

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

D I C A M

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali

TESI DI LAUREA IN COSTRUZIONI IDRAULICHE

**ANALISI DELLE ROTTURE NELLE TUBAZIONI DELLE
RETI ACQUEDOTTISTICHE**

Candidato:

MIRCO TAVERNELLI

Relatore:

Prof. Ing. MARCO MAGLIONICO

Anno Accademico 2010-2011

Sessione III

INDICE

INTRODUZIONE.....	3
CAPITOLO 1 - LE TUBAZIONI PER ACQUEDOTTO.....	5
1.1. TUBAZIONI METALLICHE.....	7
1.1.1. Ghisa grigia.....	7
1.1.2. Ghisa sferoidale.....	8
1.1.3. Acciaio.....	13
1.2. TUBAZIONI CEMENTIZIE.....	20
1.2.1. Cemento armato.....	20
1.2.2. Cemento armato precompresso.....	22
1.2.3. Cemento amianto.....	26
1.3. TUBAZIONI PLASTICHE.....	31
1.3.1. Policloruro di vinile - PVC.....	33
1.3.2. Polietilene a bassa densità - PEBD.....	37
1.3.3. Polietilene ad alta densità - PEAD.....	39
1.3.4. Polipropilene - PP.....	43
1.3.5. Resina poliestere rinforzata con fibre di vetro - PRFV.....	44
1.3.6. Tabella riassuntiva delle caratteristiche.....	51
CAPITOLO 2 - MECCANISMI DI ROTTURA.....	53
2.1. SOLLECITAZIONI TERMICHE.....	57
2.2. PRESSIONE INTERNA DELL'ACQUA.....	58
2.3. PRESSIONE ESTERNA DEL TERRENO.....	59
2.4. PRESSIONE ESTERNA DA SOVRACCARICO.....	60
2.5. TRANSITORI ELASTICI E CONSEGUENTI SOVRA/SOTTOPRESSIONI.....	
DA COLPO D'ARIETE.....	62
2.6. CORROSIONE DELLE TUBAZIONI METALLICHE E DELLE BULLONERIE DEI GIUNTI.....	65
2.7. SCORRIMENTO VISCOSO DELLE TUBAZIONI PLASTICHE.....	73
2.8. SFIBRAMENTO DELLE TUBAZIONI IN FIBROCEMENTO.....	74
2.9. CORROSIONE DELLE ARMATURE DELLE TUBAZIONI CEMENTIZIE.....	76
2.10. AZIONE DELLE RADICI DEGLI ALBERI.....	77
2.11. FALLE DI PRODUZIONE E POSA IN OPERA NON CORRETTA.....	78
2.12. DIVERSA ESPANSIONE DEI MATERIALI DEI GIUNTI.....	81
2.13. SFORZI DI FLESSIONE O TAGLIO.....	82
CAPITOLO 3 - ANALISI DEI DATI DI ROTTURA.....	83
3.1. ROTTURE TUBAZIONI.....	84
3.2. DATI CLIMATICI.....	107
3.3. RELAZIONI ROTTURE – DATI CLIMATICI.....	112

CAPITOLO 4 - RETI NEURALI ARTIFICIALI.....	125
4.1. PREMESSA.....	127
4.2. FONDAMENTI.....	128
4.2.1. <i>Fondamenti biologici</i>	128
4.2.2. <i>Fondamenti matematico/informatici</i>	129
4.3. STORIA.....	133
4.4. TEORIA E PARADIGMI DI APPRENDIMENTO	136
4.4.1. <i>Paradigm i di apprendimento</i>	138
4.5. FUNZIONAMENTO.....	140
4.5.1. <i>Algoritmo di backpropagation</i>	142
4.5.2. <i>Varianti alla backpropagation</i>	143
4.6. APPLICAZIONI E PROPRIETÀ.....	144
CAPITOLO 5 - METODOLOGIA DELLA RICERCA	147
5.1. CARATTERISTICHE DELLA RETE NEURALE UTILIZZATA.....	149
5.2. SUDDIVISIONE DEI DATI.....	151
5.2.1. <i>Statistiche utilizzate</i>	152
5.3. METODOLOGIA DI RICERCA	154
5.3.1. <i>Fase preliminare</i>	155
5.3.2. <i>Fase 1</i>	157
5.3.3. <i>Fase 2</i>	160
CAPITOLO 6 - RISULTATI DELLA RICERCA.....	163
6.1. RISULTATI FASE 1.....	164
6.2. RISULTATI FASE 2.....	174
CAPITOLO 7 - APPLICAZIONI INTEGRATIVE.....	191
7.1. APPLICAZIONE ALSOLO PE.....	192
7.2. APPLICAZIONE DIFFERENZIATA PRESE/CONDOTTE PRINCIPALI	198
7.2.1. <i>Prese</i>	198
7.2.2. <i>Condotte principali</i>	202
7.3. NUOVA RICERCA PER PE	206
7.3.1. <i>Nuova procedura</i>	207
7.3.2. <i>Risultati ottenuti</i>	209
CONCLUSIONI	217
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	219

Introduzione

La pianificazione dell'uso, della tutela e dell'organizzazione dei servizi di depurazione, approvvigionamento acquedottistico e fognario, ricoprono da sempre un ruolo strategico nel tema centrale dell'utilizzo delle risorse idriche, sempre più importante anche nel quadro legislativo nazionale.

In questo complesso processo di progettazione, si ritiene che rivesta un ruolo molto importante il risparmio idrico, finalizzato non solo a limitare ogni spreco di risorsa da parte dell'utente finale, ma anche a contenere a valori non patologici le perdite idriche in rete, per le quali va tuttora disperso, a scala nazionale, quasi un terzo dell'acqua prelevata dai corpi idrici.

Un uso razionale dell'acqua da parte dell'utente finale, passa anche attraverso un'attenta gestione dei sistemi acquedottistici. La minimizzazione delle perdite idriche è un obiettivo da perseguire, che garantisce vantaggi non solo di natura economica (connessi ai minori costi di captazione, stoccaggio, potabilizzazione, adduzione, distribuzione, oltre che raccolta, trattamento e smaltimento di acque reflue), ma anche significativi benefici di natura ambientale, in relazione ai minori prelievi di acque di superficie e sotterranee.

La riduzione delle perdite ed una gestione efficiente dei sistemi acquedottistici, passa anche attraverso una comprensione dei fenomeni che portano alla rottura delle tubazioni; aspetto estremamente complesso da prevedere in quanto funzione di molteplici fattori che dipendono dalle proprietà fisiche delle tubazioni, dalle condizioni di esercizio e da diversi aspetti ambientali.

Negli ultimi anni, numerosi studi hanno cercato di individuare i fattori maggiormente responsabili del deterioramento e delle rotture delle tubazioni, ed essi possono sintetizzarsi fondamentalmente in tre gruppi (Marco Maglionico, 2011):

1. *fattori fisici*, come il materiale, il diametro, lo spessore, l'età, ecc.;
2. *fattori operativi*, come la pressione di esercizio, la velocità e la qualità dell'acqua, le operazioni di manutenzione, ecc.;

3. *fattori ambientali*, come le condizioni di posa in opera, il tipo di suolo, condizioni climatiche (intese come precipitazioni e temperatura esterna), correnti elettriche vaganti, attività sismiche, ecc.

Questo tipo d'indagine può avere aspetti ingegneristici importanti, sia quando si definiscono le condizioni di posa delle tubazioni, sia quando si vogliono adottare o calibrare modelli matematici di previsione delle rotture, fondamentali per pianificare gli interventi di sostituzione delle tubazioni e di ricerca delle perdite.

Nel presente lavoro si è cercato di evidenziare proprio come le condizioni climatiche siano un fattore importante nella rottura delle tubazioni. Questo è stato eseguito fornendo, nei primi due capitoli, una panoramica descrittiva delle principali tipologie di materiali utilizzati nei sistemi acquedottistici e delle cause di rottura dominanti nelle tubazioni stesse. In seguito, attraverso l'analisi dei dati di rottura di una rete acquedottistica situata in Emilia Romagna e comprendente un arco temporale di undici anni, è stato possibile evidenziare come il legame tra il numero di rotture e le condizioni ambientali sia risultato molto forte, potendo così ricercare, con un modello funzionale, di riprodurre queste relazioni.

In particolare, per questa operazione si è optato per l'approccio basato sull'utilizzo di un modello di previsione a Rete Neurale Artificiale: modello matematico che si basa su una rete di unità di elaborazione interconnesse che, ispirandosi ai neuroni nel cervello umano, in qualche misura imita le proprietà dei neuroni viventi, per simulare relazioni complesse tra ingressi e uscite che altre funzioni analitiche non riescono a rappresentare.

Dopo la costruzione e la convalida di vari modelli di rete, il più performante è stato utilizzato per la previsione delle rotture, validandone l'attendibilità in diverse applicazioni integrative. Esso può così costituire, come da intenzione iniziale, un'efficace strumento per l'elaborazione di strategie di riabilitazione e controllo dei sistemi di distribuzione idrica.

CAPITOLO 1

Le tubazioni per acquedotto

La distribuzione dell'acqua nei centri urbani viene effettuata mediante tubazioni in pressione e, nella generalità dei casi, anche l'adduzione dalle zone di captazione a quelle di utilizzazione viene fatta con condotte in pressione. Le tubazioni sono perciò una delle componenti più importanti di un acquedotto.

Le condotte per uso acquedotti stico vengono identificate sia dal progettista che dalle ditte fornitrici tramite due parametri:

- La pressione nominale PN (D.M. 12/12/85) è definita come somma tra:
 - Pe = pressione di esercizio massima, cioè massimo valore della pressione in asse alla tubazione per il più gravoso funzionamento idraulico, compresi quindi anche i fenomeni transitori. In assenza di calcoli specifici in merito, per $D \leq 350$ mm, è consentito adottare il valore di sovrappressione per moto vario a $\Delta p = 2.5$ kgf/cm²;
 - Po = pressione equivalente, cioè pressione assiale che conferisce al materiale tensioni di trazione massima eguali a quelle determinate in base ad azioni non connesse con l'esercizio idraulico del sistema; tali sono quelle dovute al rinterro di copertura, ai sovraccarichi esterni statici e dinamici, alle variazioni termiche e alle azioni sismiche (per tracciati in zone sismiche). Il valore di pressione equivalente può anche essere trascurabile rispetto alla pressione di esercizio ma deve essere calcolato esplicitamente per tubi di grande diametro.

- Il Diametro nominale DN: è una definizione convenzionale della dimensione della tubazione; essa non coincide in genere né con il diametro interno né con il diametro esterno. In generale, ogni ditta produttrice segue una propria convenzione ed occorre quindi verificare attentamente i calcoli idraulici sulla base del valore del diametro interno della tubazione.

Ai fini del nostro lavoro presentiamo un elenco dei materiali comunemente impiegati per la realizzazione di reti di acquedotto. Per ognuno di essi si fornisce una breve descrizione delle principali caratteristiche, fornendo un quadro abbastanza chiaro anche dei tipi di giunto e degli eventuali rivestimenti esterni ed interni delle tubazioni, riprendendo poi in altra sezione l'analisi delle problematiche specifiche.

Si includono inoltre anche materiali poco usati nella realizzazione di un acquedotto moderno (plastici: PE) o non più usati (cemento amianto), in quanto il nostro studio riguarda principalmente una loro eventuale sostituzione e non la loro attuale frequenza d'impiego.

Si analizzano quindi le caratteristiche di:

- Tubazioni metalliche:
 - Ghisa grigia;
 - Ghisa sferoidale;
 - Acciaio;
- Tubazioni cementizie:
 - Cemento armato;
 - Cemento armato precompresso;
 - Cemento amianto;
- Tubazioni plastiche:
 - Policloruro di vinile (PVC);
 - Polietilene a bassa densità (PEBD);
 - Polietilene ad alta densità (PEAD);
 - Polipropilene (PP);
 - Vetroresina (PRFV).

1.1 Tubazioni metalliche

1.1.1 Ghisa grigia

Materiale molto usato in passato per reti di acquedotto, grazie alla resistenza alla corrosione ad opera del fluido e dell'ambiente esterno. Fino agli anni Cinquanta è stata l'unico tipo di ghisa impiegato ed era ottenuta dalla fusione di ghisa d'alto forno e rottami di ghisa (ghisa ordinaria di seconda fusione), presentando una disposizione lamellare dei cristalli di grafite (vedi figura seguente).



Figura 1 - Micrografia di una ghisa grigia (da V. Milano, 1996)

Il classico metodo di realizzazione è per colata verticale in forma fissa, che permise realizzazioni fino a 4 m di lunghezza. Tubi fino a 7,5 m sono stati prodotti invece per centrifugazione. Per ciò che riguarda le tecnologie di rivestimento ed i giunti (a corda catramata e piombo i primi realizzati), si rimanda alla trattazione successiva della ghisa sferoidale. I DN di produzione, coincidenti col diametro interno, variavano da 40mm a 800mm.

E' il materiale metallico fragile per eccellenza e la sua resistenza a rottura a trazione, valore che più interessa per tubazioni in pressione, è di 150 – 350 N/mm².

Nonostante i limiti intrinseci, il diffuso impiego in passato ha fatto sì che questo tipo di tubo costituisca buona parte della rete attualmente esistente.

1.1.2 Ghisa sferoidale

Prende il nome dalla forma dei suoi cristalli di grafite, la cui forma (vedi figura seguente) riduce di molto le soluzioni di continuità introdotte dai classici cristalli lamellari e presenta una struttura molecolare molto più omogenea. La percentuale di carbonio (3,75% circa) non si discosta molto invece da quella della ghisa grigia (3,65%).

Differisce dalla ghisa grigia per una minima quantità di magnesio aggiunta (0,03%) e per le migliori caratteristiche meccaniche che ne conseguono (paragonabili a quelle dell'acciaio): minore fragilità, resistenza a rottura a trazione di 400 – 800 N/mm², migliori lavorabilità, resistenza all'usura da attrito e alla corrosione, assorbimento delle vibrazioni.

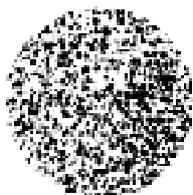


Figura 2 - Micrografia di una ghisa sferoidale (da V. Milano, 1996)

Scoperta dalla International Nickel Company (USA) nel 1948, si è affermata nel 1950 e ha avuto un ulteriore impulso (1956) grazie a nuove tecniche e materiali di rivestimento. In breve tempo ha soppiantato la ghisa grigia grazie alle sue migliori qualità; la sua produzione è regolata dalla NORMA UNI EN 545 – 2002 (tubi, raccordi ed accessori in ghisa sferoidale e loro assemblaggi per condotte d'acqua – prescrizioni e metodi di prova).

Ha ridotto il divario di peso, a pari lunghezza e diametro, nei confronti dell'acciaio, potendo realizzarsi con essa spessori minori rispetto alla ghisa grigia.

Storicamente prodotti anch'essi per colata, ora lo sono quasi esclusivamente per centrifugazione. Inoltre, da oltre 70 anni vengono successivamente ricotti a circa 900 °C per ridurne la fragilità. La produzione in Italia si arresta a valori del DN = 700 mm, con lunghezze generalmente sino a 6 metri. La pressione nominale ha raggiunto, nelle produzioni di serie, valori da 250 N/cm² a 400 N/cm² in funzione del DN.



Figura 3 - Stock di tubazioni in ghisa sferoidale (da www.rsrappresentanze.com)

RIVESTIMENTI

Le tubazioni di ghisa di normale produzione sono generalmente dotate di rivestimento interno ed esterno: i rivestimenti interni non devono contenere prodotti solubili in acqua, né che possano conferirle sapore dopo un opportuno lavaggio, né tanto meno essere tossici.

Normalmente (NORMA UNI EN 545 - 2003), presentano un rivestimento esterno in zinco e vernice bituminosa e uno interno in malta cementizia centrifugata, di spessore variabile da 3 a 12 mm secondo il DN. Il rivestimento in malta è assolutamente igienico, oltre che assai protettivo (il cemento d'altoforno impiegato ha bassissimo tenore di calce libera) e di bassissima scabrezza (offre prestazioni migliori del bitume).

Altri rivestimenti (p.e. bituminosi, cemento alluminoso per acque aggressive) possono essere disponibili su richiesta. I pezzi speciali (ne esistono di varie tipologie), che servono per poter eseguire cambi di direzione o diametro, sono trattati con bagno interno ed esterno di vernice bituminosa.

COLLEGAMENTI

I tubi di ghisa vengono collegati con giunti di tipo a bicchiere e di tipo a flangia (per applicazioni particolari).

Nel caso di giunto a bicchiere, fra la superficie interna del bicchiere e quella cilindrica esterna del tubo adiacente, deve essere realizzato un dispositivo di tenuta idraulica. Sono quindi richieste pulizia e lubrificazione delle parti a contatto.

La tenuta veniva un tempo realizzata tipicamente con corda catramata ribadita e piombo fuso ribattuto (vedi figura successiva).



**Figura 4 - Giunto a corda catramata e piombo a caldo con e senza bordino per tubazioni in ghisa
(da V. Milano, 1996)**

Oggi il giunto tipico è realizzato con un anello di gomma, resistente all' invecchiamento, fortemente schiacciata fra le due superfici. Un primo tipo è il giunto rapido (NORMA UNI 9163 – 87), realizzato come in figura seguente, che consente lievi deviazioni angolari.

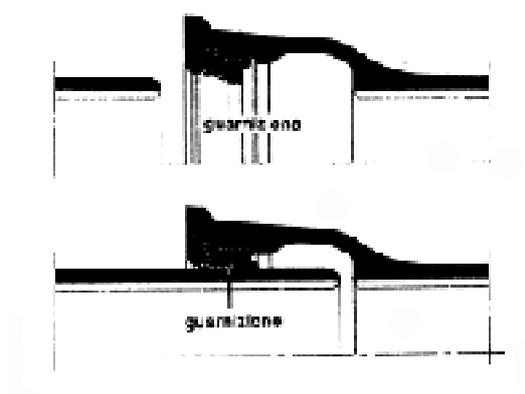


Figura 5 - Giunto rapido per tubazioni in ghisa (da V. Milano, 1996)

Un secondo tipo è il giunto express (NORMA UNI 9164 – 87), realizzato come in figura seguente. Anch'esso permette una certa deviazione angolare. Si noti che anche i bulloni e la contro-flangia sono in ghisa sferoidale.

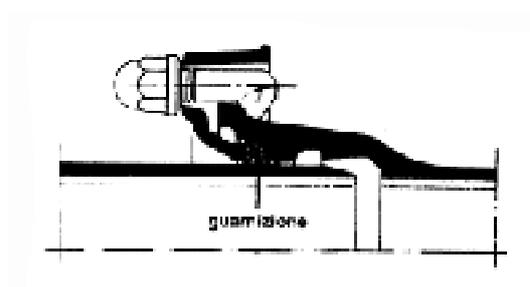


Figura 6 - Giunto express per tubazioni in ghisa (da V. Milano, 1996)

Un altro tipo di collegamento è quello a flangia: i tronchi di tubo terminano alle estremità con una corona circolare, detta appunto flangia, munita di fori nei quali vengono inseriti dei bulloni successivamente serrati.

Si osserva che la loro natura implica una certa difficoltà di realizzazione e quindi limita il loro uso a casi di tubazioni non interrate o almeno ispezionabili in corrispondenza dei giunti (ciò dovuto anche ad evitare il contatto del giunto con il terreno). La tenuta è assicurata dalla guarnizione che, un tempo di piombo o rame, oggi è essenzialmente di gomma. La flangia può essere fissa o mobile (orientabile).

Un esempio di giunti flangiati è in figura seguente.

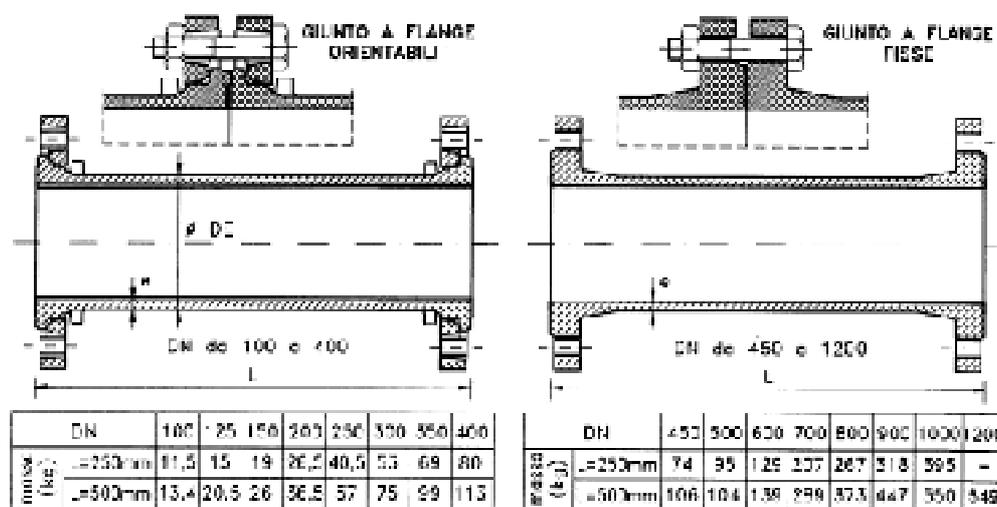


Figura 7 - Giunti a flangia per tubazioni in ghisa (da L. Da Deppo, et al., 2006)

1.1.3 Acciaio

Le tubazioni di acciaio trovano impiego da tempi remoti, tuttavia si sono enormemente diffuse con l'avvento dei rivestimenti protettivi e della protezione catodica, che limitano il problema della corrosione, problema grave specie per condotte interrato (controlli e manutenzione impossibili).

Rispetto alle tubazioni di ghisa, esse sono: meno costose (soprattutto se saldate longitudinalmente); presentano una maggiore leggerezza, e quindi ridotti costi di movimentazione e posa in opera; la lunghezza delle barre (8 – 13,50 m, in genere) è più vantaggiosa; le normali produzioni di serie raggiungono maggiori pressioni di esercizio sopportabili. (in certi casi il loro impiego è quasi obbligato)

Per contro, sono però più sensibili alla corrosione da parte di terreni e acque aggressive, nonostante i sistemi protettivi anzi citati (acciai speciali resistenti alla corrosione hanno un prezzo non concorrenziale rispetto alla ghisa sferoidale).



Figura 8 - Posa di una condotta in acciaio (da www.rametal.it)

Le caratteristiche meccaniche le rendono necessarie per impianti di sollevamento, attraversamenti, tratti a forte pressione e/o velocità o se si temano transitori importanti; da questo tipo di impieghi discende l'uso frequente di blocchi d'ancoraggio e talvolta (attraversamenti) di giunti di dilatazione.

I processi di produzione si distinguono a seconda dell'impiego di saldatura longitudinale (Thermatool, con saldatura elettrica, Fritz – Moon, con saldatura al gas d'acqua) o meno (Mannesman, per laminazione). I tubi laminati sono sempre più in disuso per il loro costo e per le loro prestazioni, ormai paragonabili a quelli saldati.

La lunghezza massima di produzione arriva a 13,5 m (16 m su richiesta). I tubi saldati lo sono per saldature longitudinali (piccoli diametri) o elicoidali (grandi diametri)

La produzione dei tubi in acciaio è regolata dalla norma UNI EN 10020, che ne definisce e classifica i tipi di acciaio, e dalla norma UNI EN 10224, che prescrive le condizioni tecniche sia dei tubi che dei raccordi. In generale, si hanno tubazioni di tre diversi spessori commerciali (e quindi di diverse pressioni massime d'esercizio) sino al DN 1000 mm: lo spessore più comune è quello della "serie normale", quello più sottile distingue la "serie leggera", più idonea per pressioni modeste, ed infine si ha la "serie pesante" con gli spessori maggiori. Dal DN 1200 mm al DN massimo di 2700 mm, la serie è invece unica.

Gli acciai usati sono:

Tipo di acciaio	Carico unitario di rottura Rr (N/mm²)	Carico unitario di snervamento Rs (N/mm²)	Allungamento min A (%)
Fe 360	360	235	25
Fe 410	410	255	22
Fe 510	510	355	20

Tabella 1 - Caratteristiche degli acciai per tubazioni da acquedotto (da V. Milano, 1996)

Le norme prevedono una serie di prove sul materiale, sul prodotto finito e sulle saldature.

RIVESTIMENTI

I rivestimenti sia esterni che interni di uso più comune per le tubazioni d'acciaio sono quelli bituminosi, per i quali ci si riferisce alla NORMA UNI ISO 5256 – 1987.

Il rivestimento esterno ha lo scopo di proteggere le condotte dalla corrosione per effetto degli agenti esterni e sono generalmente a base di sostanze bituminose opportunamente trattate e/o rinforzate a mezzo di armature, per resistere alle eventuali azioni meccaniche esterne. Tale strato va reso continuo in corrispondenza dei giunti e dei pezzi speciali, con materiale analogo fornito dal produttore. Ovviamente va tenuta una certa cura nelle operazioni di trasporto e posa in opera.

Si distingue fra rivestimento esterno normale (costituito da una sottile pellicola di bitume e uno strato isolante di bitume fillerizzato, con eventuale armatura a doppio strato di feltro di vetro) e pesante per ambienti aggressivi (armatura costituita da due strati, uno di feltro di vetro ed uno di tessuto di vetro). In condizioni particolarmente difficili si può usare il rivestimento “rinforzato”, che è come il “pesante” ma con due strati di feltro e uno di tessuto di vetro.

Vi sono poi rivestimenti in polietilene fuso o estruso in nastri (NORMA UNI 9099) e in polipropilene estruso, applicati in due o tre strati, che garantiscono un elevato isolamento elettrico.

Infine si può applicare un rivestimento esterno (ma anche interno) a polveri (resine epossidiche o poliammide), applicate per via elettrostatica sul tubo caldo e verniciato con primer se necessario.



Figura 9 - Tubazioni in acciaio con rivestimento in polietilene (Andrea Giusti, 2007)

Fra i rivestimenti interni si distinguono la bitumatura semplice e il rivestimento a spessore.

La prima è una verniciatura protettiva solo per il tempo tra la fabbricazione e la posa in opera. Il secondo, usato per acque chimicamente aggressive, si ottiene tipicamente deponendo, analogamente a quanto già detto, due strati bituminosi (pellicola più strato vero e proprio) sul metallo decapato e fosfatato. Ciò riduce anche la scabrezza interna. Occorre impiegare giunzioni che non danneggino tale rivestimento interno (a flange, sferico per saldatura o sovrapposizione con camera d'aria, Victaulic, Gibault).

Vi è poi il rivestimento interno epossidico, adatto in casi di problemi severi di corrosione, incrostazione ed efficienza di flusso; tali vernici epossidiche o derivate (epossi – catrame, epossi – viniliche) sono costituite da una resina base, un induritore e da un diluente, miscelati al momento d'uso con le proporzioni descritte dal produttore.

