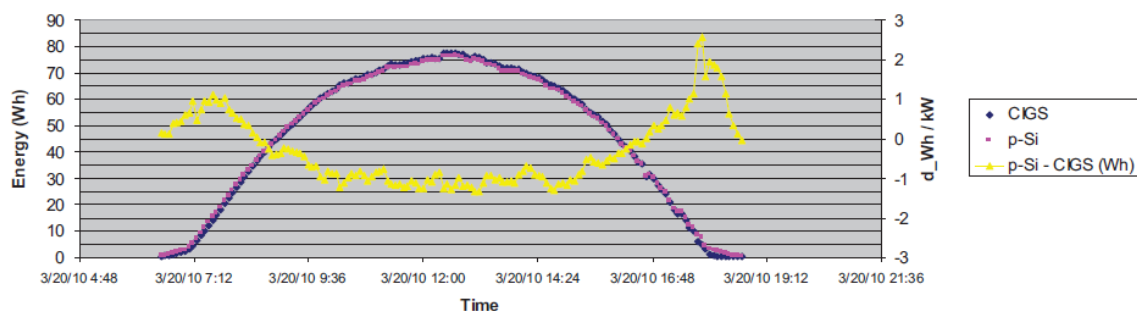


Figura 75: Confronto fra la produzione annuale di un pannello CIGS e di un pannello in silicio amorfo. In viola la curva riferita al pannello in silicio amorfo. In blu la curva riferita al pannello CIGS. In giallo la differenza di produzione

⁸⁴ Capitolo 2.2

⁸⁵ Informazioni trovate al sito <http://www.globalsolar.com/>

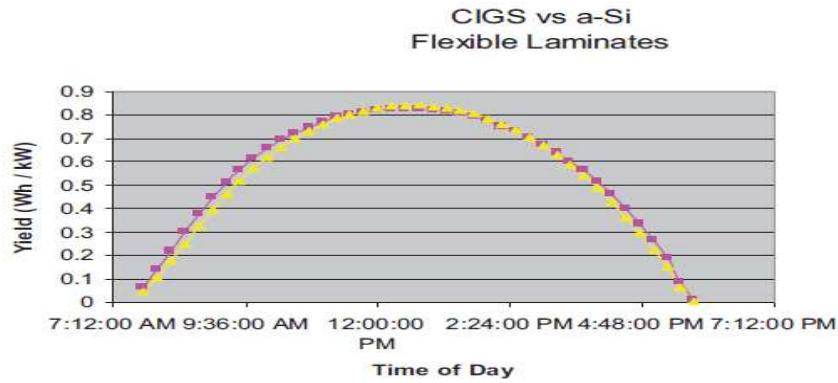


Figura 76: Confronto fra la resa giornaliera di un pannello in silicio amorfo (curva gialla) e CIGS (curva viola)

Il pannello Powerflex, combinando un peso ridotto, una elevata efficienza e una configurazione di montaggio semplice e economica, risulta essere la migliore nel mercato soluzione come rendimento rispetto all'area coperta e come rendimento rispetto al peso. I seguenti grafici riportano i dati relativi a esperienze di installazione dei CIGS, confrontandoli con i risultati ottenuti dalle altre tecnologie:

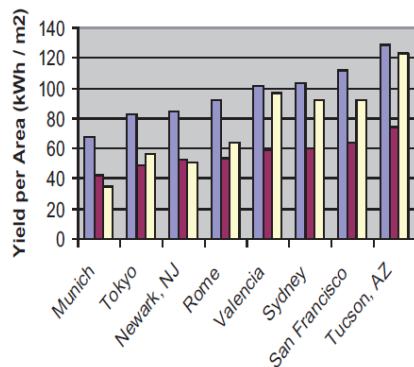


Figura 77: Confronto della resa per area occupata Tra CIGS (in blu), silicio amorfo (rosso), silicio cristallino (bianco) in diverse applicazioni

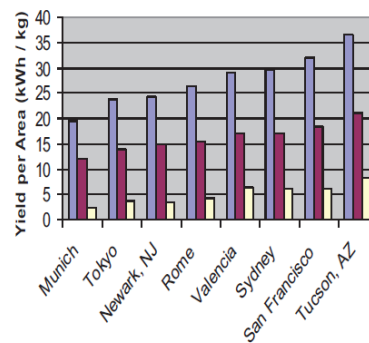


Figura 78: Confronto della resa rispetto al peso tra CIGS (in blu), silicio amorfo (rosso), silicio cristallino (bianco) in diverse applicazioni

I moduli hanno inoltre dimostrato un'eccellente stabilità e affidabilità dopo anni di produzione in campo, come illustrato dei seguenti grafici relativi a un'installazione fatta a Tucson (Arizona)

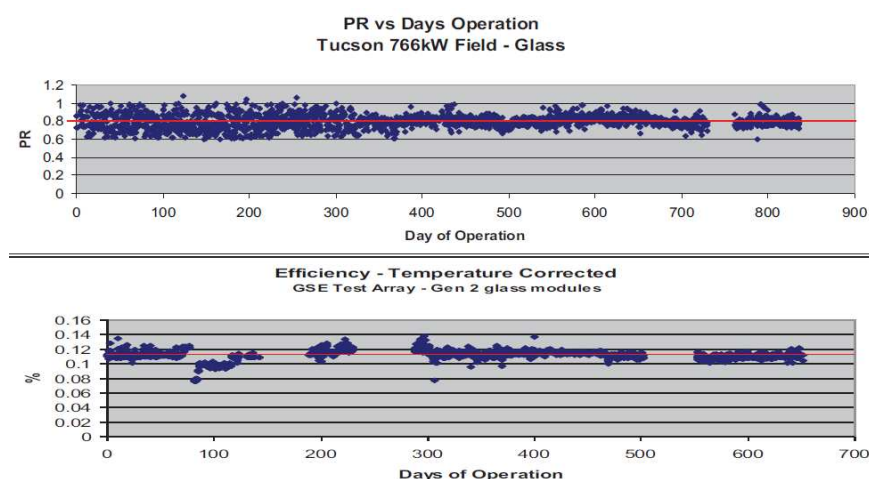


Figura 79: Mantenimento delle prestazioni e dell'efficienza dei moduli CIGS in un'applicazione a Tucson

Riguardo i citati vantaggi nell'uso di CIGS riguardo l'efficienza a bassa intensità di luce e a temperature elevate, questi sono confermati dalle esperienze in campo, riassunte nei grafici che seguono.

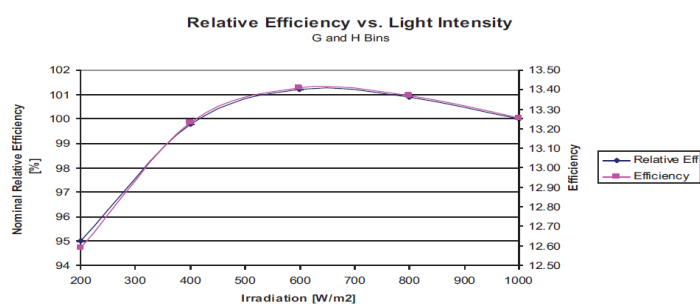


Figura 80: Confronto fra l'efficienza nominale e l'efficienza effettiva al variare dell'irradiazione solare

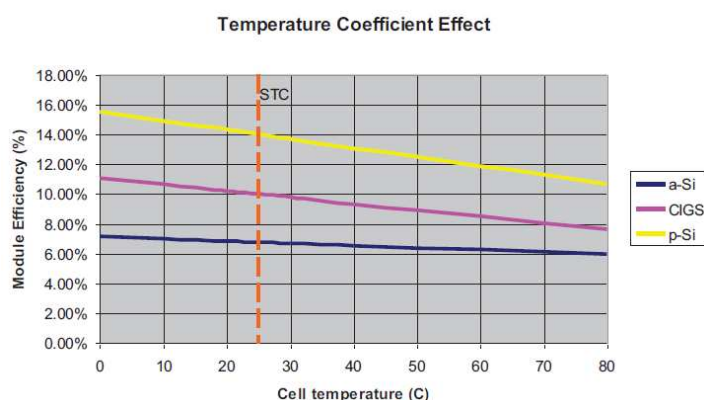


Figura 81: Diminuzione dell'efficienza dei moduli dovuto all'aumento di temperatura

Altri grossi vantaggi dei CIGS riguardano la loro capacità di assorbire e convertire un ampio spettro di lunghezza d'onda. Il che permette ai pannelli di produrre energia per tutta la durata del giorno, dal mattino al tardo pomeriggio, cosa che la maggior parte dei pannelli non può fare.

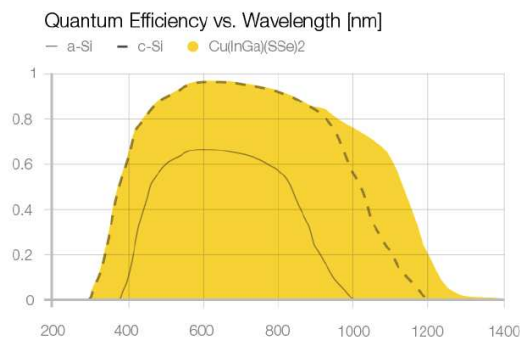


Figura 82: Variazione dell'efficienza al variare della lunghezza d'onda della luce

In più i pannelli Powerflex hanno la particolare capacità di “intrappolare” la luce, così da produrre energia, anche se sono posizionati con angoli di incidenza non ottimali.

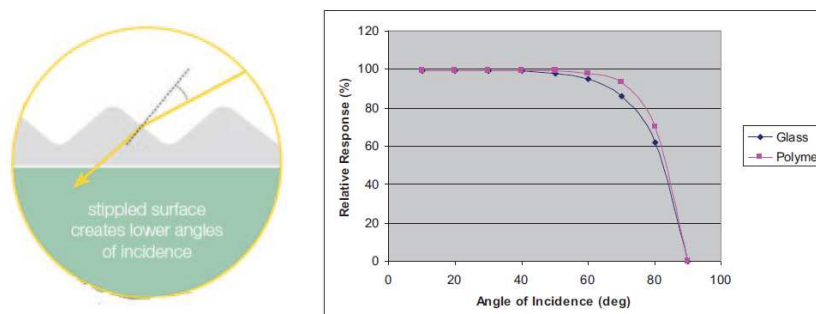


Figura 83: Variazione della risposta del pannello al variare dell'angolo di incidenza della luce

Per il dettaglio delle caratteristiche tecniche del pannello, si rimanda alla scheda tecnica.

4.7 Sistemazione della copertura esistente

Per l'installazione della copertura con geomembrana esposta e dell'impianto fotovoltaico, si rende necessario fare un lavoro preventivo di sistemazione del terreno di posa. In particolare andranno sistemati gli avvallamenti creatisi negli anni a causa dei cedimenti e si dovrà garantire una pendenza minima del 3% su tutta la parte del pendio interessata dalla copertura con geomembrana esposta. In questo capitolo viene illustrata la scelta relativa a quale zona della discarica coprire con l'EGCS e sono state analizzate le operazioni necessarie per la sistemazione ottimale del pendio per ospitare tale opera.

