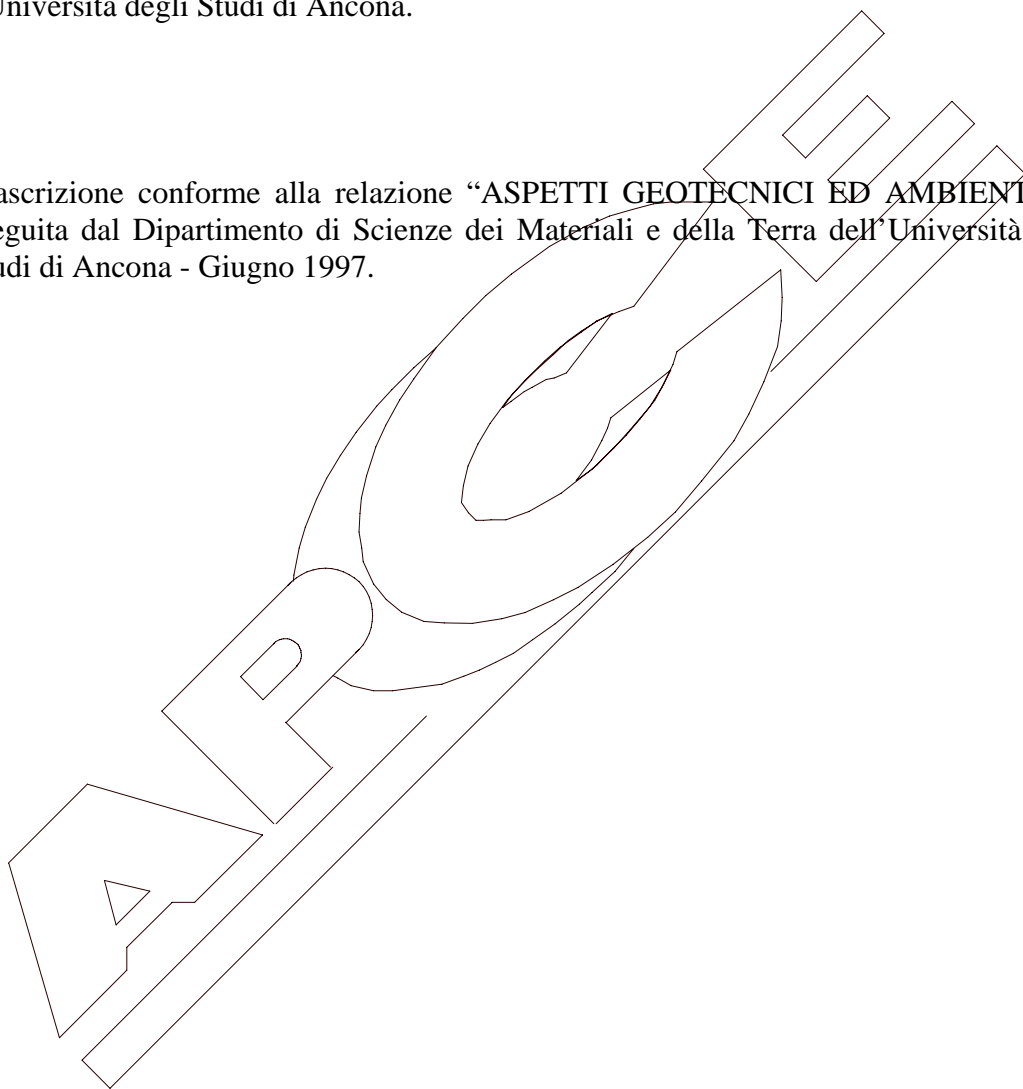


Convenzione per la ricerca sui temi inerenti gli aspetti geotecnici ed ambientali dei dispersori profondi degli impianti di protezione catodica stipulata tra l'A.P.C.E. e l'Università degli Studi di Ancona.

Trascrizione conforme alla relazione "ASPETTI GEOTECNICI ED AMBIENTALI" eseguita dal Dipartimento di Scienze dei Materiali e della Terra dell'Università degli Studi di Ancona - Giugno 1997.



Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		

*INDICE*

Premessa .....	pag.	2
<b>1 Protezione catodica a corrente impressa di strutture metalliche interrata</b>		
1.1 Generalità .....		3
1.2 Dispersioni profonde .....		4
<b>2 Realizzazione del foro per la posa del dispersore</b>		
2.1 Informazioni sulla natura dei terreni .....		8
2.2 Stabilità delle pareti del foro .....		8
2.3 Modalità di impiego del fango bentonitico .....		9
2.4 Preparazione del fango .....		10
<b>3 Aspetti ambientali nella realizzazione e funzionamento dei dispersori profondi</b>		
3.1 Comunicazione di falde superficiali con falde profonde .....		11
3.2 Materiali costituenti il backfill .....		14
3.2.1 Bentonite .....		14
3.2.2 Granulati o polvere di carbone .....		14
3.2.3 Cessione di sostanze dai materiali utilizzati come backfill .....		15
3.3 Fase di funzionamento del dispersore .....		15
3.3.1 Aspetti generali .....		15
3.3.2 Materiali costituenti il dispersore .....		16
3.3.2.1 Anodo di ferro-silicio-cromo con backfill di bentonite .....		16
3.3.2.2 Anodo di ferro-silicio-cromo con backfill di carbone .....		17
3.3.2.3 Anodi di ferro e ferro-silicio .....		18
3.4 Effetto immobilizzante della bentonite .....		18
3.5 Migrazione di sostanze in campo elettrico .....		19
<b>4 Conclusioni .....</b>		<b>20</b>

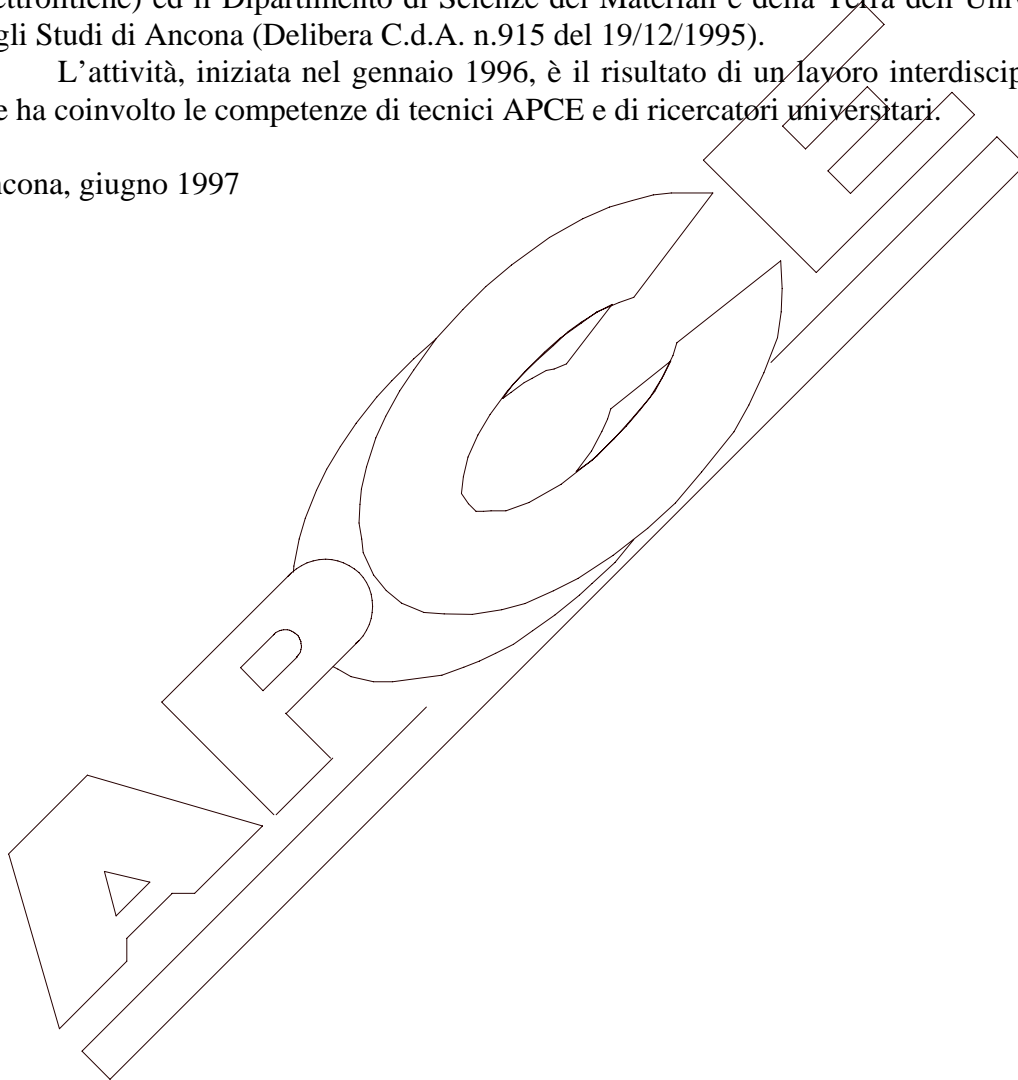
Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		

**Premessa**

La presente relazione sintetizza i risultati ottenuti nell'ambito della convenzione di ricerca stipulata tra l'APCE (Associazione per la Protezione dalle Corrosioni Elettrolitiche) ed il Dipartimento di Scienze dei Materiali e della Terra dell'Università degli Studi di Ancona (Delibera C.d.A. n.915 del 19/12/1995).