Altri rivestimenti interni sono quello cementizio, (ottenuto per proiezione, centrifuga e vibratura di malte speciali) e la zincatura a caldo (NORMA UNI 5745). Rivestimenti particolari sono possibili su ordinazione.

Se si temono correnti vaganti o pile elettrolitiche naturali, occorre dotare la condotta di protezione catodica.

COLLEGAMENTI

La posa in opera è analoga a quelle dei tubi in ghisa. Si consiglia però di adottare un ricoprimento minimo di 1,50 m per $DN \geq 600$ e, per tubazioni di grande diametro, di considerare l'effetto delle sollecitazioni esterne nei calcoli.

I giunti tipici delle tubazioni in acciaio sono quelli a bicchiere, a flangia, a manicotto filettato ed elastici.

I giunti a bicchiere sono oggi saldati, il che presenta molti vantaggi:

- maggiori tenuta e resistenza meccanica (specie a trazione longitudinale, altrimenti scarsa);
- minor costo del tubo rispetto a quelli con altri tipi di giunzione;
- facilità e rapidità di posa in opera, con conseguente economia;
- eliminazione di molti pezzi come: manicotti, manufatti di contropinta durante le prove idrauliche e pezzi di inversione;
- possibilità di risolvere facilmente, anche in fase di montaggio, problemi di adattamenti e modifiche e possibilità di utilizzare tutti gli spezzoni di tubo disponibile, purché compatibili come diametro;
- elevata conduttanza elettrica longitudinale, quindi non necessità di cavallottare i giunti per realizzare l'eventuale protezione catodica;
- manutenzione ridotta, in quanto eventuali sostituzioni di spezzoni possono essere fatte per taglio e successiva saldatura.

Il bicchiere è cilindrico fino a DN 125mm, sferico da DN 150mm in avanti; quest'ultimo permette deviazioni angolari fino a circa 5° (come il bicchiere classico). I tubi di acciaio possono anche essere giuntati saldandoli di testa; in tal caso, i lembi possono essere retti (a "L") o smussati (a "V"), a seconda dello spessore dei tubi.



Figura 10 - Giunto a flangia per tubazione metallica (da www.directindustry.it)

I giunti a flangia, per cui vale quanto detto per i tubi di ghisa, possono avere flange mobili, fisse o saldate.

Tipi di giunto intermedi tra quelli a flangia e a bicchiere sono di dilatazione e di smontaggio.

Si hanno poi i giunti elastici, con tenuta anche ad alte pressioni e di facile montaggio e smontaggio: Victaulic o meccanico con gusci, e Gibault.

Per tutti i tipi di giunto menzionati si presentano le seguenti figure schematiche.

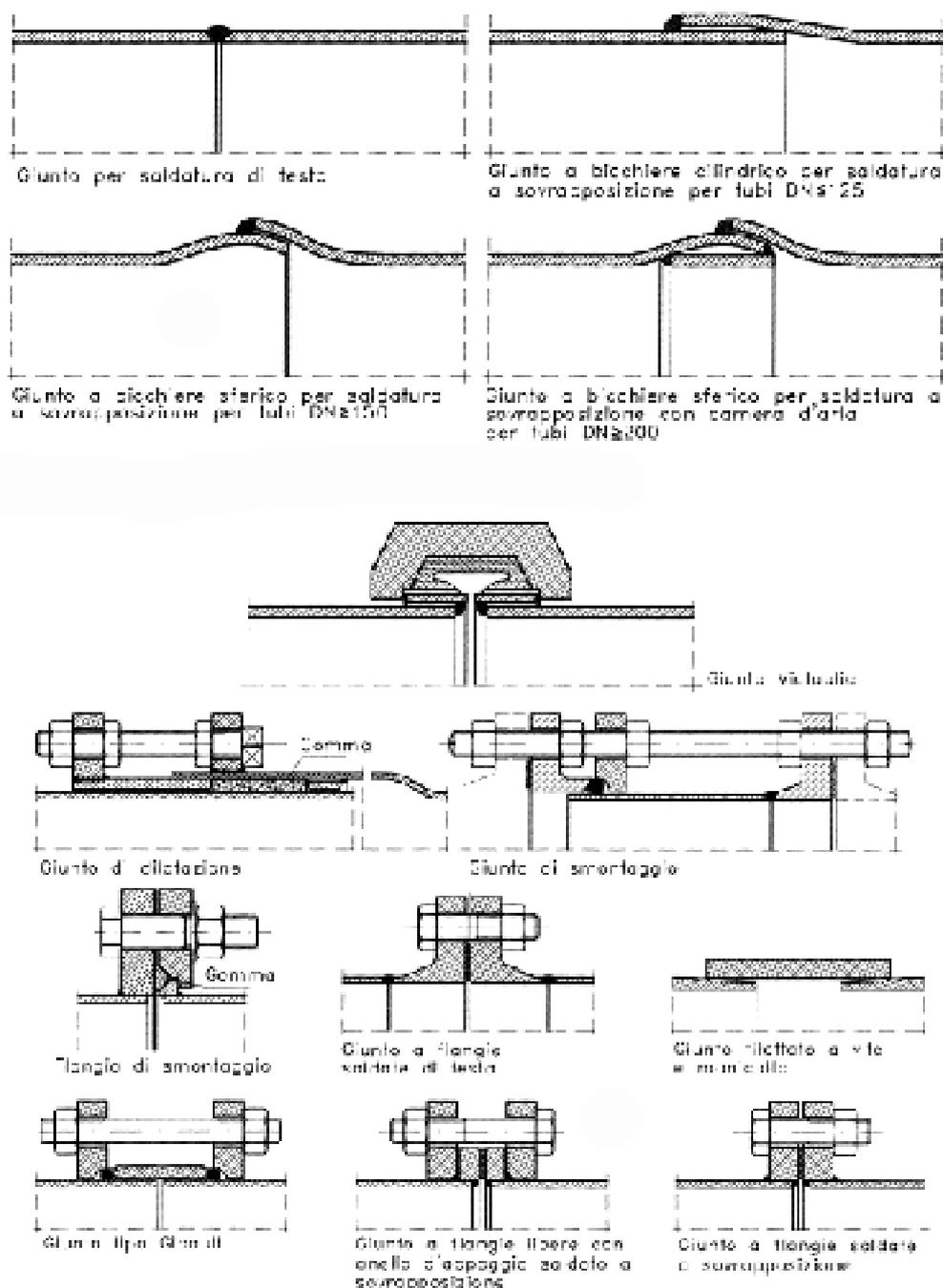


Figura 11 - Giunti per tubazioni in acciaio (da L. Da Deppo, et al, 2006).

I pezzi speciali delle tubazioni in acciaio sono prodotti in una serie molto più ampia di quelli di ghisa. Sono disponibili per giunti a flangia, a manicotto e filettati.

1.2 Tubazioni cementizie

I tubi di calcestruzzo hanno trovato fino a non molto tempo fa delle difficoltà di impiego in presenza di pressioni interne anche di modesta entità. Ciò era dovuto ad alcune caratteristiche meccaniche del materiale:

- la bassa resistenza a trazione (e quindi la necessità di ricorrere ad elevati spessori, soprattutto con la presenza di armatura);
- la fragilità (che impedisce anche la giunzione con materiali diversi);
- la non assoluta permeabilità (soprattutto per elevate pressioni di utilizzo).

D'altra parte, l'economicità e la maggior resistenza del cls all'aggressività delle acque e dei terreni rispetto ai materiali metallici, hanno incoraggiato una serie di ricerche che hanno avuto un certo successo.

In particolare, si è ottenuto un aumento di resistenza a trazione e un miglioramento dell'impermeabilità grazie al confezionamento con rapporti acqua/cemento molto bassi e particolari composizioni degli inerti, oltre che all'utilizzo di particolari tecniche di vibrazione e realizzazione per centrifugazione.

Inoltre, la precompressione (sforzi di trazione eliminati) e l'introduzione della gomma come materiale di tenuta delle giunzioni, ne hanno favorito la diffusione.

1.2.1 Cemento armato

La diffusione delle condotte cementizie armate inizia nei primi del Novecento, ma trova impiego più vasto dal secondo dopoguerra-

I tubi di c.a. semplice si ottengono per centrifugazione o per colata in casseforme mantenute in vibrazione. In ambo i casi, l'armatura (gabbia elicoidale più ferri longitudinali) è precedentemente messa in posizione baricentrica o verso la superficie interna. Successivamente sono maturati ad acqua e vapore. Il rapporto acqua/cemento è basso, sopperendo la centrifugazione alla mancanza di fluidità: la poca acqua, unita a

una scelta accurata degli inerti, dà luogo a un impasto poco poroso, con una resistenza a 28gg di almeno 350 kg/cm^2 (elevato dosaggio di cemento). Per spessori maggiori di 10 cm si ha una doppia armatura.

I tubi di cemento armato semplice vengono realizzati per pressioni nominali massime di $0,7 \text{ N/mm}^2$.

Per quanto riguarda l'interazione ferro – calcestruzzo, si osserva che la protezione che quest'ultimo offre al metallo non è solo di natura fisica, ma anche chimica: infatti il calcestruzzo crea un ambiente fortemente alcalino attorno alla superficie metallica, passivandola e rendendola insensibile anche alle infiltrazioni d'acqua.



Figura 12 - Tubazione in cemento armato (da www.davanzo-manufatti.com)

1.2.2 Cemento armato precompresso

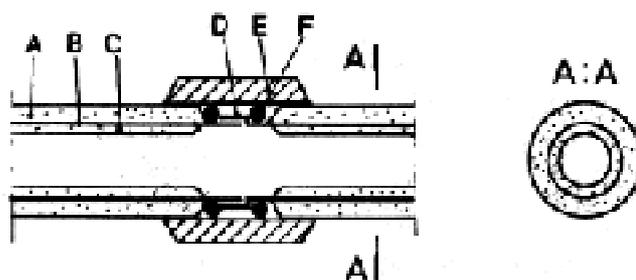
I tubi di c.a.p. hanno lo scopo di evitare che il materiale sia soggetto a sforzi di trazione durante l'esercizio, ottimizzano l'uso dell'acciaio e consentono spessori di calcestruzzo minori, pur raggiungendo pressioni nominali di 2 N/mm^2 . L'armatura può essere messa in trazione prima del getto o durante la fase di presa. In ogni caso deve garantire che per pressione doppia di quella d'esercizio non si superi il 70% della tensione di rottura dell'armatura elicoidale.

Per ambienti aggressivi il tubo va assolutamente protetto per prevenire qualsiasi possibilità di corrosione dell'armatura pretesa, generalmente con un rivestimento di mastice bituminoso armato con tessuto di vetro.

Le normative di riferimento sono le UNI EN 639/96, UNI EN 640/96 e UNI EN 641/96, riguardanti tubi e pezzi speciali armati per condotte in pressione.

I tubi Bonna, che possono considerarsi una particolare tipologia di tubi precompressi, incorporano un tubo di acciaio saldato di spessore esiguo, comunque superiore a 2 mm, con estremità rinforzate da anelli saldati in lamiera striata, che tende a svolgere gli stessi compiti affidati all'armatura di precompressione. A tale tubo, a volte precompresso trasversalmente da una spirale di filo d'acciaio, è affidata la funzione di garantire l'impermeabilità.

Vi è poi un rivestimento interno di calcestruzzo semplice (per piccoli diametri) o di c.a. (per grandi diametri), ottenuto per centrifugazione di strati successivi, avente grande compattezza e bassa rugosità, di spessore minimo di 15mm. Infine vi è uno strato esterno in c.a. o c.a.p., avente spessore minimo di 25mm, ottenuto per vibrazione a cui è affidata la resistenza. I diametri prodotti vanno da 100 a 2.000 mm ed oltre (4 m).



A—rivestimento esterno in c.a.; B—tubo in lamierino metallico; C—rivestimento interno in c.a.; D—giunto a bicchiere del lamierino; E—masticotto in cemento; F—guelli di tenuta in gomma.

Figura 13 - Tubo Bonna (da V. Milano, 1996)

I tubi con cilindro metallico incorporato presentano anche vantaggi tecnici ed economici, che possono influire molto sulla costruzione e sull'esercizio delle condotte: presentano un'assoluta impermeabilità e tenuta delle giunzioni; necessitano di un uso molto limitato di pezzi speciali; la loro resistenza è al livello dei tubi di acciaio; hanno durevolezza maggiore a quella degli altri tubi in calcestruzzo; hanno una notevole praticità ed elasticità di impiego. Inoltre il loro costo non differisce troppo da quello dei tubi precompressi senza cilindro.

Veniamo agli aspetti comuni delle tubazioni cementizie. Possono essere cilindriche o con fondo piano (vedi figura seguente) e le produzioni tipiche vanno da 600 a 2.500 mm, con lunghezza inferiore ai 6 m.

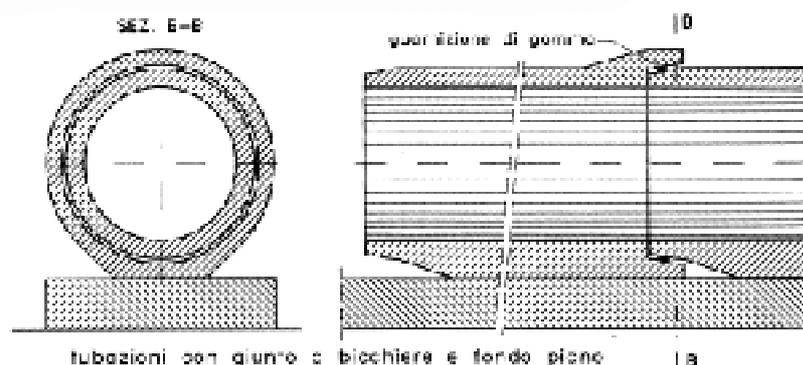


Figura 14 - - Tubi in calcestruzzo con fondo piano (da L. Da Deppo, et al., 2006).

Oltre alle prove di collaudo in opera, il Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici del 12-12-1985 prevede una serie di prove da effettuarsi in stabilimento. Le tubazioni tipo Bonna non vi sono considerate; ma comunque deve fornirsi documentazione delle caratteristiche delle tubazioni impiegate.

I *vantaggi* delle tubazioni cementizie rispetto a quelle metalliche sono:

- l'economicità, ma solo per alti diametri (oltre DN 800, in genere) e basse pressioni (0,3 – 0,4 N/mm² per il c.a. e 1 – 1,2 N/mm² per il c.a.p.);
- la resistenza alle acque trasportate e al terreno di posa;
- la durata della superficie interna, la sua conservazione (lo spessore non diminuisce nel tempo) e la riparabilità in opera, con conseguente NON tendenza allo scoppio.

Vi sono però molti *limiti*:

- la non convenienza per piccoli diametri e/o alte pressioni (peso eccessivo e costi di posa e trasporto alti). Importante se si prevedono colpi d'ariete (grandi rischi);
- la sensibilità all'attacco delle radici degli alberi che vi possono penetrare da microfessure e ostruire la sezione ("code di volpe");
- la sensibilità ai fulmini, che generano lesioni longitudinali e rotture dei giunti;
- la necessità di un terreno di posa abbastanza stabile.

COLLEGAMENTI

I giunti tipici sono a bicchiere con anello di gomma. La zona di giunzione è lavorata a macchina dopo la maturazione del calcestruzzo ed è rinforzata dalla maggior armatura presente. Una variante di tale giunto è quello a maschio e femmina, che però costringe a ridurre lo spessore del calcestruzzo in corrispondenza del giunto. Dato che per diametri elevati la posa avviene spesso su sella di calcestruzzo (ampiezza circa 120°), il loro vantaggio è quello di non richiedere interruzione di tale sella o riduzione del suo spessore. Si stanno affermando tipologie in cui la guarnizione è alloggiata su anello metallico riportato: ciò per favorire la pianeità della guarnizione, specie per alti diametri.



Figura 15 - Giunto a maschio e femmina per tubazioni cementizie (da www.eurobeton.it)

Giunti a manicotto in c.a. e c.a.p. e anelli di gomma di tenuta (Simplex o Gibault) sono poco diffusi ma a volte impiegati con raccordi in ghisa per pezzi speciali o apparecchiature.

I tubi Bonna hanno giunti a bicchiere ricavati nel tubo metallico annegato. Un manicotto esterno in c.a. garantisce resistenza e coassialità.

La gamma dei pezzi speciali è ridotta rispetto alle tubazioni metalliche. Rispetto ai tubi di ghisa si consiglia un maggior ricoprimento, specie per gli alti diametri.

1.2.3 Cemento amianto

I tubi di cemento amianto sono costituiti da una speciale malta di cemento, che ha come inerte delle fibre di amianto; l'amianto, che dal punto di vista chimico è un silicato idrato di magnesio, è un minerale fibroso noto fin da tempi assai remoti per la sua resistenza alle alte temperature e per l'inalterabilità nel tempo.

L'impiego di tale materiale, iniziato negli anni 1913 – 1922 e dovuto all'Ing. Adolfo Mazza della Eternit S.p.A. (ideatore del processo di fabbricazione e della prima macchina produttrice), è esploso negli anni '50 e '60. In seguito, la legge n°257 del 27/03/1992 ne ha infine bandito l'uso, riconoscendo la pericolosità del materiale. Tuttavia occorre precisare due aspetti: primo, è dimostrato che l'amianto risulta nocivo alla salute per effetto dell'inalazione, e quindi il pericolo è eminentemente concentrato nella lavorazione e nel contatto negli ambienti di produzione, mentre l'acqua trasportata da tali condutture non risulta particolarmente ricca di fibre di amianto (esperienze americane); inoltre il materiale esplica la sua nocività a livello polmonare e non per contatto con l'apparato digerente. Secondo, nonostante l'abbandono di tale materiale, il cemento amianto ha trovato in passato largo impiego nelle tubazioni per acquedotti ed una notevole quantità di tubazioni sono ancora in servizio, ed è perciò opportuno occuparsene.

Per le tubazioni venivano impiegati amianto serpentino o crisotilo (a fibre bianche e soffici) e amianto anfibolo nelle varietà crocidolite (amianto bleu, il più pericoloso) e amosite (amianto bruno, a fibre paglierine e più rigide).



Figura 16 - Tubazione di cemento-amianto (da Andrea Giusti, 2007).

Il cemento, per lo più ad alta resistenza, sfruttava tali fibre come armatura diffusa atta ad assorbire gli sforzi di trazione. Per acque pure era raccomandato cemento pozzolanico, mentre per acque solfatiche cemento ferrico.

La fabbricazione seguiva le seguenti tappe:

- preventiva macinazione dell' amianto, per suddividerne le fibre;
- miscela al 18 – 20 % con acqua e cemento (miscela molto liquida);
- successivi avvolgimenti fortemente compressi su forme rotanti, con eliminazione di buona parte dell'acqua durante la lavorazione. Il processo portava all'orientamento delle fibre in direzione tangenziale al tubo e ciò faceva sì che la loro azione fosse simile a quella dell' armatura del c.a.;
- maturazione in appositi forni e vasche;
- rifinitura (taglio e tornitura delle testate)
- collaudi;
- stoccaggio.

Pregi di tali tubazioni erano: resistenza all'aggressività di acque (eccetto quelle solforose, che dilavano la calce) e terreni, anche maggiori delle tubazioni cementizie; insensibilità alle correnti vaganti; bassa rugosità e alterazioni limitate nel tempo; leggerezza rispetto ai tubi in c.a. e c.a.p. ($1.900 - 2.000 \text{ kg/m}^3$), quindi bassi costi di trasporto e posa in opera; economicità del materiale in sè, specie per basse pressioni (fino a 1 N/mm^2) e bassi diametri (massimo $800 - 1.000 \text{ mm}$); coefficiente di conducibilità termica basso, circa 130 volte minore di quello del ferro, esaltato da spessori relativamente alti; assoluta impermeabilità e quindi insensibilità alle radici (prove di posa in terreno ricco di radici arboree hanno dimostrato l'impenetrabilità delle tubazioni, nonostante fossero state avvolte dalle radici stesse).

I *limiti* tecnici erano: una maggiore fragilità rispetto alle altre tubazioni; la necessità di terreni di posa stabili ed una posa che necessitava molta accuratezza (sensibilità alla flessione longitudinale); la non convenienza economica oltre certi diametri e pressioni, che ne limitava la produzione di serie al diametro: DN 500 mm per PN = $1,78 \text{ N/mm}^2$; DN 700 mm per PN = $1,53 \text{ N/mm}^2$; DN 1000 mm per PN = $1,27 \text{ N/mm}^2$; DN 2000 mm, solo per produzioni speciali a richiesta, per PN = $2,55 \text{ N/mm}^2$.

I tubi di cemento amianto erano prodotti, secondo NORMA UNI 4372/76, in diametri da 50 fino a 1.000 mm (anche 2.000 per produzioni speciali) in lunghezze multiple di 0,50 m, con minimi di 3m per $\text{DN} \leq 200 \text{ mm}$ e 4 m per $\text{DN} > 200 \text{ mm}$. Se necessario, erano protetti con vernici bituminose o d'altro tipo. La norma prevedeva una serie di prove in officina (tenuta, scoppio, rottura per schiacciamento trasversale e flessione longitudinale, facoltativa) e a seconda della pressione interna sopportabile si distinguevano diverse classi.

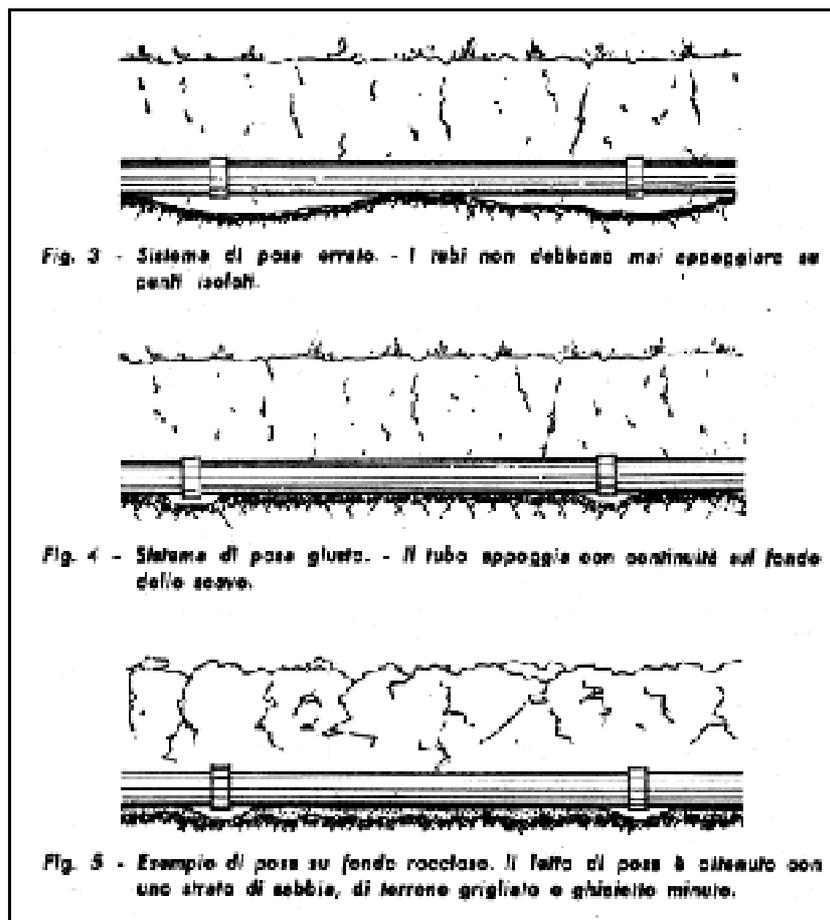


Figura 17 - Posa in opera dei tubi di cemento-amianto (da Andrea Giusti, 2007).

La tecnica produttiva non consentiva di realizzare pezzi speciali, eccetto i giunti, per cui si usavano quelli di ghisa.

Attualmente, solo per reti di fognatura, trovano impiego tubazioni in CPC (Composito Polimeri e Cemento) in cui le fibre di amianto sono sostituite da fibre plastiche e cellulosiche. I risultati sono in attesa di verifica, almeno nel campo delle reti in pressione.

COLLEGAMENTI

Per ciò che riguarda i raccordi, si osserva anzitutto che il giunto a bicchiere era diffuso solo per certe produzioni (tubi Magnani) e comunque per impieghi quasi esclusivamente fognari. La tecnica produttiva rendeva più semplice produrre tubi semplicemente cilindrici, da giuntarsi quindi con sistemi a giunto rapido (senza distanziatore interno), Gibault (usato specie per installazioni provvisorie o per collegamenti con raccordi o pezzi speciali in ghisa o acciaio) o a manicotto con distanziatore (manicotto in cemento amianto, guarnizione in gomma e distanziatore avente funzione di allineamento). Tutti questi tipi di giunzione affidavano la tenuta ad anelli di gomma, messi in compressione per schiacciamento. Si osserva infine che ogni produttore aveva un proprio sistema di giunzione particolare, anche se il principio restava identico.

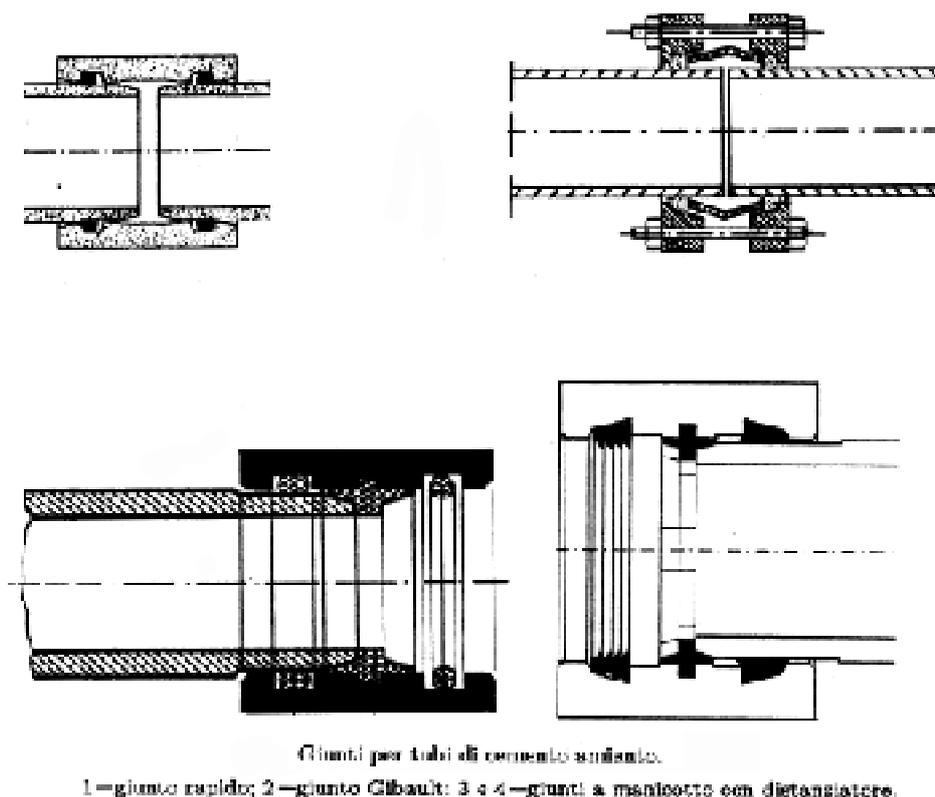


Figura 18 - Giunti per tubazioni in cemento-amianto (da V. Milano, 1996)

1.3 Tubazioni plastiche

I tubi di materiale plastico hanno trovato impiego in tempi abbastanza recenti, infatti le prime applicazioni sono state in Germania nel 1938 con tubi in cloruro di polivinile (PVC), ma hanno avuto una larga diffusione solo nel dopo guerra, per cui l'esperienza non è ancora in grado di fornire precise indicazioni sul loro comportamento a lungo termine.