Dopo aver analizzato la planimetria dello stato attuale della discarica, si è scelta la zona più adatta per l'installazione dell'EGCS.



Figura 84: planimetria stato di fatto della discarica

Tale scelta è stata fatta in base a diverse osservazioni, la principale delle quali è che la discarica presenta, nelle quote minori, presenza di alberature; mentre nelle parte sommitale non vi è presenza di vegetazione arborea. Si è quindi optato, rispettando la scelta iniziale di ricomposizione ambientale, di non installare la nuova copertura nelle zone già alberate, zone tra l'altro già collaudate positivamente. La copertura a geomembrana esposta si estenderà dunque nella sola zona dove non vi è la presenza di alberature e identificata nella figura seguente dalla zona verde.

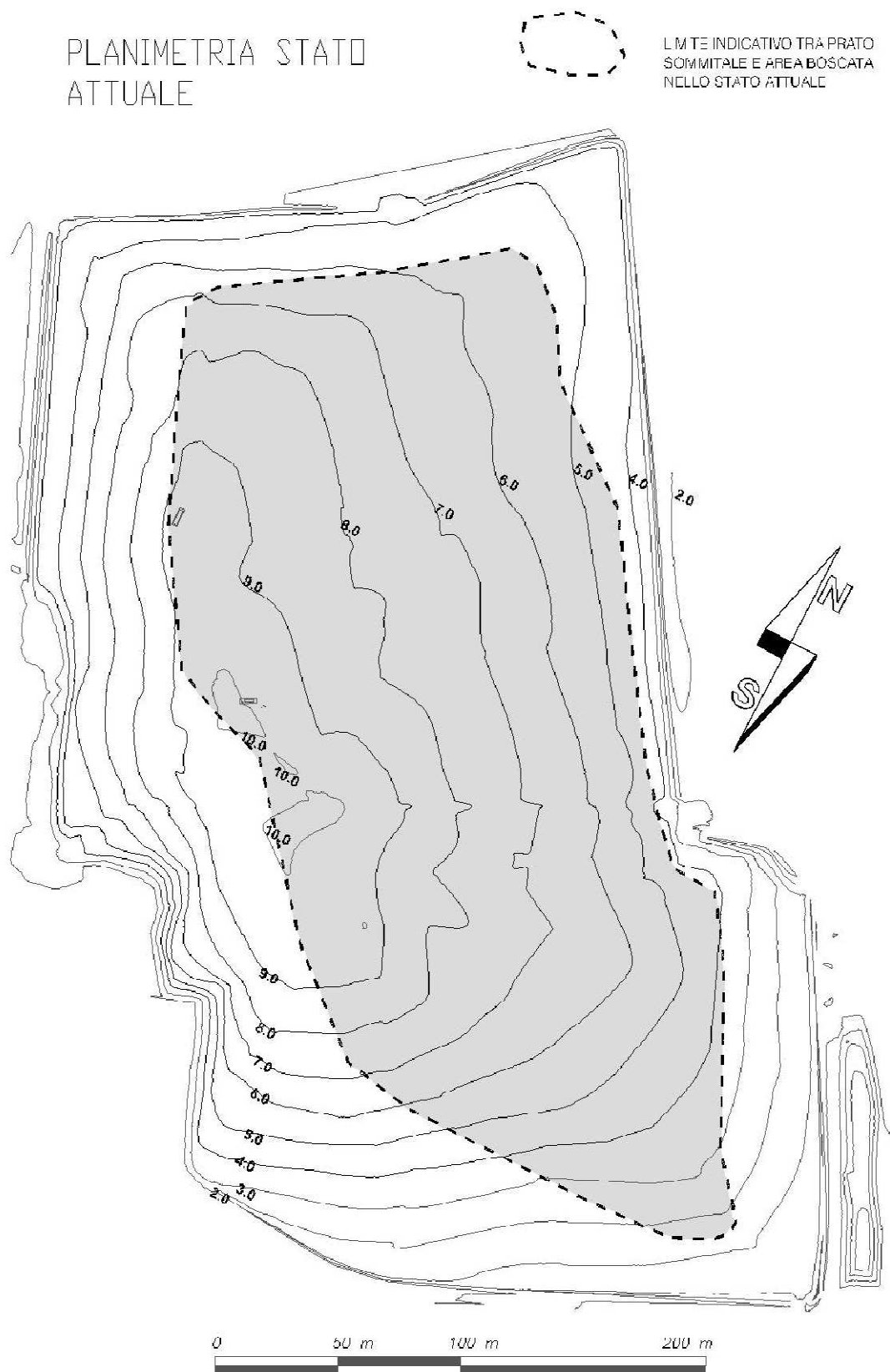


Figura 85: Planimetria stato di fatto della discarica. In evidenza la superficie di intervento del progetto

La zona necessita di essere sistemata apportando terreno per garantire una pendenza minima del 3% e per sistemare gli eventuali avvallamenti che possono essersi formati a seguito dei cedimenti. Bisognerà inoltre apportare terreno, nei punti dove sia richiesto, per assicurare i 60cm di protezione dal gelo per l'argilla precedentemente calcolati ⁸⁶. Per permettere un miglior funzionamento dell'impianto fotovoltaico, si necessita oltretutto di dividere la zona in lotti con pendenza e orientamento costante. Questo perché è necessario che tutti i pannelli connessi in serie allo stesso inverter lavorino alle stesse condizioni per ottimizzare il funzionamento dell'inverter. Infatti se due pannelli hanno esposizioni diverse, l'inverter lavora come quello che produce meno, andando così a non sfruttare a pieno la produzione di energia del pannello esposto in maniera migliore.

Per assicurare la pendenza minima del 3% e l'ottimizzazione dell'uso degli inverter, si rende necessario l'apporto e la sistemazione di terreno che porti alla nuova planimetria illustrata di seguito. Il terreno utilizzato per il riporto sarà terreno limoso a basso costo, esso non dovrà infatti avere particolari caratteristiche essendo l'impermeabilità demandata alla geomembrana e alla barriera argillosa. Tale barriera, essendo già stata collaudata, non andrà modificata. Ci si limiterà ad assicurare le pendenze e lo strato minimo contro il gelo grazie all'adeguato apporto di materiale. In particolare, essendo la configurazione di progetto a maggior pendenza della situazione attuale e volendo assicurare uno strato minimo di 60cm di terreno a protezione dal gelo in ogni punto, ci saranno zone, soprattutto verso la sommità del pendio, con strati di terreno superiori ai 60cm. Ciò, anche se comporta un costo, è inevitabile per assicurare protezione all'argilla e contemporaneamente una stessa pendenza ai pannelli del medesimo lotto.

⁸⁶ Capitolo 4.1.1

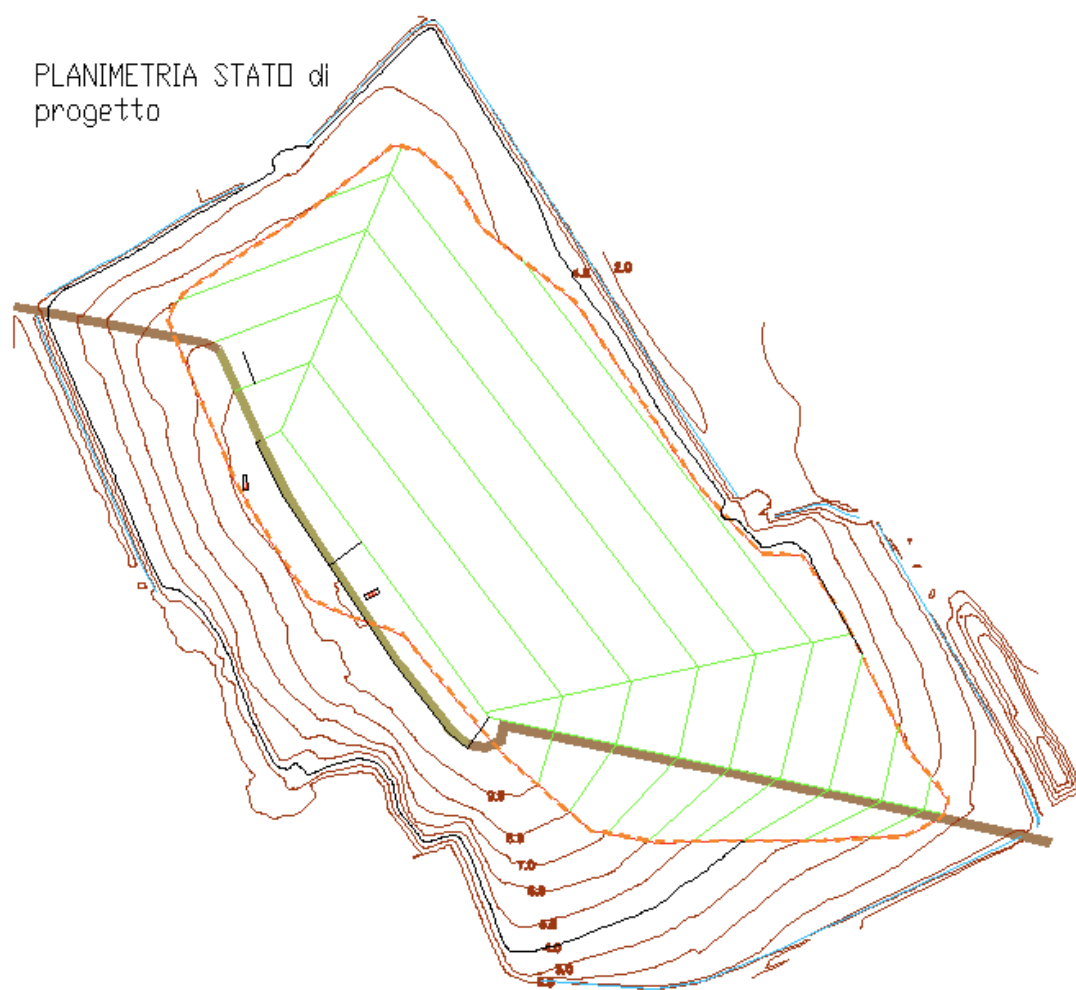


Figura 86: planimetria discarica con pendenze sistemate per ospitare l'impianto fotovoltaico

Si rende necessario quindi calcolare il volume di terra necessario per effettuare tale modifica. Per fare ciò si è discretizzata la discarica secondo le linee altimetriche ipotizzando una variazione lineare tra una isoipsa e quella successiva. Si sono così creati due solidi rappresentanti la discarica allo stato attuale e la discarica allo stato di progetto. Da un confronto tra i volumi di questi solidi si è calcolato il volume di terra necessario per la sistemazione del sito, pari a circa 10 mila m^3 .

Di seguito viene riportato il confronto in planimetria e in sezioni tra lo stato attuale della discarica e lo stato di progetto.