L'attività, iniziata nel gennaio 1996, è il risultato di un lavoro interdisciplinare che ha coinvolto le competenze di tecnici APCE e di ricercatori universitari.

Ancona, giugno 1997



Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		

# 1

## Protezione catodica a corrente impressa di strutture metalliche interrato

### 1.1 Generalità

Una struttura metallica interrata è soggetta a progressiva degradazione chimico-fisica - corrosione - provocata da interazioni con l'ambiente in cui è immersa.

I metodi per attuare la protezione dalla corrosione delle strutture metalliche interrato possono essere di due tipi, tra loro interagenti e complementari, comunemente classificati come protezione passiva e come protezione attiva o protezione catodica.

#### *Protezione passiva*

Tale tipo di protezione è costituito da un insieme di provvedimenti da adottare, in fase di progetto e di realizzazione, al fine di:

- evitare che parti metalliche della struttura vengano in contatto diretto con l'ambiente o con altre strutture;
- ridurre l'influenza di campi elettrici presenti nell'ambiente sulla struttura da proteggere;
- ridurre l'interferenza elettrica con altre strutture metalliche intersecanti o poste in vicinanza.

Ciò si ottiene mediante l'applicazione di un rivestimento protettivo esterno, che deve essere continuo per creare una barriera di elevata resistenza elettrica.

#### *Protezione attiva o protezione catodica*

Questo tipo di protezione dalla corrosione viene realizzato rendendo catodiche le superfici metalliche della struttura interrato nei confronti dell'ambiente, in modo da ridurre od arrestare le reazioni elettrochimiche di ossidazione del metallo.

I metodi con cui la protezione catodica viene attuata possono essere:

- a corrente impressa;
- ad anodi galvanici (sacrificali).

La protezione catodica a corrente impressa di strutture metalliche interrato viene realizzata facendo circolare una corrente continua fra la struttura da proteggere ed un dispersore immerso nello stesso ambiente. A tal fine si utilizza un'apparecchiatura (alimentatore di protezione catodica), il cui polo positivo è collegato al dispersore (anodo) e quello negativo alla struttura metallica interrato (catodo).

I materiali anodici più comunemente usati per la realizzazione dei dispersori di corrente sono:

- leghe di ferro-silicio e ferro-silicio-cromo;
- grafite;
- acciaio;
- titanio attivato.

La protezione catodica ad anodi sacrificali è basata sulla realizzazione di una macropila, dove la struttura metallica da proteggere costituisce ancora il catodo, e la

Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		

corrente elettrica di protezione è fornita dall'ossidazione del materiale di cui è costituito l'elettrodo consumabile (anodo sacrificale, in genere leghe di zinco o magnesio, immerso nel terreno).

## 1.2 Dispensori profondi

I dispersori profondi sono costituiti da una successione di elementi anodici collegati elettricamente fra loro ed immersi in un adeguato letto di posa. I fori di perforazione del terreno in cui essi vengono alloggiati sono in genere eseguiti mediante trivellazione, con diametri di 130÷200 mm e profondità tali da raggiungere i 100 m ed anche, eccezionalmente, maggiori.

Per i dispersori profondi si usa, generalmente, come letto di posa lo stesso fango utilizzato durante la perforazione per stabilizzare le pareti del foro (fango bentonitico). In questo caso, la bentonite miscelata con acqua rende uniforme l'ambiente circostante il dispersore, migliorandone in tal modo l'efficienza elettrica.

Ove esista il timore che i gas generati dalla reazione anodica restino intrappolati sotto forma di bolle sul dispersore, isolandolo dall'ambiente circostante ed impedendogli così di erogare la corrente richiesta, è necessario prevedere adeguati tubi di sfianto.

Per un dispersore profondo posato lateralmente e sulla verticale della struttura da proteggere, la norma UNI 9782 prevede una profondità di interramento della sua estremità superiore di almeno 40 m.

Nelle realizzazioni tipiche di dispersori profondi si fa uso di:

- barre di acciaio (diametro 60 mm, lunghezza barra 4 m e massa 90 kg);
- anodi di ferro-silicio o ferro-silicio-cromo in barre cilindriche tubolari (diametro 50÷75 mm, lunghezza 1,5÷1,1 m e massa di 16,5÷23 kg).

Le barre di acciaio vengono accoppiate meccanicamente, collegate elettricamente e calate nel foro di alloggiamento (fig. 1).

Gli anodi di ferro-silicio o ferro-silicio-cromo vengono montati singolarmente su idonei supporti e calati nel foro unitamente ai rispettivi cavi (fig. 2).

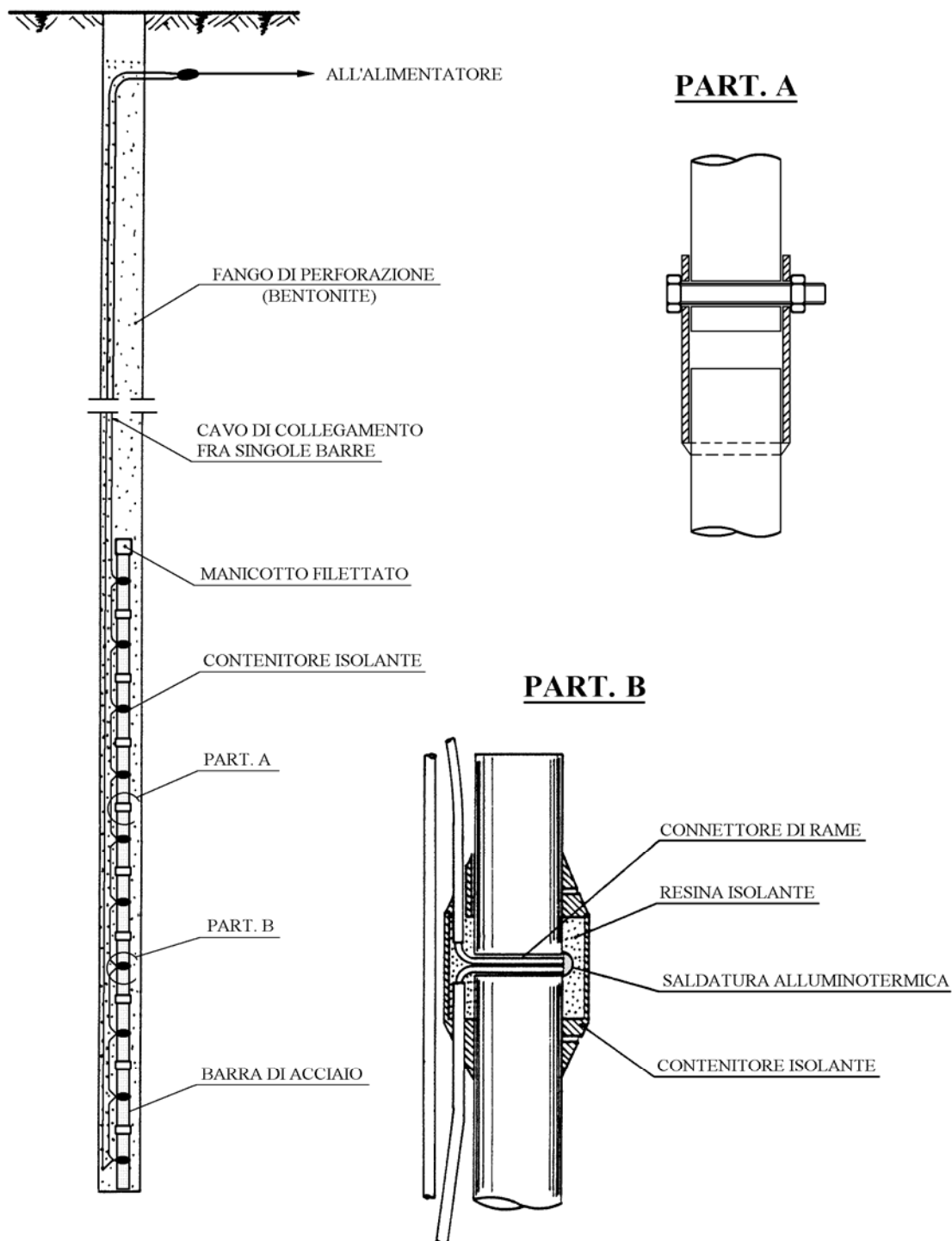
Qualunque sia il tipo di materiale anodico utilizzato, gli elementi anodici che costituiscono il dispersore possono essere assemblati coassialmente su un cavo continuo in stabilimento ed essere successivamente calati nel foro (fig. 3).

