

Contraente: 	Progetto: METANODOTTO SERGNANO – MORTARA, TRATTO CERVIGNANO – MORTARA DN 750 (30”), MOP 70 BAR, E OPERE CONNESSE Rimozione condotte esistenti		Cliente:  SNAM RETE GAS
	N° Contratto : N° Commessa : NR/11030		
N° documento: J01811-ENV-RE-300-0005	Foglio 1 di 17	Data 12-04-2013	

STUDIO SULLA DISPERSIONE DEL FERRO NEL TERRENO

00	12-04-2013	EMISSIONE	MARIANI	CECCONI	MONTONI
REV	DATA	TITOLO REVISIONE	PREPARATO	CONTROLLATO	APPROVATO.

METANODOTTO SERGNANO – MORTARA, TRATTO CERVIGNANO – MORTARA DN 750 (30”), MOP 70 BAR, E OPERE CONNESSE Rimozione condotte esistenti			
STUDIO SULLA DISPERSIONE DEL FERRO NEL TERRENO			
N° Documento: J01811-ENV-RE-300-0005	Foglio di	17	Rev.: 00

INDICE

1	PREMESSA	3
2	INDIVIDUAZIONE DEI TRATTI DA NON RIMUOVERE	4
3	PERMANENZA A LUNGO TERMINE DELLA CONDOTTA NEL TERRENO	5
	3.1 Dissoluzione del ferro	5
	3.1.1 Generalità sulla corrosione	5
	3.1.2 Fattori di corrosione	6
	3.1.3 Meccanismi di corrosione	7
	3.2 Stima della corrosione nel terreno saturo	9
4	DISPERSIONE E TRASPORTO IN FALDA	10
	4.1 Modello Domenico di dispersione in falda	10
5	VALUTAZIONE DELLA DISSOLUZIONE IN FALDA DEGLI IONI FERRO	12
	5.1 Schema di valutazione della dissoluzione	12
	5.2 Parametri del modello	14
	5.2.1 Parametri della tubazione	14
	5.2.2 Parametro di corrosione	14
	5.2.3 Parametri idrogeologici	14
	5.2.4 Parametri chimico-fisici del ferro	15
	5.3 Risultati	15

METANODOTTO SERGNANO – MORTARA, TRATTO CERVIGNANO – MORTARA DN 750 (30”), MOP 70 BAR, E OPERE CONNESSE Rimozione condotte esistenti				
STUDIO SULLA DISPERSIONE DEL FERRO NEL TERRENO				
N° Documento: J01811-ENV-RE-300-0005	Foglio 3	di 17	Rev.: 00	

1 PREMESSA

Il presente “Studio sulla dispersione del ferro nel terreno”, relativo al gasdotto denominato “Metanodotto Sergnano-Mortara, tratto Cervignano-Mortara, DN 750 (30”), MOP 70 bar e opere connesse”, è redatto in accordo a quanto richiesto al punto 4 della “Richiesta integrazioni allo Studio di Impatto Ambientale” formulata dalla *Commissione tecnica VIA - VAS del Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare* ed inoltrata dalla *Direzione Generale per le Valutazioni Ambientali*, con protocollo DVA-2012-0031518 del 27/12/2012.

La rimozione delle condotte citate fa parte del progetto di realizzazione del “Metanodotto Cervignano – Mortara DN 1400 (56”), DP 75 bar e opere connesse”, destinato a sostituire il metanodotto Cervignano – Mortara e a ricollegare i punti di riconsegna e le reti ad esso collegati.

Il metanodotto principale in rimozione, ricadente in regione Lombardia, misura 56,100 km ed interessa le province di Pavia (per 36,350 km, pari al 65%), Milano (per 13,105 km, pari al 23%) e Lodi (6,745 km, pari al 12%).

Le opere connesse, ricadenti anch’esse in regione Lombardia, misurano complessivamente 21,716 km ed interessano le medesime province, ma con percentuali differenti: 73% per Pavia (pari a 15,920 km), 16% per Milano (pari a 3,575 km) e 10% per Lodi (pari a 2,221 km)

Per le tubazioni da dismettere a seguito della messa in operatività delle nuove reti, si prevedono tre tipologie di tratti di intervento:

- tratti con rimozione della condotta con scavo a cielo aperto;
- tratti con estrazione del tubo di linea e intasamento del tubo di protezione;
- tratti da lasciare in opera e intasare.

Il presente documento è volto, nello specifico, ad approfondire e quantificare le possibili dispersioni di ferro nel terreno dovute ai tratti di tubazione che non saranno oggetto di rimozione, bensì di fondellamento e inertizzazione mediante malta cementizia.

Nel dettaglio, lungo la condotta DN750 (30”), tali tratti sono riconducibili ai seguenti:

- dal km 7+900 al km 9+100, in corrispondenza del passaggio della condotta in prossimità della ex-discarica di Vizzolo, per complessivi 1.200 m;
- dal km 27+260 al km 28+430, in comune di Rognano in corrispondenza del SIC/ZPS IT2080023 “Garzaia Cascina Villarasca”, classificato anche come Important Bird Area IBA 022 “Lomellina e Garzaie del Pavese”, per 1.170 m;
- dal km 39+305 al km 42+500, in corrispondenza dell’attraversamento dell’alveo del Fiume Ticino e del Bosco del Modrone, per complessivi 3.195 m.

Per le opere connesse, invece, non si rilevano tratti da non rimuovere.