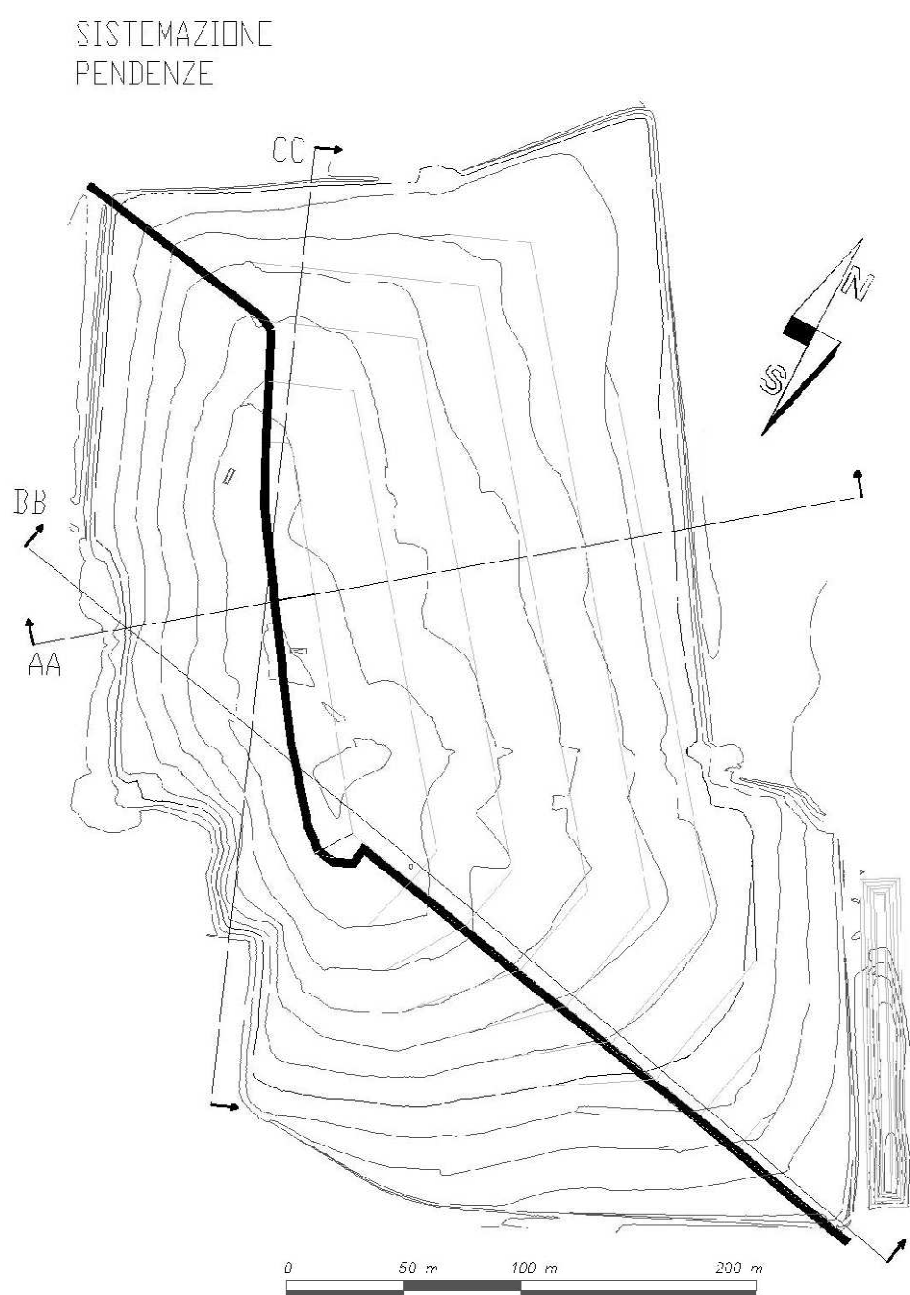


Figura 87: confronto fra planimetria stato di fatto e planimetria stato di progetto

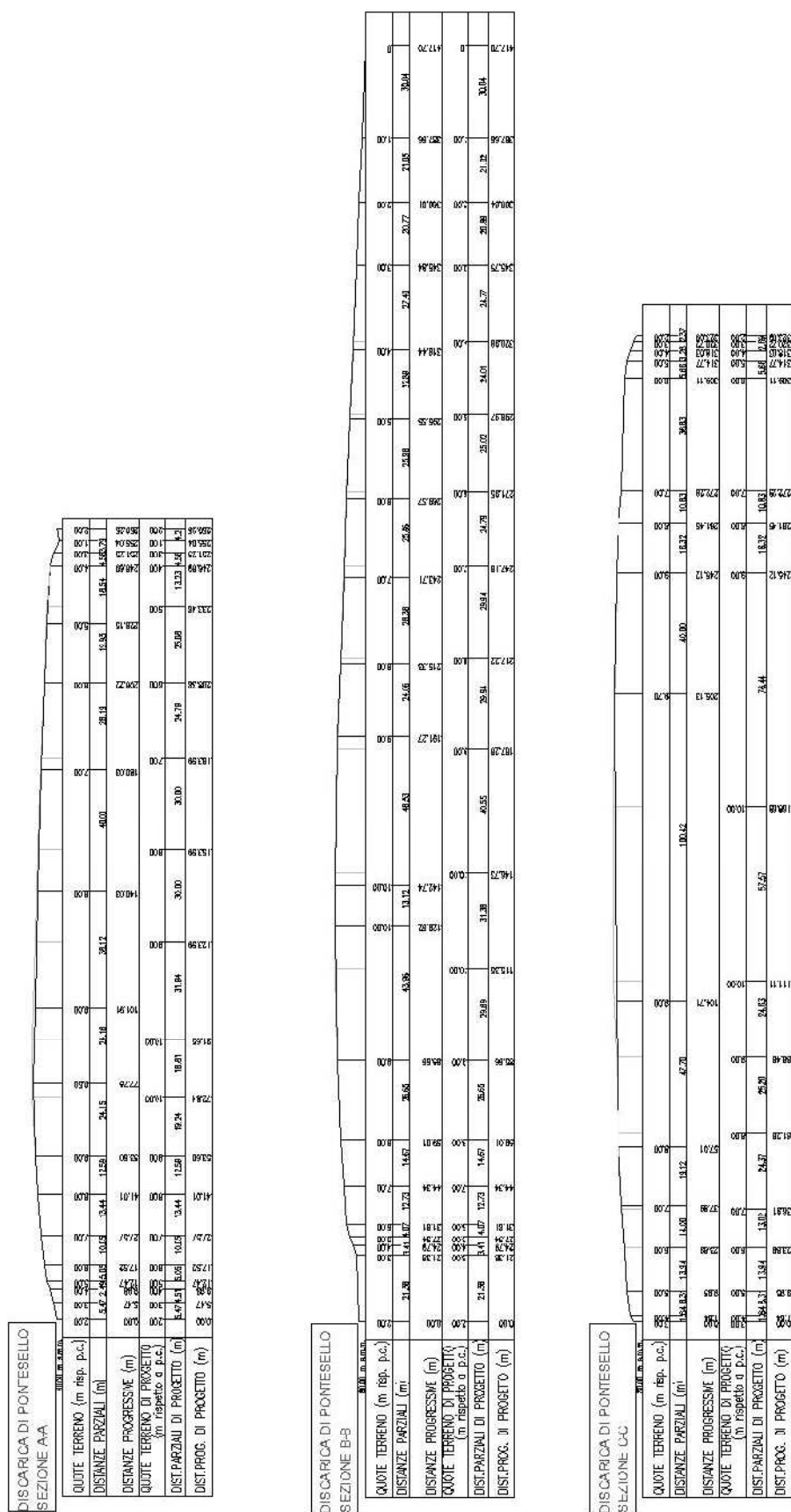


Figura 88: Confronto fra le sezioni. In verde lo stato di progetto, in nero lo stato di fatto

4.8 Planimetria dell'impianto fotovoltaico

La disposizione dei pannelli fotovoltaici sopra la geomembrana deve tener conto di vari aspetti. Si è già discusso dell'importanza di lasciare parti di geomembrana libere dai pannelli per permettere a questa di potersi deformare a seconda delle tensioni a cui viene sottoposta. Altra considerazione riguarda la distanza tra i pannelli che deve essere abbastanza grande da lasciare la possibilità di manutenzione per ogni singolo pannello. Altro particolare di non poca importanza riguarda la loro vicinanza alle trincee dove dovranno passare i cavi, bisogna cercare di minimizzare i tratti di collegamento tra i pannelli e le trincee. Infatti in questi punti i cavi elettrici non potranno essere interrati e bisognerà provvedere a delle canalette di protezione per gli stessi in quanto risulta inadeguato lasciare i cavi esposti senza protezioni. Infine va fatta una considerazione dal punto di vista elettrico.

I pannelli hanno una potenza di picco di 275 Wp e gli inverter che verranno utilizzati hanno una potenza nominale di 100 kW. Bisognerà quindi cercare di disporre i pannelli in modo da ottimizzare il funzionamento degli inverter. Gli inverter che verranno utilizzati su questo impianto sono da 100 kW⁸⁷. Dallo schema unifilare dell'inverter si evince che questo è suddiviso in 3 moduli, ognuno dei quali gestisce 11 stringhe da 11 moduli fotovoltaici, per un totale di 363 moduli per ogni inverter. Ecco che quindi la disposizione dei pannelli, per ottimizzare il funzionamento degli inverter, dovrà far sì che per ogni lotto siano presenti moduli in pari o multiplo di 363.

Ricapitolando le scelte fatte per la disposizione dei pannelli si può quindi fare il seguente elenco:

- Ogni pannello dista da quello adiacente di 50 cm
- Ogni pannello dista dalla più vicina trincea di 25 cm
- I lotti hanno un numero di pannelli multiplo di 363

Nel lotto 1 è stata progettata la posa di 726 moduli fotovoltaici e 2 inverter, nel lotto 2 5.082 moduli e 14 inverter, nel lotto 3 1.089 moduli e 3 inverter. Si è riusciti così a posizionare nell'area interessata 6.897 moduli fotovoltaici per una potenza nominale dell'impianto pari a 1.897 kWp. Per tale realizzazione si rendono necessari 19 inverter.