In tutti i casi descritti la lunghezza del cavo, o dei cavi, deve essere adeguata alla profondità della perforazione per evitare giunzioni elettriche all'interno del foro.

La posa del dispersore viene di norma eseguita con l'ausilio di idonee attrezzature e procedure di installazione, in genere direttamente nel fango bentonitico. Ciononostante, varianti di realizzazione e di posa possono essere eseguite da ditte qualificate e specializzate.

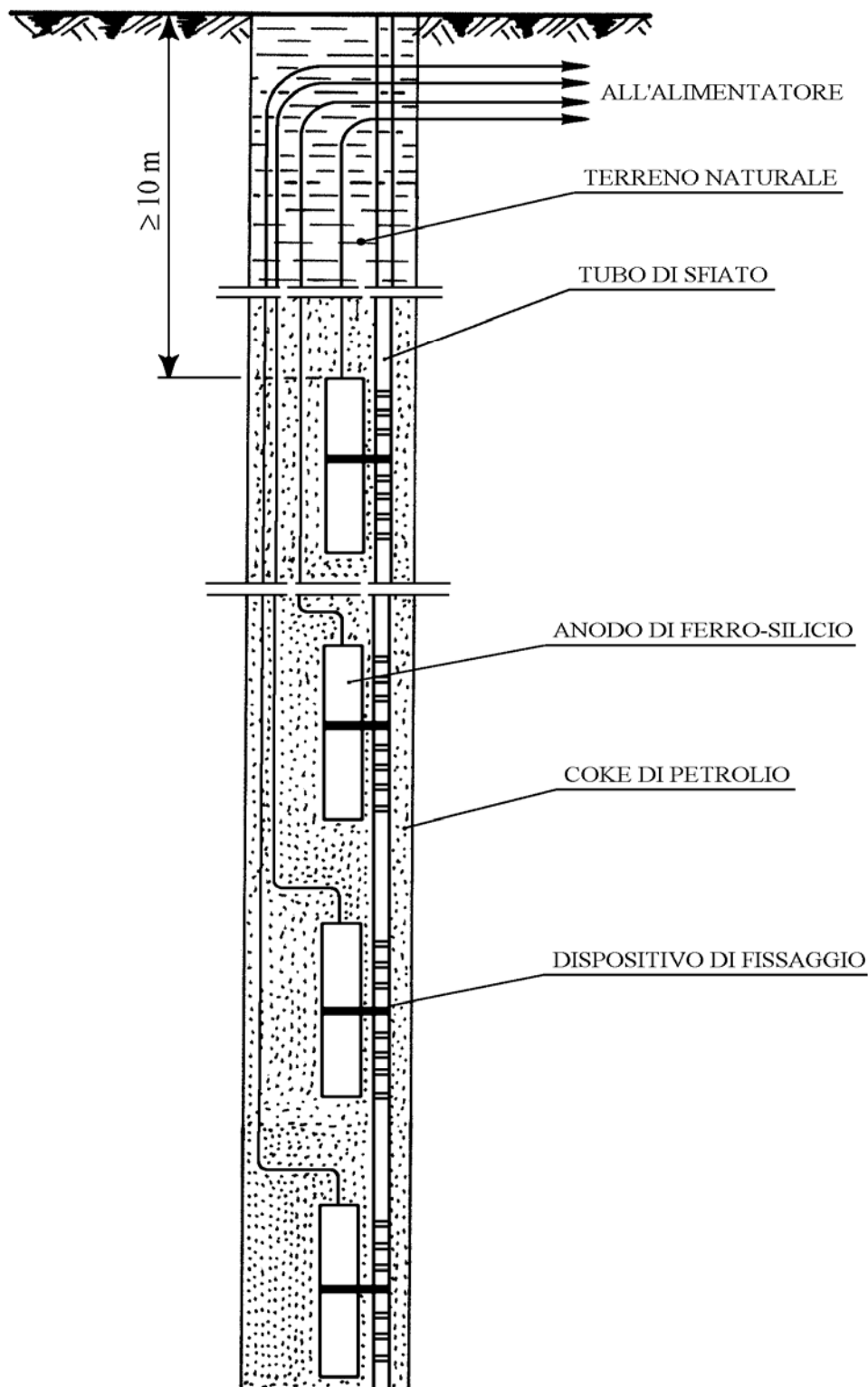
Si possono anche realizzare dispersori profondi iniettando intorno all'anodo materiali conduttori in forma granulare, mediante pompaggio dal fondo del foro fino a coprire la sommità del dispersore, operazione che consente nel contempo la rimozione del fango bentonitico. In questo caso, i materiali iniettati - coke di carbone, coke di petrolio calcinato o grafite - devono possedere proprietà tali da poter essere mescolati con acqua in modo da facilitarne il pompaggio, la deposizione ed il compattamento all'interno del foro.

Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		



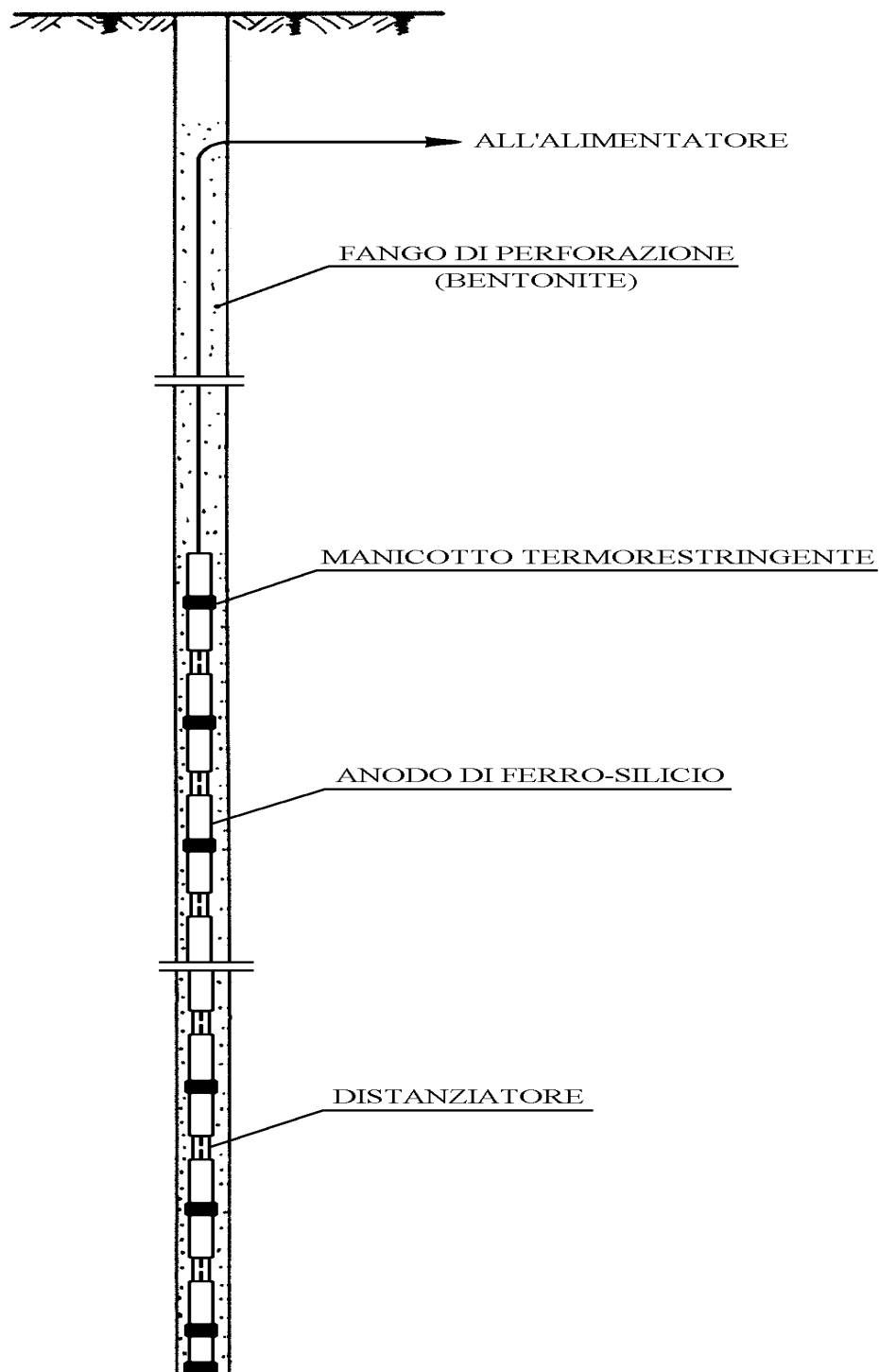
**Fig. 1 - Dispensore profondo con barre di acciaio.**

Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		



*Fig. 2. - Dispensore profondo con anodi cilindrici in ferro-silicio.*

Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		



*Fig. 3 - Dispensore profondo con anodi tubolari in ferro-silicio.*

Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		



**2**

**Realizzazione del foro per la posa del dispersore**

La perforazione deve essere eseguita in modo tale da garantire il raggiungimento delle profondità di interesse e la stabilità del foro. In particolare, il sistema di stabilizzazione delle pareti del foro deve essere tale da:

- non rendere laboriosa la successiva installazione degli anodi;
- ottimizzare l'efficienza dell'impianto.