METANODOTTO SERGNANO – MORTARA, TRATTO CERVIGNANO – MORTARA DN 750 (30”), MOP 70 BAR, E OPERE CONNESSE				
Rimozione condotte esistenti				
STUDIO SULLA DISPERSIONE DEL FERRO NEL TERRENO				
N° Documento: J01811-ENV-RE-300-0005	Foglio 4	di 17	Rev.:	00

2 INDIVIDUAZIONE DEI TRATTI DA NON RIMUOVERE

Le caratteristiche litologiche e la permeabilità lunghi i tratti da non rimuovere sono riportate nella seguente tabella:

Tab. 2.1 - Litologia e permeabilità dei tratti oggetto di non rimozione

Da km	A km	Lunghezza (m)	Area	Litologia/permeabilità
Metanodotto Sergnano-Mortara, tratto Cervignano-Mortara, DN 750 (30”), MOP 70 bar				
7+900	9+100	1.200	Ex-discarda di Vizzolo	Alluvium medio ed antico: depositi caratterizzati da un grado di permeabilità variabile da elevato nei termini grossolani ghiaioso-sabbiosi ($K=10^{-4}$ m/s) a medio-alto nei termini sabbioso-limosi ($K=10^{-5}$ m/s) Alluvium recente ed attuale: depositi caratterizzati da un grado di permeabilità mediamente elevato ($K=10^{-2}$ / 10^{-4} m/s)
27+260	28+430	1.170	SIC/ZPS IT2080023 “Garzaia Cascina Villarasca”, IBA 022 “Lomellina e Garzaie del Pavese”	Fluviale Wurm: depositi caratterizzati da un grado di permeabilità variabile da elevato nei termini grossolani ghiaioso-sabbiosi ($k=10^{-4}$ m/s), a medio-alto nei termini sabbioso-limosi ($K=10^{-5}$ m/s) fino ad essere basso nella coltre superficiale argillosa di copertura ($K=10^{-7}$ / 10^{-9} m/s)
39+305	42+500	3.195	Fiume Ticino e Bosco del Modrone	Alluvium medio ed antico: depositi caratterizzati da un grado di permeabilità variabile da elevato nei termini grossolani ghiaioso-sabbiosi ($K=10^{-4}$ m/s) a medio-alto nei termini sabbioso-limosi ($K=10^{-5}$ m/s) Alluvium recente ed attuale: depositi caratterizzati da un grado di permeabilità mediamente elevato ($K=10^{-2}$ / 10^{-4} m/s)
Opere connesse				
-	-	-	-	-

METANODOTTO SERGNANO – MORTARA, TRATTO CERVIGNANO – MORTARA DN 750 (30”), MOP 70 BAR, E OPERE CONNESSE Rimozione condotte esistenti				
STUDIO SULLA DISPERSIONE DEL FERRO NEL TERRENO				
N° Documento:	Foglio	Rev.:		
J01811-ENV-RE-300-0005	5 di 17	00		

3 PERMANENZA A LUNGO TERMINE DELLA CONDOTTA NEL TERRENO

La condotta da dismettere è costituita essenzialmente da acciaio al carbonio ed in minima parte dal suo rivestimento in bitume pesante (fillerizzato con una % di polvere minerale inerte).

Questi materiali, acciaio e bitume, immersi nel terreno ed a volte in acque di falda subiscono processi di degradazione con tempi e con modalità molto diverse.

In particolare il bitume, che è costituito da una miscela di idrocarburi avente numero di atomi di carbonio superiore a 25, non è significativamente solubile in acqua, non viene attaccato apprezzabilmente dai microrganismi e non determina una considerevole domanda biologica di ossigeno. Il prodotto non ha effetti dannosi sull'ambiente acquatico e sulle piante. In letteratura (*“Durability of bituminous geomembrane water proofing works. 57th Canadian geotechnical conference”*) sono riportati valori medi di velocità di degradazione dei rivestimenti bituminosi nel terreno dell'ordine dei 5 µ/anno.

Questo significa che per degradare il rivestimento della tubazione sono ipotizzabili tempi dell'ordine di 900 anni.

L'azione del rivestimento viene tuttavia meno in corrispondenza di falle o difetti di costruzione, già presenti nel rivestimento, la cui presenza è pressoché inevitabile.

L'acciaio costituente la condotta interrata, privo di protezione, è soggetto a fenomeni di corrosione e di dissoluzione dei derivati per lisciviazione delle acque di falda o percolanti dalla superficie. In presenza di terreni argillosi o limosi dove il flusso dell'acqua è praticamente nullo, il trasporto del ferro soluto è minimo.

Nel seguito si considereranno gli effetti della dissoluzione del ferro soltanto in presenza di terreni con permeabilità significativa e sede di falda freatica; tale situazione è da ritenere quella più conservativa ai fini dell'impatto sull'ambiente.

3.1 Dissoluzione del ferro

3.1.1 Generalità sulla corrosione

La corrosione di manufatti metallici interrati è un fenomeno complesso che si basa principalmente su processi elettrochimici che si instaurano a livello della superficie metallica, determinando la dissoluzione del metallo ed eventualmente la formazione di prodotti ossidati (ossidi e idrossidi variamente idratati).

La corrosione si manifesta laddove ci siano delle disuniformità dei metalli di natura fisica, chimica e geometrica e disuniformità chimiche e fisiche dell'ambiente di contatto, le quali determinerebbero la localizzazione delle reazioni anodiche (ossidazione del metallo, e quindi la sua dissoluzione) e delle reazioni catodiche (riduzione).

Il terreno, in rapporto alle condotte in acciaio interrate, risulta un mezzo corrosivo e caratterizzato da una struttura porosa e da conducibilità ionica.

METANODOTTO SERGNANO – MORTARA, TRATTO CERVIGNANO – MORTARA DN 750 (30”), MOP 70 BAR, E OPERE CONNESSE Rimozione condotte esistenti				
STUDIO SULLA DISPERSIONE DEL FERRO NEL TERRENO				
N° Documento: J01811-ENV-RE-300-0005	Foglio di	17	Rev.:	
			00	

Le porosità possono essere sede sia di acqua, che di aria (ossigeno). Il grado di porosità è in relazione alla granulometria delle particelle che lo costituiscono: i terreni dove prevale la presenza di particelle grossolane e quelli sabbiosi possiedono elevata capacità di drenaggio, di accumulo e flusso di acqua all'interno degli spazi vuoti, e basso grado di ritenzione dell'acqua. I terreni a granulometria fine (limi e soprattutto argille) hanno invece un'elevata capacità di trattenere l'acqua nei pori e sono soggetti a fenomeni di risalita capillare dalla tavola d'acqua.