⁸⁷ Il tipo di inverter e tutte le informazioni relative sono state ricavate dal sito: <http://www.socomec.it>

PLANIMETRIA STATO DI PROGETTO

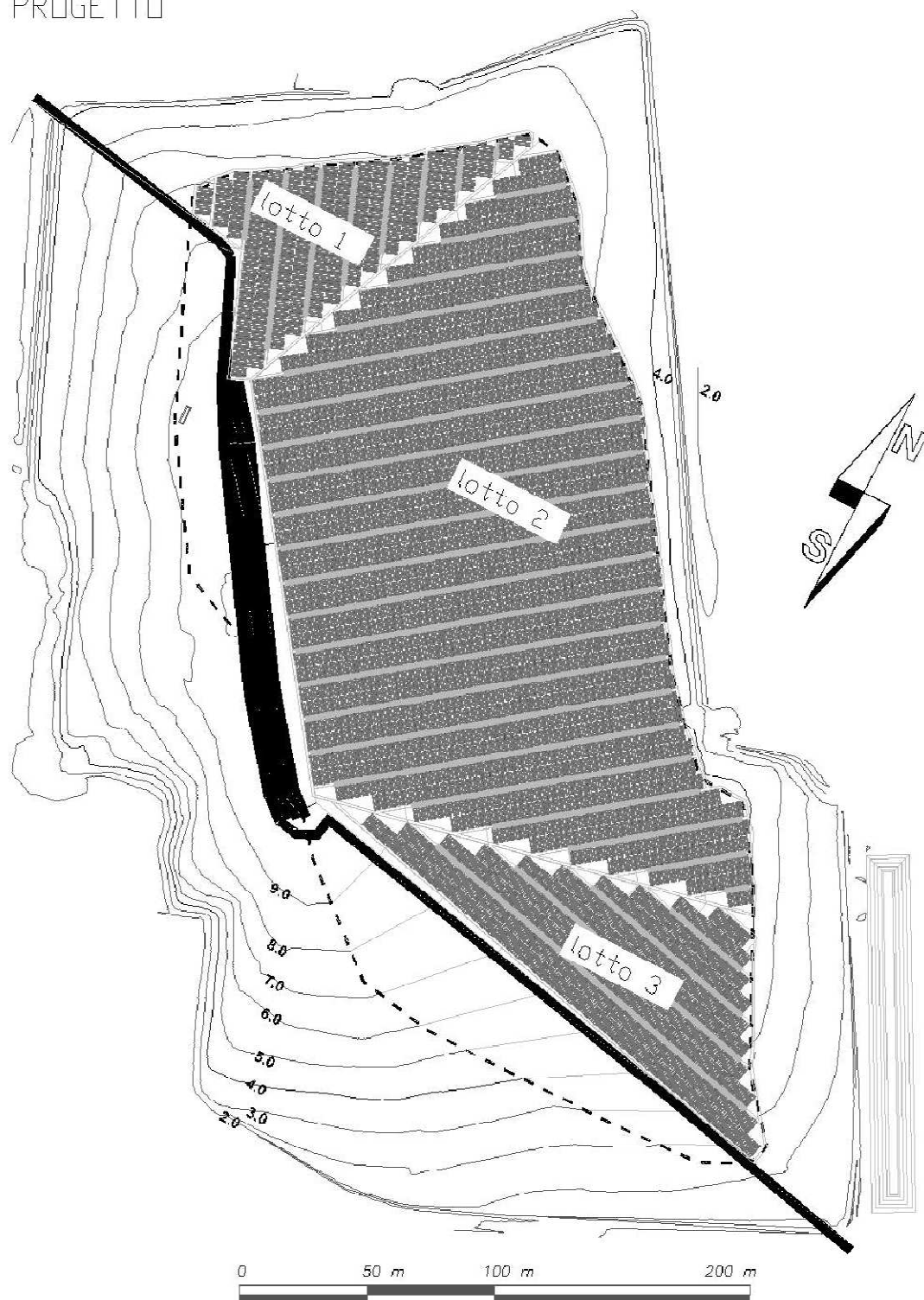


Figura 89: Planimetria della disposizione dei pannelli nello stato di progetto

4.9 L'elemento di copertura Riopower

Per l'accoppiamento tra i pannelli fotovoltaici e la geomembrana, si è utilizzato un brevetto della ditta Energyka Srl denominato Riopower.

Riopower è un sistema di copertura e impermeabilizzazione con moduli fotovoltaici integrati. Consiste in una membrana monostrato in TPO, sulla quale viene collegata per saldatura a caldo una superficie fotovoltaica flessibile, accoppiata quindi senza l'utilizzo di adesivi. L'uso di colle non dà mai garanzia di lunga tenuta, l'esposizione alle intemperie ed agli sbalzi termici ne riducono notevolmente la vita e costringono ad interventi di manutenzione costosi e indesiderati. Il sistema è stato specificatamente sviluppato per assicurare un'integrazione ottimale della funzione fotovoltaica con quella impermeabile.

Si prevede la posa di una membrana sullo strato superiore della copertura e il fissaggio dei moduli fotovoltaici sulla membrana stessa mediante accoppiamento termico da realizzare sul perimetro dei moduli. La membrana impermeabile impiegata per questa tipologia di copertura dovrà realizzarsi in TPO dello spessore minimo di mm 2,0, accoppiata a feltro di supporto in tessuto non tessuto di poliestere con grammatura minima di g/mq 200.

I moduli fotovoltaici a film sottile CIGS vengono resi solidali al sottostante manto in TPO, come detto precedentemente, mediante la saldatura dei bordi perimetrali (2,5 cm di saldatura sul perimetro esterno dei moduli) con apparecchio automatico a controllo elettronico con velocità di avanzamento e temperatura di saldatura variabili, in funzione delle condizioni meteorologiche e dell'umidità relativa al momento della applicazione. I moduli fotovoltaici a film sottile CIGS diventano solidali alla membrana TPO e, dopo test in laboratorio, si può affermare che resistono alle sollecitazioni derivate dall'azione dinamica del vento in depressione, con valori di resistenza ad estrazione (pelatura) che raggiungono i 7 KN/m², secondo la norma UNI EN 12316-2. Le sovrapposizioni laterali tra i teli prefabbricati, a cimosa libera, senza supporto di feltro non tessuto in poliestere, sono saldate per termofusione ad aria calda, previo trattamento con idoneo pulitore in Acetato di Etila delle superfici da accoppiare. L'aderenza tra i bordi del modulo fotovoltaico e la sottostante membrana in TPO previene la presenza di infiltrazioni tra la membrana ed il modulo fotovoltaico stesso, consentendo l'installazione del sistema su coperture con pendenze minime (fino ad un grado di pendenza minima) con lento deflusso delle acque meteoriche senza pregiudicare il corretto funzionamento.

4.10 Produzione energetica

Per il calcolo della produzione energetica dell'impianto è stato usato un simulatore online del progetto SOLAREC⁸⁸ che stima la produzione teorica di un impianto fotovoltaico a seconda delle sue caratteristiche. Il simulatore utilizza il PVGIS⁸⁹ che è parte del progetto SOLAREC dell'unione europea. Si è scelto di usare questo simulatore, oltre che per l'autorevolezza degli sviluppatori, anche per la bontà delle previsioni riscontrate in esperienza precedenti. È stata fatta una simulazione per ognuno dei 3 lotti in cui è stato suddiviso l'impianto, in quanto ogni lotto, avendo potenze installate e orientazioni diverse, avrà una resa differente.

Il simulatore richiede come dati di ingresso:

- La localizzazione del sito, per la quale si può utilizzare una mappa interattiva,
- La tecnologia di fotovoltaico usato che le caso in esame è CIGS⁹⁰
- La potenza di picco installata espressa in kWp che varierà per ogni lotto
- Una stima delle perdite di sistema che il simulatore suggerisce pari al 14% e che si riferiscono all'insieme delle perdite che si verificano tra l'energia prodotta direttamente dai pannelli e l'energia che è resa poi disponibile all'immissione in rete.
- La posizione di montaggio, in questo caso sarà un montaggio a terra
- L'inclinazione del pendio in gradi: per l'impianto in esame la pendenza è di 7°
- L'orientazione espressa in azimuth, dove l'est è pari a -90° e il sud pari a 0°, il quale varierà per ogni lotto

Dopo la simulazione, si avrà come risultato una tabella indicante la produzione elettrica media e l'irraggiamento medio per ogni mese.

Sono state quindi fatte 3 simulazioni, una per lotto, e sommate le produzioni annuali per trovare la produzione totale dell'impianto.

⁸⁸ SOLAREC è un progetto del centro ricerche della Commissione Europea che contribuisce allo sviluppo dell'[energia](http://re.jrc.ec.europa.eu/esti/activities_projects/solarec_en.htm) rinnovabili in Europa. Ulteriori informazioni si possono trovare al sito http://re.jrc.ec.europa.eu/esti/activities_projects/solarec_en.htm

⁸⁹ PhotoVoltaic Geographical Information System

⁹⁰ Nel simulatore si usa CIS al posto di CIGS in quanto quest'ultimo non è disponibile tra le scelte. Da esperienza precedenti si è valutato che la previsione è corretta comunque.

Lotto 1				
Potenza nominale del sistema FV: 200,0 kW				
Stime di perdite causata dalla temperatura: 7,4% (usando temperatura esterna locale)				
Stima di perdite causate da effetti di riflessione: 4,5%				
Altre perdite (cavi, inverter, ecc.): 14,0%				
Perdite totali del sistema FV: 23,9%				
Sistema fisso: inclinazione=7°, orientamento=159°				
Mese	E_d	E_m	H_d	H_m
Gen	164,00	5.080	1,11	34,03
Feb	306,00	8.570	2,39	55,07
Mar	518,00	16.000	3,30	102
Apr	715,00	21.500	4,57	137
Mag	914,00	28.300	6,36	185
Giu	966,00	29.000	6,42	193
Lug	999,00	31.000	7,07	207
Ago	822,00	25.500	5,49	170
Set	594,00	17.800	4,34	118
Ott	347,00	10.800	2,31	71,07
Nov	186,00	5.580	1,28	38,04
Dic	143,00	4.420	1,39	30,07
Media annuale	558	17.000	0,1722	112
Totale per l'anno		203.000	1.340	

Tabella 10: produzione energia lotto 1

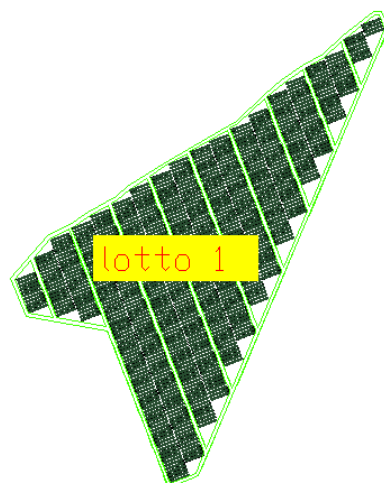


Figura 90: Lotto 1

Lotto 2				
Potenza nominale del sistema FV: 1400,0 kW				
Stime di perdite causata dalla temperatura: 7,4% (usando temperatura esterna locale)				
Stima di perdite causate da effetti di riflessione: 4,2%				
Altre perdite (cavi, inverter, ecc.): 14,0%				
Perdite totali del sistema FV: 23,7%				
Sistema fisso: inclinazione=7°, orientamento=-127°				
Mese	E_d	E_m	H_d	H_m
Gen	1.260,00	39.000	1,19	36,08
Feb	2.300,00	64.500	2,11	59,00
Mar	3.770,00	117.000	3,42	106
Apr	5.100,00	153.000	5,06	140
Mag	6.450,00	200.000	6,02	186
Giu	6.790,00	204.000	6,45	194
Lug	7.040,00	218.000	0,3	208
Ago	5.850,00	181.000	5,57	173
Set	4.300,00	129.000	4,05	122
Ott	2.560,00	79.500	2,42	75,00

Nov	1.420,00	42.500	1,36	40,09
Dic	1.110,00	34.300	1,07	33,02
Media annuale	4.000	122.000	0,177778	114
Totale per l'anno		1.460.000	1.370	