Inesperienza nei materiali impiegati, scarsa conoscenza delle loro caratteristiche, difetti di produzione e di posa hanno prodotto, insieme ad una mancanza di normative (da poco colmata), risultati inizialmente negativi. Siamo ora in una fase di miglioramento delle prestazioni, che ha portato ad una crescente diffusione di tali materiali, incentivata anche dalle loro caratteristiche positive:

- costi competitivi, almeno rispetto alle tubazioni metalliche;
- leggerezza, con un peso minore da 2,5 a 10 volte rispetto all'acciaio;
- possibilità di produrre pezzi di grande lunghezza, quindi minor numero di giunti;
- elevata resistenza agli agenti chimici ed elevato isolamento elettrico;
- scabrezza ridottissima (si può considerare il comportamento idraulico di tubo liscio) e sua costanza nel tempo;
- celerità del materiale molto ridotta, quindi bassa sensibilità ai transitori elastici;
- assoluta impermeabilità.

Gli aspetti negativi sono essenzialmente:

- resistenza meccanica limitata (eccetto la vetroresina), fatto che limita la pressione sopportabile;
- deformabilità sotto i carichi esterni, il che dà pressioni di esercizio p_0 elevate e condizionanti. Esigenza quindi di posa accurata;
- decadimento nel tempo e con la variazione di temperatura (più che altro teorico per gli acquedotti) delle proprietà meccaniche;

- fragilità agli urti, sebbene inferiore a quella del fibrocemento, il che comporta la posa con letto e copertura di sabbia;
- movimentazione e posa in opera delicate (evitare ovalizzazioni, urti e alte temperature).



Figura 19 - Posa di tubazione in polipropilene (da www.crmwa.com)

Le materie plastiche impiegate nella fabbricazione dei tubi si suddividono in due grandi categorie: le resine termoplastiche (policloruro di vinile - PVC, polietilene ad alta densità - PEAD e a bassa densità - PEBD, polipropilene isotattico - PP o *Moplen*) e le resine termoindurenti rinforzate (resina termoindurente rinforzata con fibre di vetro - PRFV o vetroresina). Entrambi i tipi di resine assumono un elevato grado di indurimento con il raffreddamento dopo la lavorazione a caldo, ma mentre le resine termoplastiche rammolliscono se nuovamente scaldate, sino a divenire pastose, le termoindurenti mantengono le loro caratteristiche.

1.3.1 Policloruro di vinile - PVC

Il PVC è una resina termoplastica che ha la proprietà di rammollire con il calore, assumendo la forma che le viene impressa e conservandola con il raffreddamento, ma che poi perde nuovamente con le alte temperature. Dal punto di vista chimico è un alto polimero.

I tubi si ottengono per estrusione di granuli di pezzatura molto sottile (aspetto simile a polvere). Il processo richiede l'uso di: additivi stabilizzanti (contrastano la degradazione termica durante la lavorazione e le azioni successive degli agenti atmosferici e della luce); lubrificanti (per facilitare l'estrusione); coloranti (pigmenti). Gli additivi plastificanti non sono utilizzati nella produzione dei tubi (PVC rigido).

Le prime tubazioni impiegate in Italia risalgono agli anni '50, ma la loro diffusione è aumentata particolarmente negli ultimi 30 anni.

Il PVC è pressoché insensibile alle basse temperature e pressoché inattaccabile dai liquidi (fino a 40°C) e dal terreno di posa. E' inoltre atossico se puro, ma gli additivi possono non esserlo: quindi, per tubi veicolanti acque destinate al consumo umano, essi devono sottostare a prescrizioni del Ministero della Sanità.



Figura 20 - Stock di tubazioni in PVC (da www.e-idrotec.it)

La norma che tratta le generalità di tubi e raccordi, valvole, accessori ausiliari e la funzionalità del sistema è la UNI EN 1452.

La pressione nominale PN è la massima pressione interna ammissibile a 20 °C in assenza di altre sollecitazioni esterne. La pressione di esercizio Pe è invece la massima pressione interna ammissibile alla temperatura di impiego e in assenza di sollecitazioni esterne. Gli spessori sono calcolati in funzione di un valore della tensione di sicurezza, assunto supponendo la diminuzione di resistenza meccanica nel tempo, con vita utile pari a 50 anni.

La produzione è unificata in base al diametro esterno teorico D; con diametri commerciali che vanno da 110 a 630 mm; le lunghezze tipiche sono di 6 e 12 m; le pressioni d'esercizio 4, 6, 8, 10 e 16 bar. I tubi in PVC possono essere forniti in rotoli se $D \leq 40$ mm e il diametro dell'avvolgimento rispetta certi minimi;

Il PVC, al pari degli altri materiali viscoelastici, presenta il fenomeno del fluage o scorrimento plastico (deformazione crescente nel tempo sotto un certo carico). In altri termini E cala nel tempo. Per carichi inferiori a quello di rottura istantaneo, il tempo di rottura è tanto minore quanto più i due carichi sono simili. Non vi è proporzionalità tra il diminuire del carico e l'aumento del tempo di rottura. Inoltre l'allungamento nel tempo non segue una legge lineare. Ovviamente, l'aumento della temperatura accelera il processo di invecchiamento. Si riportano su piano logaritmico tali andamenti.

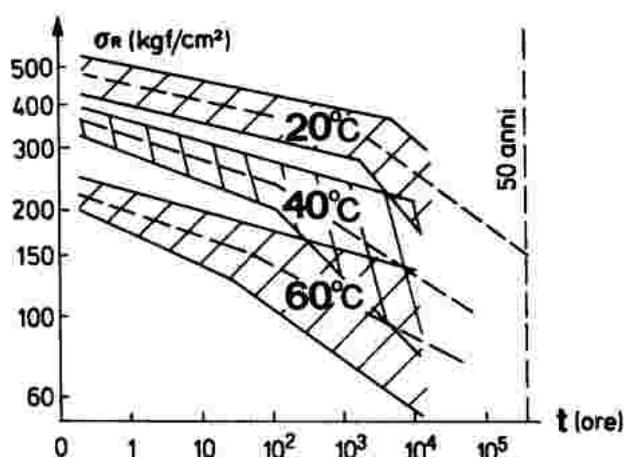


Figura 21 - Resistenza PVC nel tempo e a varie temperature (da V. Milano, 1996)

Si nota come il comportamento peggiori sensibilmente a un certo punto della vita del materiale. Tale peggioramento, anticipato per temperature crescenti, sembra dovuto a invecchiamento fisico e non chimico del polimero (sforzi prolungati danno slittamenti relativi di molecole, da cui irregolarità e rotture fragili). Dunque E si riduce a 50 anni di un coefficiente variabile tra 2 e 3,3 (2,5 in media).

Per i tubi sono previste in stabilimento prove (NORMA UNI EN 1452) non distruttive (tenuta idraulica dei giunti alla pressione interna e alla depressione, tenuta dei tubi in rotoli) e distruttive (assorbimento d'acqua, tensioni interne, resistenza alla pressione interna, temperatura di rammollimento, resistenza all'acetone e resistenza all'urto). Per raccordi e flange vi sono alcune prove coincidenti con quelle per i tubi, incentrate sulla verifica di tenuta del giunto in pressione.

COLLEGAMENTI

Un primo tipo di giunto è quello a bicchiere ad incollaggio, a volte rinforzato con ulteriore saldatura all'estremità del bicchiere (solo per spessori adeguati poiché vi è il rischio di un indebolimento del materiale ad opera della saldatura). Una seconda tipologia è il giunto a bicchiere con anello di tenuta elastomerico, che ha il vantaggio, rispetto al primo, di permettere le dilatazioni termiche. Si hanno poi giunti a manicotto incollato e a manicotto incollato e saldato (molto meno diffusi), i giunti a manicotto filettato (per diametri fino a 80 – 100 mm e per spessori adeguati). Infine esistono giunti a flangia fissa o mobile, usati ove occorra smontare frequentemente la tubazione o inserire pezzi speciali.

Si riportano di seguito alcune figure di condotte in PVC e di tali giunti.

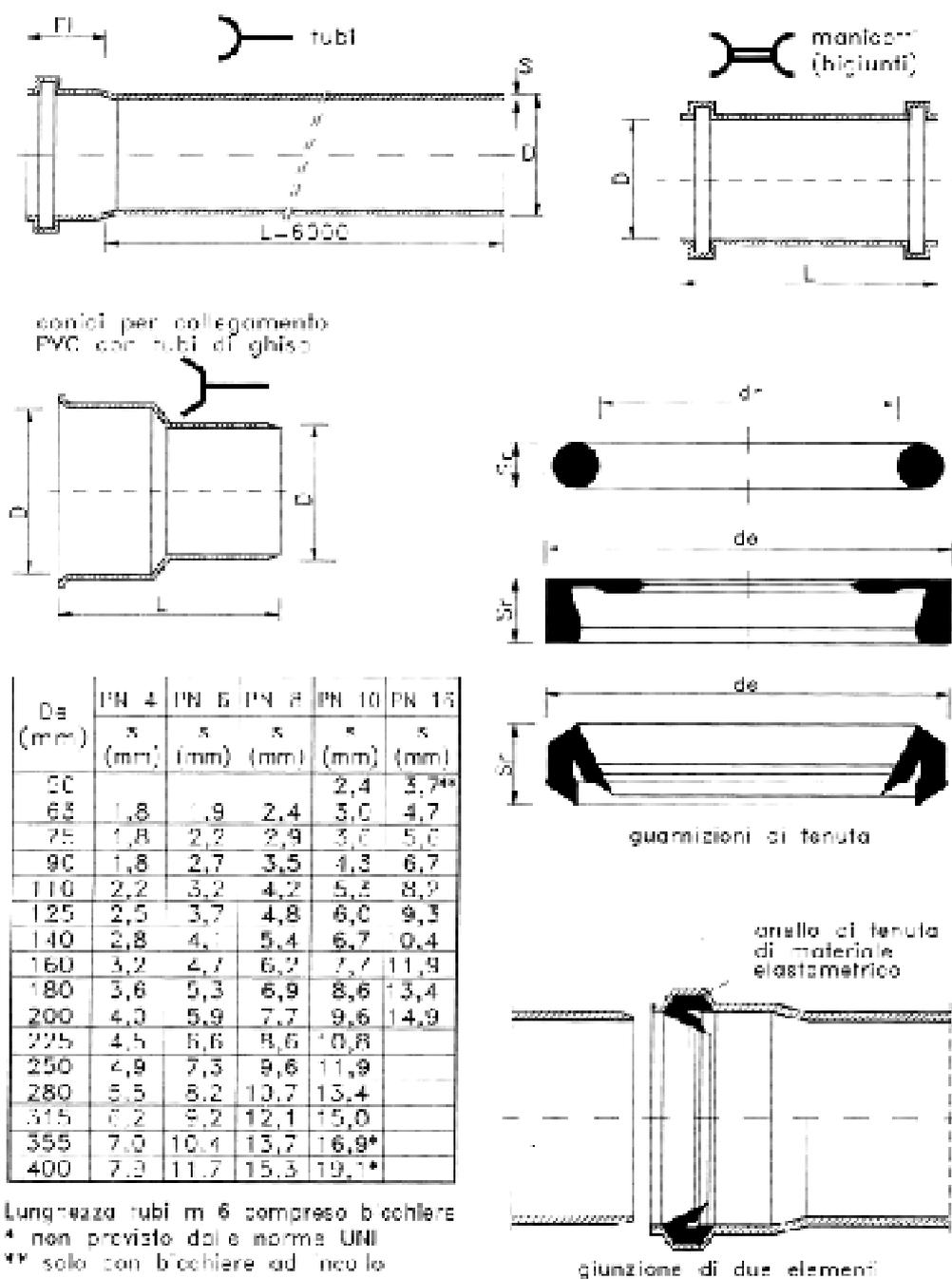


Figura 22 - Condotte e pezzi speciali di PVC per acquedotti (da L. Da Deppo, et al, 2006).

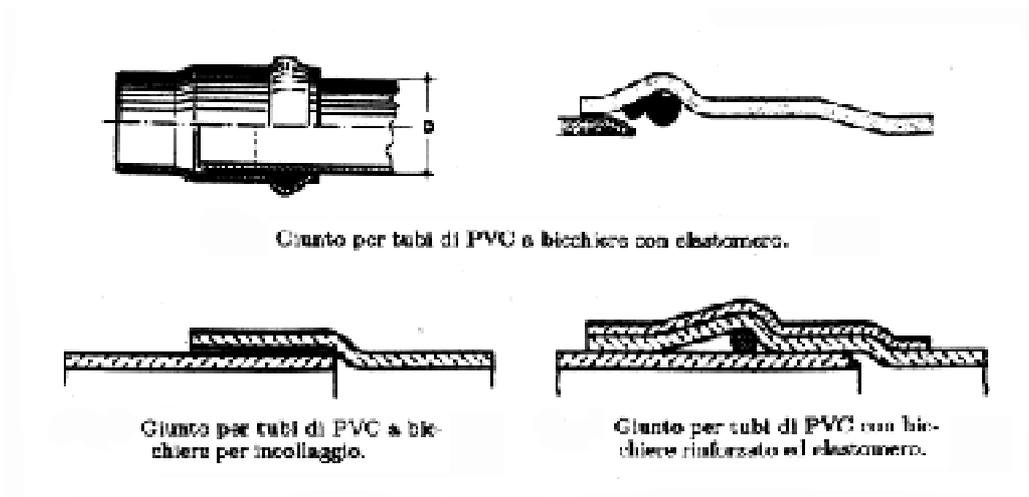


Figura 23 - Giunti per tubazioni in PVC (da V. Milano, 1996)

I pezzi speciali consistono in curve a 45 e a 90°; braghe, deviazioni ad incollaggio, riduzioni; manicotti; tappi di chiusura; raccordi con tubi di ghisa, con manicotti di ghisa, con tubi e manicotti di conglomerato cementizio.

1.3.2 Polietilene a bassa densità - PEBD

Il polietilene a bassa densità si ottiene comprimendo il gas etilene ad elevata pressione (oltre 1000 Atm) ed alte temperature, in presenza di piccole quantità di ossigeno, presentandosi di colore biancastro.

I tubi di PEBD si ottengono per estrusione di granuli di polimero, addizionati al 2% circa di nerofumo come stabilizzante. Il processo consente di produrre tubi di lunghezza qualsiasi. Il PEBD è atossico, infrangibile, ha alte proprietà isolanti, alta inerzia chimica ed elettrica. L'alta elasticità e flessibilità lo rendono confezionabile in rotoli anche di 2 km per piccoli diametri, il che minimizza il numero di giunti.

La NORMA UNI di nostro interesse è la 7990/79, che ne definisce le caratteristiche dei polimeri e ne fa una classificazione in base al valore della massima tensione di rottura a trazione a 20°C ($Pe\ 25 = 2,5\ N/mm^2$ e $Pe\ 32 = 3,3\ N/mm^2$), mentre, per la loro idoneità

al trasporto di acqua potabile, devono essere conformi alle prescrizioni igienico-sanitarie del DLgs n° 174 del 6 aprile 2004 (acqua destinata al consumo umano).

Le pressioni nominale e di esercizio sono definite come per il PVC. I diametri esterni dei tubi vanno da 10 a 200 mm per Pe25 e da 10 a 500 mm per Pe32. Sono prodotti per $p_N = 4 - 6 - 10 \text{ kgf/cm}^2$ e forniti in barre o in rotoli (diametro minimo del rotolo 600 mm).



Figura 24 - Tubi in PEBD pronti alla posa in opera (da it.wikipedia.org)

Similmente al PVC, il PEBD presenta fenomeni di decadimento della resistenza con la temperatura e col tempo. La riduzione di resistenza nel tempo è però meno marcata: a 50 anni la resistenza a trazione è circa il 60 % di quella istantanea, contro circa il 30 % del PVC. Varie prove di tenuta e resistenza sono previste dalle norme citate.

Avendo il PEBD caratteristiche meccaniche molto inferiori al PEAD il suo impiego è limitato per trasporto di fluidi in pressione. Il basso modulo elastico consente di fabbricare tubazioni abbastanza flessibili e quindi adattabili alla morfologia del terreno, specie per rami di minor diametro.

I tipi di giunzione sono simili e si trattano in seguito, la posa in opera è analoga a quella del PVC.

1.3.3 Polietilene ad alta densità - PEAD

I tubi di PEAD presentano molte analogie con quelli di PEBD, sia per quel che riguarda la normativa, che per il processo di produzione. Il monomero chimico è costituito con procedimento identico al PEBD, ma la polimerizzazione avviene secondo il procedimento ad alta pressione e ciò gli conferisce struttura più cristallina e proprietà meccaniche e termiche migliori, pur conservando le eccellenti caratteristiche dielettriche e chimiche e l'assoluta impermeabilità. Non se ne consiglia comunque l'uso per il trasporto di acqua a temperature permanentemente superiori ai 40 °C.

Le NORME che li trattano sono la UNI EN 12201, che ne fornisce anche una classificazione in funzione della resistenza minima (PE 100 per $\sigma = 10$ MPa e PE 80 per $\sigma = 8$ MPa) e la UNI EN ISO 15494, per i criteri di qualità. Inoltre, per la conformità al trasporto di acqua potabile, devono rispettare la norma UNI EN 1622.

I tubi di PEAD sono prodotti per PN = 2,5 – 4 – 6 – 10 – 16 kgf/cm², a cui corrispondono identiche pressioni d'esercizio. La produzione considera diametri esterni tra 110 e 1.200 mm, con spessori compresi (a meno di una tolleranza) tra 3,5 e 37,2 mm. I tubi con diametro fino a 110 mm sono normalmente forniti in rotoli.



Figura 25 - Tubo in PEAD serie 100 (da www.idromet.it)

La riduzione del modulo di elasticità normale E a lungo termine va dalle 4 alle 8 volte, in funzione della tensione applicata, ed è dunque maggiore di quello che compete al PVC. Per tenere conto poi del decadimento delle caratteristiche meccaniche del materiale all'aumentare della temperatura, si considera un valore decrescente della pressione nominale all'aumentare della temperatura, sino ad un massimo di 60°C (curve di regressione elaborate secondo le norme ISO/TR 9080).

I metodi di prova sono previsti dalla NORMA UNI EN 12201 e sono distinte in distruttive e non distruttive; le provette devono comprendere, in alcuni casi, anche i giunti.



Figura 26 - Rotoli di tubi in PEAD (Andrea Giusti, 2007)

COLLEGAMENTI

Esiste una vasta gamma di raccordi ed i giunti più comuni dei tubi di PEBD e PEAD sono:

- con saldatura di testa (solo PEAD);
- con saldatura nel bicchiere (solo PEAD);
- a manicotto semplice o doppio;
- a collare;
- a flange, anche di altri materiali;
- mediante raccordi, anche di altri materiali.

Le saldature possono essere per polifusione (senza materiale d'apporto) o con materiale d'apporto (polietilene o polipropilene). Il secondo tipo è usato, scarsamente, solo per giunzioni di testa. Il primo tipo è invece diffuso sia per giunti di testa che a bicchiere. I giunti a manicotto possono essere filettati o saldati: in quest'ultimo caso incorporano una resistenza elettrica che porta il materiale a fusione. I giunti a collare prevedono un tronchetto di tubazione metallica (in genere ottone) inserito tra le estremità dei tubi da collegare, tubi che vengono cinti da due collari metallici e quindi serrati contro tale tronchetto. Vi sono poi giunti metallici a dente di sega e guarnizioni. Infine si hanno i giunti a flange (fisse, mobili o saldate), analoghi a quelli di PVC.

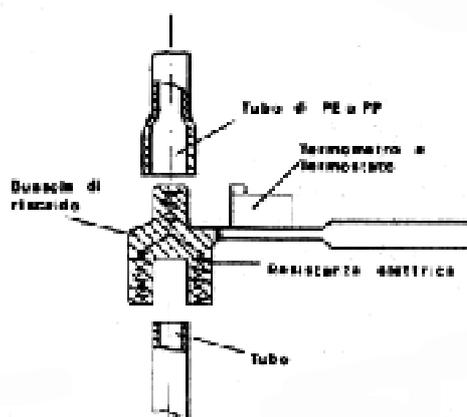


Fig. 4.34 Giunto per tubi di PEAD per polifusione nel banchiera.

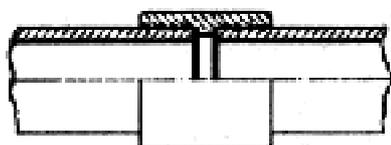


Fig. 4.35 Giunto per tubi di PEAD a manicotto con elettroresistenza incorporata.

Figura 27 - Giunti per tubazioni in PEAD (da V. Milano, 1996)

La posa in opera è analoga a quella del PEBD e del PVC.

I pezzi speciali in commercio sono curve a 45 e 90°, TI a 90°, manicotti e riduzioni. Inoltre la facile saldabilità consente di realizzare con costi limitati anche pezzi speciali particolari.

1.3.4 Polipropilene - PP

Il polipropilene fa parte di una nuova categoria di polimeri olefinici scoperta dal Prof. Natta del Politecnico di Milano nel 1954 ed è anche commercialmente noto col nome di *Moplen* (datogli dalla Montecatini Edison).

Il prodotto più interessante dal punto di vista commerciale è quello *isotattico*: è un polimero semicristallino caratterizzato da un elevato carico di rottura, una bassa densità, resistenza chimica ed elettrica, una buona resistenza termica e all'abrasione. La sua densità è di 900 kg/m^3 e il punto di fusione è spesso oltre i $165 \text{ }^\circ\text{C}$ (a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ conserva circa il 30% delle caratteristiche meccaniche a $20 \text{ }^\circ\text{C}$). È molto utilizzato anche il PP-r: polipropilene copolimero (formato da unità polimeriche diverse) con disposizione *random*.



Figura 28 - Stock di tubazioni in PP (da www.esi.info)

La norma di riferimento che ne descrive le caratteristiche del sistema è la UNI EN ISO 15874. I tubi di PP sono prodotti per cinque classi di PN = 2,5 – 4 – 6 – 10 – 16 kgf/cm². Gli spessori sono calcolati in funzione di un valore della tensione di sicurezza, assunto supponendo la diminuzione di resistenza meccanica nel tempo, con vita utile pari a 50 anni, come per gli altri materiali plastici.

Le forniture possono essere fatte sia in barre che in rotoli, purché con diametro di avvolgimento di almeno 600 mm.

Sono previste una serie di prove: prove di tenuta idraulica alla pressione interna dei tubi e dei giunti e prove di resistenza alla pressione interna. I valori della tensione cui deve essere sottoposto il tubo sono diversi a seconda che il polipropilene sia classificato come *omopolimero* o *copolimero*. L'*omopolimero* ha, a breve termine, una resistenza superiore del 30% rispetto al *copolimero*, tuttavia presenta però un maggior decadimento nel tempo della resistenza meccanica, tanto che a 50 anni le due sono paragonabili.

Anche per i tubi in polipropilene la produzione di raccordi è ampia ed i tipi di giunzione utilizzati sono gli stessi visti per i tubi in polietilene.

1.3.5 Resina poliestere rinforzata con fibre di vetro – PRFV

La vetroresina è una resina termoindurente rinforzata con fibre di vetro, che costituiscono la parte strutturale del materiale, a cui è affidata la resistenza meccanica, mentre la resina è la matrice che assicura l'impermeabilità e la resistenza chimica e che lega le varie fibre, permettendo la distribuzione degli sforzi.

La resina termoindurente può essere scelta fra quelle fenoliche, poliestere, epossidiche, ecc.; le più impiegate sono quelle poliestere, liquide allo stato di monomero, polimerizzano con l'aggiunta di opportuni additivi. Le resine fenoliche (le prime ad essere usate), sono dotate di buon potere dielettrico, resistenza meccanica e chimica.

Le fibre di vetro possono presentarsi sotto diverse forme: in filati, in tessuti e nastri, in un sottile tappeto di fibra sciolta compressa. Hanno resistenza a trazione dell'ordine di 1.600 N/mm^2 , per cui le prestazioni della vetroresina sono elevate, paragonabili a quelle dell'acciaio. Inoltre, essendo la maggiore resistenza in direzione delle fibre, orientandole opportunamente si possono ottenere resistenze più elevate in certe direzioni piuttosto che in altre (il PRFV è un materiale "progettabile").



Figura 29 - Tubazioni in PRFV (da www.compositesworld.com)

La realizzazione dei tubi avviene attraverso l'avvolgimento delle fibre di vetro e della resina intorno ad un mandrino, poi riutilizzabile, sino ad ottenere lo spessore previsto, secondo le seguenti fasi:

- applicazione di uno strato sottile di resina rinforzata con un velo di vetro (80 – 90 % di resina);
- applicazione di un secondo strato di vetro impregnato di resina (70 % circa di resina). Si forma il *liner*, che garantisce l'impermeabilità, la resistenza chimica ed un buon comportamento idraulico (il PRFV è estremamente liscio);

- applicazione di un terzo strato al 70 % circa di vetro impregnato di resina, avvolto con tensione costante, che garantisce essenzialmente la resistenza meccanica;
- finitura con strato di alcuni decimi di mm di pura resina, così da garantire un'impregnazione totale dello strato sottostante. Vi si aggiungono additivi anti UV.

Per tubazioni aventi classi di pressione nominale molto elevata, si può aggiungere una percentuale di silice pura al posto del vetro, ottenendo caratteristiche di resistenza maggiori.

Si può procedere anche usando un sottile tubo in PVC come mandrino, tubo che resta a far parte del prodotto finito; un procedimento meno frequente è per centrifugazione.

La vetroresina ha più di un *pregio*:

- un costo globale che sta divenendo inferiore a quello dell'acciaio;
- alta inerzia chimica ed elettrica;
- leggerezza (1,40 Kg/dm³, contro i 7,5 dell'acciaio e i 2,5 del cemento);
- scabrezza ridotta e costante nel tempo;
- deformabilità: oltre all'adattabilità al terreno, comporta anche un'azione smorzante nei confronti dei colpi d'ariete.