L'acqua e l'aria, presenti nei pori, sono antagoniste: i terreni asciutti favoriscono il trasporto per diffusione di aria e quindi dell'ossigeno (condizioni aerobiche); nei terreni bagnati, con elevato contenuto di acqua, la diffusione dell'ossigeno è molto rallentata e può avvenire solo attraverso la fase acquosa (condizioni anaerobiche).

3.1.2 Fattori di corrosione

I principali fattori che regolano la corrosività di un terreno sono:

- la resistività;
- l'acidità;
- il contenuto di Sali (cloruri, solfati, bicarbonati).

A questi si deve aggiungere la presenza di specie batteriche che sono in grado di intervenire sul meccanismo di corrosione.

3.1.2.1 Resistività

La resistività del terreno è un parametro complesso, funzione della porosità, permeabilità, contenuto ionico dei fluidi e mineralizzazione argillosa. Tanto più la resistività di un terreno è bassa, tanto più elevata è la sua potenziale corrosività.

La previsione della effettiva corrosività di un terreno non può tuttavia essere basata sulla sola resistività e deve tenere conto di tutti i meccanismi di corrosione effettivamente operanti.

3.1.2.2 Sali disciolti

Elevati tenori di sali nel terreno ne diminuiscono la resistività. Alcuni ioni, in particolare i cloruri ed i solfati, agiscono come depassivanti e antagonisti alla formazione di prodotti di corrosione protettivi. Concentrazioni, riferite alla massa di terreno asciutto, pari a 200 ppm per gli ioni Cl^- , e a 1000 ppm per gli ioni SO_4^{2-} , sono i limiti indicativi al di sopra dei quali la corrosività di un terreno è considerata severa.

3.1.2.3 Acidità

Nei terreni acidi, con pH inferiori a 5,5, la corrosività aumenta al diminuire del pH, cioè al crescere dell'acidità, in relazione alla maggiore solubilità dei prodotti di corrosione.

METANODOTTO SERGNANO – MORTARA, TRATTO CERVIGNANO – MORTARA DN 750 (30”), MOP 70 BAR, E OPERE CONNESSE Rimozione condotte esistenti				
STUDIO SULLA DISPERSIONE DEL FERRO NEL TERRENO				
N° Documento: J01811-ENV-RE-300-0005	Foglio di	7 17	Rev.:	00

3.1.3 Meccanismi di corrosione

3.1.3.1 Corrosione Generalizzata

La corrosione dei metalli nel terreno avviene con meccanismo elettrochimico ed è causata dalla presenza dell'ossigeno disciolto nell'acqua. Nel caso dell'acciaio, la corrosione generalizzata è la risultante di diversi processi (vedi Tab. 3.1).

Tab. 3.1 - Processi di corrosione

Semireazione anodica	$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$
Semireazione catodica	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^{-} \rightarrow 2OH^{-}$
Ossidazione di ioni ferrosi, Fe^{2+} , a ferrici, Fe^{3+}	$Fe^{2+} + \frac{1}{4}O_2 + \frac{1}{2}H_2O \rightarrow Fe^{3+} + OH^{-}$
Precipitazione di prodotti di corrosione	$2Fe^{3+} + 3H_2O \rightarrow Fe_2O_3 + 6H^{+}$ $Fe^{3+} + 2Fe^{2+} + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 8H^{+}$
Precipitazione di carbonati	$Ca(HCO_3)_2 + OH^{-} \rightarrow CaCO_3 + H_2O$

La massima velocità di corrosione generalizzata è uguale alla densità di corrente limite di diffusione dell'ossigeno, di solito compresa tra 10 e 100 mA/m², a cui corrisponde una velocità di corrosione di circa 0,010 – 0,10 mm/anno.

La precipitazione di croste di carbonati e di prodotti di corrosione del ferro determinano tuttavia una progressiva diminuzione della corrosione nel tempo.

La perdita di spessore, o penetrazione della corrosione, per molti materiali metallici, tra cui l'acciaio, segue un andamento parabolico.

3.1.3.2 Corrosione Localizzata

Gli stessi processi che sono alla base della progressiva diminuzione della velocità di corrosione generalizzata, cioè la precipitazione di prodotti di corrosione e di incrostazioni di carbonati, possono determinare delle differenziazioni locali sulla superficie metallica a contatto con il terreno, da cui si innescano attacchi localizzati con separazione tra area anodica, di corrosione, e area catodica circostante, di riduzione di ossigeno. Questi tipi di attacchi localizzati assumono una forma a cratere e sono dette anche pustole di corrosione; l'attacco procede con meccanismo auto-catalitico.

3.1.3.3 Corrosione per Aerazione differenziale

Le condizioni di corrosione per aerazione differenziale si instaurano quando la struttura metallica è a contatto con terreni aventi diversa permeabilità all'ossigeno. Un caso caratteristico è quello di una condotta di acciaio il cui tracciato attraversa terreni contigui argillosi e sabbiosi: la superficie metallica a contatto con l'argilla, poco permeabile all'ossigeno, diventa anodica e quindi sede del processo di dissoluzione del metallo, mentre quella a contatto con la sabbia, permeabile all'ossigeno, diventa catodica, sede cioè del processo di riduzione dell'ossigeno. Questo sistema è anche designato "pila geologica".