**2.1 Informazioni sulla natura dei terreni**

La scelta del sistema ottimale di perforazione e di sostentamento delle pareti del foro richiede la conoscenza della natura dei terreni che si andranno ad attraversare.

Una soluzione per controllare la natura dei terreni da attraversare è quella di disporre dei risultati di un'apposita indagine geognostica. L'alternativa a tale indagine è la raccolta di informazioni e dati già disponibili sul sito di interesse.

A questo riguardo, utili informazioni potranno essere ottenute dalla consultazione delle carte geologiche dell'area in esame, reperibili presso librerie specializzate e generalmente disponibili presso le Facoltà Universitarie di Ingegneria Civile, di Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio e di Scienze Geologiche. Ulteriori dati potranno essere acquisiti consultando i risultati delle indagini geotecniche e geologiche già eseguite sul sito in esame e sulle aree limitrofe in occasione di precedenti studi sul territorio e progettazioni di strutture. Molto utili possono risultare inoltre le informazioni acquisite durante l'esecuzione di pozzi profondi per il prelievo di acqua. Le indagini geotecniche e geologiche sono generalmente disponibili presso i locali Uffici Tecnici Comunali e presso gli uffici del Servizio Decentrato OO.PP. e Difesa del Suolo (ex Genio Civile).

**2.2 Stabilità delle pareti del foro**

La stabilità delle pareti del foro dipende dalla particolare natura del terreno. In presenza di terreni coesivi compatti o di terreni cementati (arenarie, calcareniti, ...) le pareti del foro risultano solitamente stabili, almeno per il periodo di tempo necessario per completare le operazioni di installazione. Tuttavia, in considerazione della profondità di perforazione da raggiungere (60÷100 m), è probabile incontrare strati di terreno che possono richiedere un sostentamento. In queste condizioni, l'impiego del fango bentonitico costituisce uno strumento atto ad assicurare la stabilità delle pareti del foro. Infatti il fango bentonitico è una miscela colloidale di acqua e bentonite che assolve una triplice funzione:

- a) stabilizza le pareti del foro;
- b) trasporta i detriti di perforazione in superficie;
- c) può costituire, a perforazione ultimata, il letto di posa del dispersore.

Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		

### 2.3 Modalità di impiego del fango bentonitico

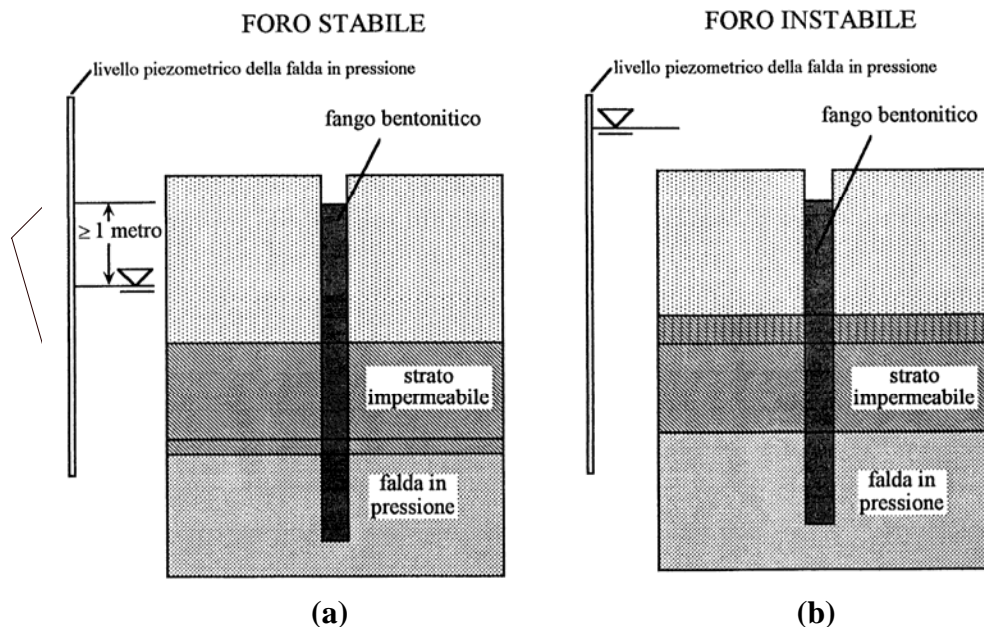
Affinché il fango abbia un effetto stabilizzante sulle pareti del foro occorre che siano assicurate le seguenti condizioni:

- la pressione idrostatica del fango all'interno del foro deve essere superiore a quella esercitata esternamente dalla falda presente nel terreno (fig. 4-a);
- la granulometria del terreno deve essere sufficientemente fine (sabbie, limi, argille) da impedire perdite di fango dal foro verso il terreno.

Il fango stabilizza le pareti del foro per l'effetto congiunto della pressione esercitata dallo stesso sulle pareti e della formazione di una particolare pellicola (cake). Tale pellicola è costituita dalle particelle di fango bentonitico che, per effetto del gradiente idraulico, filtrano dal foro verso il terreno, per essere trattenute dallo stesso riducendone la porosità in prossimità delle pareti.

Se il livello piezometrico dell'acqua di falda presente nel terreno è superiore al livello del fango bentonitico all'interno del foro di perforazione, l'acqua di falda entrerà nel foro, trascinando con sé particelle di terreno e determinando il franamento delle pareti (fig. 4-b).

Pertanto, il ricorso al fango bentonitico è possibile solo nei terreni in cui i livelli piezometrici delle falde interessate dalla perforazione risultino inferiori alla quota del piano campagna. Si tenga presente che il livello del fango bentonitico all'interno del foro di perforazione deve risultare di almeno 1 m superiore al massimo livello piezometrico delle falde presenti negli strati di terreno attraversati dal foro (fig. 4-a).



**Fig. 4 - Condizioni di stabilità (a) e di instabilità (b) delle pareti del foro in presenza di fango bentonitico.**

Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		

Dati relativi alla realizzazione e all'uso di pozzi presenti nell'area in esame forniscono utili informazioni sul livello piezometrico delle falde. Ulteriori informazioni possono essere acquisite presso le locali Aziende di distribuzione dell'acqua.

Una particolare attenzione va posta nel caso in cui nel terreno siano presenti strati di materiale di pezzatura grossolana, molto permeabili; in tal caso, infatti, è possibile che il fango non sia trattenuto dal terreno ma si disperda in esso. Pertanto, non è garantita la formazione del cake sulle pareti del foro e quindi la stabilità dello stesso. In questi casi sarà necessario assicurare la stabilità delle pareti del foro mediante la tecnica dei rivestimenti provvisori.

## 2.4 Preparazione del fango

In fase di preparazione dei fanghi bisogna tenere presenti due avvertenze principali:

- miscelare la bentonite con acque dolci e non utilizzare acque salmastre e/o acide (verificare che il pH sia maggiore di 6-7);
- effettuare la miscelazione preventiva di acqua e bentonite onde ottenere un fango di opportuna fluidità. È da evitare l'uso di fanghi non correttamente miscelati: non è accettabile la preparazione del fango attraverso l'immissione di acqua e di bentonite in polvere direttamente alla bocca del foro, facendo affidamento, per la miscelazione, sulla rotazione della trivella che esegue la perforazione. Infatti, questo sistema sbrigativo comporta un forte spreco di bentonite e produce un fango disomogeneo, ricco di grumi di bentonite, tale da non assicurare un'efficace formazione del cake sulle pareti del foro.

Tenendo conto delle caratteristiche delle bentoniti esaminate presso il Dipartimento di Scienze dei Materiali e della Terra, che sono quelle normalmente utilizzate per questo scopo, risulta che la qualità del fango bentonitico dipende prevalentemente dal sistema di miscelazione piuttosto che dal tipo di bentonite utilizzato.