Si hanno di *contro*:

- una modesta rigidità, specie per le tubazioni a filamento continuo, per cui è necessaria la posa con letto e copertura di sabbia;
- sensibilità in caso di temperatura ambiente inferiore a 0 °C.

L'uso di elezione è quindi in zone impervie o con terreni aggressivi, o in presenza di correnti vaganti.

I primi usi risalgono agli anni '50, ma le NORME UNI che li trattano sono recenti: la 9032/88, che suddivide i tubi di PRFV in classi e tipi a seconda del tipo di fabbricazione e della loro composizione, e la 9033/88 per quanto riguarda i metodi di prova.

La produzione tipica va da diametri di 25 a 1000 mm, ma arriva anche a DN 4000, con lunghezze fino a 18 m per elemento. Le lunghezze standard sono di 3,5 m per $DN \leq 50$ mm, 6 m per $DN \leq 250$ mm, 10 m per $DN \leq 800$ mm e 12 m per $DN \geq 900$ mm. Le PN di produzione, riferite alla temperatura dell'acqua di 20°C, vanno da 1 a 40 kgf/cm² e le prestazioni sono vicine a quelle dei tubi metallici (e quindi molto maggiori di quelle dei tubi in materiale termoplastico).

È poi stabilita una lunga serie di prove, distruttive e non, per valutarne tenuta, resistenza, fenomeni plastici, inflessione e altri aspetti.



Figura 30 - Posa in opera di tubazioni in PRFV (da www.reinforcedplastics.com)

COLLEGAMENTI

I giunti più diffusi sono quelli a bicchiere:

- per incollaggio con adesivo;
- per incollaggio a fasciatura esterna, per pressioni elevate;
- con incollaggio e ripresa interna, per grandi diametri;
- con guarnizione di gomma per la tenuta, forse il più diffuso;
- con guarnizione di gomma e cavetto antisfilante.

Nella figura seguente alcuni esempi di giunti a bicchiere per tubazioni in PRFV:

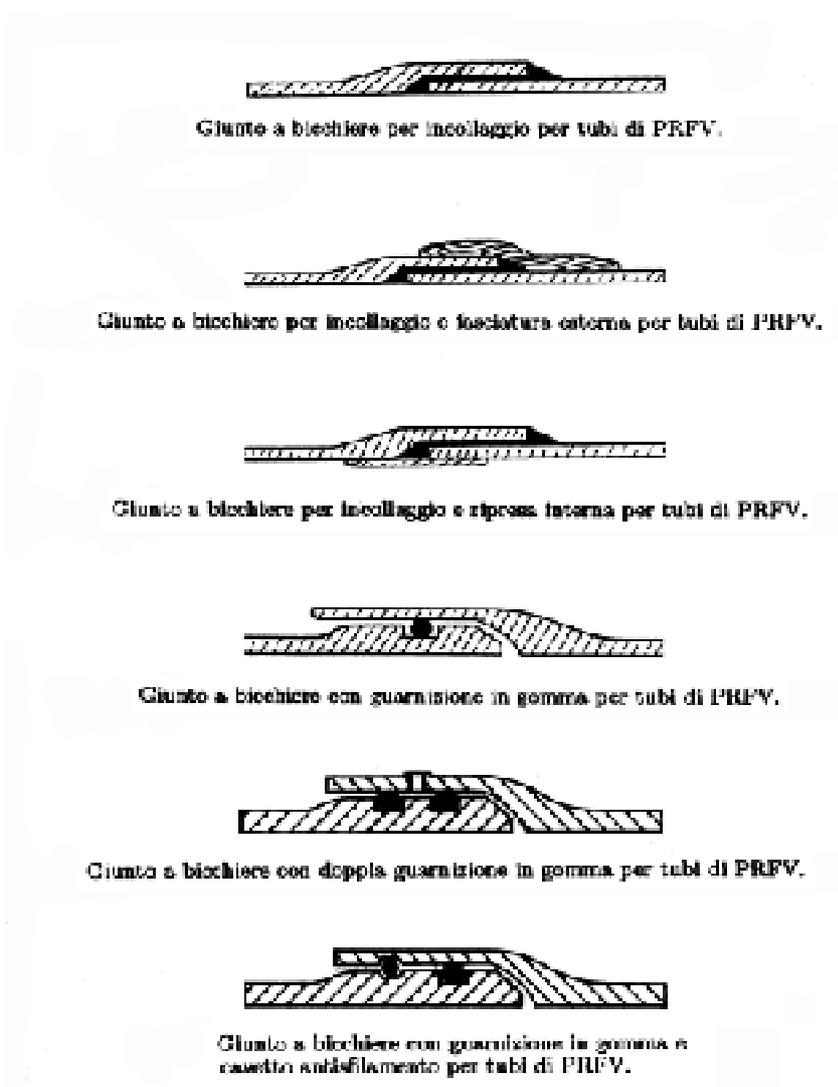


Figura 31 - Giunti a bicchiere per tubazioni in PRFV (da V. Milano, 1996)

Si hanno poi i giunti a manicotto: si realizzano due estremità maschio infilate poi in un manicotto di PRFV. Un'altra versione prevede un manicotto flessibile posto sopra una guarnizione elastomerica di profilo adatto alla tenuta.

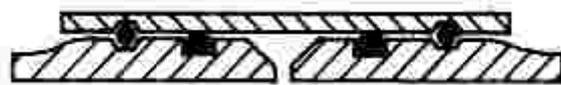


Figura 32 - Giunto a manicotto per tubazioni in PRFV (da V. Milano, 1996)

Le giunzioni di testa si effettuano prevalentemente in officina e per grandi diametri.



Figura 33 - Giunto di testa per tubazioni in PRFV (da V. Milano, 1996)

Infine i giunti a flange, fisse o mobili, si usano nei casi già visti per gli altri tipi di tubo. La guarnizione di tenuta è sempre elastomerica.

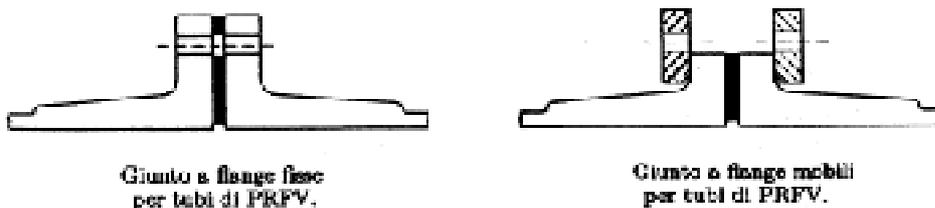


Figura 34 - Giunti a flange per tubazioni in PRFV (da V. Milano, 1996)

Vi è una discreta produzione di raccordi e pezzi speciali per il PRFV.

Per il collegamento e l'inserimento di accessori di rete, quali saracinesche, idranti, sfiati, ecc., si preferisce ricorrere a tronchetti di acciaio calibrati.

La posa in opera è uguale a quella degli altri tubi plastici esaminati.



Figura 35 - Posa in opera di tubi in PRFV (da www.reinforcedplastics.com)

1.3.6 Tabella riassuntiva delle caratteristiche

Si riporta infine una tabella riassuntiva delle principali caratteristiche dei materiali plastici per tubazioni acquedottistiche, sin qui analizzati.

Materiale	PVC	PEBD	PEAD	PP	PRFV
Densità ρ (Kg/m³)	1.370 - 1.450	920-930	945-965	900-960	1.850
Carico di snervamento (N/mm²)	≥ 47	10	24	28-35	110-130
Allungamento a rottura (%)	≈ 10	≥ 500	≤ 20	≥ 100	≈ 4
Modulo di elasticità normale E (N/mm²)	2.940	150	900	1.000 - 1.300	10.000 - 14.000
Resistenza elettrica superficiale (Ω)	$\geq 10^{12}$	10^{15}	10^{15}	≈ 50	10^9
Conduttività termica (Kcal/m·h·°C)	0,13	0,30	0,47	0,19	0,22
Coeff. di dilatazione termica lineare (1/°C)	$60-80 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	100 - $150 \cdot 10^{-4}$	1,8 - $2,2 \cdot 10^{-5}$

Tabella 2 – Principali caratteristiche dei materiali plastici per tubazioni da acquedotto
(da V. Milano, 1996 per PVC, PEBD, PEAD e PP; Sarplast, 2000 per il PRFV)

CAPITOLO 2

Meccanismi di rottura

Come in tutti gli aspetti delle “costruzioni”, anche le reti acquedottistiche presentano fattori di imperfezione tecnici ed umani, che spesso sono alla base delle rotture.

In generale, la principale causa a cui possono essere ricondotte la maggior parte delle rotture (se non tutte), è quella dell'impossibilità di avere un'accuratezza assoluta in fase di installazione e poi di esercizio. Se una condotta fosse posata in maniera perfetta, con il rivestimento assolutamente esente da danneggiamenti o punti di debolezza, se le condizioni di esercizio fossero ottimali (mai colpi d'ariete, mai sovraccarichi puntuali oltre i limiti), nessuna “causa” di rottura potrebbe agire: il gelo non esplicherrebbe la sua azione a certe profondità, la corrosione non lavorerebbe se i rivestimenti fossero perfetti, e così via.

Ma nella realtà vi sono dei limiti tecnici: queste ipotesi di perfezione non esistono e non è possibile individuare a priori le deficienze durante le fasi che vanno dalla produzione della tubazione (che per quanto normata e standardizzata non può fornire prodotti assolutamente privi di difetti) alla sua posa in opera e messa in esercizio (bontà di posa e limiti umani)-

È necessario partire allora dai dati sulle rotture per costruire a ritroso il probabile meccanismo che ha condotto al cedimento. Riportiamo quindi schematicamente alcuni principali meccanismi di rottura e alcune delle cause che stanno loro a monte.

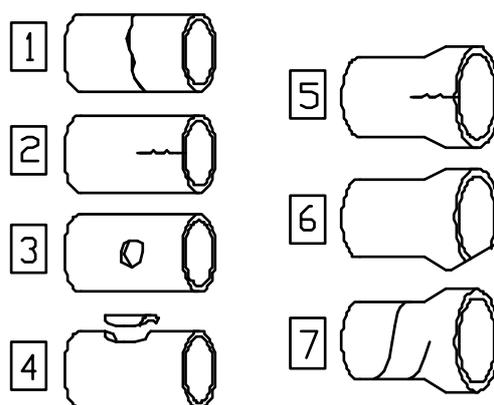


Figura 36 - Meccanismi di rottura nelle tubazioni (da E. Salvioi, 2005).

1. Rottura a forma di circonferenza:
 - Deformazione a fatica di origine termica (contrazioni – dilatazioni);
 - Deformazione a fatica dovuta al rigonfiamento dell'argilla;
 - Fatica longitudinale vicino alle valvole e alle guarnizioni.
2. Rottura longitudinale:
 - Rottura a fatica dovuta alla pressione interna dell'acqua;
 - Rottura a fatica dovuta al terreno circostante;
 - Rottura a fatica dovuta a cicli di gelo e dis gelo;
 - Rottura a fatica dovuta al passaggio veicolare.
3. Foro diretto:
 - Corrosione;
 - Falla di produzione.
4. Distacco di un pezzo:
 - Rottura a fatica dovuta alla pressione interna dell'acqua;
 - corrosione o sfibramento.
5. Spaccatura della campana (o della flangia o di altro tipo di giunto):
 - Diversa espansione dei materiali nei giunti.

6. Campana (o flangia o altro tipo di giunto) tranciata:

- Flessione o taglio fra le due condotte;
- Deformazione a fatica.

7. Rottura a spirale:

- Combinazione di deformazioni e fenomeni di fatica dovuti alla pressione interna dell'acqua.

Puntualizziamo che l'età in se non è una causa di deterioramento, ma una misura del tempo a cui una tubazione è stata esposta a un fattore di rottura. Questo è un po' meno vero nel caso delle materie plastiche, per le quali i fenomeni di scorrimento plastico sono direttamente relazionati con l'età, la quale mette in evidenza un "difetto intrinseco" di tali materiali.

Inoltre, vi possono e, in un certo senso, vi devono essere più cause contemporanee che portano a rottura. Per esempio, la pressione interna non è in se causa di rottura: un tubo nasce per sopportarla, almeno entro certi limiti. Così, neppure una certa riduzione di spessore del tubo lo è, almeno finché vi è materiale sufficiente per sopportare le azioni applicate. Solo insieme questi due aspetti portano a un cedimento.

Le cause possono essere distinte in:

- "Intrinseche": interne al problema sin dall'inizio, per esempio un materiale difettoso;
- "Preparatorie": si manifestano durante l'intera storia del fenomeno, per esempio la corrosione;
- "Accidentali": quelle che accidentalmente fanno superare il limite ultimo di resistenza dei materiali, ad esempio il colpo d'ariete.

Molte cause di rottura sono comuni a più di un materiale. Ne presentiamo ora un elenco sistematico delle principali, che verranno nel seguito analizzate una ad una:

- Sollecitazioni termiche (con particolare riguardo ai cicli di gelo – disgelo);
- Pressione interna dell' acqua;
- Pressione esterna del terreno;
- Pressione esterna da sovraccarico (traffico veicolare o altro);
- Transitori elastici e conseguenti sovra/sottopressioni da colpo d'ariete;
- Corrosione delle tubazioni metalliche e delle bullonerie dei giunti;
- Scorrimento viscoso delle tubazioni plastiche;
- Sfibramento delle tubazioni in fibrocemento;
- Corrosione delle armature delle tubazioni cementizie;
- Azione delle radici degli alberi;
- Falle di produzione e posa in opera non corretta;
- Diversa espansione di materiale dei giunti;
- Sforzi di flessione o taglio (cedimento del terreno, anche per subsidenza differenziale, o della fondazione).

2.1 Sollecitazioni termiche

Il variare della temperatura provoca una variazione proporzionale delle dimensioni lineari delle tubazioni, e il problema si presenta in misura tanto maggiore quanto più la condotta è vincolata, mentre la presenza di giunti elastici (guarnizioni elastomeriche) riduce notevolmente le tensioni nel materiale, trasformandole in deformazioni

Il problema si manifesta tanto in senso assiale, con spinte che finiscono per ripercuotersi sui nodi, tanto sulle singole sezioni trasversali, con conseguenti sforzi di trazione o compressione diretti tangenzialmente alla sezione..

Si rileva come i vari materiali abbiano coefficienti di dilatazione termica e moduli elastici differenti e che quindi ciascuno possa reagire in maniera differente. Anche l'aumento di fragilità col calare della temperatura è diverso da materiale a materiale.

L'azione del gelo si esplica invece con un congelamento dell'acqua contenuta nel terreno, una sua espansione e quindi un'espansione della matrice solida che la include, con conseguente aumento di carico esterno sulla tubazione. L'importanza di tale sollecitazione è funzione dunque del contenuto d'acqua del terreno e della sua natura (porosità).

In casi eccezionali si può anche arrivare ad un congelamento dell'acqua trasportata nelle tubazioni, con aumento di pressione interna e possibile rottura della condotta.

Naturalmente, ambo i fenomeni sono tanto meno importanti quanto più la profondità del tubo è notevole.

2.2 Pressione interna dell'acqua

Tutte le tubazioni sono progettate per resistere a determinati valori di pressione interna e l'insorgere dei problemi è dovuto alla decadenza delle caratteristiche meccaniche del materiale (assottigliamento dovuto alla corrosione, fenomeni intrinseci, per perdita di precompressione, ecc.) o ad una pressione superiore a quella di progetto.

In quest'ultimo caso si può pensare ad una sovrappressione esistente sin dall'installazione della condotta (condotta sottodimensionata) o ad una pressione che ha subito un incremento nel tempo; tale evoluzione sfavorevole può essere dovuta a un cambio della geometria della rete di distribuzione, all'installazione di nuovi serbatoi che fissano un carico esuberante o a pompe di maggiore prevalenza, magari allo scopo di superare le aumentate perdite di carico di una rete che invecchia.



Figura 37 - Rottura longitudinale su condotte in PEAD (da E. Salviodi, 2005).

2.3 Pressione esterna del terreno

In senso assoluto è difficile che tale azione raggiunga valori elevati. Anche assumendo una condotta posata a profondità notevole, (poniamo 5 m ed in suolo argilloso, per il quale possiamo assumere densità di $2,0 \text{ g/cm}^3$), la pressione verticale che si riscontra nel terreno è molto modesta (nel nostro esempio di $1,0 \text{ kg/cm}^2$, quindi di circa 1 atmosfera).

Sulle tubazioni plastiche, tuttavia, si può assistere a fenomeni di ovalizzazione anche per azioni relativamente modeste, per cui in tali casi è sempre opportuno realizzare un rinforzo adeguato, con il compito di assorbire le azioni esterne.

2.4 Pressione esterna da sovraccarico

Possiamo considerare sovraccarichi statici e dinamici, concentrati o distribuiti. La trattazione è abbastanza complessa, ma per gli scopi che ci prefiggiamo ci limitiamo ad alcune osservazioni indicative.

Per quanto riguarda l'ordine di grandezza di tali pressioni, Boussinesq (1885) fornisce la relazione per il calcolo della tensione verticale di compressione σ_z generata nel terreno da un carico concentrato verticale P . Alla profondità z e sulla circonferenza di raggio r si ha:

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{(z^2 + r^2)^{5/2}}$$

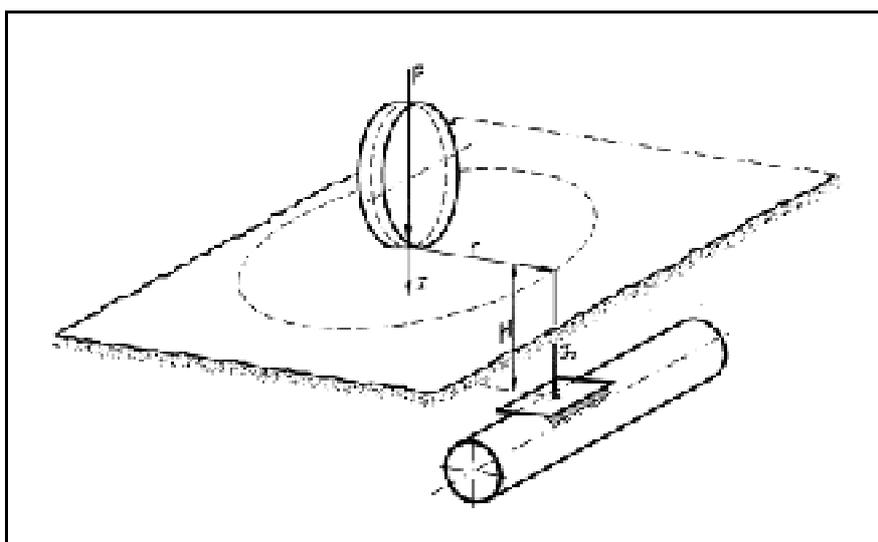


Figura 38 - Schema di carico concentrato (da L. Da Deppo, et al., 2006).

Considerando il caso di un veicolo di classe HT 60, il più pesante secondo la norma DIN 1072, (avente un carico per ruota di 100 kN = circa 10.000 kg), ad una profondità di 1 m (ricoprimento minimo per una tubazione) e sulla verticale del carico, la σ_z indotta è di circa 0,5 kg/cm² (circa 0,5 atmosfere), che appare relativamente modesta. Tale pressione cala poi rapidamente con la profondità.

Si rileva però che tali azioni, ancorché modeste, possono dare origine a fenomeni di fatica quando ripetute milioni di volte durante la vita di una condotta.

Nel caso di tubazioni in fibrocemento questo ultimo aspetto non è trascurabile: spesso, essendo tale materiale dotato di bassissima conducibilità termica, sono state posate a profondità ridotte (come del resto le case costruttrici suggerivano) ed, unitamente alla particolare sensibilità del materiale alle vibrazioni e ai fenomeni di fatica, può essere oggetto di preoccupazione.

Non si ritiene opportuno approfondire ulteriormente l'argomento, tanto più che analisi sperimentali in sito hanno rilevato scarsa o nulla dipendenza delle rotture in relazione al traffico veicolare.

2.5 Transitori elastici e conseguenti sovra/sottopressioni da colpo d'ariete

In corrispondenza degli organi idraulici il moto è disturbato anche in condizioni di normale esercizio (turbolenze); tuttavia sono molto più rilevanti le manovre brusche sulle apparecchiature idrauliche (installate lungo le tubazioni), che possono dare origine a fenomeni di colpo d'ariete.

La celerità con cui si propagano le perturbazioni in una condotta, è quindi definita dall'equazione:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{D}{s} \frac{\varepsilon}{E}}}$$

dove: ε = modulo di compressibilità cubica del liquido in N/m² (2,03·10⁹ N/m² per l'acqua);

ρ = densità del liquido in kg/m³ (1.000 kg/m³ per l'acqua);

D = diametro della tubazione;

s = spessore della tubazione;

E = modulo di elasticità del materiale della tubazione, indicato in tabella:

Materiale della tubazione	E (N/m²)	a (m/s)
Acciaio	≈ 2,06 · 10 ¹¹	1.000 – 1.250
Ghisa	≈ 1,05 · 10 ¹¹	1.000 – 1.200
Tubazioni cementizie	≈ 1 · 10 ¹⁰	700 – 800
Fibro cemento	1,6 – 2,0 · 10 ¹⁰	700 – 1.100
PVC	2,94 · 10 ⁹	250 – 450
PEAD	8,8 · 10 ⁸	200 – 300
PEBD	1,5 – 2,0 · 10 ⁸	100 – 200
PRFV	1 – 2 · 10 ¹⁰	450 – 600
PP	1 – 1,3 · 10 ⁹	150 – 500

Tabella 3 – Moduli di elasticità e celerità di materiali per condotte da acquedotto
(da E. Marchi, A. Rubatta, 1981).

Nel caso classico di condotta collegata ad un serbatoio e dotata di chiusura regolabile all'altra estremità, si hanno le seguenti sovra-pressioni massime (D. Citrini, G. Nosedà, 1987):

- per chiusura totale brusca: $\Delta p = \rho a V_0$ e, in colonna d'acqua: $\Delta h = \frac{a V_0}{g}$
- per chiusura totale lenta: $\Delta p = \frac{2 L V_0 \rho}{t_c}$ e, in colonna d'acqua: $\Delta h = \frac{2 L V_0}{g t_c}$

La distinzione tra manovra brusca e lenta si basa sul confronto tra il tempo di chiusura t_c e la durata di fase $\vartheta = \frac{2L}{a}$: manovra brusca se $t_c < \vartheta$; lenta se viceversa.

Naturalmente, i casi di manovre su reti di condotte non rientrano in buona parte in questo schema generale, che pur evidenzia una dipendenza delle sollecitazioni data da:

- Diametro della tubazione D , al crescere del quale decresce la celerità a e quindi il sovraccarico per chiusura *brusca*;
- Spessore della tubazione s , al crescere del quale cresce la celerità a e quindi il sovraccarico per chiusura *brusca*;
- Materiale della tubazione in funzione del suo modulo elastico E , al crescere del quale cresce la celerità a e quindi il sovraccarico per chiusura *brusca*;
- Lunghezza della condotta L , al crescere della quale cresce il sovraccarico per chiusura *lenta*;
- Velocità iniziale dell'acqua in condotta V_0 , al crescere della quale cresce il sovraccarico in *entrambi i tipi di manovra*.

Concludendo le osservazioni sul colpo d'ariete si osserva che, specie per condotte plastiche, vi può essere il problema dell'instabilità elastica indotta da un'onda di *depressione*, che può far collassare il materiale ancor prima di raggiungere il limite ultimo di rottura a trazione.

Il problema è opposto per condutture cementizie o di fibrocemento, che resistono meglio a sforzi di compressione e male a trazione: sarà l'onda di *pressione*, in tal caso, a essere più dannosa. Il fibrocemento, in particolare, può trovare il suo punto debole nelle zone dei giunti, poiché il processo produttivo non garantisce una buona disposizione tangenziale delle fibre di amianto in queste zone, e conseguentemente la riserva di resistenza risulta ivi ridotta.

2.6 Corrosione delle tubazioni metalliche e delle bullonerie dei giunti

Due metalli diversi immersi in una soluzione elettrolitica che garantisca la continuità elettrica tra di essi danno in genere origine a ossidazione (perdita di elettroni) dell'uno (anodo, o polo negativo) e a riduzione dell'altro (catodo, o polo positivo).

Un metallo che ha minor tendenza di un altro a cedere elettroni si dice nobile nei confronti del secondo. Per esempio il rame è nobile rispetto al ferro e questo lo è rispetto allo zinco.

Quasi tutte le reazioni di corrosione che avvengono in ambiente neutro sono sostenute da riduzione dell'ossigeno.

Restringiamo le osservazioni ai materiali ferrosi. Nel caso dell'acciaio il ferro va in soluzione e restano crateri visibili sulla superficie del metallo. Nel caso della ghisa (grigia e sferoidale) ossidi, idrossidi e sali originati dalla corrosione della ferrite rimangono in sede insieme alla grafite (grafitizzazione). Scarsa è la loro coesione.

Distinguiamo diversi tipi di grafitizzazione:

- di superficie, tipica di terreni uniformi ad alta resistività, consistente in una pellicola che lascia intatto il metallo sottostante;
- di tipo a cratere svasato verso l'interno, pieno di grafite e prodotti di corrosione, tipica di terreni eterogenei e di zone della tubazione ove essa è anodica;
- completa, in cui restano solo grafite e prodotti di corrosione.

Si ricorda che, in teoria, una corrente di 1A asporta annualmente 9 kg da un elettrodo di ferro puro immerso in un elettrolita (terreno, acqua, ecc.); per ghisa e acciaio i valori sono di poco inferiori.