METANODOTTO SERGNANO – MORTARA, TRATTO CERVIGNANO – MORTARA DN 750 (30”), MOP 70 BAR, E OPERE CONNESSE Rimozione condotte esistenti				
STUDIO SULLA DISPERSIONE DEL FERRO NEL TERRENO				
N° Documento: J01811-ENV-RE-300-0005	Foglio di	17	Rev.:	
			00	

Altra situazione tipica di “corrosione per aerazione differenziale nel terreno” è quella di una tubazione a contatto con un terreno dove sono presenti isole di argilla. Tali isole di argilla impediscono la diffusione dell’ossigeno dalla massa del terreno alla superficie metallica, originando aree anodiche di corrosione.

3.1.3.4 Corrosione per contatto galvanico

Strutture realizzate con metalli diversi interrate e collegate elettricamente tra loro possono dare luogo a corrosione bimetallica, o per contatto galvanico. Gli effetti di accoppiamento galvanico aumentano al diminuire della resistività del terreno. La velocità di corrosione del metallo meno nobile assume valori molto elevati quando aree anodiche di piccole dimensioni sono accoppiate ad aree catodiche estese; viceversa, l’effetto di accoppiamento è trascurabile quando le aree catodiche sono piccole oppure se il reagente catodico è disponibile in quantità limitata.

3.1.3.5 Corrosione per Correnti disperse e interferenza

Il sottosuolo è spesso sede di correnti elettriche dette correnti disperse, di natura continua o alternata, che possono avere origine, ad esempio, da impianti ferroviari o tranviari, da impianti di protezione catodica, da messe a terra, da linee ad alta tensione. La corrente dispersa può investire le strutture metalliche interrate come le tubazioni, alterandone lo stato elettrico; questa alterazione è definita interferenza (UNI 9783-90).

Le superfici metalliche dove la corrente circola dal terreno verso il metallo risultano polarizzate catodicamente e quindi in parte o completamente protette; viceversa quelle dove la corrente circola in senso opposto, dal metallo verso l’ambiente, sono polarizzate anodicamente e i processi di corrosione risultano accelerati.

Sebbene si adottino negli impianti moderni tutti gli accorgimenti possibili per rendere minima la dispersione nel terreno, la quota parte di dispersione supera il 50% della corrente totale, almeno nel caso di treni e tram, le cui rotaie sono posate sul ballast. Si comprende, perciò, come una struttura metallica posta nelle vicinanze di una rotaia e soprattutto vicino alla sottostazione, sia facilmente interferita.

La corrente alternata provoca effetti di corrosione molto minori rispetto a quella continua.

3.1.3.6 Corrosione Microbiologica

I microrganismi presenti nel terreno e nelle acque naturali, possono intervenire, direttamente o attraverso le sostanze da essi prodotti, nel meccanismo degli attacchi di corrosione riscontrati sulle tubazioni interrate (corrosione batterica o microbiologica).

La famiglia più pericolosa di microrganismi è costituita dai batteri solfato-riduttori, che si sviluppano solo in ambienti anaerobici. Le condizioni proprie dei terreni argillosi, neutri e senza ossigeno, ideali dal punto di vista elettrochimico per escludere processi di corrosione, sono in realtà quelle che favoriscono la crescita dei batteri solfato-riduttori: questi riducono i solfati inorganici a solfuri (concentrazione di H₂S fino a circa 3000 ppm), ottenendo energia da un substrato di composti organici, con formazione di acido acetico o CO₂. Nelle condotte tali fenomeni si incontrano nei tratti stagnanti o a bassa velocità. La crescita è favorita tra 20 e 45°C, pH da 6,5 a 8,5; diminuisce al di sopra di una salinità

METANODOTTO SERGNANO – MORTARA, TRATTO CERVIGNANO – MORTARA DN 750 (30”), MOP 70 BAR, E OPERE CONNESSE Rimozione condotte esistenti				
STUDIO SULLA DISPERSIONE DEL FERRO NEL TERRENO				
N° Documento: J01811-ENV-RE-300-0005	Foglio 9 di 17	Rev.:		
		00		

dell'acqua di 70 - 80 g/l e diviene trascurabile sopra 130-140 g/l. Provocano corrosione dell'acciaio con formazione di solfuro di ferro.

3.2 Stima della corrosione nel terreno saturo

In assenza di sistemi di protezione, l'acciaio esposto agli ambienti naturali quali terreno o acque, si corrode in modo prevalentemente generalizzato.

La corrosività del terreno dipende dalla natura, composizione, presenza di acqua e composizione dell'acqua, presenza di specie batteriche (in particolare SRB - batteri solfato-riduttori).

La velocità di corrosione può essere determinata misurando la perdita di peso per unità di superficie esposta, ed espressa come velocità di penetrazione uniforme, in millimetri per anno (mm/anno) o in micron per anno ($\mu\text{m}/\text{anno}$).

In letteratura sono riportate tipiche velocità di corrosione generalizzata di strutture metalliche nel terreno (vedi Tab. 3.2).

Tab. 3.2 - Velocità di corrosione.

Fonte	Velocità di Corrosione Generalizzata (mm/a)
US National Bureau of Standards	0,068
BISRA (UK)	0,035
National Physical Laboratory (UK)	0,050

Valori di velocità di corrosione più elevata, mediamente di 0,25 – 0,30 mm/anno, si riscontrano in presenza di corrosione localizzata (fenomeni di *pitting*) e nel caso di attacco batterico da SRB dove si possono raggiungere velocità di 1 – 2 mm/anno.

Non disponendo di dati specifici, si ritiene di poter assumere come ipotesi realistica, ma comunque adeguatamente conservativa, una velocità di corrosione generalizzata di 0,050 mm/anno.