In sintesi, per quanto riguarda il sostegno delle pareti del foro:

- tutte le bentoniti utilizzate sono risultate idonee all'uso;
- è necessario che l'installatore disponga di un adeguato sistema di miscelazione dei fanghi bentonitici e delle apparecchiature per il controllo delle loro principali caratteristiche (cono tipo Marsh per il controllo della viscosità secondo Corps of Engineer CRD-C 79-77 - *Test method for flow of grout mixtures*, od anche ASTM C939/1981, e bilancia per fanghi per il controllo del peso di volume tipo *Mud Balance Model 140* Baroid Testing Equipment, o equivalente).

La quantità di bentonite, utilizzata per formare il fango bentonitico, può variare generalmente tra il 4% e il 10% in peso rispetto all'acqua, per ottenere un fluido avente viscosità Marsh compresa orientativamente tra 30 e 55 secondi. Alla preparazione, il peso di volume del fango deve risultare, indicativamente, di  $1,02 \div 1,05 \text{ g/cm}^3$ . Nel corso della perforazione, per effetto delle particelle di terreno che rimangono in sospensione, il peso di volume del fango può aumentare notevolmente; è necessario controllare, tuttavia, che esso non superi il valore di  $1,3 \text{ g/cm}^3$ , limite oltre il quale l'utilizzo del fango bentonitico può divenire problematico.

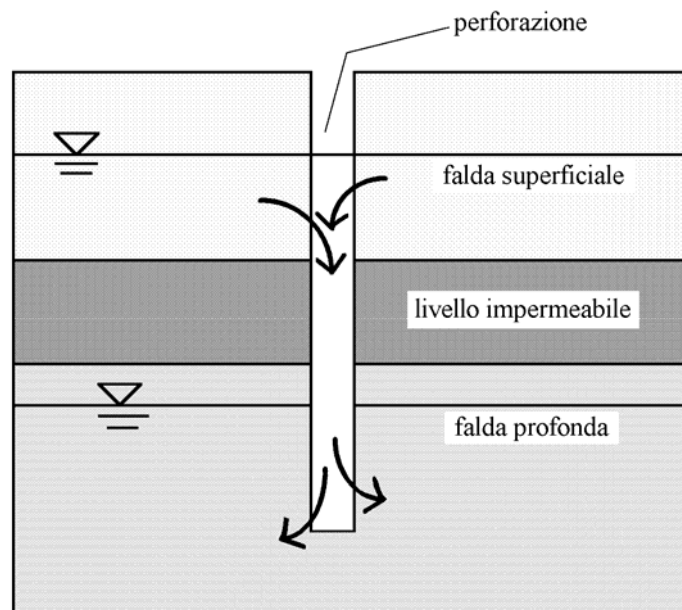
Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		

**3**

**Aspetti ambientali nella realizzazione e funzionamento  
dei dispersori profondi**

**3.1 Comunicazione falde superficiali con falde profonde**

È ricorrente il quesito se la realizzazione della perforazione per l'installazione dei dispersori profondi possa costituire un pericolo per l'ambiente nei casi in cui la perforazione stessa mette in comunicazioni le falde superficiali, inquinate o potenzialmente inquinabili, con una falda profonda, utilizzata o utilizzabile per uso domestico (fig. 5).



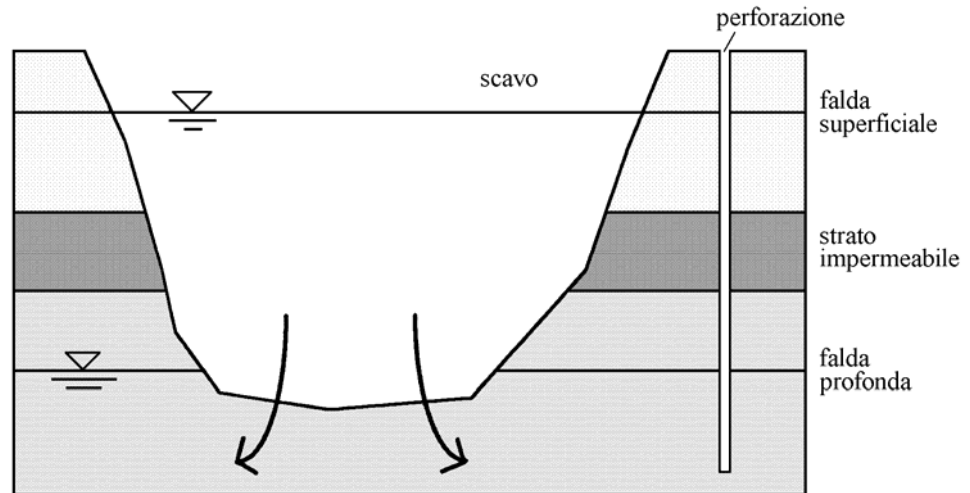
**Fig. 5 - Esempio di comunicazione fra falde prodotta dalla perforazione.**

Tale problema non si pone nei due casi che seguono.

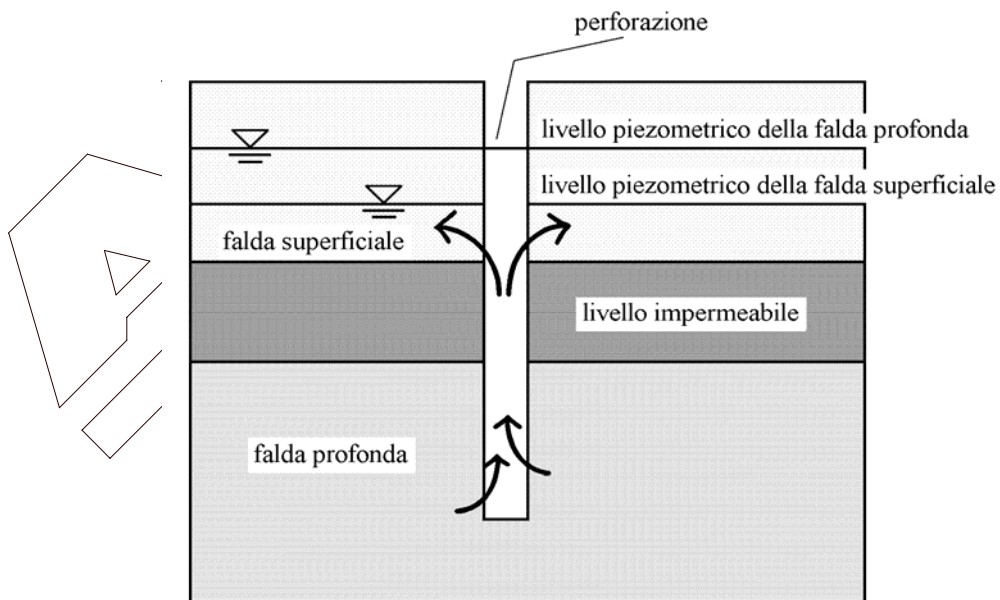
1. Quando nell'area in esame o in prossimità di essa sono già stati realizzati interventi che abbiano già messo in comunicazione le falde. Questa situazione si verifica sovente in aree adibite attualmente o in passato ad attività estrattive sotto falda di materiali granulari (ad esempio in numerose zone della Pianura Padana). In tali casi la comunicazione tra falde profonde e superficiali è già avvenuta; inoltre, l'eventuale effetto conseguente alla perforazione per realizzare un dispersore profondo è trascurabile, considerando che il diametro di perforazione è di alcuni centimetri (15÷30 cm) mentre le superfici di comunicazione tra le falde dovute all'estrazione sono dell'ordine dell'ettaro (fig. 6).

Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		

2. Quando la falda profonda è in pressione ed il suo livello piezometrico supera quello della falda superficiale (fig. 7); in tal caso, il gradiente idraulico produce un flusso di acqua dalla falda profonda verso la falda superficiale ed impedisce pertanto la possibile contaminazione delle acque profonde.