Un tubo corroso può presentarsi integro all'aspetto e può anche non essere sede di perdite. Solo il suono sordo alla percussione e la facile scalfibilità ne rivelano lo stato reale. Sollecitazioni prolungate o improvvise possono comprometterli improvvisamente. Riportiamo un riassunto dei vari tipi di corrosione:

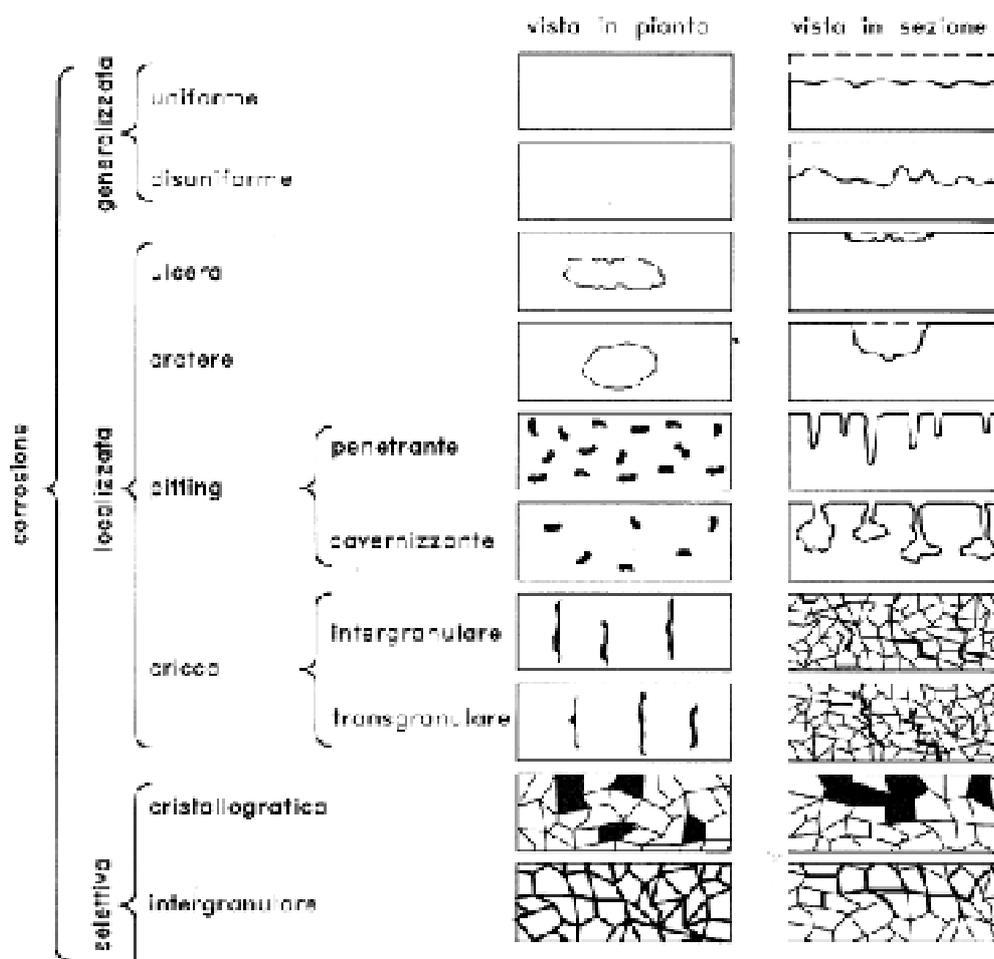


Figura 39 - Classificazione tipi di corrosione (da L. Da Deppo, et al., 2006).

Si osserva poi (vedi figura seguente) che in caso di lesioni al rivestimento della tubazione, la corrosione è localizzata e rapida, ma non compromette l'integrità dell'intera tubazione.

Viceversa, in assenza di rivestimento, il fenomeno è diffuso e lento, ma mette fuori servizio un ampio tratto di condotta. Infine fenomeni di corrosione interna si possono verificare per aggressività delle acque trasportate.

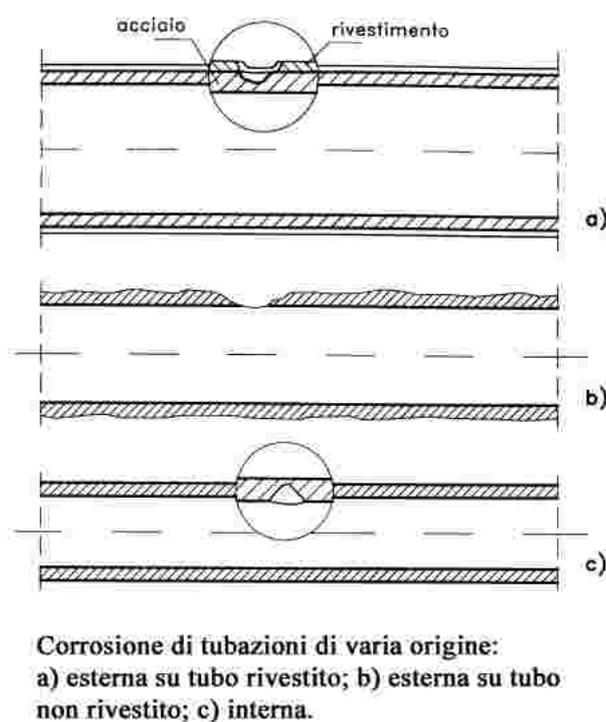


Figura 40 - Corrosione esterna ed interna (da L. Da Deppo, et al., 2006).

Anche il terreno, ovviamente, può fungere da elettrolita. Due parametri che ci interessano per caratterizzare un terreno sono la sua corrosività (o aggressività) e la sua resistività elettrica.

La prima, che dà informazioni di massima anche sulla seconda, è esprimibile come attitudine ad asportare una certa quantità di metallo o a generare una lesione di una certa profondità; è ovviamente riferita ad un certo metallo.

La seconda misura l'attitudine del terreno a trasportare elettroni e quindi a favorire ulteriormente il processo corrosivo. E' legata alla temperatura (terreni gelati sono ad alta resistività), all'umidità, alla natura del terreno (argillosi: bassa resistività) e alla presenza di ioni cloro o solforici (terreni impregnati di acqua di mare hanno resistività anche di soli 25 – 30 $\Omega \cdot \text{cm}$).

Corrosività	Resistività elettrica $\Omega \cdot \text{cm}$
trascurabile	maggiore di 12.000
debole	12.000-5.000
media	5.000-2.000
elevata	minore di 2.000

Figura 41 - Classificazione della corrosività dei terreni in funzione della resistività elettrica

(da L. Da Deppo, et al., 2006).

Una condotta di uno stesso materiale può subire l'attacco delle cosiddette pile geologiche, azioni di terreni diversi a bassa resistività sulla tubazione. Il principio è che il potenziale di uno stesso metallo in elettroliti diversi è a sua volta diverso, e questo genera il trasferimento di elettroni dall'anodo, a potenziale più basso, al catodo, a potenziale più alto. L'anodo dunque si corrode. Le pile, di dimensioni anche chilometriche, possono sovrapporsi concordemente, intensificando il fenomeno, o discordemente, riducendolo.

A seguire si portano gli schemi anzi descritti.

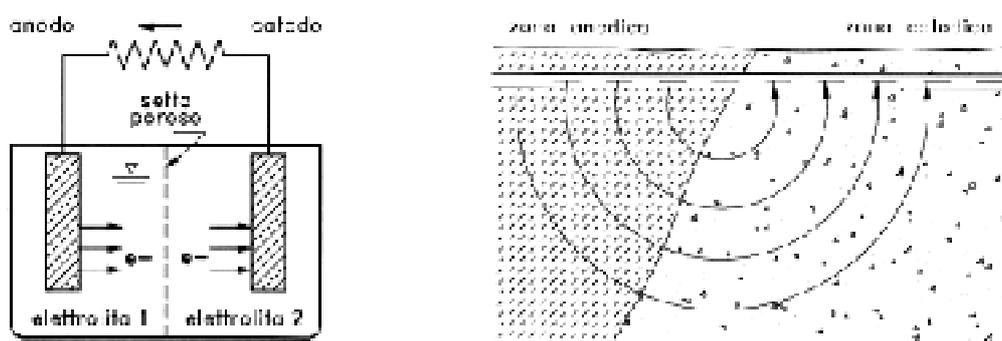


Figura 42 - Pila chimica e geologica (da L. Da Deppo, et al., 2006).

Un'altro fattore molto importante nella diffusione della corrosione è l'azione delle correnti vaganti, ossia di tutte quelle correnti disperse nel terreno da:

- impianti di trazione a corrente continua (ferrovie, tranvie, ecc.);
- impianti industriali utilizzando le terre come conduttori di ritorno (elettrochimici, di saldatura, di trasporto, ecc.);
- alimentatori di protezione catodica di strutture di terzi.

Si riporta lo schema del caso classico di tratta ferroviaria: il ritorno della corrente si ripartisce in relazione con le resistenze elettriche delle rotaie, del terreno e della condotta. È quindi evidente come terreni ad alta resistività e condotte ad alta conduttanza longitudinale esaltino il fenomeno.

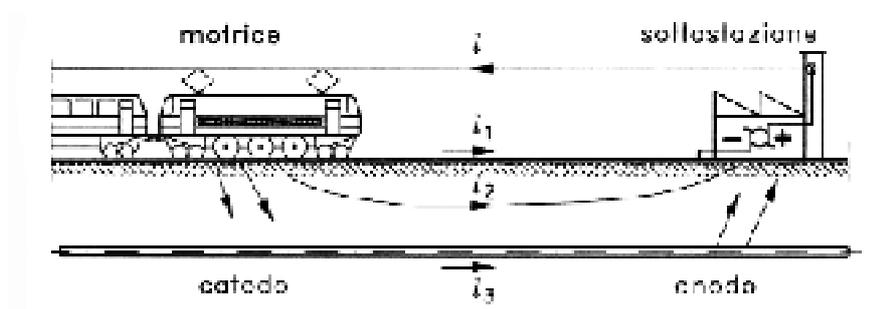


Figura 43 - Schema di impianto ferroviario (da L. Da Deppo, et al., 2006).

Si osserva inoltre che il percorso della corrente nella condotta possa anche invertirsi, in virtù delle mutate posizioni delle zone anodica e catodica (posizione della motrice rispetto alla tubazione e alla sottostazione).

Le correnti vaganti hanno in genere intensità molto superiore a quella delle pile galvaniche: raggiungono infatti anche decine di Ampère. Dispersioni a terra di impianti a corrente *alternata* (ferrovie, messe a terra di impianti elettrici) sono molto meno temibili, essendo l'asportazione di metallo valutabile intorno alla centesima parte di quella a pari condizioni in corrente continua.

CONTROLLO DELLA CORROSIONE

Per proteggere le tubazioni dalla corrosione, si possono adottare diversi provvedimenti. Distinguiamo innanzitutto tra protezioni passive ed attive: le *passive* sono tutte quelle che tendono ad isolare elettricamente la condotta.

Un primo esempio sono i giunti dielettrici (per interventi successivi di protezione catodica). Oltre a un grado di isolamento di almeno 4 M Ω e una rigidità dielettrica di almeno 3 kV, devono evitare cedimenti strutturali o isolamento in fase di esercizio e garantire perfetta tenuta idraulica.

Si hanno poi i vari rivestimenti delle condotte e degli organi di manovra, i cui requisiti essenziali sono:

- isolamento elettrico;
- aderenza al metallo;
- resistenza alle offese da pietre, terreno, compressione, movimentazioni e condizioni di esercizio gravose;
- facilità di applicazione e di riparabilità.

Ai requisiti sopra elencati risponde bene il PE applicato in più strati aderenti.

Infine, si hanno i materiali e le tecniche di rinterro.

Veniamo alla protezione *attiva* (o catodica), che consiste nella diminuzione di potenziale della condotta al di sotto di un valore, detto di soglia o di protezione (per una struttura in acciaio è assunto convenzionalmente pari a -850 mV o -950 mV a seconda del terreno), facendo circolare una corrente elettrica continua dall'ambiente esterno alla condotta. Ciò implica una sufficiente conducibilità dell'ambiente.

E' richiesto un corretto isolamento della condotta, sia longitudinale (giunti isolanti) che trasversale (rivestimento).

Le condotte di ghisa risentono meno di quelle di acciaio dei fenomeni corrosivi: ciò anzitutto per i giunti elastici tra le condotte, che aumentano molto la resistenza elettrica longitudinale, ostacolando l'azione di correnti vaganti e pile geologiche, ma non solo: vi è da considerare il maggior spessore dei tubi di ghisa rispetto a quelli di acciaio, il che allunga la vita utile del tubo, e la crosta di fusione dei tubi colati in forme fisse o centrifugati in forme di sabbia, crosta che ostacola parecchio il degrado del metallo. Tale crosta manca nelle condotte centrifugate in forme metalliche.

Per questi motivi e per l'onere, causato dalla presenza di guarnizioni sintetiche, di dover separare ogni giunto per realizzare un eventuale protezione catodica (necessaria per situazioni severe), la protezione tipica delle tubazioni in ghisa è passiva. In casi estremi è bene rinunciare a questo tipo di materiale.

COLLEGAMENTI

Con i dovuti adattamenti, quanto detto vale anche per la bulloneria di determinati giunti (flangia, Express, Gibault) e per giunti metallici tra condotte di materiali non metallici (vedi figura seguente).



Figura 44 - Giunto metallico tra condotte in polietilene (da E. Salvioli, 2005).

2.7 Scorrimento viscoso delle tubazioni plastiche

Nel capitolo riguardante i materiali plastici si è già trattato tale argomento. Si ritiene opportuno però fornire un quadro riassuntivo del problema. S'intende per scorrimento plastico (o *fluage*) la crescita della deformazione nel tempo sotto un carico costante che caratterizza, seppur in modo diverso, tutte le tubazioni in materiale plastico.

Dunque il modulo di elasticità normale cala nel tempo, fino a rottura del materiale, in tempi tanto più brevi quanto più il carico iniziale è prossimo a quello di rottura istantaneo. Non vi è però proporzionalità inversa tra diminuzione del carico e aumento del tempo di rottura. Inoltre, l'allungamento nel tempo non segue una legge lineare. Ovviamente l'aumento della temperatura accelera il processo di invecchiamento

Per il PVC il comportamento peggiora sensibilmente a un certo punto della vita del materiale. Tale peggioramento, anticipato per temperature crescenti, sembra dovuto a invecchiamento fisico e non chimico del polimero (sforzi prolungati danno slittamenti relativi di molecole, da cui irregolarità e rotture fragili). Comunque molto è da chiarire a tali propositi.

Materiale	E iniziale [N/mm²]	E a 50 anni [%]	Diminuzione [%]
PVC	2.940	30 – 50 (40 in media)	70 – 50 (60 in media)
PEBD	150 (Pe 25) 200 (Pe 32)	40	60
PEAD	900	12,5 – 25	87,5 – 75
PP	1.000 – 1.300	L'omopolimero ha resistenza a breve superiore circa del 30% rispetto al copolimero, ma a 50 anni la resistenza è analoga per via del più rapido decadimento dell'omopolimero.	
PRFV	1 – 2 · 10 ⁴		

Tabella 4 – Prestazioni elastiche dei vari materiali (da L. Da Deppo, 2006).

2.8 Sfibramento delle tubazioni in fibrocemento

Uno dei motivi del deterioramento delle tubazioni in fibrocemento è la perdita di coesione tra le fibre di amianto causata dall'asportazione della calce del legante. Acque aggressive o solfatiche o ambiente esterno di pari caratteristiche tendono appunto a dilavare la calce, per cui si rendeva necessario applicare dei rivestimenti bituminosi protettivi e impiegare cementi ferrici. Anche eccessiva acidità, presenza di ioni di magnesio e ammoniacale portano a corrosione della frazione cementizia del fibrocemento.

E' del resto cosa nota che alti contenuti di C_3A (alluminato tricalcico) sono correlati ad alta vulnerabilità all'attacco solfatico.

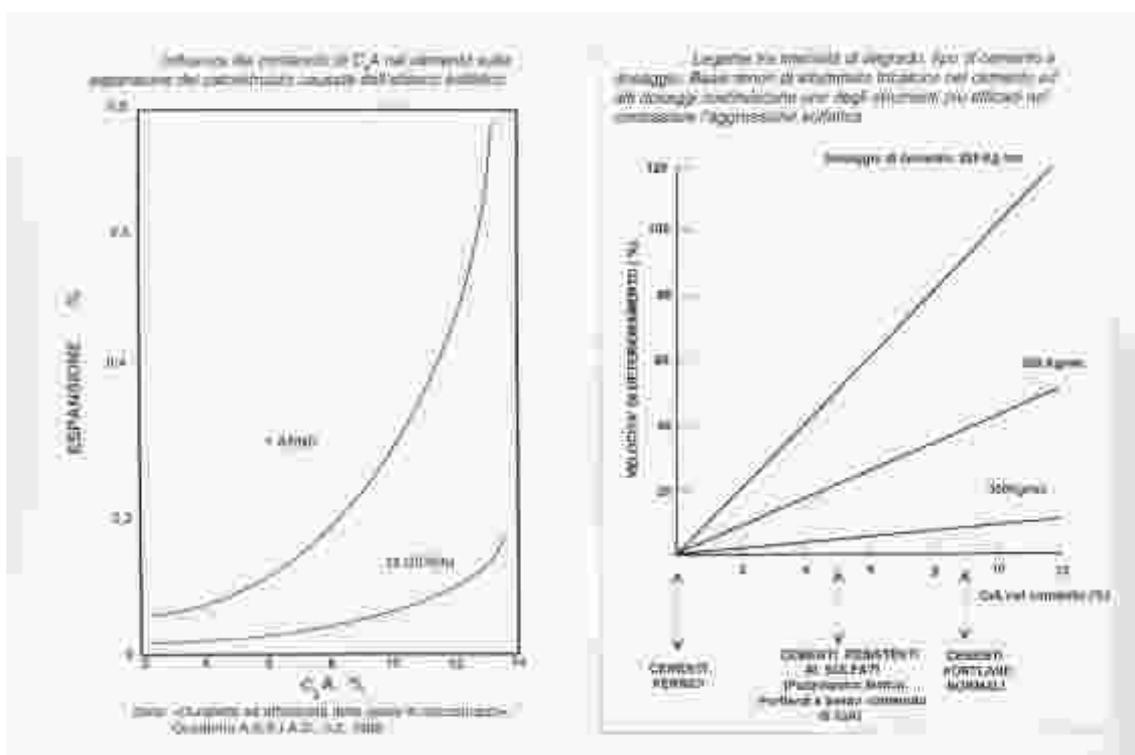


Figura 45 - Correlazione C3A-attacco solfatico (da Andrea Giusti, 2007).

L'impiego di cementi non adatti, l'asportazione del rivestimento bituminoso o la presenza di lesioni in esso accelerano questo processo, in cui il fattore tempo è, obiettivamente, rilevante.



Figura 46 e 47 - Rotture longitudinali su condotte in fibrocemento (da E. Salvioli, 2005).

2.9 Corrosione delle armature delle condotte cementizie

Uno dei motivi del deterioramento delle condotte cementizie armate è la corrosione delle armature. Questa non è dovuta tanto alla semplice presenza dell'acqua che naturalmente si infiltra nel conglomerato cementizio (anche se il conglomerato in sé dovrebbe provvedere a generare quell'ambiente alcalino che protegge l'acciaio dall'ossidazione), ma a determinate condizioni, come:

- acque aggressive che asportano il legante del conglomerato (specie se di qualità non adatta);
- esiguo spessore del copri ferro;
- eccessive infiltrazioni d'acqua da microfessure precedenti;
- rivestimento bituminoso fallato.

A questo punto il processo deteriorante accelera e i prodotti ossidati tendono ad espandersi, facendo distaccare ulteriormente il rivestimento cementizio ed esponendosi sempre più all'ambiente esterno, senza garanzia di protezione alcalina (garantita dal conglomerato). Il processo termina con la rottura della condotta.

2.10 Azione delle radici degli alberi

Gli alberi possono causare considerevoli danni alle tubazioni. La crescita del loro apparato radicale può interferire col percorso della rete dell'acquedotto e l'azione meccanica che si genera (flessione, tipicamente) può portare a rottura il singolo tubo. Una eventuale perdita d'acqua può contribuire ad attirare le radici in direzione della condotta, condotta è tanto più a rischio quanto più il materiale è sensibile a rottura di tipo fragile e poco atto a subire sforzi flessionali: calcestruzzo e fibrocemento ne sono esempi tipici.

Le tubazioni cementizie sono soggette anche ad un altro tipo di attacco: le microfalle presenti spesso nel conglomerato cementizio, sono allo stesso tempo fonte di attrazione per le radici, che sentono la presenza di abbondante quantità di acqua, e punto preferenziale per il loro ingresso. La forza espansiva della piccola radice che si insinua in tale fessura e il suo accrescimento accelerato dalla presenza di acqua in quantità, danno origine ad una penetrazione completa all'interno della tubazione, alla perdita di acqua e al formarsi, all'interno del tubo, della cosiddetta "coda di volpe" (insieme di radici disposte secondo il flusso dell'acqua), che possono anche portare all'ostruzione completa del lume della condotta.

Naturalmente, numero e tipo di alberi, loro dimensioni e distanza dalla condotta sono altri fattori essenziali per determinare il rischio di rottura di una certa tubazione.

Si osserva però che tale fenomeno non è poi così comune nella realtà che si vuole indagare in questo ambito.

2.11 Falle di produzione e posa in opera non corretta

Entrano qui in gioco quei fattori a carattere aleatorio che portano a una precoce fallanza della tubazione: in genere esiste una fase di giovinezza della condotta durante la quale emergono questi vizi iniziali, che però possono far sentire la loro azione anche più avanti nel tempo.

Numerosi sono i disguidi che possono interferire con le fasi produttive, per quanto esse siano automatizzate, normate e standardizzate. Ancor più varia e imprevedibile è la casistica dei comportamenti pratici che fanno discostare la posa delle condotte da quella ottimale. Passiamo quindi in rassegna alcuni di questi eventi, senza pretendere di fornire un elenco esaustivo.

In fase di produzione:

- disomogeneità di colaggio, estrusione, saldatura;
- rivestimenti non perfettamente continui;
- guarnizioni di tenuta fallate o montate sul tubo in maniera non corretta;
- microfessure da ritiro (tubazioni lapidee);
- autotensioni.

In fase di immagazzinaggio, trasporto e posa in opera:

- esposizioni a temperature e a cicli termici non adeguati;
- esposizioni a raggi solari per materiali sensibili (condotte di PE nero,...);
- ammucchiamento scorretto (in magazzini o cantieri);
- urti e danni ai rivestimenti protettivi e alle guarnizioni;
- sospetta possibilità di creazione di stress da piegamento in condotte plastiche in rotoli (arrotolamento e srotolamento);



Figura 48 - Condotte in PEAD ammucciate in modo non idoneo (notare la forte curvatura)

(da Andrea Giusti, 2007)

- terreni di posa inadeguati;
- sottofondo inadeguato o insufficiente (problema importante per condotte a rischio flessionale, come il fibrocemento);
- cedimenti differenziali del sottofondo (conseguenti sforzi di taglio e flessione);
- rinterro insufficiente o inadeguato (possibili ovalizzazioni e schiacciamenti di condotte in materiali plastici, lesioni alle tubazioni o al rivestimento);
- riprese del rivestimento non corrette (punti preferenziali per l'attacco chimico);
- serraggi della bulloneria insufficienti o esuberanti.



**Figura 49 - Matasse di condotte in PEAD stoccate all'aperto e in pieno sole
(da Andrea Giusti, 2007)**

2.12 Diversa espansione dei materiali dei giunti

Il problema riguarda essenzialmente i giunti rigidi (non elastomerici). In caso di temperature del sottosuolo molto diverse da quella di realizzazione dei giunti, i materiali a contatto possono dilatarsi o restringersi in diversamente l'uno dall'altro, dando origine a rottura del giunto.

I giunti rigidi sono: a bicchiere incollato o saldato, nelle tubazioni di plastica; a piombo, nelle antiche tubazioni di ghisa; saldati nelle tubazioni di acciaio.

Si fanno le seguenti osservazioni:

- maggiore è la profondità del tubo, minore è l'escursione termica cui è sottoposto;
- tale escursione può essere limitata dalla capacità termica dell'acqua che scorre al suo interno; capacità proporzionalmente maggiore per tubazioni di grande diametro;
- il gradiente termico è meno stressante per tubazioni di grande diametro (dato il ridotto raggio di curvatura);
- materiali più isolanti e più rigidi hanno ulteriori svantaggi: la rigidità stessa, che male consente loro di subire lo stress tensionale da gradiente termico, e la differenza di temperatura tra superficie interna ed esterna, tanto maggiore quanto minore è la conducibilità termica del materiale.

Per quanto indicato sopra, il "candidato ideale" per una rottura da espansione differenziale dei giunti è una tubazione cementizia di piccolo diametro, posata a profondità modesta.

2.13 Sforzi di flessione o taglio

Questi tipi di sollecitazione nascono per varie cause e agiscono in modo differente nei diversi materiali. Causa principale è il cedimento del sottofondo, se mal realizzato, o del terreno di fondazione della trincea, tipicamente per fenomeni di subsidenza differenziale: è infatti evidente che se tutta l'area in esame subisse traslazioni verticali uniformi, lo spostamento relativo dei vari punti delle tubazioni sarebbe nullo. Ricadono in questa categoria anche gli sforzi da sisma.

Le tubazioni in acciaio e in PEBD si prestano particolarmente bene a subire deformazioni da taglio e flessione. Quelle in cemento armato e in ghisa presentano maggiore fragilità, mitigata però dalla lunghezza relativamente corta del singolo pezzo e dalle giunzioni elastiche, che concedono una certa libertà di movimento alla successione di tubi. Nelle tubazioni in cemento armato le eventuali microfessure da deformazione possono però aprire la strada ad attacchi chimici e fisici ben più rilevanti (vedi corrosione).

Particolarmente suscettibili a tali sforzi sono invece i tubi di fibrocemento, che assommano più di una caratteristica penalizzante in tal senso:

- erano prodotti in lunghezze anche ragguardevoli (limite inferiore per DN > 200 mm: 4 m;
- il processo di lavorazione tende ad orientare le fibre di amianto tangenzialmente alle direttrici, per ottimizzare il comportamento a trazione in tale direzione (per la pressione interna); questo però penalizza la resistenza a trazione assiale del tubo. I tubi in cemento armato hanno, in tal senso, una riserva di sicurezza data dall'armatura longitudinale, che assolve anche alla funzione di contrastare gli sforzi di taglio;
- il fibrocemento è un materiale rigido, che non riesce a subire le deformazioni imposte senza sfogarle in tensione (le norme imponevano particolare cura nella realizzazione di sottofondo e ricoprimento), a differenza dei materiali plastici.

CAPITOLO 3

Analisi dei dati di rottura

Dopo aver preso in considerazione quelli che sono i materiali caratteristici costituenti una rete acquedottistica ed aver elencato le principali cause di una loro rottura, si esegue ora una analisi dei reali dati di rottura provenienti da un sistema acquedottistico sito nella regione Emilia Romagna e comprendente un arco temporale di 11 anni: dal 2000 al 2010.

Questa analisi si pone l'obiettivo di ricercare una possibile relazione tra le rotture delle tubazioni e quelli che sono identificati come gli agenti climatici maggiormente influenti: le precipitazioni e la variazione di temperatura.

I dati degli eventi di rottura, desunti da supporto informatico, sono stati depurati dagli eventi accidentali o non influenti, pervenendo ad un elenco di rotture significative. I dati così selezionati sono poi stati opportunamente elaborati, esaminandone la distribuzione nell'arco temporale considerato e facendo opportune considerazioni.