METANODOTTO SERGNANO – MORTARA, TRATTO CERVIGNANO – MORTARA DN 750 (30”), MOP 70 BAR, E OPERE CONNESSE Rimozione condotte esistenti			
STUDIO SULLA DISPERSIONE DEL FERRO NEL TERRENO			
N° Documento: J01811-ENV-RE-300-0005	Foglio di 10 17	Rev.:	
		00	

4 DISPERSIONE E TRASPORTO IN FALDA

4.1 Modello Domenico di dispersione in falda

Una delle soluzioni analitiche più utilizzate è la soluzione di Domenico, la quale fornisce la distribuzione delle concentrazioni in un dominio spaziale tridimensionale, in regime variabile, per effetto dell'emissione continua di un contaminante attraverso una sorgente areale, costituita da un piano perpendicolare alla direzione del flusso della falda idrica, avente dimensioni trasversale S_w e verticale S_d ($= \delta_{gw}$).

Considerando che la dispersione avvenga nella direzione longitudinale (x), lungo le due direzioni trasversali (-y, +y) e verticali (-z, +z), la distribuzione delle concentrazioni è data dalla seguente equazione:

$$\frac{C(x,y,z,t)}{C_0} = \frac{1}{8} \cdot \exp\left(\frac{x}{2\alpha_x} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{4\lambda_i \alpha_x R_i}{v_e}}\right]\right) \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{R_i \cdot x - v_e \cdot t \sqrt{1 + \frac{4\lambda_i \alpha_x R_i}{v_e}}}{2 \cdot \sqrt{\alpha_x v_e R_i t}}\right] \cdot \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{y + 0.5S_w}{2\sqrt{\alpha_y x}}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{y - 0.5S_w}{2\sqrt{\alpha_y x}}\right] \right\} \cdot \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{z + S_d}{2\sqrt{\alpha_z x}}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{z - S_d}{2\sqrt{\alpha_z x}}\right] \right\}$$

Dove la funzione erf (x), definita come:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

mentre

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$$

Come si può osservare la variabile tempo compare solamente all'interno della funzione erfc; quando l'argomento di tale funzione raggiunge il valore -2, la funzione erfc raggiunge il suo asintoto di valore 2 e si ottiene la soluzione stazionaria, nota come "equazione di Domenico" [Domenico e Schwartz, 1998].

$$\frac{C(x,y,z)}{C_0} = \frac{1}{4} \cdot \exp\left[\frac{x}{2\alpha_x} \cdot \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4\lambda_i \alpha_x R_i}{v_e}}\right)\right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y + 0.5S_w}{2\sqrt{\alpha_y x}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y - 0.5S_w}{2\sqrt{\alpha_y x}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{z + S_d}{2\sqrt{\alpha_z x}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z - S_d}{2\sqrt{\alpha_z x}}\right) \right]$$

Dove:

$C(x,y,z)$ è la concentrazione nel punto di coordinate x, y, z (punto di conformità);

METANODOTTO SERGNANO – MORTARA, TRATTO CERVIGNANO – MORTARA DN 750 (30”), MOP 70 BAR, E OPERE CONNESSE Rimozione condotte esistenti			
STUDIO SULLA DISPERSIONE DEL FERRO NEL TERRENO			
N° Documento: J01811-ENV-RE-300-0005	Foglio 11 di 17	Rev.:	
		00	

C_0 è la concentrazione in falda alla sorgente;
 λ è il coefficiente di biodegradazione del primo ordine;
 R è il fattore di ritardo dovuto all'assorbimento del contaminante su matrice solida;
 S_w è la larghezza della sorgente nella direzione y perpendicolare al flusso, $S_d (= \delta_{gw})$ è l'ampiezza della sorgente nella direzione z perpendicolare al flusso, e R è il fattore di ritardo

$$R = 1 + k_s \frac{\rho_s}{\theta_T}$$

Le principali ipotesi su cui si basa tale equazione sono stato stazionario ($t \rightarrow \infty$), emissione continua, concentrazione rappresentativa alla sorgente costante, sorgente di dimensioni finite, dispersione nelle tre direzioni dello spazio x, y, z , e convezione solo lungo la direzione di flusso x (velocità di trasporto unidirezionale e costante).

Il valore di concentrazione più elevato si avrà ovviamente lungo l'asse x ; pertanto ponendo $y = z = 0$ nella equazione precedente e tenendo conto del fatto che $\text{erf}(-B) = -\text{erf}(B)$, si ottiene l'equazione semplificata che consente di calcolare la concentrazione $C(x)$ lungo l'asse longitudinale di flusso.

Se si ipotizza una dispersione lungo z solo nella direzione positiva, l'equazione diventa:

$$\frac{C(x)}{C_0} = \exp\left[\frac{x}{2\alpha_x} \cdot \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4\lambda_i \alpha_x R_i}{v_e}}\right)\right] \cdot \left[\text{erf}\left(\frac{S_w}{4\sqrt{\alpha_y x}}\right)\right] \cdot \left[\text{erf}\left(\frac{S_d}{2\sqrt{\alpha_z x}}\right)\right]$$

Questa ipotesi è valida ipotizzando che il piano di falda si comporti come un limite superiore nella direzione z e che la sorgente possa trovarsi al limite del piano di falda.

Poiché la dispersività longitudinale è il parametro utile per la determinazione del fattore di trasporto e dispersione in falda, calcolato a mezzo del modello di "Domenico" è possibile stimare la dispersività longitudinale in falda (α_x [cm]) utilizzando una delle tre equazioni empiriche:

1. Pickens e Grisak (1981) $\alpha_x (1) = 0,1 \times L$
2. Xu e Eckstein (1995) $\alpha_x (2) = 0,83 \times (\log L)^{2,414}$
3. Gelhar et al. (1985): $\ln \alpha_x (3) = -3,795 + 1,774 \ln L - 0,093(\ln L)^2$

Dove L rappresenta la distanza tra la sorgente ed il punto di conformità.