Tabella 11: produzione energia lotto 2

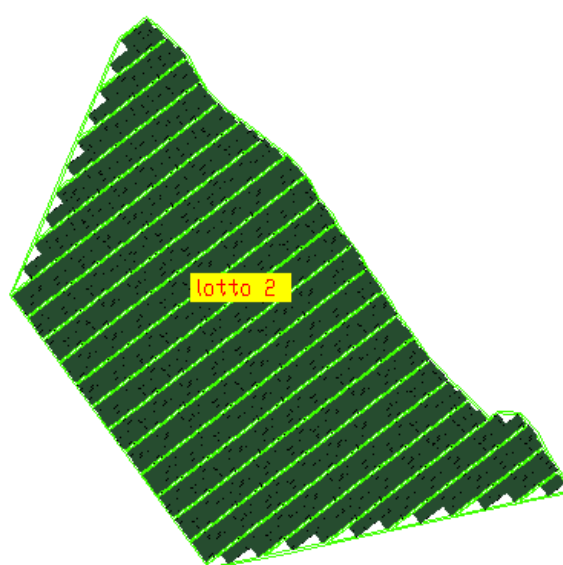


Figura 91: Lotto 2

Lotto 3				
Potenza nominale del sistema FV: 300,0 kW (CIS)				
Stime di perdite causata dalla temperatura: 7,4% (usando temperatura esterna locale)				
Stima di perdite causate da effetti di riflessione: 3,7%				
Altre perdite (cavi, inverter, ecc.): 14,0%				
Perdite totali del sistema FV: 23,4%				
Sistema fisso: inclinazione=7°, orientamento=-77°				
Mese	E_d	E_m	H_d	H_m

Gen	326,00	10.100	1,38	42,09
Feb	574,00	16.100	240	67,02
Mar	883,00	27.400	4,11	115
Apr	1.140,00	34.300	5,27	146
Mag	1.410,00	43.700	6,16	191
Giu	1.470,00	44.100	6,54	196
Lug	1.530,00	47.600	7,26	213
Ago	1.300,00	40.300	6,19	180
Set	990,00	29.700	4,34	130
Ott	617,00	19.100	3,07	82,08
Nov	362,00	10.800	1,57	47,00
Dic	293,00	9.070	1,27	39,02
Media annuale	910	27.700	0,192361	121
Totale per l'anno		332.000	1.450	

Tabella 12: produzione energia lotto 3

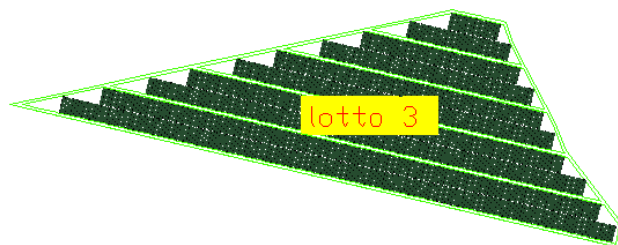


Figura 92: Lotto 3

Ed: Produzione elettrica media giornaliera dal sistema indicata (kWh)

Em: Produzione elettrica media mensile dal sistema indicata (kWh)

Hd: Media dell'irraggiamento giornaliero al metro quadro ricevuto dai pannelli
del sistema (kWh/m²)

Hm: Media dell'irraggiamento al metro quadro ricevuto dai pannelli del sistema
(kWh/m²)

La produzione elettrica totale per l'anno per tutto l'impianto è quindi pari a 1.995 MWh

4.11 Piano finanziario

Al fine di valutare se il progetto è una valida risposta alle esigenze del gestore della discarica di Pontesello, è stato redatto un sintetico computo metrico e un piano finanziario. Si ricorda che la discarica necessitava, oltre alla sistemazione della copertura, di un metodo per rifinanziare la continuazione della post-gestione a seguito dell'esaurimento dei fondi, dopo la conclusione degli undici anni di post-gestione preventivati. È quindi stato verificato che l'impianto fotovoltaico progettato risponda alla necessità di creare introiti per i gestori del sito, di modo da poter continuare la gestione della discarica.

4.11.1 Computo metrico

Nel computo metrico si riassume, in maniera sintetica, i costi per la realizzazione del progetto in esame. Di seguito vengono elencate le principali voci di costo, per poi riassumerle in una tabella finale per il calcolo del costo complessivo.

- Fornitura e posa in opera di moduli fotovoltaici. Sono stati previsti moduli PowerFLEX BIPV 275 o simili: questa voce rappresenta oltre il 50% del costo totale dell'opera. I pannelli dovranno possedere tutte le caratteristiche precedentemente discusse⁹¹ e illustrate nella scheda tecnica degli stessi. Dovranno essere posati seguendo la disposizione illustrata nella tavola relativa, assicurando l'accessibilità ad ogni singolo pannello.
- Fornitura e posa in opera di geomembrana. È stata prevista la geomembrana TPO FLAGON EP/PR o simili: il manto sintetico in poliolefina modificata TPO dovrà possedere tutte le caratteristiche precedentemente discusse⁹² e illustrate nella scheda tecnica. Questa voce di costo comprende anche:
 - o La preparazione della superficie: questa deve essere regolare, compattata, priva di asperità (sassi, macerie, ecc). Intorno a tubi e strutture il terreno deve essere sempre ben compattato.
 - o La preparazione della fossa perimetrale, i cui bordi devono essere leggermente arrotondati e privi di suolo sciolto, irregolarità o macerie che potrebbero danneggiare la geomembrana
 - o Lo strato di regolarizzazione e protezione meccanica della geomembrana: qualora la superficie non si presentasse regolare e

⁹¹ Capitolo 4.5

⁹² Capitolo 4.2

- ci fosse presenza di potenziali elementi di perforazione, su tutta la superficie va riportato uno strato di materiale fine con funzione di protezione meccanica.
 - o Posa in opera della geomembrana: i teli vengono consegnati in cantiere in rotoli, dotati di schema di posizionamento per l'apertura. Nella disposizione vanno evitate giunzioni a incrocio, ovvero punti in cui 4 teli si incrociano in un unico punto. Le giunzioni devono essere parallele alla pendenza del pendio.
 - o Giunzione con termosaldatura della geomembrana.
 - o Penetrazioni di tubi passanti la geomembrana: tubi e penetrazioni vengono impermeabilizzati con pezzi speciali prefabbricati, saldabili con saldatori manuali ad aria calda sulla membrana al fine di garantire la continuità dell'impermeabilizzazione.
- Fornitura e posa geocomposito drenante. È stato previsto il geocomposito Pozidrain⁹³ o simili.
- Saldatura dei moduli alla geomembrana: per il fissaggio dei moduli alla geomembrana si userà il sistema di accoppiamento Riopower di Energyka illustrato precedentemente⁹⁴.
- Fornitura e installazione degli inverter: sono stati previsti inverter SUNSYS station P03 della ditta Socomec solar o simili. Gli inverter dovranno possedere tutte le caratteristiche riportate nella scheda tecnica.
- Fornitura e installazione dell'impianto elettrico dell'impianto fotovoltaico comprendente
 - o Cavi elettrici
 - o Condutture atte a portare l'energia elettrica generata dai pannelli sottoforma di corrente continua
 - o Allacciamenti ai quadri elettrici
- Fornitura e installazione dei quadri di campo. Questi devono consentire il sezionamento di ciascuna stringa di moduli fotovoltaici, proteggere da sovracorrenti, proteggere il generatore fotovoltaico e gli inverter da sovratensioni impulsive e combinare eventualmente diverse stringhe in un certo numero di montanti elettrici verso gli inverter.
- Fornitura e installazione di trasformatori trifase MT/BT.
- Fornitura e posa in opera di una cabina elettrica di conversione e trasformazione con struttura prefabbricata in calcestruzzo armato e di una cabina elettrica di consegna e misure e dei relativi impianti elettrici.
- Fornitura e installazione del sistema di supervisione. È stato previsto l'uso di Sungard professional⁹⁵ e di kit di sensori per l'irraggiamento della ditta Socomec o simili.

⁹³ Capitolo 4.1.2

⁹⁴ Capitolo 4.7

- Sistemazione della canaletta perimetrale⁹⁶.
- Fornitura e posa in opera di terreno limoso per la sistemazione delle pendenze della copertura e degli avvallamenti.
- Scavo e reinterro trincee di ancoraggio sulla copertura della discarica.
- Scavo vasca di dispersione con sagomatura sponde.
- Riutilizzo delle terre di risulta degli scavi.
- Nuova recinzione dell'area della vasca di dispersione con rete metallica
- Fornitura e installazione dell'impianto di sorveglianza e protezione. Il sistema d'allarme sarà costituito da un apparato a barriere a microonde che saranno disposte lungo tutto il perimetro dell'impianto e da un apparato di telecamere pan-tilt-zoom a circuito chiuso dotate di illuminatore a infrarosso e sistema di motion detection incorporato.
- Fornitura e installazione impianti tecnologici per manutenzione.
- Oneri per la sicurezza
- Progettazione

Di seguito viene riportata la tabella riassuntiva dei costi dell'impianto:

⁹⁵ <http://www.socomec.com/presentation-onduleurs-solaires-supervision-sungard.html>

⁹⁶ Capitolo 4.3.6

nr	Descrizione	U.M.	Quantità	Prezzo unitario in €	Importo
1	Fornitura e posa in opera di moduli fotovoltaici PowerFLEX BIPV 275	kWp	1.896,7	1.520	2.882.946 €
2	Fornitura e posa in opera di geomembrana TPO FLAGON EP/PR	mq	60.700	20	1.214.000 €
3	Fornitura e posa geocomposito drenante Pozidrain	mq	60.700	3	182.100 €
4	Saldatura dei moduli alla geomembrana	num	6.897	14	96.558 €
5	Fornitura e installazione degli inverter	num	19	15.678	297.882 €
6	Fornitura e installazione dell'impianto elettrico dell'impianto fotovoltaico	num	3	18.000	54.000 €
7	Fornitura e installazione dei quadri di campo	num	57	1.620	92.340 €
8	Fornitura e installazione di trasformatori trifase MT/BT	num	3	13.500	40.500 €
9	Fornitura e posa in opera delle due cabine e dell'impianto elettrico relativo	num	2	67.500	135.000 €
10	Fornitura e installazione del sistema di supervisione Sungard professional	num	19	1.350	25.650 €
11	Sistemazione della canaletta perimetrale	ml	1.500	75	112.500 €
12	Fornitura e posa in opera di terreno limoso e sistemazione pendenze	mc	10.000	18	180.000 €
13	Riutilizzo delle terre di risulta degli scavi	ton	2.550	20	51.000 €
14	Scavo e reinterro trincee di ancoraggio	mc	2.007	16	32.112 €
15	Scavo vasca di dispersione	mc	3.200	8	25.600 €
16	Nuova recinzione area della vasca di dispersione	ml	314	50	15.700 €
17	Fornitura e installazione dell'impianto di sorveglianza e protezione.			72.000	72.000 €
18	Fornitura e installazione impianti tecnologici per manutenzione	num	3	9.000	27.000 €
19	Oneri per la sicurezza			51.300	51.300 €
20	Progettazione			200.000	200.000 €
				Totale	5.788.188 €

Tabella 13:computo metrico

4.11.2 Business Plan

È stato infine redatto un piano finanziario per valutare la bontà dell'investimento e il periodo necessario per l'ammortamento dei costi. A questo scopo è stato creato un foglio di calcolo grazie al quale, dopo aver inserito i dati relativi a ogni parametro, è possibile valutare l'andamento dei flussi di cassa e quindi calcolare il tempo necessario all'ammortamento della spesa iniziale e il guadagno in termini monetari dato dalla realizzazione dell'impianto.