I dati climatici di temperature e precipitazioni, relative agli anni dello studio in oggetto, sono stati scaricati dal sito della rispettiva provincia ARPA (Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente). Recuperati sotto forma di foglio elettronico, essi forniscono:

- per quanto riguarda le precipitazioni, il valore giornaliero in (mm);
- per quanto riguarda le temperature, il valore nel singolo giorno misurato ora per ora (quindi 24 dati per ogni giorno) o, in alcuni casi, i dati di temperatura media giornaliera.

Essi sono stati uniformati all'intervallo temporale delle rotture (e quindi a valori mensili), per un opportuno confronto successivo.

Osserviamo ora in dettaglio l'analisi dei dati.

3.1 Rotture tubazioni

I dati necessari all'elaborazione ci sono stati forniti sotto forma di foglio elettronico, suddivisi per anno e contenenti svariate informazioni, tra cui quelle fondamentali per una prima suddivisione: data dell'intervento (che ovviamente non garantisce che la rottura sia avvenuta esattamente nel medesimo giorno, ma è comunque un'indicazione sufficientemente attendibile per una sua collocazione temporale); tipo di intervento (esplicato nelle note descrittive); tipo di materiale sostituito (comprendente anche il diametro della tubazione); indirizzo, a volte completo anche di numero civico.

Con una prima filtrazione (poiché non tutti gli interventi erano relativi a rotture, oppure a rotture di tubazioni acquedottistiche), si è pervenuti ad un elenco delle rotture significative e i dati sono stati riordinati per tipo di materiale (indicando i materiali costituenti la rete: ACC = tubazioni in acciaio; FIB = in cemento amianto o fibrocemento; GH = ghisa; PE = polietilene ad alta densità; PB = polietilene a bassa densità; PVC = polivinilcloruro), raccolti mensilmente per ogni anno di osservazione.

Di seguito sono riportati i grafici dall'anno 2000 al 2010 degli eventi di rottura, suddivisi per mese e tipo di materiale, per ogni anno di osservazione.