METANODOTTO SERGNANO – MORTARA, TRATTO CERVIGNANO – MORTARA DN 750 (30”), MOP 70 BAR, E OPERE CONNESSE Rimozione condotte esistenti			
STUDIO SULLA DISPERSIONE DEL FERRO NEL TERRENO			
N° Documento: J01811-ENV-RE-300-0005	Foglio di 12 di 17	Rev.:	
		00	

5 VALUTAZIONE DELLA DISSOLUZIONE IN FALDA DEGLI IONI FERRO

5.1 Schema di valutazione della dissoluzione

Di seguito si descrive il “*modello black-box*” proposto per il calcolo delle concentrazioni di ferro in falda, a valle delle tubazione da dismettere e nell’ipotesi che questa interessi terreni permeabili in presenza di falda.

Assunto un certo tasso di corrosione generalizzata della tubazione posata ad una profondità tale da essere nella parte superiore del terreno saturo, si ipotizza, in modo conservativo, che la falda abbia moto ortogonale alla tubazione stessa.

Note mediante la conducibilità idraulica dell’acquifero (permeabilità del suolo ipotizzata 1×10^5 m/s per terreni sabbioso-limoso ed 1×10^{-4} m/s per terreni sabbiosi con presenza di ghiaia) ed il gradiente (si considera un valore costante di 0,2%), è poi possibile calcolare la velocità dell’acqua di falda, ovvero il flusso che investe lateralmente la tubazione.

Tale acqua di falda, con una composizione tipo come quella riportata in Tab. 5.1, si arricchirà del ferro ceduto dalla tubazione per corrosione fino a una concentrazione limite iniziale C'_0 , variabile in funzione della conducibilità idraulica dell’acquifero (massimo 1960 mg/l in terreni sabbioso-limosi e 200 mg/l in terreni sabbiosi con ghiaia).

Nell’ipotesi di considerare uno scenario chimicamente reattivo, questa concentrazione C'_0 sarà vincolata dagli equilibri di solubilità delle fasi mineralogiche contenenti ferro.

Una stima del contenuto di ferro che rimane in soluzione acquosa (C_0), depurata della precipitazione dei composti del ferro non solubili, può essere ottenuta utilizzando codici di speciazione geochimica (Parkhurst D. And C.A.J. Appelo, 1999). Una preliminare valutazione ottenuta dall’applicazione di tali modelli consente di ipotizzare una riduzione del contenuto del ferro in soluzione dipendente dal contesto mineralogico considerato; nel caso dello scenario più conservativo ($C'_0 = 1960$ mg/l) tale contenuto di ferro si attesta in un range di valori compresi tra 1.0 e 50 mg/l.

Tab. 5.1 - Ipotetica composizione chimica dell’acqua di falda.

Parametro	U.M.	Valore
Temperatura	°C	18
pH	-	8.0
Sali totali disciolti	mg/l	490
Alcalinità	meq/l (HCO_3)	144
Silice	mg/l (SiO_2)	10
Ferro	mg/l	0,05
Na	mg/l	45
K	mg/l	20
Ca	mg/l	65
Mg	mg/l	10
Cl	mg/l	150
SO_4	mg/l	97
Al	mg/l	0,04

METANODOTTO SERGNANO – MORTARA, TRATTO CERVIGNANO – MORTARA DN 750 (30”), MOP 70 BAR, E OPERE CONNESSE			
Rimozione condotte esistenti			
STUDIO SULLA DISPERSIONE DEL FERRO NEL TERRENO			
N° Documento: J01811-ENV-RE-300-0005	Foglio di 17	Rev.:	
	13	00	

La tubazione quindi determinerà una sorgente attiva e continua di ferro disciolto in falda che, per i meccanismi di advezione e dispersione idrodinamica, è veicolato nel tempo ed a concentrazioni decrescenti a valle della tubazione lungo la direzione della falda.

Per valutare l’impatto della dissoluzione del ferro in falda, sono state stimate le concentrazioni del metallo a diverse distanze dalla sorgente (tubo) e nel tempo, fino al raggiungimento delle massime concentrazioni. I tenori del ferro tenderanno a diminuire all’esaurimento della sorgente.

La distanza di riferimento presa in considerazione per la stima della concentrazione è di 25 m, mentre il tempo stimato per l’esaurimento della sorgente del metallo, funzione della velocità di corrosione e dello spessore del tubo, è stimato pari a circa 250 anni.

La concentrazione ottenuta alla distanza considerata è comparata alla concentrazione soglia di contaminazione (CSC) indicata dal D.Lgs.152/2006 (Titolo V, All. 5, Tab. 2), che per il ferro è 200 µg/l. Nel caso di concentrazione inferiore alla CSC stimata ai 25 m indicati si è valutata la distanza rispetto alla tubazione alla quale i tenori di Fe raggiungono il limite normativo.

Per esemplificare graficamente il “*modello black-box*” proposto, si veda il seguente schema in Fig. 5.1.