I dati necessari allo sviluppo di un corretto piano finanziario sono:

- La potenza totale dell'impianto, pari a 1.896,7 kWp
- Costo totale dell'investimento, pari a 5.788.188 €
- La produzione di energia, pari a 1.995.302 kWh/y
- L'incentivo del conto energia, pari a 0,1804 €/kWh. L'incentivo è stato calcolato dal Decreto interministeriale 5 maggio 2011. In particolare ci si è riferiti al secondo semestre 2012, data di possibile entrata in funzione dell'impianto. Essendo il soggetto responsabile un ente pubblico, si può accedere all'incentivo per impianti su edificio, pari a 0,164 €/kWh. Inoltre essendo i pannelli di costruzione europea si può accedere ad un ulteriore incentivo europeo che migliora l'incentivo precedente del 10%. Ci sarebbe un'ulteriore maggiorazione del 5% dovuta al fatto che l'impianto è situato in una discarica, ma le due maggiorazioni non possono essere cumulate.
- Il prezzo dell'energia al kWh. Questo è stato imposto pari a 0,1027 €/kWh, come indicato nell'aggiornamento dei prezzi minimi garantiti per l'anno 2012⁹⁷ pubblicato dal GSE⁹⁸
- L'incremento dei prezzi dell'energia all'anno. Questo dato è stato posto pari al 4% annuo, dato considerato cautelativo. Da una statistica⁹⁹ dell'autorità per l'energia elettrica e il gas risulta infatti che negli ultimi 8 anni il costo dell'energia ha subito un aumento in media del 15% annuo. Si preferisce stare su valori più bassi, in quanto l'errore di sovrastimare l'aumento del costo dell'energia potrebbe portare ad una previsione troppo favorevole e poco realistica.

⁹⁷ Aggiornamento dei prezzi minimi garantiti per l'anno 2012, ai sensi della deliberazione dell'Autorità per l'energia elettrica e il gas 6 novembre 2007, n. 280/07.

⁹⁸ GSE: Gestore Servizi Energetici

⁹⁹ Statistica reperibile al sito <http://www.autorita.energia.it/it/dati/eep35.htm>

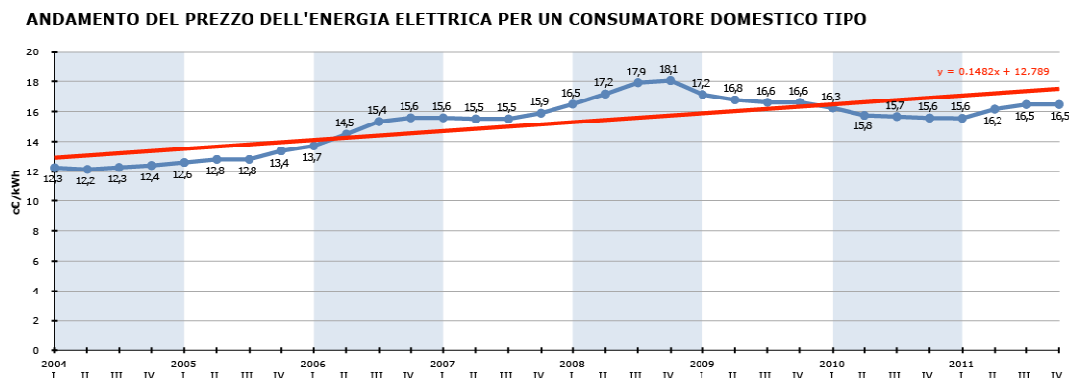


Figura 93: Andamento del prezzo dell'energia negli ultimi 8 anno secondo la statistica dell'autorità per l'energia e il gas

Segue poi la parte del finanziamento bancario. I dati richiesti per il calcolo sono:

- La presenza di un eventuale finanziamento a fondo perduto, come potrebbe avvenire in caso di partecipazione nazionale o regionale al progetto. Nel caso in esame non si è considerata la possibilità di un tale intervento.
- Il finanziamento da parte della banca, ovvero la percentuale del costo per la quale si intende fare ricorso a un indebitamento bancario come un leasing o un mutuo. È stato imposto un finanziamento pari all'80% del costo totale.
- Il tasso d'interesse applicato dalla banca, impostato pari al 5%/anno
- La durata del finanziamento, posto pari a 15 anni.
- Costi annui di manutenzione dell'impianto elettrico, posti pari allo 0,50%, ipotizzando che almeno un inverter ogni 7 anni debba andare sostituito.
- Assicurazione, posta pari allo 0,25%. Il dato si riferisce all'ipotesi di incremento dei costi assicurativi dell'immobile per danni da agenti atmosferici, vandalici, ecc.
- Incremento costi per l'inflazione, posti pari al 2%
- Durata dell'ammortamento, posta pari a 20 anni. Come da normativa l'ammortamento è sulla durata della vita dello strumento.

Una volta inseriti tutti i parametri, viene calcolato in automatico il conto economico, riportato nel dettaglio nella seguente tabella.

PARAMETRI		
Tipologia impianto	Powerflex	
Tipologia area	Copertura discarica	
Potenza totale	1.896,7	Kwp
Costo al Kw	€ 3.052	Euro
Totale Investimento	€ 5.788.188	Euro
Produzione di 1Kw	1.052,00	Kwh/y
decadimento produzione	0,8%	/anno
Incentivo C/energia	€ 0,1804	
Prezzo Kwh Energia	€ 0,1027	
Increment. Prezzi Kwh energia	4,0%	/anno
Fin. a f.do perduto	€ 0	Eur/Kw
Fin. Banca	80,0%	
Importo	€ 4.630.550	Euro
Tasso	5,0%	/anno
Durata	15	anni
Imposte sul reddito	0%	
Costi manut. Annuì	0,50%	dell'inv.
Assicurazione	0,25%	dell'inv.
Incremento costi per inflazione	2,00%	
Ammortamento	20	anni
Tasso di attualizzazione	2,00%	

Tabella 14: parametri piano finanziario

CONTO ECONOMICO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	TOTAL E
Produzione (Kwh)	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	4,E+07
Ricavi Conto Energia	4,E+05	4,E+05	4,E+05	4,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	7,E+06
Ricavi Vendita /autoconsumo	2,E+05	2,E+05	2,E+05	2,E+05	2,E+05	2,E+05	2,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	4,E+05	6,E+06
Totale Ricavi	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	7,E+05	7,E+05	7,E+05	7,E+05	1,E+07
Manutenzione	3,E+04	3,E+04	3,E+04	3,E+04	3,E+04	3,E+04	3,E+04	3,E+04	3,E+04	3,E+04	4,E+04	4,E+04	4,E+04	4,E+04	4,E+04	4,E+04	4,E+04	4,E+04	4,E+04	4,E+04	7,E+05
Altri costi	1,E+04	1,E+04	2,E+04	2,E+04	2,E+04	2,E+04	2,E+04	2,E+04	2,E+04	2,E+04	2,E+04	2,E+04	2,E+04	2,E+04	2,E+04	2,E+04	2,E+04	2,E+04	2,E+04	2,E+04	4,E+05
EBITDA (MOL)	5,E+05	5,E+05	5,E+05	5,E+05	5,E+05	5,E+05	5,E+05	5,E+05	5,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	1,E+07
Interessi su mutuo	2,E+05	2,E+05	2,E+05	2,E+05	2,E+05	2,E+05	2,E+05	1,E+05	1,E+05	1,E+05	1,E+05	8,E+04	6,E+04	4,E+04	2,E+04						2,E+06
EBTDA	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	4,E+05	4,E+05	4,E+05	4,E+05	4,E+05	5,E+05	5,E+05	5,E+05	5,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	9,E+06
Ammortamenti	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	6,E+06
EBT (Margine Ante Imposte)	5,E+02	1,E+04	3,E+04	4,E+04	6,E+04	8,E+04	9,E+04	1,E+05	1,E+05	2,E+05	2,E+05	2,E+05	2,E+05	2,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+06
Imposte sul reddito	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00
Utile netto	5,E+02	1,E+04	3,E+04	4,E+04	6,E+04	8,E+04	9,E+04	1,E+05	1,E+05	2,E+05	2,E+05	2,E+05	2,E+05	2,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+06
CASH FLOW	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	TOTAL E
Utile netto+																					
ammortamenti	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	4,E+05	4,E+05	4,E+05	4,E+05	4,E+05	5,E+05	5,E+05	5,E+05	5,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	9,E+06
Rimborso quota capitale Mutuo	2,E+05	2,E+05	2,E+05	2,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	3,E+05	4,E+05	4,E+05	4,E+05	4,E+05						5,E+06
Investimento Netto	1,E+06																				1,E+06
Flusso di cassa netto	1,E+06	8,E+04	8,E+04	8,E+04	9,E+04	9,E+04	1,E+05	1,E+05	1,E+05	1,E+05	1,E+05	1,E+05	1,E+05	1,E+05	1,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	6,E+05	3,E+06
Flusso di cassa cumulado	1,E+06	1,E+06	9,E+05	8,E+05	8,E+05	7,E+05	6,E+05	5,E+05	4,E+05	3,E+05	1,E+05	2,E+04	1,E+05	2,E+05	4,E+05	1,E+06	2,E+06	2,E+06	3,E+06	3,E+06	
Valore attuale flussi di cassa	2256201,16										Tasso annuale attualizzato di rendimento del capitale investito					0,097448509					

Tabella 15: piano finanziario

RIEPILOGO BUSINESS PLAN					
Tipologia impianto	Powerflex				
Tipologia area	Copertura discarica				
Potenza totale	1.896,7	kWp	Kilowattora totali da installare		
Costo al kWp	€ 3.052	Euro			
Totale Investimento	€ 5.788.188	Euro			
Produzione di 1kWp	1.052,00	kWh/anno	Kilowattora prodotti inizialmente		
Incentivo C/energia	€ 0,1804	Euro/kWh			
Prezzo kWh Energia	€ 0,1027	Euro/kWh			
Anno	1	2	3	4	5
Produzione in kWh	1.995.302	1.979.340	1.963.505	1.947.797	1.932.215
Ricavi in €	564.870	568.482	572.323	576.399	580.716
Anno	6	7	8	9	10
Produzione in kWh	1.916.757	1.901.423	1.886.211	1.871.122	1.856.153
Ricavi in €	585.282	590.103	595.187	600.540	606.171
Anno	11	12	13	14	15
Produzione in kWh	1.856.153	1.841.304	1.826.573	1.811.960	1.797.465
Ricavi in €	612.088	618.299	624.811	631.635	638.778
Anno	16	17	18	19	20
Produzione in kWh	1.783.085	1.768.820	1.754.670	1.740.632	1.726.707
Ricavi in €	646.251	654.062	662.223	670.742	679.631
Totale ricavi	12.278.593				euro
Totale guadagno	3.374.405				
Ritorno investimento	12				anni

Tabella 16: Riepilogo piano finanziario

Come si evince dal riepilogo del piano finanziario, dopo 12 anni dall'entrata in funzione dell'impianto si rientrerà dell'investimento effettuato e si comincerà a guadagnare, arrivando ad un guadagno totale dopo i 20 anni di oltre 3 milioni di euro. Questi introiti permetteranno di proseguire nella post-gestione per tutti i 20 anni mancanti alla sua conclusione. In questa sede si vuole sottolineare inoltre come l'intervento faccia diminuire drasticamente i costi di post-gestione negli anni successivi, in quanto, grazie all'impermeabilizzazione, si andrà a ridurre la formazione di percolato e di conseguenza i costi per il suo trattamento. L'intervento ha quindi il duplice effetto di creare introiti grazie alla produzione di energia e abbassare i costi della post-gestione grazie all'impermeabilizzazione. Questo effetto multiplo non sarebbe stato possibile se si fosse realizzato un classico impianto fotovoltaico a pannelli rigidi. La soluzione scelta si dimostra, quindi, la scelta migliore anche per questo ulteriore motivo.