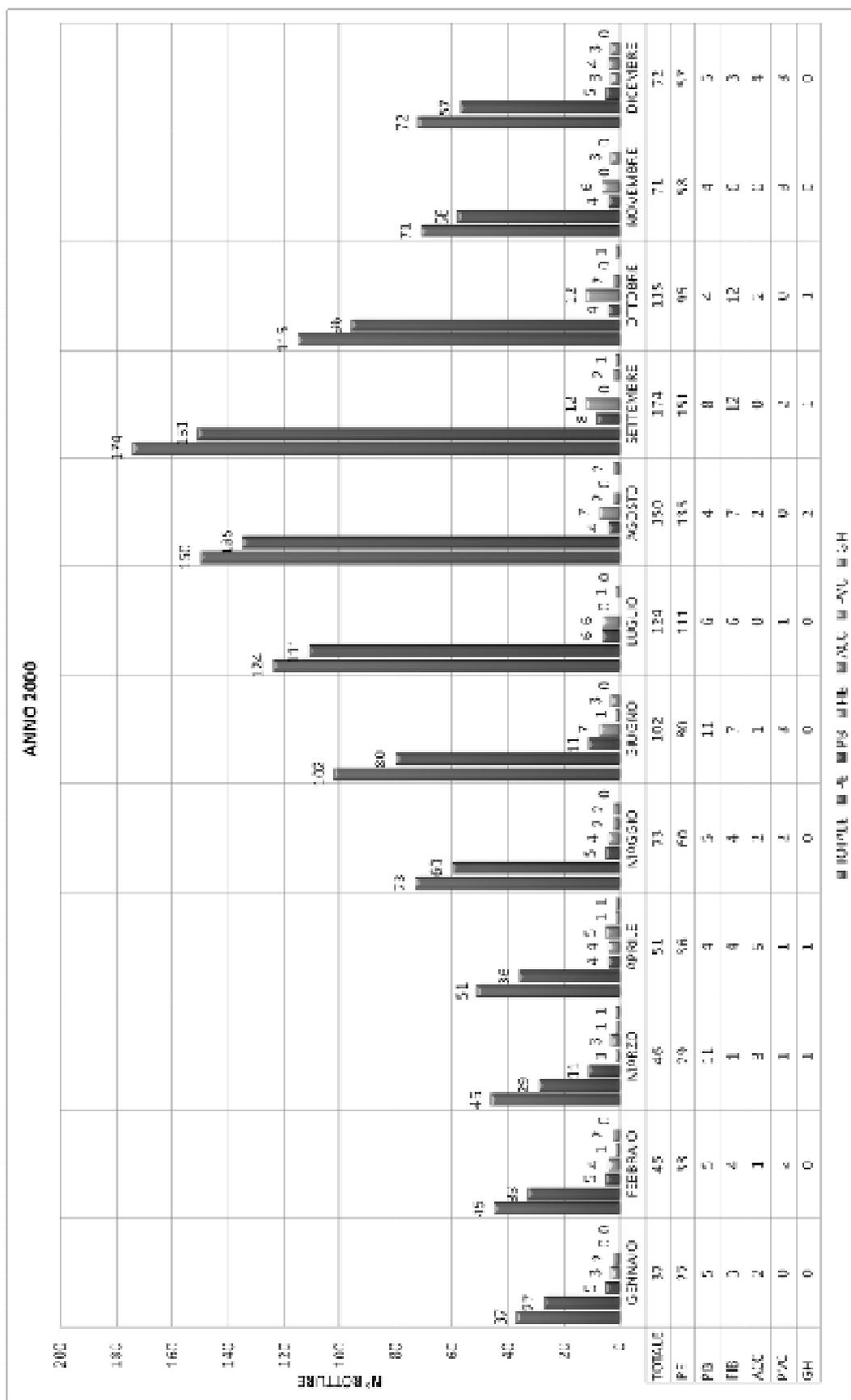


Figura 50 - Eventi di rottura per materiale anno 2000

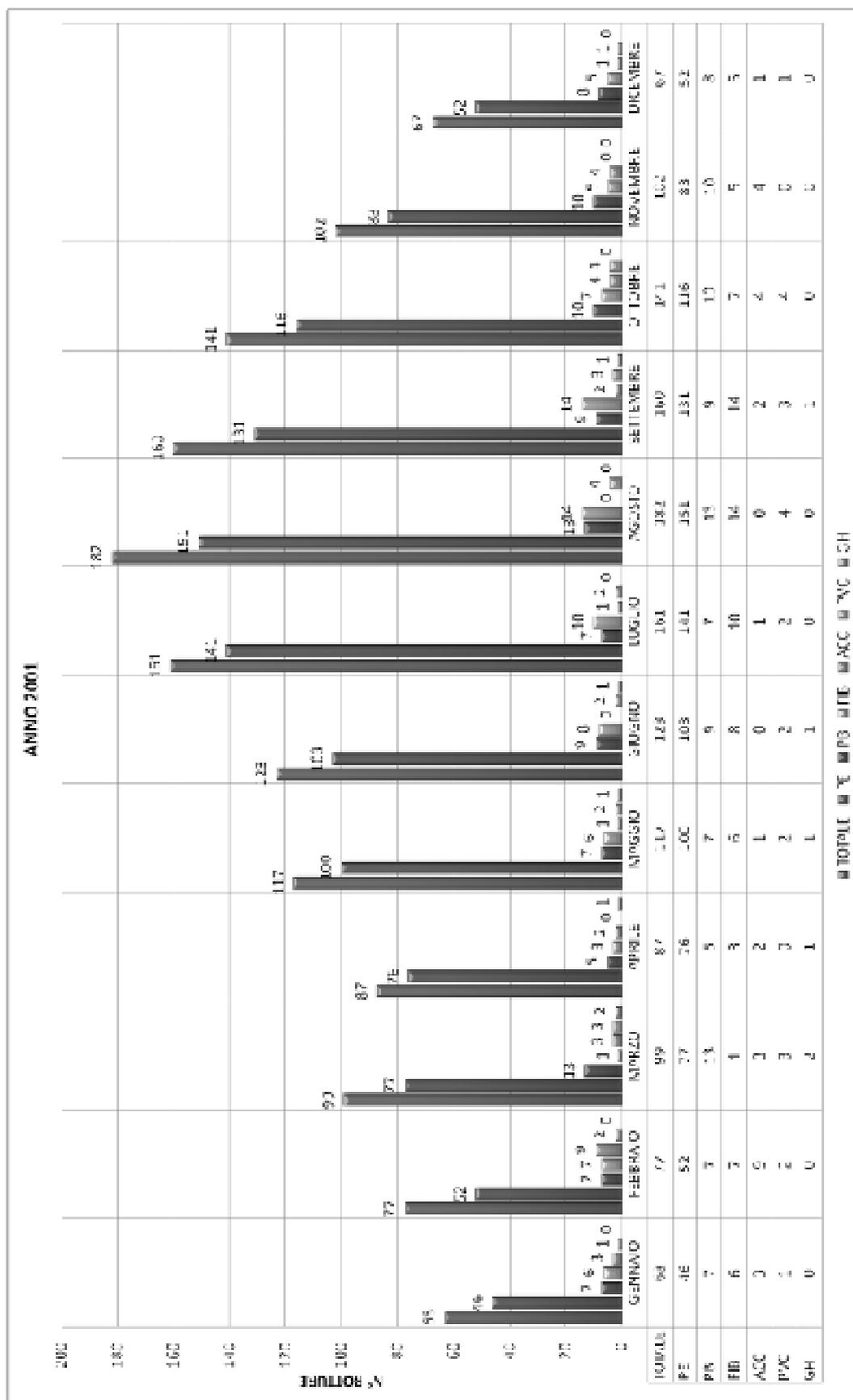


Figura 51 - Eventi di rottura per materiale anno 2001

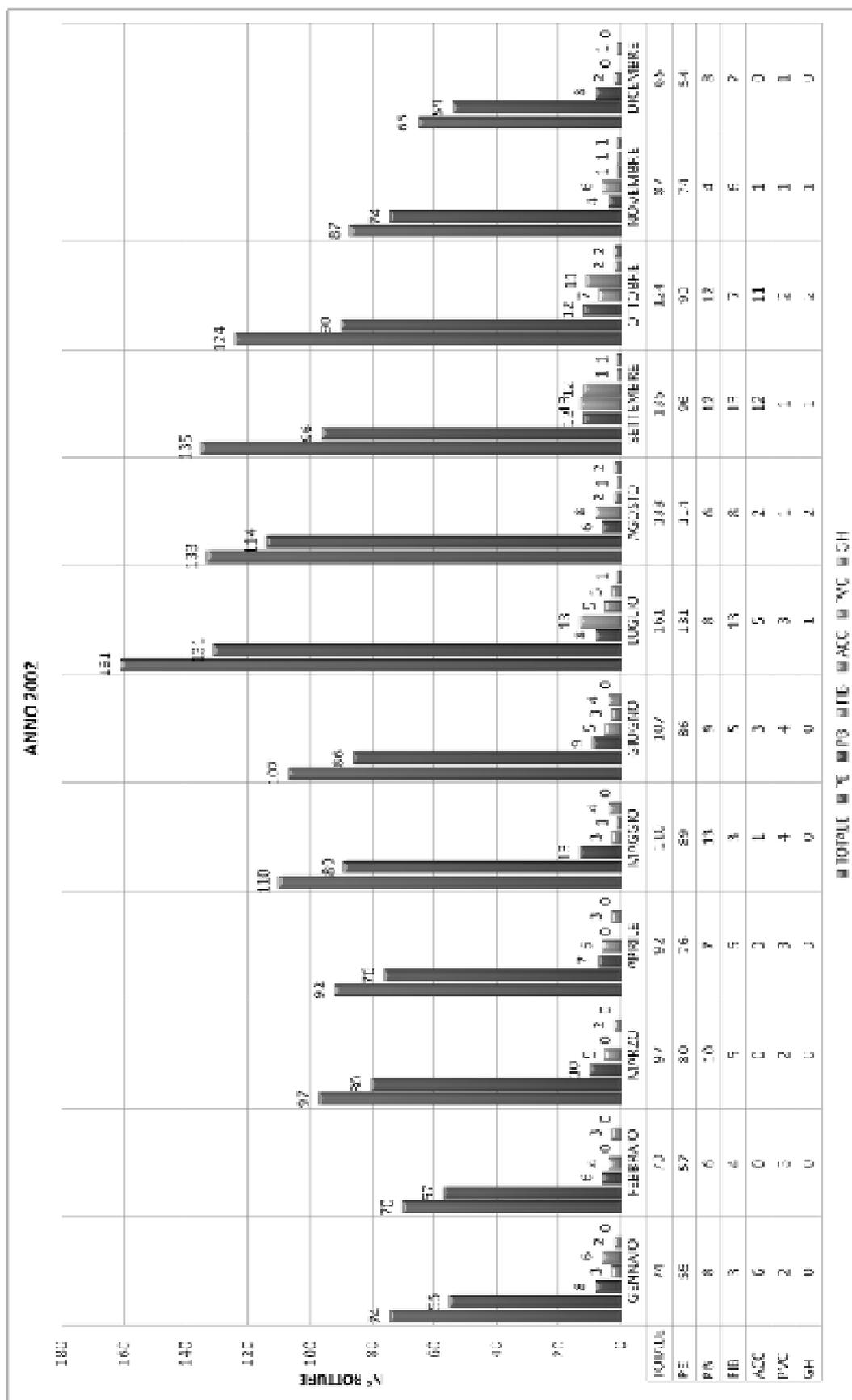


Figura 52 - Eventi di rottura per materiale anno 2002

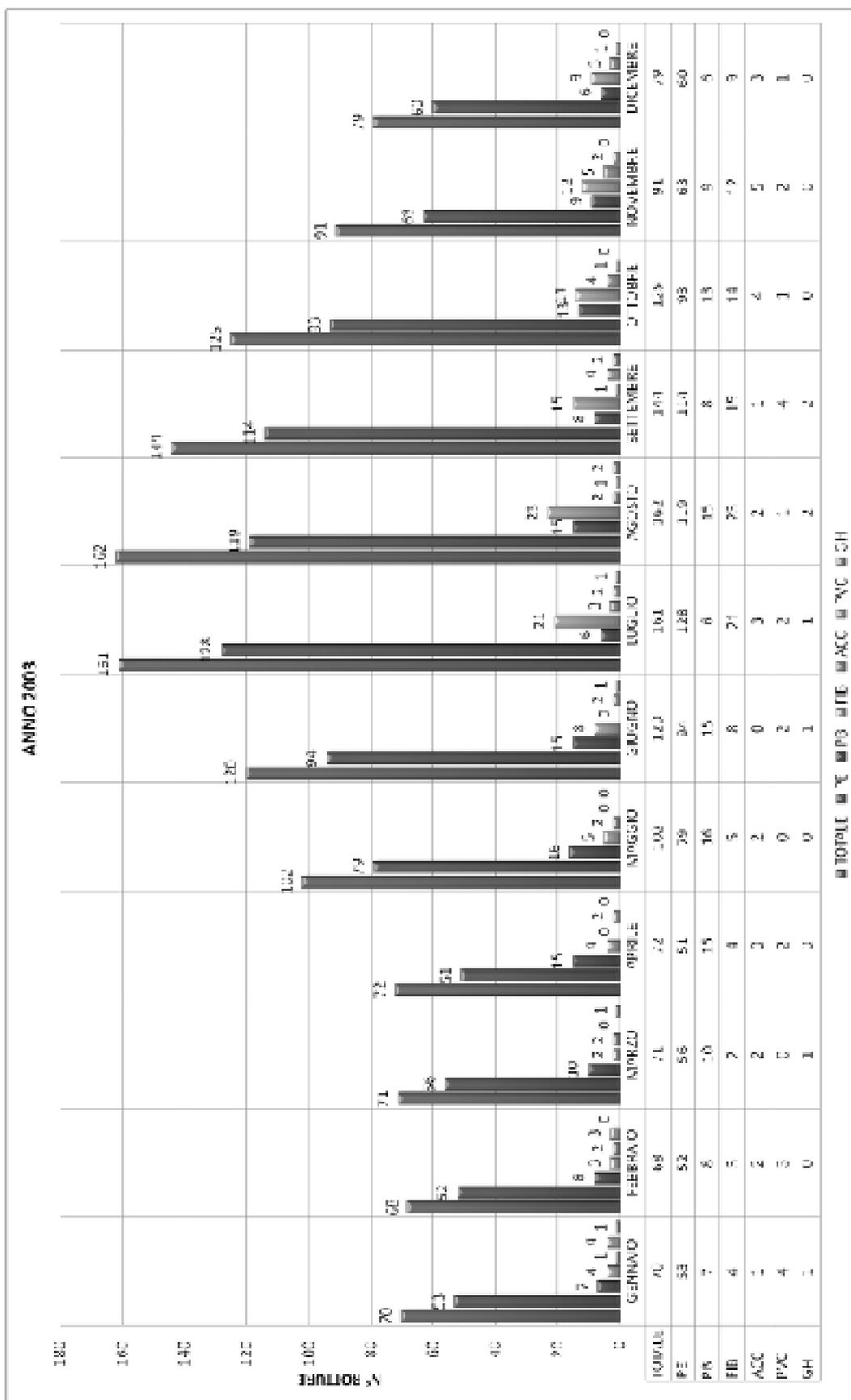


Figura 53 - Eventi di rottura per materiale anno 2003

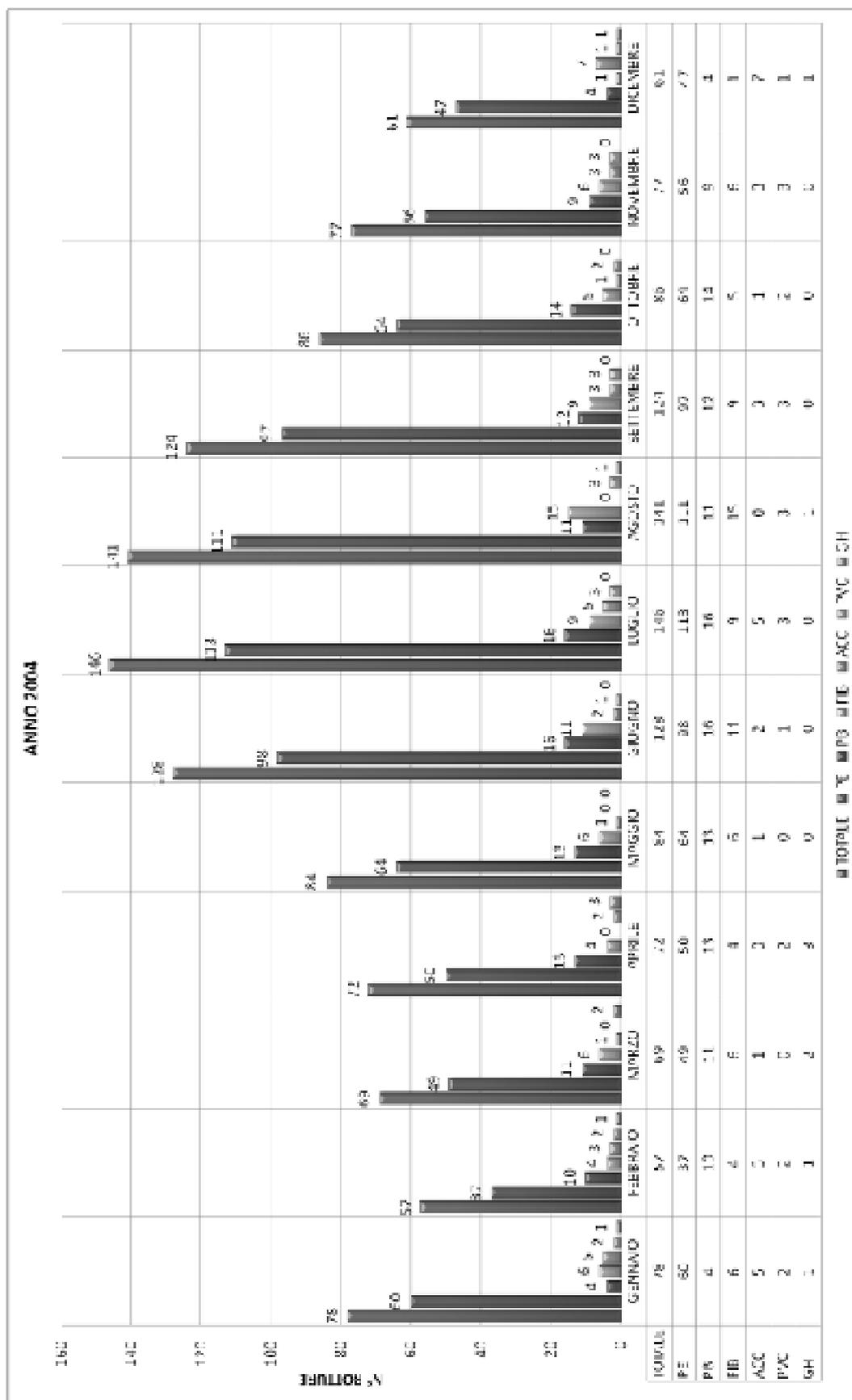


Figura 54 - Eventi di rottura per materiale anno 2004

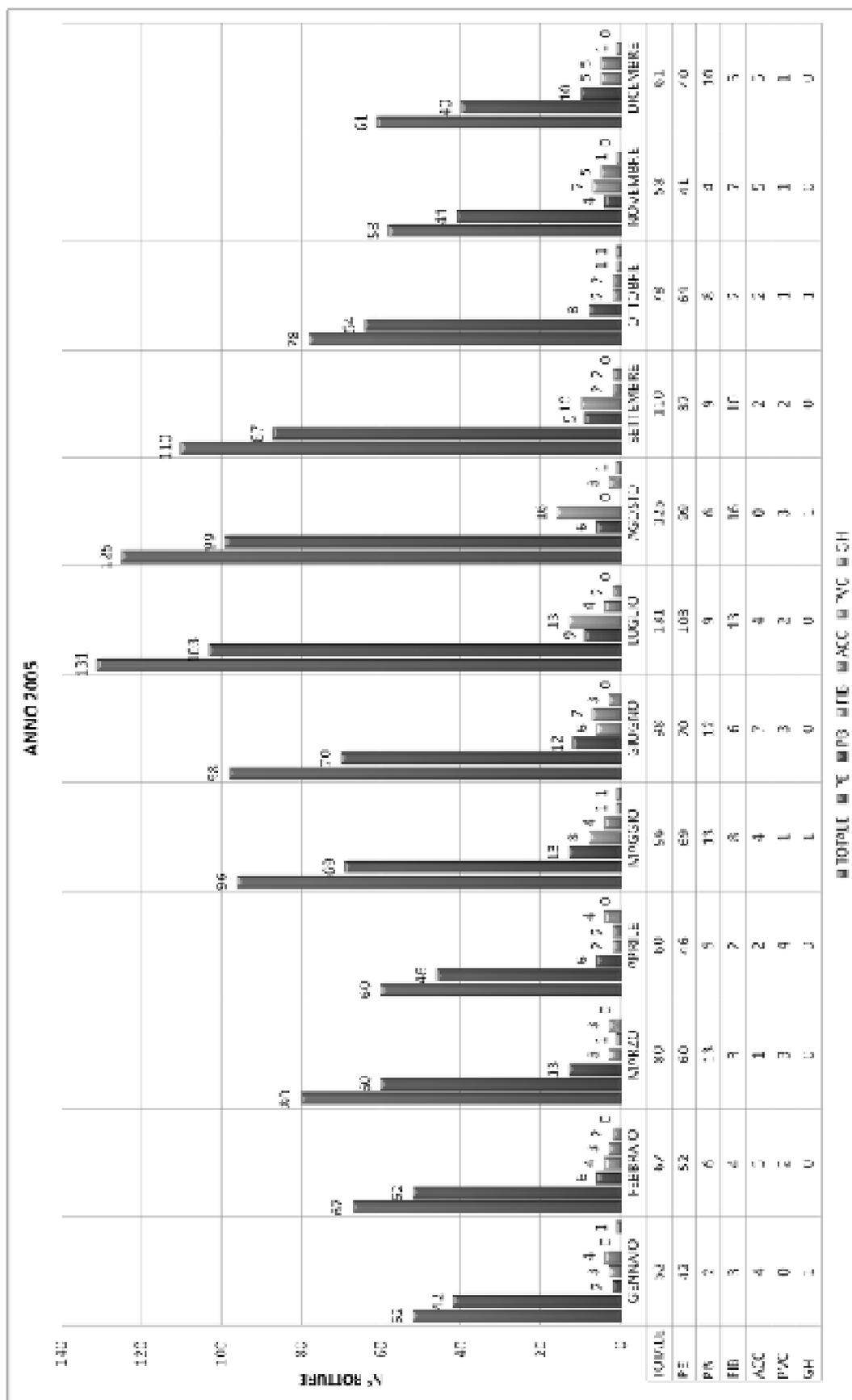


Figura 55 - Eventi di rottura per materiale anno 2005

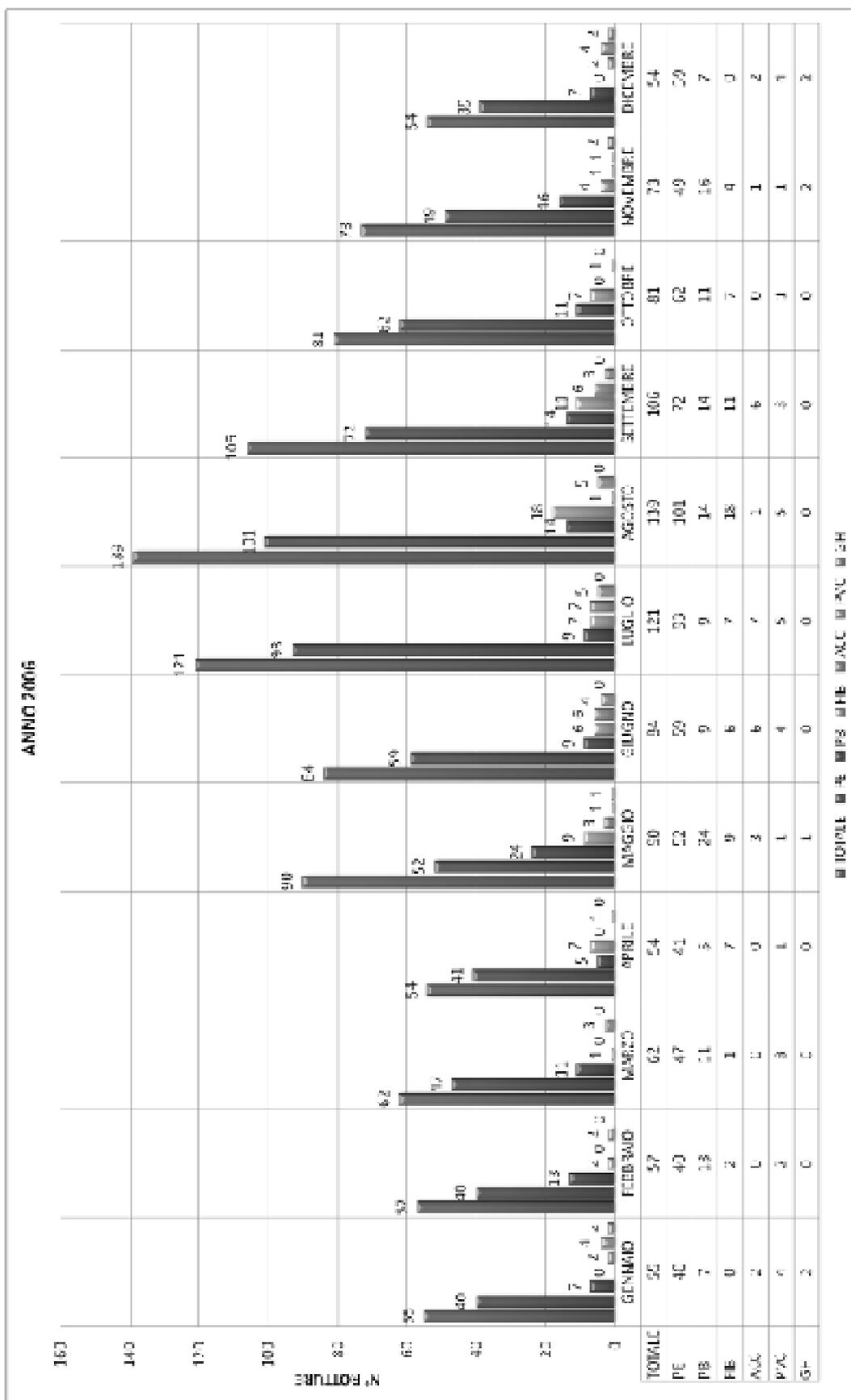


Figura 56 - Eventi di rottura per materiale anno 2006

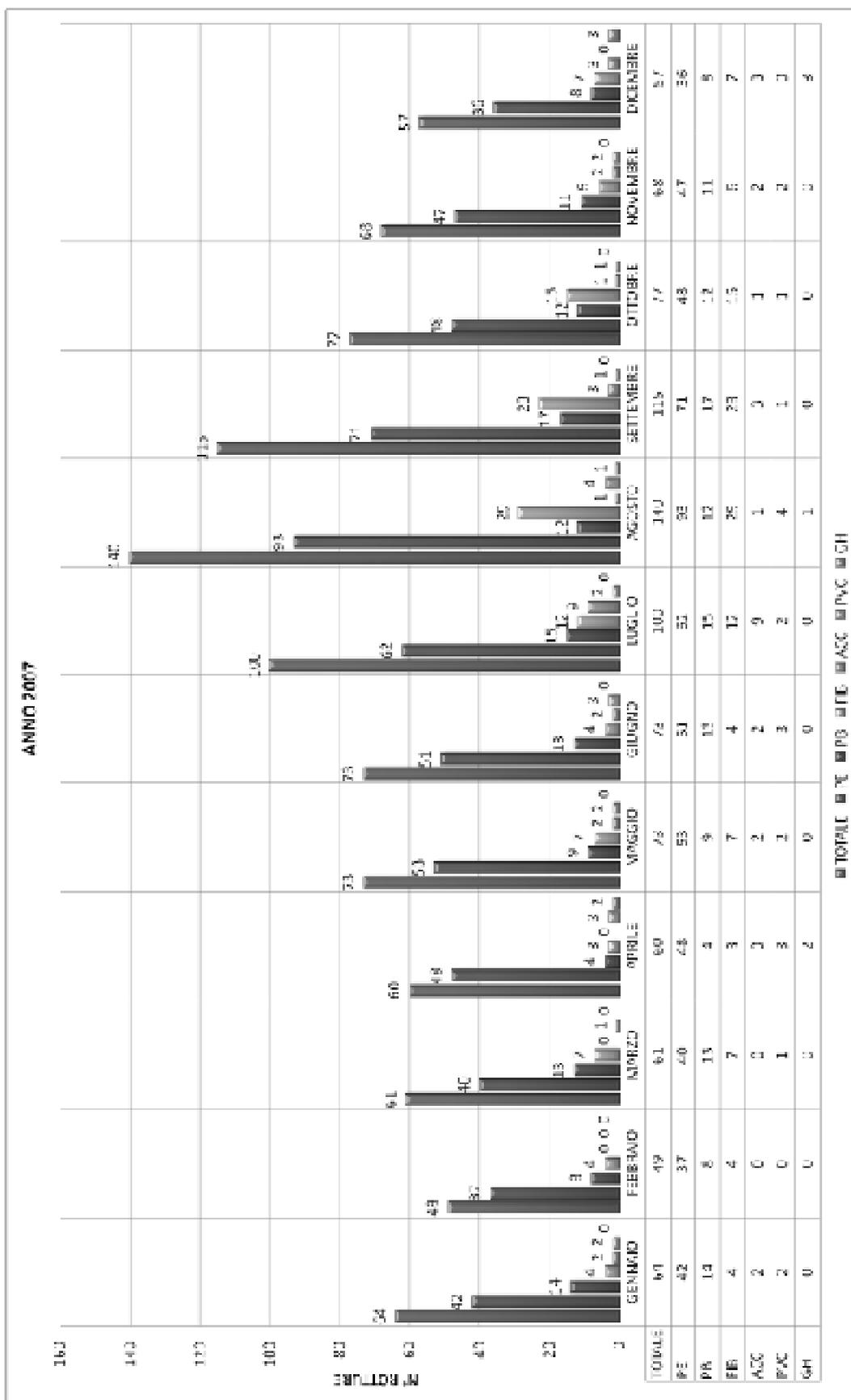


Figura 57 - Eventi di rottura per materiale anno 2007

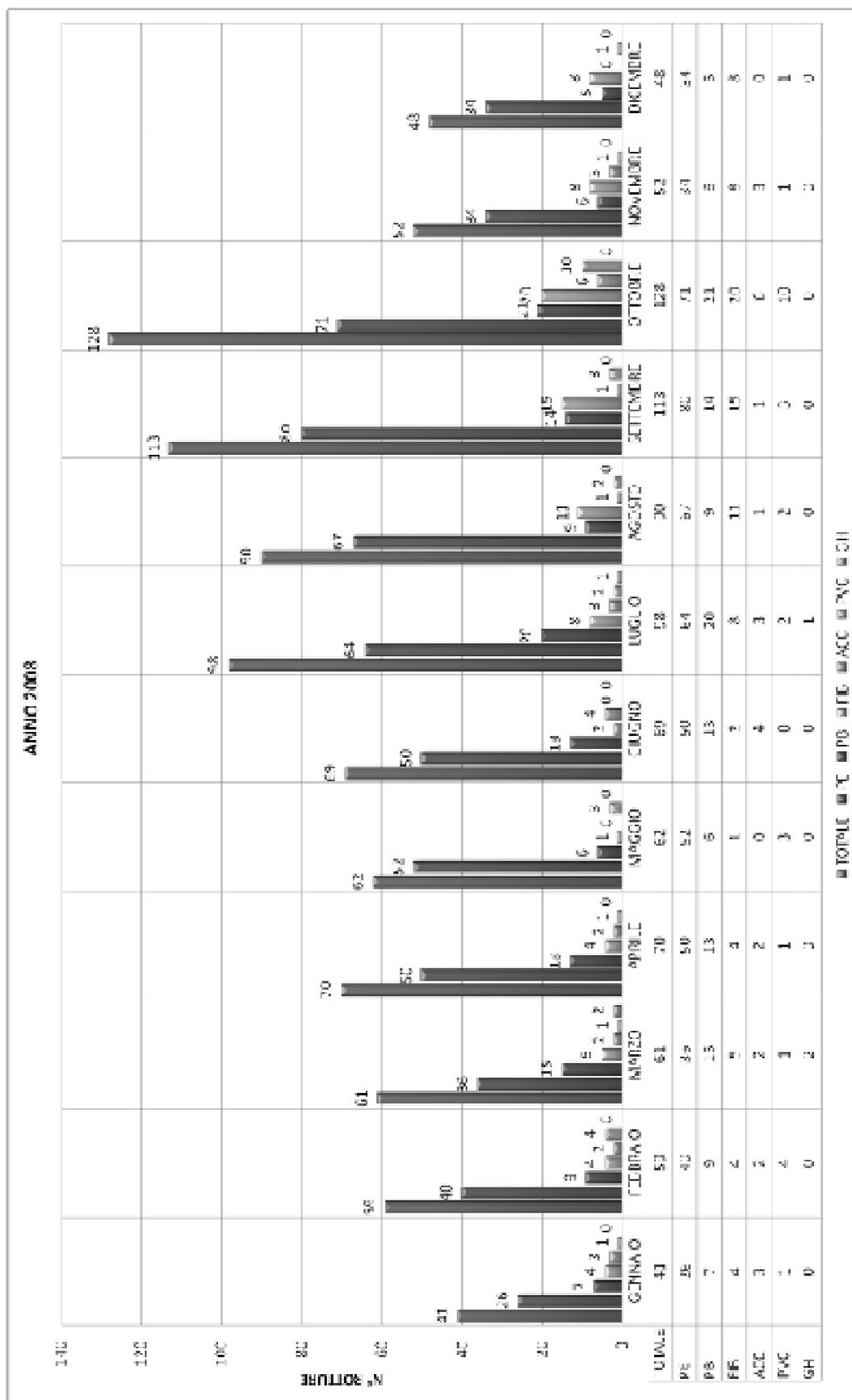


Figura 58 - Eventi di rottura per materiale anno 2008

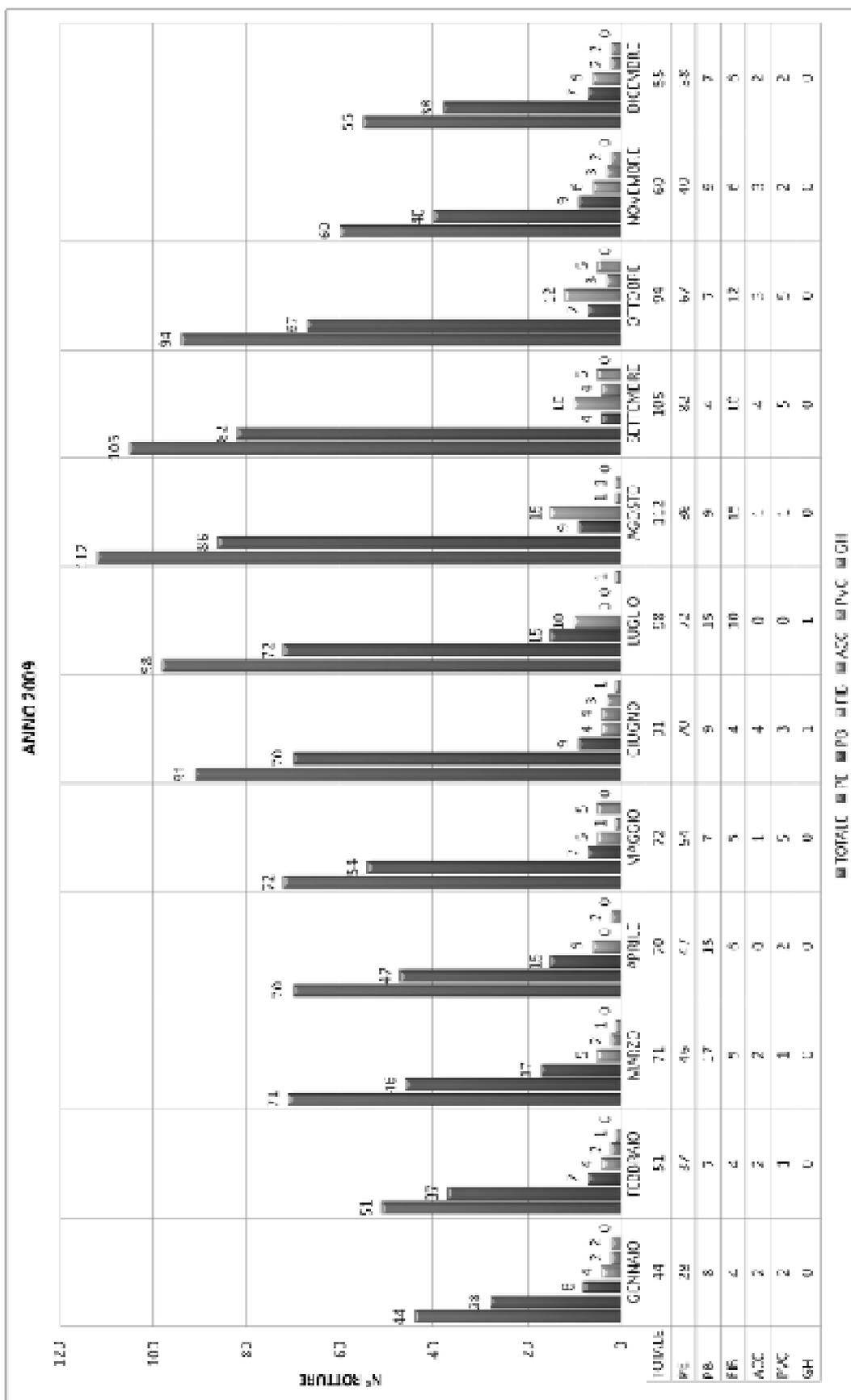


Figura 59 - Eventi di rottura per materiale anno 2009

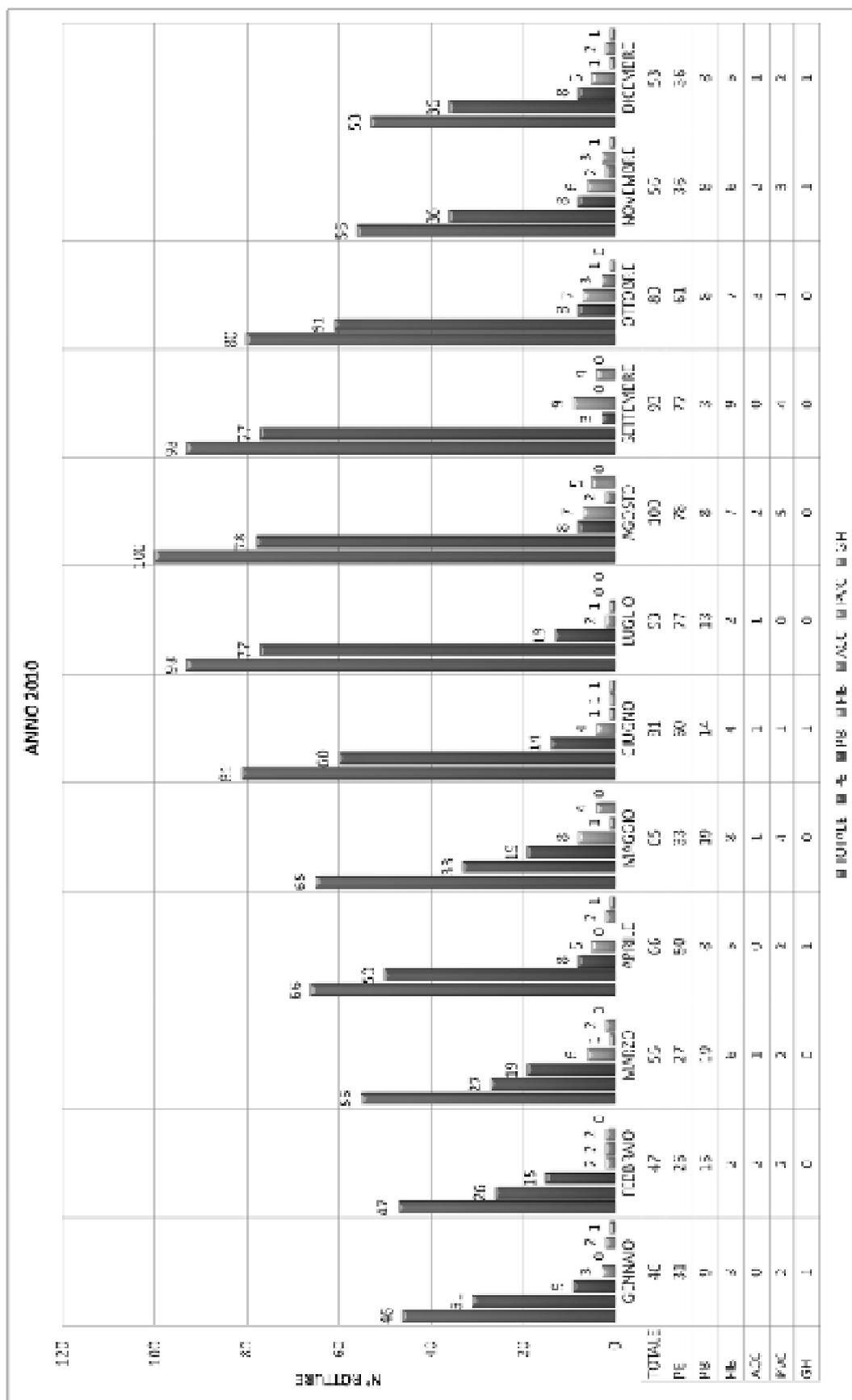


Figura 60 - Eventi di rottura per materiale anno 2010

Dai grafici annuali precedenti si nota che l'andamento delle rotture è simile di anno in anno: vi è un minimo ad inizio anno, un andamento ascendente sino a raggiungere un massimo nel periodo estivo, ed in fine vi è una fase discendente negli ultimi mesi.

Inoltre, nei mesi estivi e principalmente in Luglio, Agosto e Settembre, vi è un notevole aumento delle rotture totali, mentre nei mesi invernali si osserva un numero di rotture minimo.

Osservando invece i singoli materiali, si coglie che le rotture più frequenti sono quelle relative a tubazioni in polietilene ad alta densità (PE) e, in misura ridotta, alle tubazioni in polietilene a bassa densità (PB). Minime risultano essere le rotture relative alle tubazioni in ghisa (GH) e polivinilcloruro (PVC).

Non essendo però disponibili precisi dati sull'effettiva composizione della rete in esame (quantità dei materiali componenti l'acquedotto) e sulla data di posa delle varie tubazioni, non è possibile definire se ciò è dovuto ad un elevato tasso di fallanza o rispecchia semplicemente la composizione e le caratteristiche degli elementi della rete stessa .

Per visualizzare meglio l'andamento degli eventi di rottura negli anni dal 2000 al 2010, sono stati graficati suddividendoli per ogni singolo materiale e, a seguire, si sono raggruppati in un unico grafico, rappresentandone anche il totale.

Inoltre, si è graficato l'andamento differenziato negli anni delle rotture inerenti la sola rete principale e le prese (che indicano tutte quelle rotture avvenute dal contatore al punto di utilizzazione finale della risorsa idrica).