*Fig. 6 - Messa in comunicazione della falda superficiale con quella profonda a causa di scavi per attività estrattive.*



*Fig. 7 - Falda profonda con livello piezometrico superiore a quello della falda superficiale.*

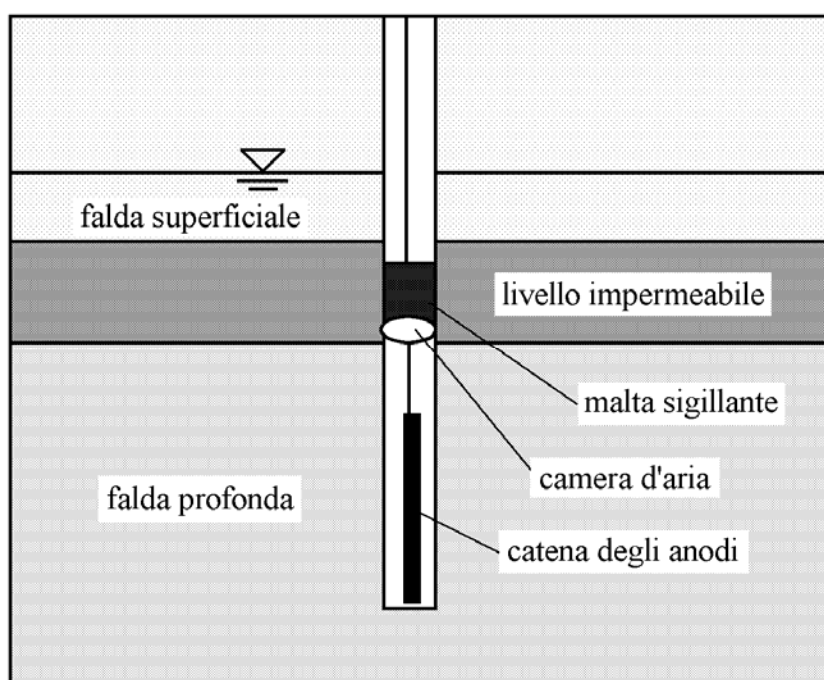
Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		

In situazioni diverse da quelle sopraindicate, l'eventuale rischio di inquinamento della falda profonda deve essere valutato alla luce delle considerazioni che seguono.

Le due falde sono messe in comunicazione attraverso un foro avente un diametro di circa 15÷30 cm e quindi con sezioni molto modeste e sempre inferiori a 0,10 m<sup>2</sup>; pertanto la quantità di sostanze inquinanti o potenzialmente inquinanti che può penetrare nella falda profonda è in genere esigua soprattutto se si tiene conto della diluizione della stessa nella falda profonda. Tale diluizione è direttamente proporzionale alla trasmissività dell'acquifero profondo (ovvero alla sua permeabilità ed al suo spessore).

A questo effetto primario (fattore di diluizione) possono aggiungersi altri fattori che concorrono a ridurre la reale entità del problema dell'inquinamento. Ad esempio, se la perforazione è stata eseguita utilizzando fango bentonitico, la presenza del cake sulle pareti del foro ne riduce la permeabilità e, a questa ridotta permeabilità, corrisponde una riduzione della quantità di inquinante che può penetrare nella falda profonda; inoltre, se il fango bentonitico costituisce il backfill, parte dell'inquinante (le specie chimiche reattive) viene adsorbito dalla bentonite presente nel fango.

Nei casi in cui la perforazione sia eseguita in prossimità di pozzi di captazione di acqua potabile, pur nel rispetto del D.P.R. 24 maggio 1988 n.236, e/o l'elevato inquinamento della falda superficiale rendano indispensabile l'isolamento delle falde, è possibile ricorrere ai seguenti interventi.



**Fig. 8 - Isolamento della falda profonda mediante l'inserimento nel foro di dispositivo di tenuta.**

Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		

Se lo strato impermeabile si trova a quota superiore a quello degli anodi, è possibile isolare le falde mediante l'inserimento nel foro di un dispositivo di tenuta insieme alla catena degli anodi; dopo aver fatto aderire tale dispositivo alle pareti del foro, si effettuerà un getto di malta sigillante (malta cementizia, miscele di acqua con cemento e bentonite), immediatamente al di sopra del dispositivo stesso per avere la garanzia di tenuta idraulica nel tempo (fig. 8).

### 3.2 Materiali costituenti il backfill

Un quesito ricorrente è se i materiali costituenti il backfill degli impianti di protezione catodica possano costituire di per sé un pericolo per l'ambiente.

Sono di seguito elencate alcune caratteristiche tipiche dei materiali più frequentemente impiegati come backfill.

#### 3.2.1 Bentonite

La bentonite <sup>(1)</sup> è una roccia della famiglia delle argille, composta essenzialmente di un minerale argilloso del gruppo delle smectiti.

Per le sue caratteristiche fisiche e chimiche (plasticità, adsorbimento, scambio basi, effetto stabilizzante su emulsioni e sospensioni, ecc.) è largamente usata in ceramica, in fonderia, nella depurazione e chiarificazione delle acque, nella chiarificazione dei vini, nella raffinazione dei prodotti petroliferi, nella fabbricazione di pellicole trasparenti e traslucide, nelle cartiere, nei saponifici, ecc.; inoltre, è spesso usata per l'eliminazione in loco di infiltrazioni in giunti e tubazioni: in presenza di acqua si rigonfia fino a 10 volte il suo volume ed aderisce fortemente, arrestando la perdita.

Questi materiali si presentano, peraltro, in forma di polvere molto fine (< 1µm) e, se secchi, possono essere aerodispersi nell'ambiente facilmente. Pertanto, durante la fase di preparazione e messa in opera del fango bentonitico per la realizzazione del dispersore, il personale deve essere dotato di dispositivi di protezione individuale (DPI) quali guanti a protezione basica e semimaschere con fattore di protezione nominale FPN > 10.

#### 3.2.2 Granulati o polveri di carbone

Il letto di posa può essere costituito oltre che da materiali argillosi, anche da granulati o polveri a base carboniosa. Anche in questo caso, la granulometria del materiale assume un ruolo determinante ai fini della esposizione personale e della protezione ambientale durante la fase di messa in opera del letto di posa. Nonostante la granulometria del coke di petrolio calcinato impiegato sia elevata, la frazione di particelle con diametro inferiore a 1 mm (< 6%) contiene una parte sufficientemente fine (< 10 µm) da essere dispersa in atmosfera, con possibile interessamento degli operatori, che dovranno essere dotati di idonei dispositivi di protezione individuale (DPI).

<sup>(1)</sup> Dal nome della località di Fort Benton (Montana, U.S.A.). In Italia un vasto giacimento si trova nell'isola di Ponza. È solitamente costituita da montmorillonite o beidellite, derivata dalla trasformazione di materiale vulcanico (di solito prodotti piroclastici, più raramente rocce effusive), in situ od anche seguita da trasporto e risedimentazione.

Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		

Il coke di carbone calcinato utilizzato nei test di cessione chimica peraltro non ha evidenziato contenuti quantificabili delle sostanze aromatiche volatili (IPA) pericolose (Benzo(a)Pirene, Benzo(a)Antracene, e BenzoFluoranteni) <sup>(2)</sup>.

### 3.2.3 Cessione di sostanze dai materiali utilizzati come backfill

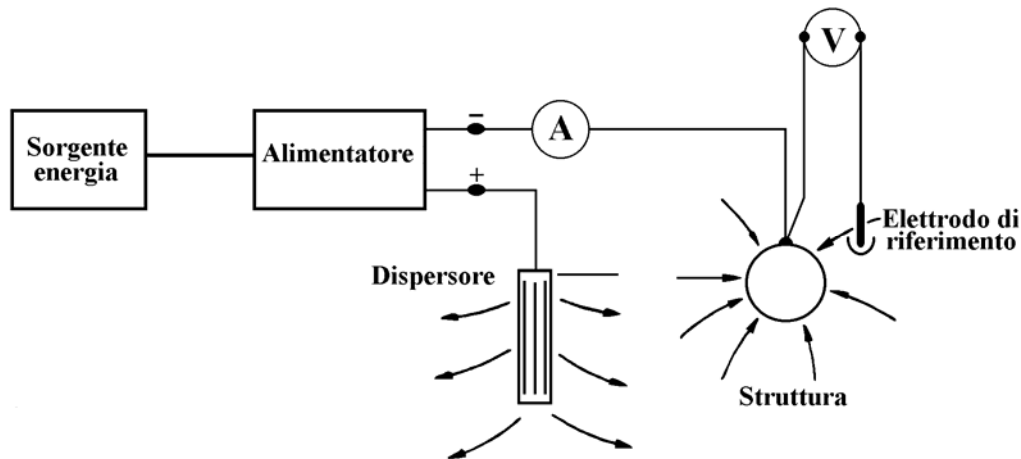
In tutte le bentoniti utilizzate la cessione degli inquinanti considerati in quanto potenzialmente più importanti da un punto di vista ambientale (metalli pesanti e idrocarburi policiclici aromatici) è risultata sempre trascurabile. Ciò porta a generalizzare la conclusione della sostanziale assenza di un problema ambientale da questa provenienza.

Il backfill carbonioso costituito dal coke di petrolio calcinato, non ha evidenziato, ai test di cessione eseguiti, rilasci di metalli pesanti. La cessione di sostanze organiche, inoltre, rimane contenuta a livelli accettabili rispetto a standards di qualità ambientale reperibili in letteratura. In particolare, i valori delle concentrazioni espresse come benzene non hanno mai superato 0,4 mg/l, in qualunque condizione; un riferimento disponibile in letteratura quale standard di qualità ambientale di protezione ecologica, riferito al benzene, è indicato in 0,5 mg/l.