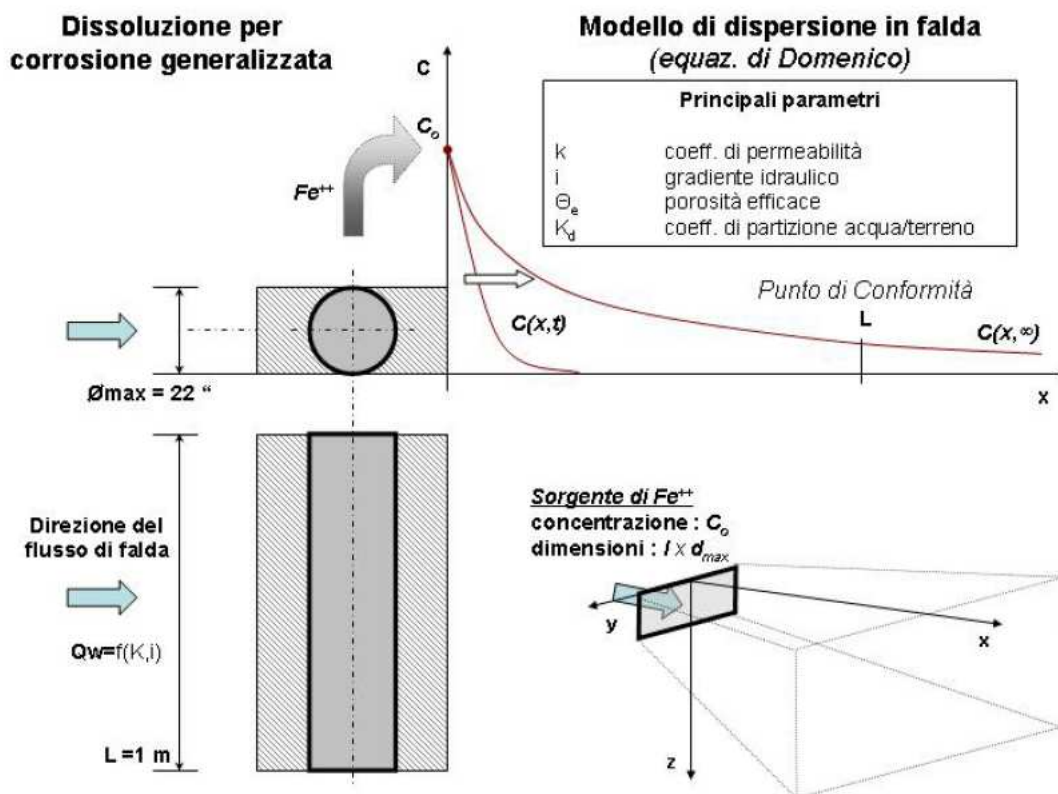


Fig. 5.1 - Modello black-box.

METANODOTTO SERGNANO – MORTARA, TRATTO CERVIGNANO – MORTARA DN 750 (30”), MOP 70 BAR, E OPERE CONNESSE Rimozione condotte esistenti				
STUDIO SULLA DISPERSIONE DEL FERRO NEL TERRENO				
N° Documento:	Foglio	Rev.:		
J01811-ENV-RE-300-0005	14 di 17	00		

Nello schema la falda ha direzione ortogonale alla tubazione (ipotesi conservativa) e la sorgente di Fe è ubicata immediatamente a valle della tubazione.

L'acqua di falda a valle della sorgente si arricchisce istantaneamente del metallo disciolto e successivamente è oggetto dei fenomeni di dispersione idrodinamica e di ripartizione acqua/terreno, tipica di un liquido contaminato in un mezzo poroso con conseguente diluizione delle concentrazioni.

5.2 Parametri del modello

5.2.1 Parametri della tubazione

Come descritto in precedenza, la tubazione in dismissione ha un diametro nominale di DN 750 (30”), uno spessore variabile da 12,7 mm a 15,9 mm ed è protetta esternamente con rivestimento bituminoso pesante.

Tale parametro è utilizzato per qualificare la dimensione verticale (sull'asse z) del termine sorgente di Fe, posto il tubo completamente in falda e collocato nelle vicinanze della superficie freatica.

In senso orizzontale si considera invece una lunghezza unitaria (1 metro), scelta come base di calcolo anche per la portata del flusso idrico sotterraneo che lambisce le tubazioni.

5.2.2 Parametro di corrosione

La tubazione rilascerà ferro per corrosione generalizzata con una velocità funzione del materiale costituente il tubo e dell'ambiente di contatto, proporzionalmente alla superficie esposta all'acqua di falda.

Come già discusso in precedenza, si può assumere una velocità di corrosione generalizzata media pari a 0,05 mm/anno. Non sono stati presi in considerazione altri meccanismi di corrosione poiché interessano generalmente settori limitati di superficie esposta.

Inoltre, non essendo noto lo stato attuale del rivestimento e la sua evoluzione nel tempo, è stata assunta, in modo conservativo, la tubazione completamente priva di protezione. Si ricorda che la tubazione sarà internamente cementata, pertanto la superficie interna non sarà oggetto di fenomeni di ossidazione.

5.2.3 Parametri idrogeologici

I parametri idrogeologici minimi necessari a permettere un calcolo quantitativo con l'equazione di Domenico sono la permeabilità, il gradiente idraulico e la porosità efficace del mezzo poroso.

Non essendo disponibili informazioni di dettaglio sugli acquiferi che interessano la tubazione in dismissione e tenendo in considerazione che le caratteristiche idrauliche degli stessi hanno una loro variabilità, è stato ritenuto lecito assumere dei parametri medi per la zona d'interesse sulla base della letteratura e da pregresse esperienze.

METANODOTTO SERGNANO – MORTARA, TRATTO CERVIGNANO – MORTARA DN 750 (30''), MOP 70 BAR, E OPERE CONNESSE Rimozione condotte esistenti				
STUDIO SULLA DISPERSIONE DEL FERRO NEL TERRENO				
N° Documento: J01811-ENV-RE-300-0005	Foglio di	15 17	Rev.:	00

I valori assunti sono:

Gradiente idraulico [%] \ 0,2

Coeff. Permeabilità [m/s] 1x10⁻⁴ (terreni sabbiosi con ghiaia)
1x10⁻⁵ (terreni sabbioso-limosi).

Per quel che concerne la porosità, non determinata sperimentalmente, da letteratura si ricavano dei range di variabilità per le litologie presenti nei punti considerati del tracciato della condotta ed indicati sopra (vedi Tab. 2.1). Si veda a questo proposito la tabella di sintesi seguente.

Tab. 5.2 - Porosità efficace per sedimenti.