5. Conclusioni

In questa tesi è stata analizzata la situazione esistente nella discarica di Pontesello nel comune di Montecchio Maggiore (VI), dove si è presentata la necessità di ampliare il periodo di post-gestione inizialmente previsto di 11 anni, a causa della persistente formazione di percolato e delle caratteristiche chimiche dello stesso, che impediscono la dismissione in sicurezza della discarica.

La formazione di percolato dipende soprattutto dalla morfologia e dalle caratteristiche della copertura esistente, che rendono altresì necessario un intervento di adeguamento della copertura stessa. Il gestore della discarica si è trovato però in mancanza di fondi, in quanto l'ammontare accantonato era stato calcolato per il periodo di progetto e alla fine di questo è risultato esaurito. In sede di progetto non era stato inoltre previsto l'accantonamento di fondi per l'adeguamento della copertura nel tempo.

È quindi stata proposta la realizzazione di un capping costituito da geomembrana esposta e pannelli fotovoltaici flessibili a film sottile, che consente, al contempo, di perseguire due obiettivi: la riduzione della produzione di percolato e la formazione di un flusso economico attivo in grado di finanziare l'intervento di adeguamento della copertura e la gestione post-operativa residua.

Prima di arrivare a questa soluzione sono state considerate varie tecnologie per lo sfruttamento dell'energia solare presenti nel mercato, con particolare riferimento a due installazioni esistenti, analizzando in particolare la possibilità del loro impiego in una copertura di discarica. Si è così verificato che, per il caso in esame, la soluzione ottimale era quella di pannelli a film sottile fissati a una geomembrana esposta. Questa tecnologia è stata preferita alle altre per varie motivazioni che spaziano dal minor impatto dei telai di ancoraggio dei moduli cristallini sulle coperture della discarica, alla maggior resa in condizioni di orientazione non

ottimale dei moduli fotovoltaici, all'adattabilità di questa tecnologia ai cedimenti differenziali della discarica e, soprattutto, dall'apporto che la geomembrana assicura all'impermeabilizzazione della discarica.

Sono state poi analizzate nel particolare le "sfide progettuali" in cui ci si imbatte nel progettare una tale installazione, allorché non esistono significative realizzazioni simili nei nostri climi. In particolare ci si è soffermati sulla scelta della geomembrana, sul problema del sollevamento da vento e sul rispetto dell'invarianza idraulica, senza dimenticare comunque la protezione della sottostante barriera argillosa dal gelo e il rispetto della normativa vigente in materia di discariche.

Nel caso specifico della discarica di Pontesello è stato progettato un particolare pacchetto di copertura che permetta di assicurare l'impermeabilità della copertura, di proteggere la barriera minerale dal gelo, di adattarsi ai cedimenti e di produrre energia grazie ai moduli fotovoltaici. Specifica attenzione è stata rivolta al rispetto dell'invarianza idraulica, per il quale è stata progettata una vasca di accumulo delle acque di deflusso superficiale. Parimenti, sono stati sviluppati i fondamenti teorici inerenti il calcolo del sollevamento da vento di una geomembrana esposta, per ovviare al quale sono stati progettati ancoraggi in trincea. Infine è stata progettata la componente impiantistica vera e propria dell'impianto fotovoltaico.

In conclusione, si può affermare che tale installazione permetterà al gestore della discarica di raggiungere il duplice obiettivo di ridurre il percolato, migliorando l'impermeabilizzazione, e di generare introiti che potranno coprire i costi della continuazione della post-gestione. L'investimento per tale realizzazione, verrà ammortato nell'ambito del periodo suppletivo di gestione post-operativa, permettendo al gestore, oltre che di garantirsi la copertura finanziaria per il prosieguo della stessa, anche di conseguire un potenziale margine economico. È altresì possibile concludere che questa risulti essere la sola tecnologia che permette di raggiungere entrambi i suddetti obiettivi. In questo caso infatti l'installazione di impianti a pannelli cristallini, se pur molto diffusa in altre realizzazioni, oltre a essere meno conveniente, data la non ottimale esposizione dovuta alla morfologia del sito, non avrebbe risolto il problema della formazione del percolato e anzi avrebbe rischiato di aggravare il problema. La soluzione proposta risulta applicabile, con le dovute attenzioni, alle numerose discariche che si trovino nella stessa situazione della discarica di Pontesello.

La tesi, vista la preparazione accademica dello scrivente, svolge la trattazione, in modo più competente e approfondito, degli aspetti geotecnici e idrogeologici dell'installazione proposta. Ciò nondimeno, si è voluto fornire un quadro generale del progetto, che ha richiesto la proposizione, ancorché generale, di larga massima, degli aspetti impiantistico-elettrotecnici ed economico-finanziari, proprio per consentire di apprezzare la particolarità del duplice obiettivo conseguibile con questa tecnologia.

6. Indici

6.1 Indice delle figure

Figura 1: pannelli fotovoltaici rigidi ancorati

Figura 2: pannelli fotovoltaici rigidi

Figura 3: pannelli fotovoltaici rigidi ancorati

Figura 4: pannelli fotovoltaici rigidi ancorati

Figura 5: pannelli a inseguimento solare.

Figura 6: impianto fotovoltaico

Figura 7: CSP con collettori parabolici lineari

Figura 8: CSP con collettore a disco

Figura 9: CSP a torre centrale

Figura 10: CSP con collettori Fresnel.

Figura 11: impianto a pannelli flessibili

Figura 12: impianto a pannelli flessibili.

Figura 13: Cedimenti differenziali in una

Figura 14: cedimenti differenziali in una discarica in

Figura 15: Bilancio idrico medio annuale in mm/anno, riferito a una copertura di discarica. Studio di S. Melchior nella discarica di Amburgo (Germania)

Figura 16: Impianto fotovoltaico

Figura 17: impianto fotovoltaico discarica di Vaiano (PO)

Figura 18: Impianto di Roncajette (PD): illustrazione del sistema di fissaggio dei pannelli fotovoltaici

Figura 19: Impianto di Roncajette (PD): vasche per i pannelli fotovoltaici zavorrate

Figura 20: Impianto di Roncajette (PD):

Figura 21: discarica di Goro (FE). Sono stati

Figura 22: Impianto di Roncajette (PD): planimetria

Figura 23: fase di incollaggio dei pannelli

Figura 24: Preparazione del terreno prima di posare

Figura 25: Impianto di Tessman Road (US-TX): sezioni delle trincee di ancoraggio

Figura 26: Impianto di Tessmann Road (US-TX):

Figura 27: Impianto di Tessmann Road (US-TX):

Figura 28: Impianto di Tessman Road (US-TX): particolare sulla copertura delle trincee con geomembrana

Figura 29: Impianto di Hickory Ridge (US-GA)

Figura 30: illustrazione del pacchetto di copertura di discarica tradizionale

Figura 31: Confronto fra la copertura tradizionale e la realizzazione di Tessman Road (US-TX)

Figura 32: Esempio di sollevamento di geomembrana a causa del vento

Figura 33: aumento della conducibilità idraulica di un argilla, dovuto a cicli di gelo-disgelo

Figura 34: confronto fra pacchetto di copertura tradizionale e pacchetto di copertura con geomembrana coperta da un manto di erba sintetica

Figura 35: copertura di discarica con erba sintetica.

Figura 36: copertura di discarica con

Figura 37: confronto fra la variazione di temperatura in superficie e la variazione di temperatura smorzata all'interno dello strato di terreno

Figura 38: rappresentazione dell'abbattimento dell'ampiezza d'onda termica in funzione della profondità (x)

Figura 39: Ricostruzione della sinuoidale delle variazioni di temperatura superficiali annuali

Figura 40: riduzione dell'ampiezza d'onda termica in funzione della profondità

Figura 41: Illustrazione del geocomposito drenante impermeabilizzante Pozidrain

Figura 42: Composizione di una geomembrana bituminosa prefabbricata

Figura 43: Scheda tecnica del TPO Flagon EP/PR

Figura 44: Curva tensioni-deformazioni del TPO Flagon EP/PR

Figura 45: inquadramento del dito della discarica di Pontesello. Google Maps

Figura 46: inquadramento del dito della discarica di Pontesello. Google Maps

Figura 47: localizzazione della discarica

Figura 48: Localizzazione della discarica di Pontesello

Figura 49: Localizzazione della discarica di Pontesello nella classe altimetrica <200 m s.m.m.

Figura 50: Caratterizzazione della litologia

Figura 51: legenda della carta delle litologie

Figura 52: Localizzazione della discarica di Pontesello nella carta della tessitura del suolo

Figura 53: Localizzazione della discarica di Pontesello nella carta delle permeabilità

Figura 54: planimetria della vasca esistente

Figura 55: confronto in planimetria tra la vasca di progetto e quella esistente

Figura 56: Rating curve della vasca

Figura 57: illustrazione della distribuzione di pressione attorno a una superficie cilindrica (adattata da goldstein 1938)

- Figura 58: variazione di pressione sulla superficie dell'ostacolo
- Figura 59: Fattore di aspirazione a seconda del punto considerato nel pendio
- Figura 60: forze in gioco nel caso di geomembrana esposta su un pendio a inclinazione B e soggetta all'aspirazione del vento
- Figura 61: configurazioni tipiche di geomembrane esposte al vento
- Figura 62: rappresentazione schematica di una geomembrana sollevata
- Figura 63: relazione tra la tensione da sollevamento normalizzata e la deformazione
- Figura 64: famiglia di curve tra di tensione-deformazione, a seconda del valore si SeL
- Figura 65: confronto tra la curva tensioni-deformazioni della geomembrana e la sua interpolazione polinomiale
- Figura 66: disposizione dei pannelli solari e degli ancoraggi come da progetto
- Figura 67: Configurazioni tipiche di ancoraggi
- Figura 68: configurazione tipica di un banchina di ancoraggio
- Figura 69: bilancio delle forze
- Figura 70: ancoraggio a banchina
- Figura 71: ancoraggio con trincea a V
- Figura 72: ancoraggio con trincea rettangolare
- Figura 73: bilancio delle forze, metodo di Koerner
- Figura 74: Diagrammi a corpo libero, R. Thiel
- Figura 75: Confronto fra la produzione annuale di un pannello CIGS e di un pannello in silicio amorfo. In viola la curva riferita al pannello in silicio amorfo. In blu la curva riferita al pannello CIGS. In giallo la differenza di produzione
- Figura 76: Confronto fra la resa giornaliera di un pannello in silicio amorfo (curva gialla) e CIGS (curva viola)
- Figura 77: Confronto della resa per area occupata
- Figura 78: Confronto della resa rispetto al peso tra
- Figura 79: Mantenimento delle prestazioni e dell'efficienza dei moduli CIGS in un'applicazione a Tucson
- Figura 80: Confronto fra l'efficienza nominale e l'efficienza effettiva al variare dell'irradiazione solare
- Figura 81: Diminuzione dell'efficienza dei moduli dovuto all'aumento di temperatura
- Figura 82: Variazione dell'efficienza al variare della lunghezza d'onda della luce
- Figura 83: Variazione della risposta del pannello al variare dell'angolo di incidenza della luce
- Figura 84: planimetria stato di fatto della discarica