### 3.3 Fase di funzionamento del dispersore

Sono qui di seguito esaminati i possibili aspetti di carattere ambientale connessi al funzionamento del dispersore profondo.

#### 3.3.1 Aspetti generali



**Fig. 9 - Sistema di protezione catodica a corrente impressa.**

<sup>(2)</sup> Queste sostanze sono presenti nella pece utilizzata per la produzione della grafite impiegata come letto di posa. Tuttavia, durante la fase di grafitazione, il trattamento termico a circa 1000°C cui è sottoposto il materiale trasforma e distrugge la maggior parte di questi componenti più volatili.

Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		



Nel sistema di protezione catodica a corrente impressa (fig. 9) il polo positivo è collegato al dispersore profondo (anodo) e quello negativo alla struttura da proteggere (catodo).

L'applicazione di corrente continua genera, in particolare, fenomeni di ossidazione all'anodo con formazione di un fronte acido (ioni  $H^+$ ) e fenomeni di riduzione al catodo dove si genera un fronte basico (ioni  $OH^-$ ).

Accanto a queste reazioni, ed in funzione del potenziale elettrochimico, coesistono reazioni di ossido-riduzione all'anodo ed al catodo con migrazione di ioni mobili. Il pH <sup>(3)</sup> assume valori prossimi a 2 in prossimità dell'interfaccia anodica e valori intorno a 12 in quella catodica.

### 3.3.2 *Materiali costituenti il dispersore*

Il dispersore è costituito nella sua interezza dall'anodo e dal circostante letto di posa (backfill).

Per valutare la generazione degli inquinanti dovuti alla corrosione dell'anodo, occorre distinguere due situazioni in relazione al backfill in cui è immerso l'anodo, cioè la bentonite o il coke di carbone. Il fenomeno è stato valutato sperimentalmente mediante un impianto pilota appositamente realizzato presso il Dipartimento di Scienze dei Materiali e della Terra dell'Università degli Studi di Ancona.

#### 3.3.2.1 *Anodi in ferro-silicio-cromo con backfill di bentonite*

L'ossidazione dell'anodo commerciale in Fe-Si-Cr <sup>(4)</sup> impiegato in presenza di bentonite ha prodotto in soluzione essenzialmente ioni metallici quali il ferro, il manganese e il cromo nei suoi stati di ossidazione trivalente ed esavalente. Il rapporto delle quantità degli ioni metallici generati rispecchia la composizione dell'anodo. Tuttavia, in presenza di bentonite, il ferro, il manganese ed il cromo trivalente sono in forma insolubile e precipitano sulla stessa che li trattiene. Con riferimento al cromo, esso presenta due diversi stati di ossidazione: il cromo esavalente ( $Cr^{VI}$ ), tossico con elevata solubilità in acqua, ed il cromo trivalente ( $Cr^{III}$ ), non tossico con solubilità dipendente dalle condizioni di pH (solubile a pH acidi ed insolubile a pH basici).

Dalle prove eseguite su impianto pilota, condotte in condizioni molto più severe di quelle usualmente rilevate in esercizio, è apparso evidente il potere tamponante della bentonite: infatti, l'89% del cromo liberato dalla corrosione dell'anodo è risultato immobilizzato dalle particelle di bentonite; del restante 11% rimasto in soluzione, il 70% è risultato  $Cr^{VI}$  e quindi pari a solo il 7,7% del cromo totale liberato.

Al proseguire dell'ossidazione dell'anodo, il pH dell'ambiente diminuisce rendendo possibile un'ulteriore dissoluzione del cromo trivalente,  $Cr^{III}$ , già precipitato sui fanghi bentonitici. Il cromo esavalente,  $Cr^{VI}$ , invece, rimane in soluzione a pH alcalini, mentre tende ad insolubilizzarsi a pH acidi, localizzandosi nella zona anodica.

<sup>(3)</sup> Il pH misura l'acidità del mezzo in una scala che comunemente viene espressa con valori compresi fra 0 e 14; il valore 7 rappresenta la neutralità, valori inferiori indicano acidità, valori superiori alcalinità.

<sup>(4)</sup> La composizione chimica di tale anodo risulta: Fe 79,3%, Si 15,0%, Cr 4,0%, C 1,0%, Mn 0,7%.

Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		

L'eccellente capacità tamponante della bentonite, con elevate densità di corrente impressa ( $> 10 \text{ A/m}^2$ ), può risultare esaurita dopo un determinato periodo di esercizio, coinvolgendo in un processo di acidificazione e di tamponamento una zona più o meno ampia di terreno circostante il foro, valutabile nell'ordine dei metri per l'intero periodo di funzionamento del dispersore.

Inoltre, se i terreni e le acque di falda contengono cloruri all'anodo si sviluppano cloro e acido ipocloroso. Questo costituisce un ulteriore motivo per evitare l'uso di acque salmastre (vedere Par.2.4) ricche in cloruri nella preparazione dei fanghi bentonitici.

Tuttavia, i cloruri possono essere presenti anche nelle bentoniti; in quelle esaminate nel corso della sperimentazione il contenuto di cloruri è risultato compreso tra 50 mg/l e 120 mg/l (da sospensioni acquose al 7% in secco). Pertanto, al fine della selezione dei materiali bentonitici, si ritiene opportuno non superare il valore massimo sopra indicato.

### 3.3.2.2 Anodo di ferro-silicio-cromo con backfill di carbone

L'ossidazione dell'anodo commerciale impiegato in presenza di carbon coke ha prodotto in soluzione essenzialmente ioni metallici quali ferro, manganese, cromo trivalente oltre a sostanze organiche.

In queste condizioni non risulta apprezzabile la quantità di cromo esavalente. Infatti, la produzione di sostanze organiche che vengono a formarsi in seguito alla ossidazione del carbon coke localizzato intorno all'anodo probabilmente ne maschera o riduce la presenza.

In effetti, i più bassi potenziali richiesti da questo dispersore come l'elevata capacità di ossidazione delle sostanze organiche da parte del  $\text{Cr}^{\text{VI}}$  con conseguente sua riduzione a  $\text{Cr}^{\text{III}}$ , fa propendere per l'assenza di  $\text{Cr}^{\text{VI}}$  piuttosto che la sua mascheratura da parte delle sostanze organiche prodotte.

Molto complessa risulta la composizione delle sostanze organiche formate in seguito all'ossidazione nella zona anodica.

Il potenziale dell'anodo è risultato sempre inferiore a quello misurato nel backfill bentonitico, a parità di corrente erogata, indicando una più bassa resistenza anodica. Ciò comporta una modesta corrosione dell'anodo metallico (circa il 10% rispetto allo steso anodo in backfill bentonitico), dovuta alla capacità del carbon coke di partecipare alle reazioni anodiche attraverso l'ossidazione del carbonio, aumentando di fatto l'area elettrodica. La massa di ioni metallici liberati nell'ambiente risulta in tal modo proporzionalmente ridotta. Per contro, la quantità di sostanza organica rilevata nella soluzione interstiziale, assente nel caso del backfill bentonitico, diventa rilevante (7 g COD<sup>(5)</sup> per grammo di anodo consumato). Considerando che nell'intorno degli anodi il backfill carbonioso impiegato può variare da 300 a 1000 kg, la produzione giornaliera di COD può variare da 3 a 10 g/d, che corrisponde ad una quantità pari a circa  $1/20 \div 1/6$  di quella prodotta giornalmente da un abitante in uno scarico civile.

Nella zona anodica si forma un liquido nero, costituito all'analisi da particellato finissimo di carbone grafitato e da una miscela di composti acidi organici non meglio

(<sup>5</sup>) Il COD (Chemical Oxygen Demand), misura dell'ossigeno consumato nei processi ossidativi, viene utilizzato come indicatore delle sostanze organiche presenti.

Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		

identificabili. Le analisi gascromatografiche escludono comunque la presenza di Benzo(a)Pirene, Benzo(a)Antracene e BenzoFluoranteni, idrocarburi policiclici aromatici considerati tossici dalle normative italiana ed internazionale.

#### 3.3.2.3 Anodi di ferro e ferro-silicio

Per gli anodi di ferro e ferro-silicio valgono le stesse considerazioni fatte per quelli in ferro-silicio-cromo, con la peculiarità dell'assenza di cromo. Non si rileva, quindi, alcun rilascio di sostanze tossiche.

### 3.4 Effetto immobilizzante della bentonite

Le sostanze che si formano durante l'ossidazione anodica possono peraltro essere trattenute dalla bentonite e dal terreno circostante impedendone l'allontanamento. Occorre allora valutare la capacità di adsorbimento, da parte dei materiali circostanti l'anodo, delle sostanze prodotte durante i processi di ossidazione.