Material	Porosity (%) (°)
Well-sorted sand or gravel	25-50
Sand and gravel, mixed	20-35

(Based on Meinzer (1923a); Davis (1969); Cohen (1965); and MacCary and Lambert (1962) as quoted by C.W. Fetter 2)

Tenendo presente i dati di porosità indicati nella tabella precedente e la tipologia dei terreni attraversati dalla tubazione oggetto della dismissione, la porosità efficace è stata assunta pari a:

Porosità [%] 38

5.2.4 Parametri chimico-fisici del ferro

Nei fenomeni di dispersione del ferro in falda è necessario descrivere l'equilibrio di assorbimento che si instaura all'interfaccia solido/liquido, ovvero come il ferro si ripartisce tra la matrice solida del terreno ed il fluido di circolazione.

Il coefficiente di partizione suolo/acqua (Kd) viene utilizzato per descrivere sinteticamente tale fenomeno. Dalla letteratura (Sheppard and Thibault, "Default soil, soil/liquid partition coefficients, Kd, for mayor soil types: a compendium", 1990) è stato assunto per il ferro un coefficiente di partizione suolo/acqua pari a:

Coefficiente di partizione Kd= 165 l/kg

5.3 Risultati

Le tubazioni in acciaio con rivestimento bituminoso, lasciate degradare nel terreno, possono generare delle interferenze nel suolo e nelle acque sotterranee.

METANODOTTO SERGNANO – MORTARA, TRATTO CERVIGNANO – MORTARA DN 750 (30”), MOP 70 BAR, E OPERE CONNESSE Rimozione condotte esistenti				
STUDIO SULLA DISPERSIONE DEL FERRO NEL TERRENO				
N° Documento:	Foglio	Rev.:		
J01811-ENV-RE-300-0005	16 di 17	00		

Nel caso specifico il rivestimento bituminoso può essere considerato inerte nei confronti degli effetti di lisciviazione delle acque di falda ed agli attacchi microbiologici.

Per quanto concerne il rilascio del ferro sul terreno si possono ipotizzare due scenari:

- terreno insaturo e bassa conducibilità idraulica;
- terreno saturo e sede di falda freatica.

Nel primo caso i prodotti di corrosione stazioneranno nei terreni adiacenti alla tubazione e non si prevedono impatti significativi sulla qualità delle acque, dei terreni e sulla vegetazione.

Nel secondo caso le acque di falda veicolano i prodotti di corrosione lungo la sua direzione di scorrimento. In base alle ipotesi precedentemente discusse e sintetizzate nella tabella seguente (vedi Tab. 5.3) è stata stimata, per il ferro, una concentrazione iniziale C'_0 compresa tra 1960 mg/l e 200 mg/l in funzione della conducibilità idraulica dei terreni.

Tab. 5.3 - Dati di input per la modellazione.

Diametro tubazione	30"
Velocità di corrosione	0,05 mm/anno
Conducibilità idraulica	$1 \cdot 10^{-5} / 1 \cdot 10^{-4}$
Gradiente piezometrico	0,2%
Porosità	38%

Applicando il modello di dispersione in falda per le due concentrazioni C'_0 si ottengono i tenori massimi di Fe di seguito sintetizzati:

Concentrazione iniziale $C'_0 = 1960$ mg/l e Conducibilità idraulica $1 \cdot 10^{-5}$ m/s:

- A distanza di 25 m dalla sorgente l'aumento della concentrazione $\Delta C = 3,2 \cdot 10^{-6}$ µg/l raggiunta dopo 750 anni;
- Valori di concentrazione di Fe superiori a 200 µg/l (CSC) si stimano fino a 3-4 m dalla sorgente.

Concentrazione iniziale $C'_0 = 200$ mg/l e Conducibilità idraulica $1 \cdot 10^{-4}$ m/s:

- A distanza di 25 m dalla sorgente l'aumento della concentrazione $\Delta C = 60$ µg/l raggiunta dopo 70 anni;
- Valori di concentrazione di Fe superiori a 200 µg/l (CSC) si stimano fino a 23 m dalla sorgente.

In sintesi, nel caso di una minore concentrazione iniziale legata alla maggiore permeabilità del suolo e quindi alla sua migrazione più rapida, i risultati portano a rilevare un aumento di concentrazione in una fascia più ampia.

Considerando tuttavia i presenti fenomeni naturali di precipitazione dello ione ferro in composti insolubili ed applicando i modelli di speciazione geochimica richiamati nel paragrafo 5.1, si ottengono nei due casi analizzati:

METANODOTTO SERGNANO – MORTARA, TRATTO CERVIGNANO – MORTARA DN 750 (30”), MOP 70 BAR, E OPERE CONNESSE Rimozione condotte esistenti				
STUDIO SULLA DISPERSIONE DEL FERRO NEL TERRENO				
N° Documento: J01811-ENV-RE-300-0005	Foglio 17 di 17	Rev.:		
		00		

Concentrazione iniziale $C'_0 = 1960$ mg/l e Conducibilità idraulica $1 \cdot 10^{-5}$ m/s:

- tenori di ferro in equilibrio con la matrice mineralogica in un range di valori compresi tra 1,0 e 50 mg/l che sono nettamente inferiori ai valori iniziali di rilascio dalla sorgente (questo riduce logicamente l'ampiezza delle zone interessate dal superamento dei limiti, che nel caso della concentrazione iniziale ipotizzata sono stimati inferiori a 3 m).

Concentrazione iniziale $C'_0 = 200$ mg/l e Conducibilità idraulica $1 \cdot 10^{-4}$ m/s:

- valori di ferro in soluzione estremamente bassi, inferiore al limite normativo (200 µg/l di D.Lgs. n. 152/06 - Titolo V, All. 5, Tab. 2).

In sintesi, quindi, le tubazioni interrato indurranno in tempi estremamente lunghi lievi perturbazioni alla concentrazione del ferro in falda e soltanto per un ambito fascia estremamente limitato (alcuni metri).