Figura 85: Planimetria stato di fatto della discarica. In verde la superficie di intervento del progetto

Figura 86: planimetria discarica con pendenze sistemate per ospitare l'impianto fotovoltaico

Figura 87: confronto fra planimetria stato di fatto e planimetria stato di progetto

Figura 88: Confronto fra le sezioni. In verde lo stato di progetto, in nero lo stato di fatto

Figura 89: Planimetria della disposizione dei pannelli nello stato di progetto

Figura 90: Lotto 1

Figura 91: Lotto 2

Figura 92: Lotto 3

Figura 93: Andamento del prezzo dell'energia negli ultimi 8 anni secondo la statistica dell'autorità per l'energia e il gas

6.2 Indice delle tabelle

Tabella 1: confronto fra diverse tecnologie di pannelli solari

Tabella 2: Possibilità di installazioni fotovoltaiche su siti marginali

Tabella 3: Classificazione degli interventi in base alla superficie di intervento

Tabella 4: Volume invasato dalle caditoie a seconda del coefficiente di allusso

Tabella 5: parametri e risultati di portata

Tabella 6: Relazioni tra le varie grandezze del problema

Tabella 7: parametri per il sollevamento da vento

Tabella 8: risultati del sollevamento da vento

Tabella 9: parametri e risultati della progettazione degli ancoraggi

Tabella 11: produzione energia lotto 1

Tabella 12: produzione energia lotto 2

Tabella 13: produzione energia lotto 3

Tabella 10: computo metrico

Tabella 14: parametri piano finanziario

Tabella 15: piano finanziario

Tabella 16: Riepilogo piano finanziario

7. Riferimenti bibliografici

7.1 Letteratura

Ayers M.R., Urritia J. L., 2011 *"A True Green Closure. A Sustainable and Reliable Approach Using Structured Membrane and Synthetic Turf"*

Busana S., 2010, *"Collaudo tecnico-amministrativo, discarica di 1° categoria di Pontesello in comune di Montecchio Maggiore (VI)"*

Cazzuffi D. *"Comportamento di geomembrane esposte su dighe in calcestruzzo e muratura"*

Cerni M., *"Riscrittura delle equazioni del metodo dell'invaso per curve di possibilità pluviometrica a tre parametri"*

Commissario Delegato per l'emergenza concernente gli eccezionali eventi meteorologici del 26 settembre 2007 che hanno colpito parte del territorio della Regione Veneto, 2009, *"Valutazione di compatibilità idraulica – Linee guida"*

Comune di Montecchio Maggiore, *"Regolamento comunale per la gestione dei rifiuti urbani"*

Comune di Montecchio Maggiore, 2008, *"Documento preliminare al Piano di Assetto Territoriale"*

Congdon J.P., Germain A., Haley D., Schader L., *"The use of an Exposed Reinforced Flexible Polypropylene Geomembrane To Cap a Landfill"*

Consorzio di Bonifica Alta Pianura Veneta, 2010, *"Piano generale di bonifica e tutela del territorio"*

Decreto legislativo 13 Gennaio 2003, n. 36

Fazio C. A., Wallace J., 2009, *"Siting of Solar Energy on Former Municipal Landfills"*
New York federation of Solid Waste Associations

Garfield G., *"Landfill Installation Consideration – Solar PV"*

Germain A., *"Green Cap Reduces Leachate Generation"*, Solid Waste Technologies September/October 1997. Pp.37-39

Germain A., Gleason M., Watson R. 1996 *"Design of an Exposed Geomembrane Cap."* SWANA's 34th Annual International Solid Waste Exposition, Wastecon

Giroud J.P., Gleason M.H., Zoindberg J.G. 1999 *"Design of Geomembrane Anchorage Against Wind Action."* Geosynthetics International Vol 6, No. 6; Pp: 481-507

Giroud J.P., Houlihan M.F., Gleason M.H. 1998 *"An Exposed Geomembrane Cover System for a Landfill."* Proc., 6th International Conference on Geosynthetics, IFAI, Atlanta, GA.

Giroud J.P., Pelte T, Bathurst R.J. 1995 *"Uplift of Geomembranes by Wind"* Geosynthetics International, Special Issue on Design of Geomembrane Applications Vol2, No.6;Pp: 897-952

Gregory N., Richardson Ph.D. 2000, *"Exposed geomembrane covers"*, GFR Magazine

Hock P., 2009, *"Flexible solar energy landfill covers, advantages & considerations"*, Federal Environmental Symposium East

Hullings D.E., Sansone L.J., 1997, *"Design Concerns And Performance Of Geomembrane Anchor Trenches"* Geotextiles and Geomembranes 15; Pp: 403-417

Hurford J. W., *"Exposed Geomembrane Cover Systems for Subtitle D Landfill Closures"*

International Solar Energy Society Italia, 2011, *"Tecnologie e sistemi solari a concentrazione"*

ISPRA, 2011 *"Rapporto rifiuti"*

Koerner R. M. 1997. *"Designing With Geosynthetics."* Fourth Edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ

Koerner R.M., 2010, *"Traditional Versus Exposed Geomembrane Landfill Covers: Cost and Sustainability Perspectives"*, Geosynthetic Institute, Folsom, PA USA

Koerner R.M., Hsuan Y.G., Koerner G.R., 2011, *"Geomembrane Lifetime Prediction: Unexposed and Exposed Conditions"*, Geosynthetic Institute

L.Da Deppo, C. Datei, 1997 *"Fognature"* Edizione libreria Cortina, Padova

Legambiente, 2008, *"Il punto sulle cave in Italia: I numeri, le leggi e ei piani, le buone e cattive pratiche"*

Levorato A., 2011, *"Dalla discarica all'energia pulita: il parco fotovoltaico di Roncagette"*

M. Zahirul Islam, Beth A. Gross, R. Kerry Rowe, 2011, *"Degradation of exposed LLPDE and HDPE Geomembranes: A Review"*

Melchior S., Sokollek V., Berger K., Vielhaber B., Steinert B., 2010, *"Results from 18 Years of In Situ Performance Testing of Landfill Cover Systems in Germany"*

Meneghetti M., *"Sull'invarianza idraulica nelle trasformazioni urbanistiche"*

Olchowik J. M., Cieslak K., Aguilera J., Garrido G. N., Terrados J., Bedin D., 2011, *"PVS in BLOOM, Strategic Vision Document"* Project PVs in Bloom -Farming photovoltaic flowers: a new challenge for land valorisation within a strategic eco-sustainable approach to local development

Peggs I. D., 2008, *"Predabricated Bituminous Geomembrane: A Candidate for Exposed Geomembrane Caps for Landfill Closures"*, The first pan american geosynthetics conference& exhibition

Richgels C., 2011, *"Crazy horse sanitary landfill closure with an exposed geomembrane "Hybrid""*, 40th annual SWANA western regional symposium

Roberts M., Alexander T., Perera K., *"A solar moment"*

Ronald S. J., Gregory T., 2010 *"Green Applications for Geomembranes in Mine Reclamation"* Mining.com

Sampson G., *"Solar Installations on Closed Landfills: Technical and Regulatory Considerations"*, Bren school of environmental science and management, university of California, Santa Barbara

Thiel R., 2010, *"Optimization of anchor trench design for solar evaporation ponds"* Geosynthetics

Thiel R., Purdy S., Yazdani R., *"Case History of Exposed Geomembrane Cover for Bioreactor Landfill"*

Tosin D., 2009 *"Il solare fotovoltaico su terreni marginali. Valutazioni tecniche per guidare la scelta di tecnologia fotovoltaica e configurazione di un impianto in relazione alle condizioni dei siti marginali di destinazione"*

Villard P., Chareyre B. 2004 *"Design methods for geosynthetic anchor trenches on the basis of true scale experiments and discrete element modeling"* Canadian Geotechnical Journal. V41, Pp. 1193-1205

West CK, Ayers M. R., Urrutia J. L., 2011, *"Impermeable Liner/Synthetic Turf Closures for Landfills"* World of Coal Ash (WOCA) Conference

Zornberg J. G., *"New trends in the Use of Geosynthetics in Environmental Applications"* University of Colorado at Boulder, USA

Zornberg J.G., Giroud J. P. 1997 *"Uplift of Geomembranes by Wind – Extension of Equations."* Geosynthetics International. Vol. 4, No.2; Pp: 187-207

"Aggiornamento dei prezzi minimi garantiti per l'anno 2012, ai sensi della deliberazione dell'Autorità per l'energia elettrica e il gas 6 novembre 2007, n. 280/07."

7.2 Siti Web

<http://www.abg-geosynthetics.com>

<http://www.acquerisorgive.it>

<http://www.altapianuraveneta.eu>

<http://www.arpa.veneto.it>

<http://www.autorita.energia.it>

<http://www.clu-in.org>

<http://www.energyka.com>

<http://www.epa.gov>

<http://www.flag.it>

<http://www.gifi-fv.it>

<http://www.globalsolar.com>

<http://www.gse.it>

<http://www.legambientepadova.it>

http://www.servizipriula.it/sit/files/fotovoltaico_tiretta

<http://www.socomec.it>

<http://www.uni-solar.com>

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=it&map=europe>

Ringraziamenti

Ringrazio, prima di tutti, il Prof. Ing. Marco Favaretti per la costante disponibilità e cortesia avute nei miei confronti.

Un ringraziamento sentito per la guida competente e solerte va all'ing. Stefano Busana. La mia stima per lui è dovuta, oltre che alla sua profonda esperienza e conoscenza nel campo della geotecnica, alla grande umanità e sapienza con la quale ha saputo indirizzarmi nei momenti di difficoltà.

Vorrei ringraziare anche l'ing. Melchiori e a tutto lo staff di Energyka Srl per l'aiuto fornitomi nello sviluppare questa tesi.

Grazie anche ai miei genitori, a mio fratello e a Cristina, i quali, con il loro incrollabile sostegno morale ed economico, mi hanno permesso di raggiungere questo traguardo.

Un ultimo ringraziamento ai miei più cari amici che hanno condiviso con me gioie e difficoltà e ai compagni di studi che sono stati per me veri amici e non solo semplici colleghi.