#### Adsorbimento di cromo esavalente

I risultati sperimentali delle prove condotte indicano una trascurabile capacità della bentonite di trattenere il cromo esavalente, che pertanto rimane libero di migrare nella soluzione interstiziale senza essere praticamente ritardato dalla presenza del fango bentonitico. E' tuttavia noto in letteratura che il Cr<sup>VI</sup> può essere parzialmente assorbito su terreni ricchi in frazione organica; è, quindi, possibile prevedere che terreni naturali con contenuti in sostanze organiche di almeno il 3÷4% possano trattenere parte del Cr<sup>VI</sup>.

#### Adsorbimento di cromo trivalente

Lo ione cromo trivalente risulta sostanzialmente insolubile per pH dell'acqua interstiziale superiori a 7. In condizioni di pH neutro od alcalino, quindi, il Cr<sup>III</sup> non è in grado di essere mobilitato e trasportato lontano dalla sua zona di formazione, mentre la sua mobilità aumenta a pH acidi con la parallela diminuzione di capacità adsorbente della bentonite.

#### Adsorbimento di sostanza organica

La sostanza organica che si forma durante l'ossidazione anodica quando il backfill è costituito da carbon coke, è stata studiata con prove di adsorbimento al fine di studiarne la possibile migrazione. Il terreno naturale di contorno del carbon coke è stato simulato utilizzando due delle bentoniti commerciali disponibili. I risultati ottenuti individuano una bassa capacità di adsorbimento (< 1-2%), con valori dell'ordine 0,2÷1,2 g di COD equivalente per kg di fango bentonitico secco. L'adsorbimento è risultato sostanzialmente indipendente dal pH nell'intervallo compreso fra 5 e 10.

Anche in questo caso tuttavia è possibile ipotizzare che in presenza di terreni con percentuali di sostanza organica superiore al 3÷4% la capacità di adsorbimento aumenti.

### 3.5 Migrazione di sostanze in campo elettrico

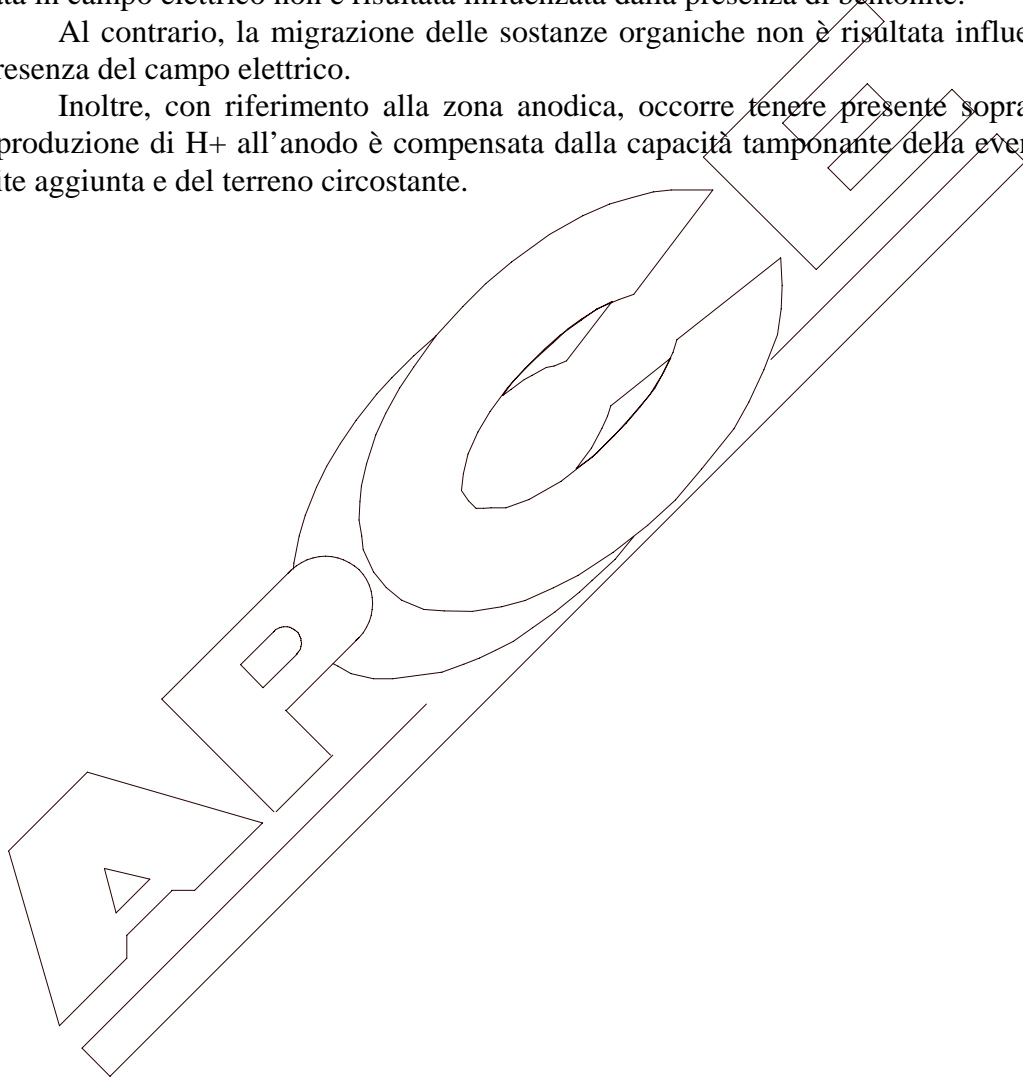
Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		

Tra le sostanze generate all'anodo ed osservate durante la sperimentazione, viene presa in considerazione la migrazione delle sole specie di particolare interesse ambientale, quali il cromo esavalente e la sostanza organica.

La sperimentazione eseguita in laboratorio ha confermato che, in presenza di campo elettrico applicato, la direzione di migrazione del Cr<sup>VI</sup> è diretta dal catodo verso l'anodo, indicando una localizzazione del Cr<sup>VI</sup> all'anodo. Inoltre, la velocità di migrazione osservata in campo elettrico non è risultata influenzata dalla presenza di bentonite.

Al contrario, la migrazione delle sostanze organiche non è risultata influenzata dalla presenza del campo elettrico.

Inoltre, con riferimento alla zona anodica, occorre tenere presente soprattutto che la produzione di H<sup>+</sup> all'anodo è compensata dalla capacità tamponante della eventuale bentonite aggiunta e del terreno circostante.



Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		

## 4

### Conclusioni

- ⇒ La scelta del sistema ottimale di perforazione e di sostentamento delle pareti del foro in cui sarà alloggiato il dispersore profondo richiede la conoscenza della natura dei terreni attraversati; per questo motivo, la realizzazione del dispersore non può, generalmente, prescindere dai risultati di un'apposita indagine geognostica preventiva, che potranno anche condizionare la tipologia del dispersore da realizzare.
- ⇒ Qualora il rischio che la perforazione necessaria alla realizzazione del dispersore metta in comunicazione falde superficiali con falde profonde sia reale, e non superato da situazioni precostituite, è necessario ricorrere ad idonee tecnologie di isolamento fra le falde e di sigillatura con garanzia di tenuta, adottate di volta in volta in base alle risultanze della predetta indagine geognostica.
- ⇒ I risultati delle prove di cessione di sostanze da parte dei materiali costituenti il dispersore durante il suo funzionamento, nonché di migrazione ed adsorbimento delle stesse sui materiali circostanti l'anodo, indicano come un problema, sia pure di proporzioni ridotte, possa esistere solo per il cromo esavalente. Poiché l'efficienza del dispersore non viene compromessa ricorrendo a materiali anodici diversi, il problema è facilmente risolvibile attraverso l'utilizzazione di anodi non contenenti cromo.
- ⇒ I risultati ottenuti, dal diverso comportamento dei due tipi di backfill generalmente utilizzati (fango bentonitico e coke di carbone) che ne mette in luce vantaggi e difetti, suggeriscono l'ipotesi della utilizzazione di miscele di coke e bentonite come backfill nella realizzazione di dispersori profondi per l'effetto sinergico che ne potrebbe derivare. Tale opportunità, tuttavia, dovrà essere valutata concretamente, attraverso un futuro sviluppo della ricerca svolta.
- ⇒ Nelle fasi di preparazione e di posa in opera sia del fango bentonitico impiegato durante la trivellazione del foro di alloggiamento del dispersore, sia del backfill a base di granulati o polveri di carbone, a causa della possibile aerodispersione delle particelle allo stato secco, gli operatori dovranno essere dotati di idonei dispositivi di protezione individuale.

Data	Edizione	Revisione	Emissione	Verifica	Approvazione
02.01.1999	1	0	CTC		