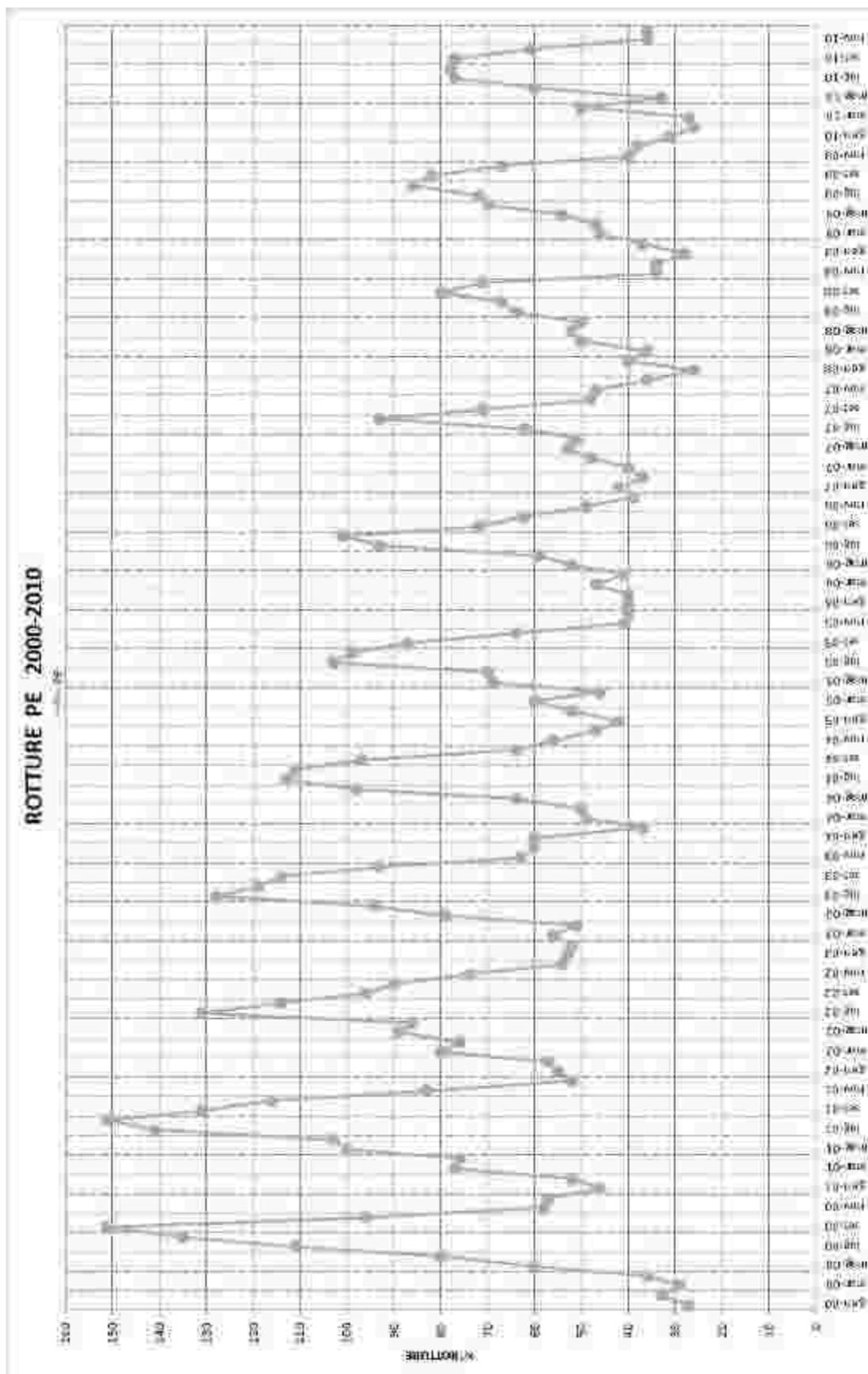


Figura 61 - Eventi di rottura PE dal 2000 al 2010

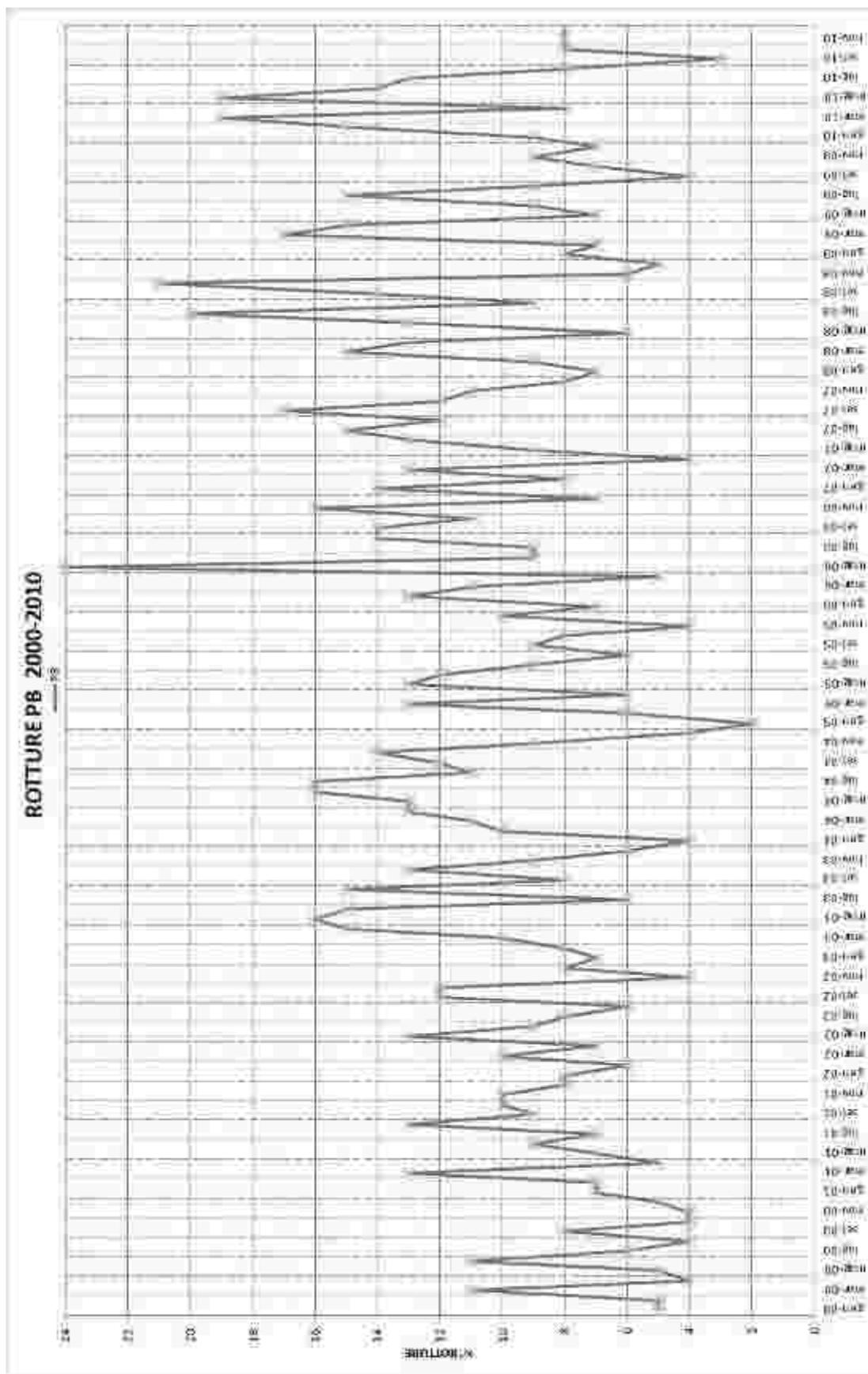


Figura 62 - Eventi di rottura PB dal 2000 al 2010

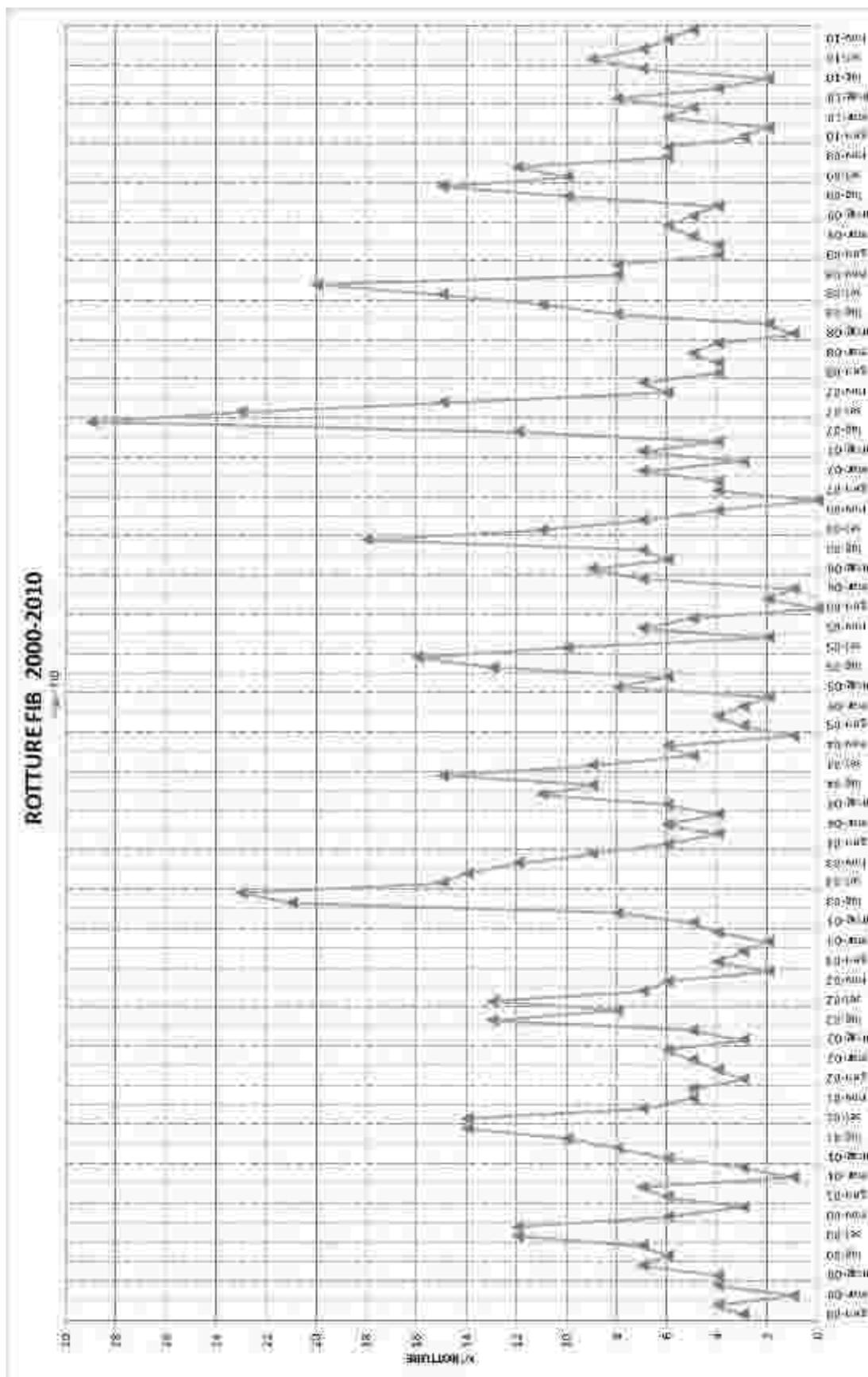


Figura 63 - Eventi di rottura FIB dal 2000 al 2010

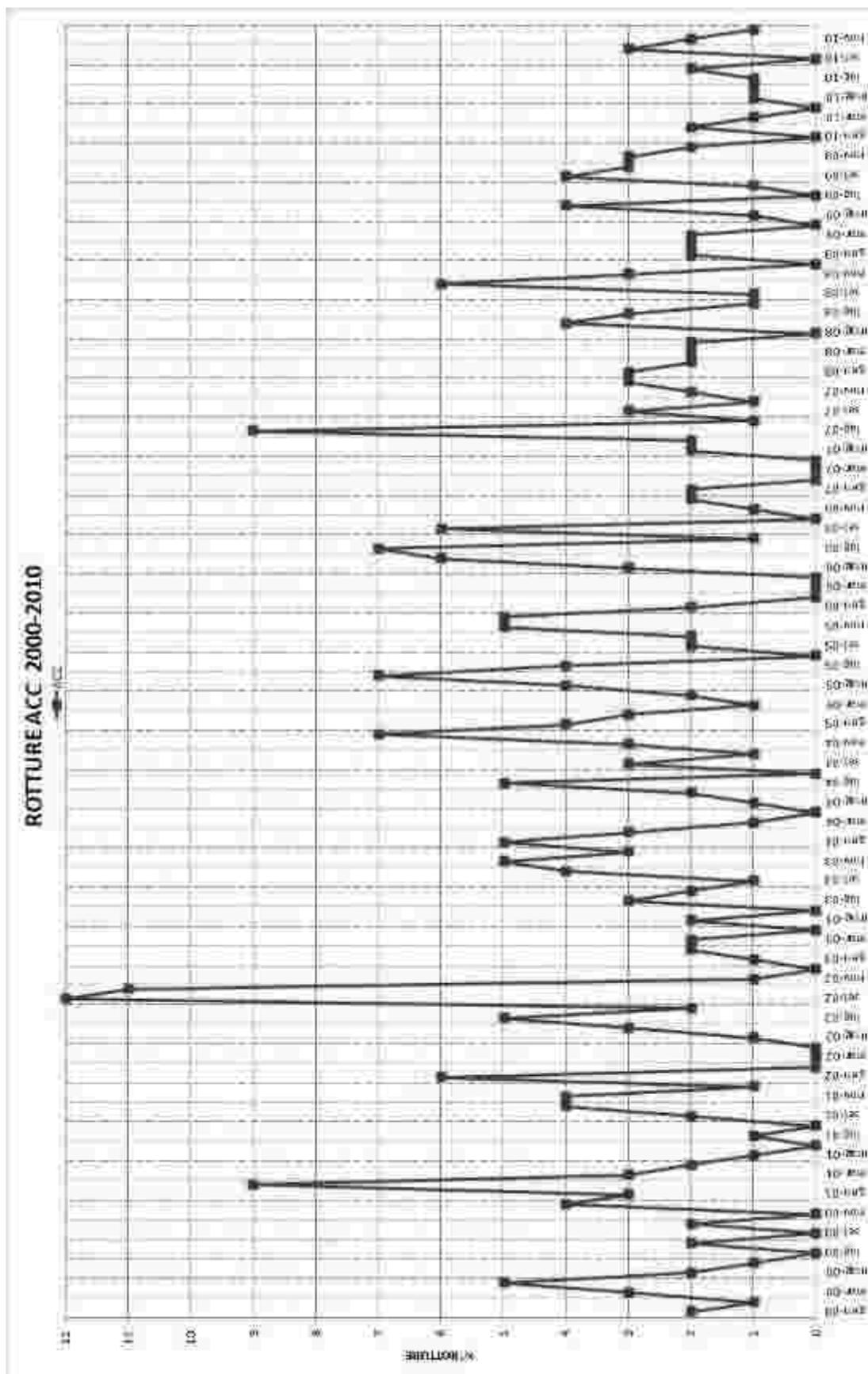


Figura 64 - Eventi di rottura ACC dal 2000 al 2010

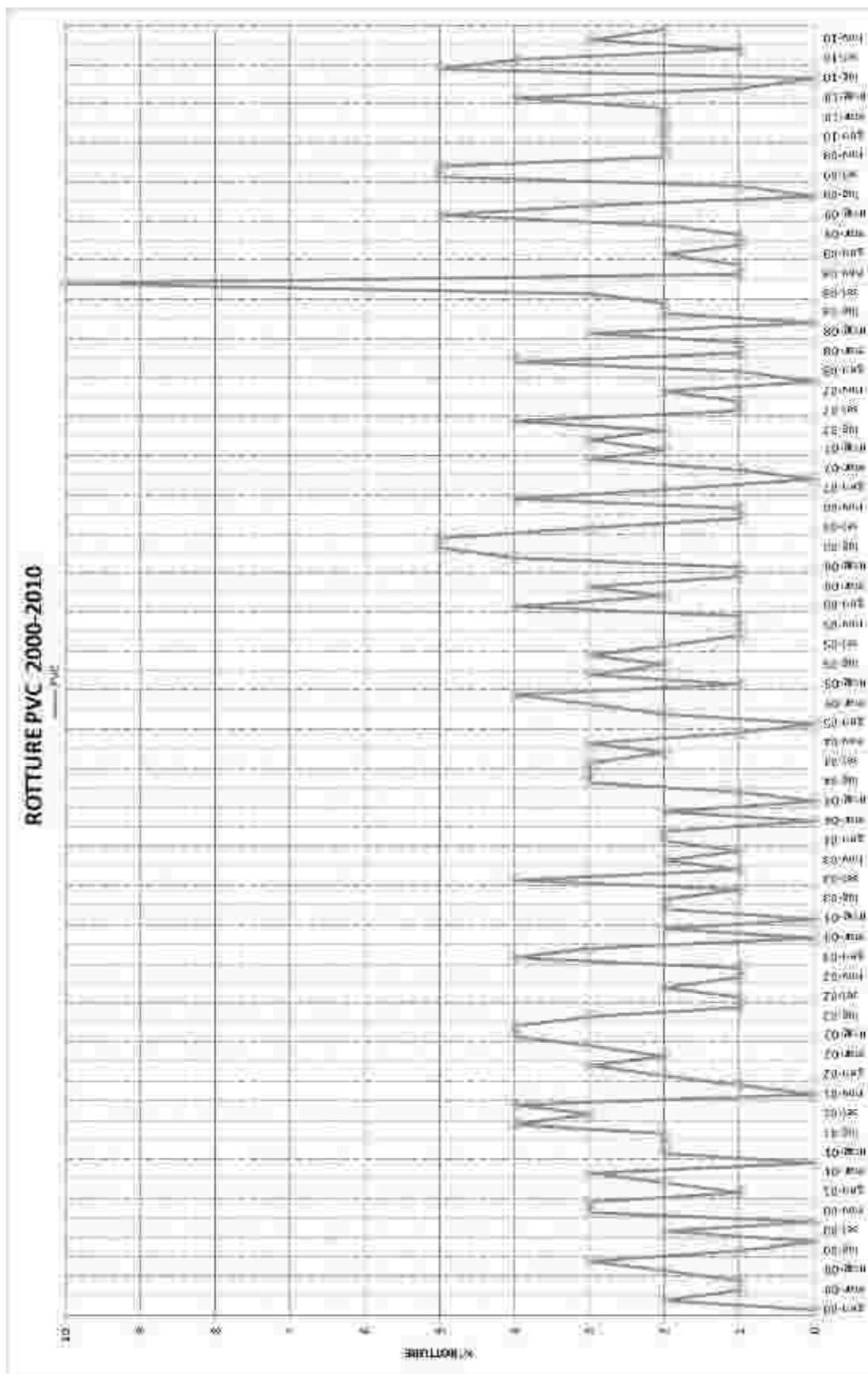


Figura 65 - Eventi di rottura PVC dal 2000 al 2010

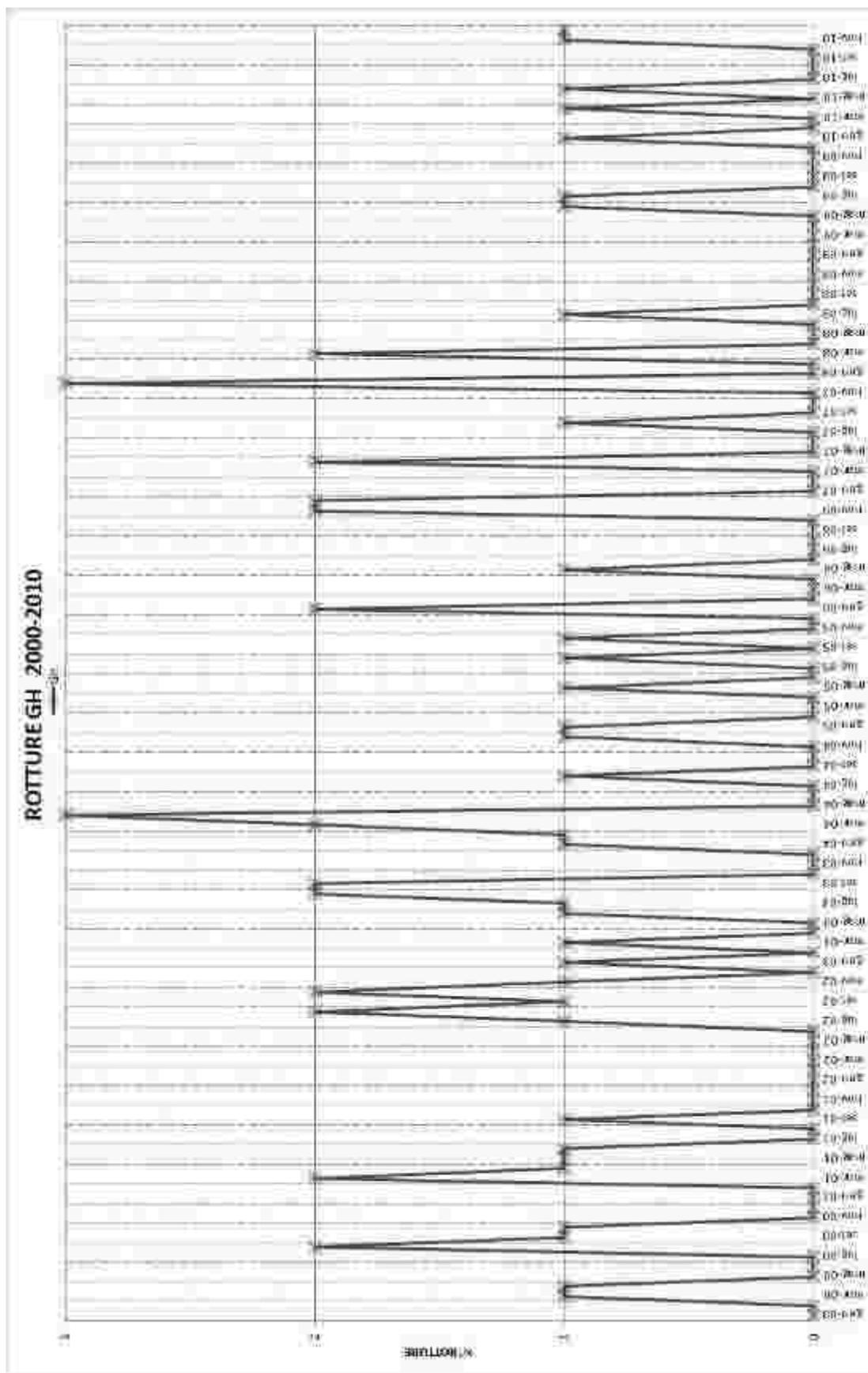


Figura 66 - Eventi di rottura GH dal 2000 al 2010

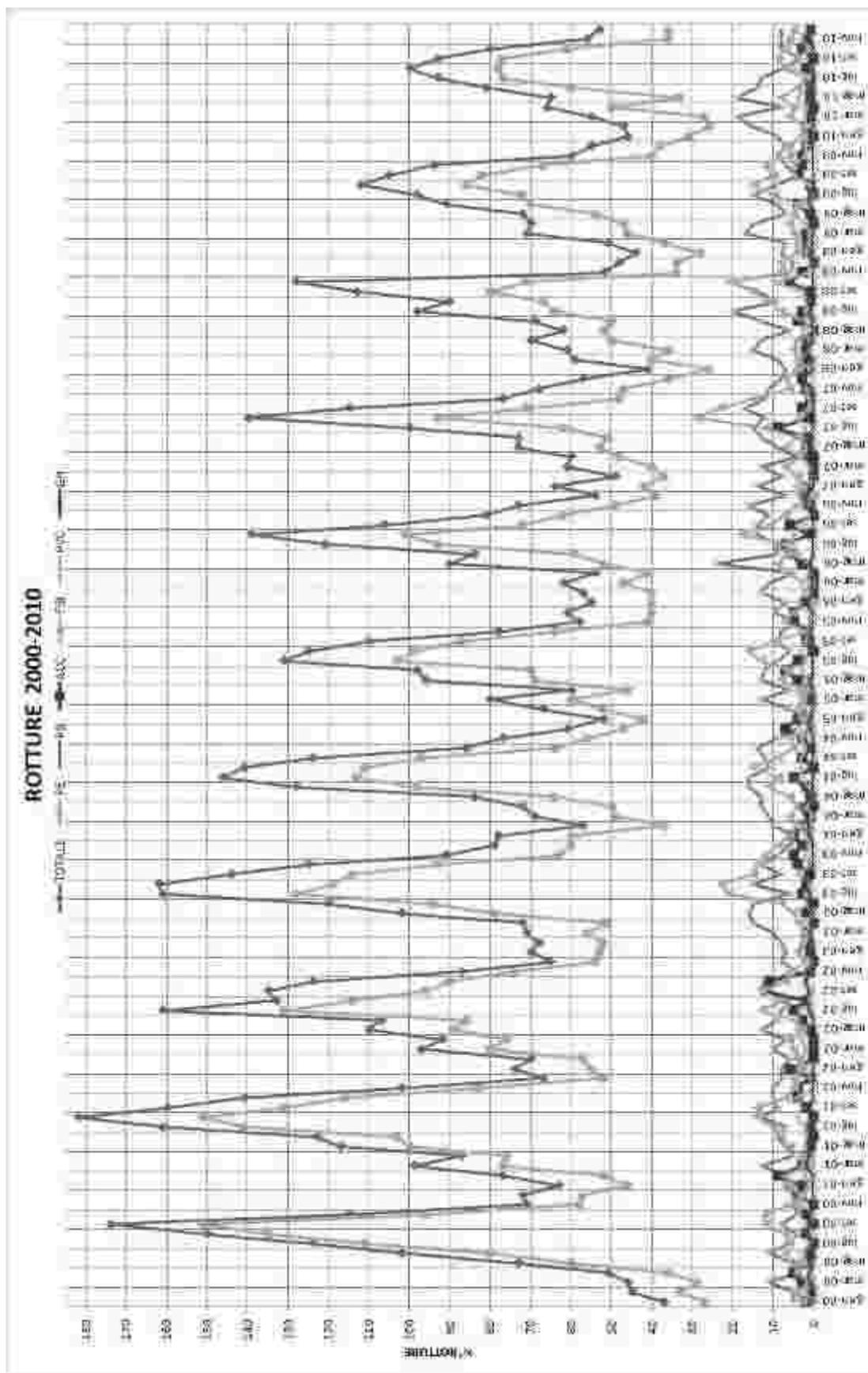


Figura 67 - Eventi di rottura totali dal 2000 al 2010

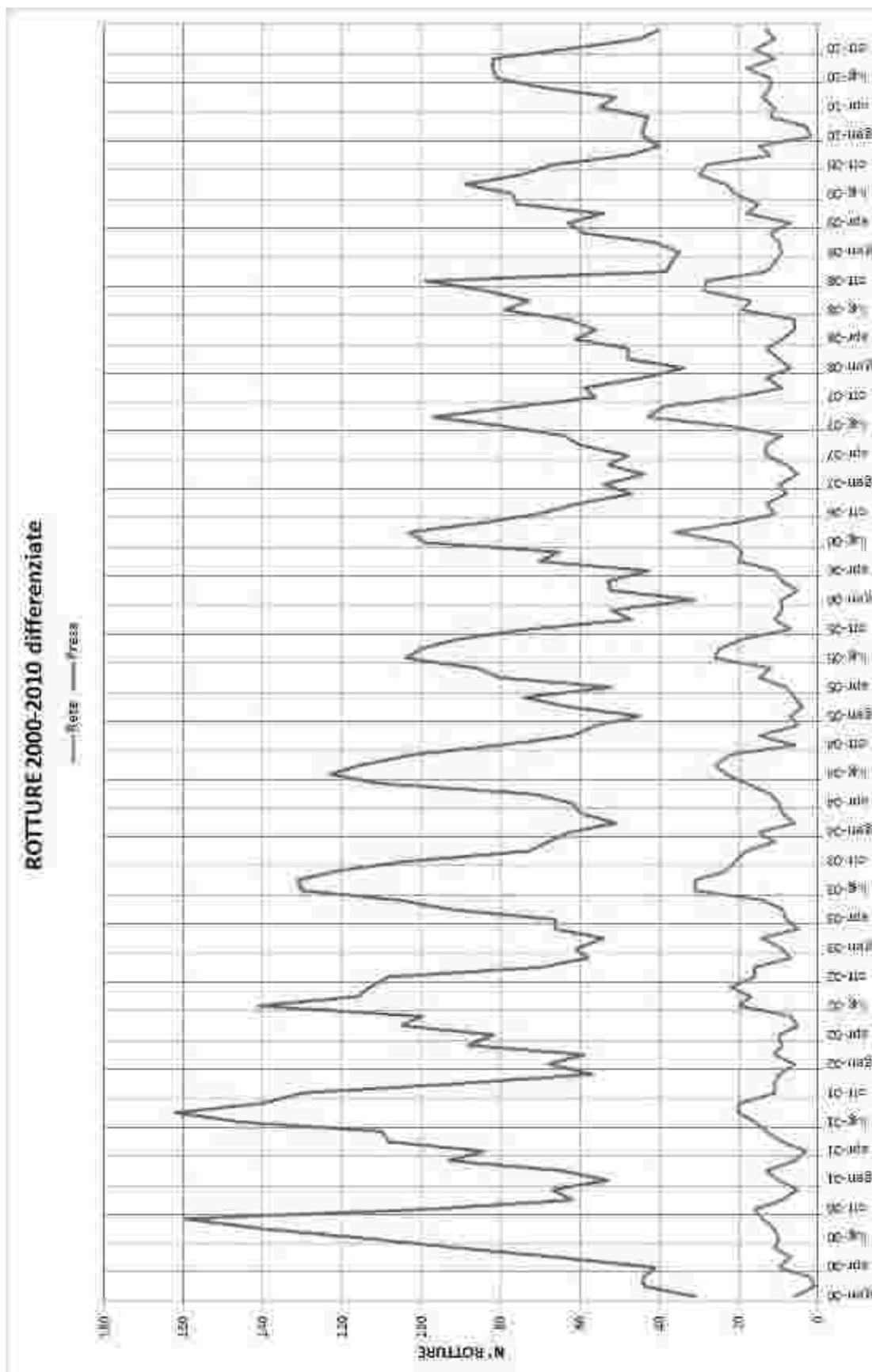


Figura 68 - Eventi di rottura differenziati tra Prese - Rete dal 2000 al 2010

L'andamento generale dei grafici, come detto in precedenza, è molto simile nei vari anni: crescente nel periodo estivo, in cui si osserva un picco delle rotture, per poi decrescere sino a fine anno, dove si osserva il minimo. Ciò è molto evidente per il polietilene ad alta densità (PE) e per il fibrocemento (FIB), mentre è meno evidente per il polietilene a bassa densità (PB).

Per quanto riguarda gli altri materiali (ACC, PVC e GH), non si possono fare le stesse considerazioni basandosi sui grafici, poiché si dispone di un numero limitato di eventi di rottura per poter fare un efficace confronto (soprattutto per la ghisa).

Per descrivere questa annuale oscillazione delle rotture che comporta un incremento nel periodo estivo, si possono considerare diversi fattori: la localizzazione spaziale, la variazione della pressione nelle tubazioni e possibili correlazioni con precipitazioni e temperature.

Per quanto riguarda quest'ultima condizione, si rimandano le opportune considerazioni ai prossimi capitoli, ove si ricercheranno le possibili relazioni climatiche in modo più approfondito.

Per quanto riguarda la localizzazione spaziale, da studi precedenti (A. Bizzarri, et al., 2000), non pare che il traffico veicolare comporti un'elevata incidenza, trovando ragione nell'adeguata profondità e modalità di posa delle tubazioni. Queste considerazioni possono essere estese con buona approssimazione anche al nostro caso, essendo questo studio (ed i suoi risultati) comparabili.

Diversamente, un'influenza maggiore può essere associata all'aumento delle pressioni, secondo considerazioni di carattere generale poiché non si dispone di specifici dati in proposito. Considerando la pressione inversamente proporzionale ai valori di portata, ovvero ai consumi, è noto come nei mesi estivi (Agosto principalmente), in conseguenza alla riduzione della popolazione residente ed al calo delle attività produttive, si registri una netta diminuzione dei consumi di acqua, a cui corrisponde un aumento di pressione. Una spiegazione plausibile è quindi legata all'influenza dei transitori di moto vario, la cui intensità è proporzionale al valore di pressione media in rete.

Osservando il grafico delle rotture di tutti i materiali, si evidenzia che nell'arco degli undici anni vi è una tendenza decrescente dei picchi degli eventi di rottura: ovvero gli eventi di rottura massimi annuali, che si verificano nei periodi estivi, tendono a decrescere con il passare degli anni, e quindi di conseguenza anche il numero totale delle rotture annuali. Questo è probabilmente dovuto anche ad interventi di riduzione della pressione in rete distribuiti nell'arco del periodo in considerazione, come già osservato, ed in qualche modo previsto, da altri studi precedenti (A. Bizzarri, et al., 2000).

Infine, l'ultimo grafico, riportante i dati di rottura differenziati tra rete e prese, evidenzia indicativamente come l'andamento oscillatorio annuale sia ripercorso ciclicamente per entrambe le categorie, anche se in modo meno marcato dai dati della sola rete; questo, molto probabilmente, è dovuto alla quantità minore degli eventi di rottura competenti alla sola rete, che ne comporta una rilevanza molto minore.

È importante evidenziare come da quest'ultimo grafico sia evidente che i massimi valori delle rotture annuali, riferiti alle prese, hanno un andamento decrescente, con apice dimezzato nell'arco degli undici anni osservati, a differenza dei valori competenti alla sola rete che, invece, presentano un modesto incremento. Data la numerosità delle rotture in presa, questo comportamento, effetto di una gestione mirata alla progressiva sostituzione degli organi di presa in materiale plastico (polietilene poco funzionale), fornisce un'ulteriore delucidazione sull'andamento decrescente negli anni del picco di rotture totali, risultandone evidentemente un elemento determinante.

3.2 Dati climatici

Dai dati climatici relativi alle temperature e alle precipitazioni, ottenuti tramite l'ARPA in formato digitale, a seguito di un'elaborazione preliminare sono state ricavate le seguenti tabelle, che riportano i dati di pioggia cumulata mensile e temperatura media mensile degli anni dal 2000 al 2010. Di seguito se ne riportano anche i grafici.

	2000		2001		2002		2003		2004	
	PIO.(mm)	TEMP.(°C)								
<i>Gennaio</i>	0,4	3,3	10,8	4,8	10,4	3,8	68,6	3,8	75,8	1,6
<i>Febbraio</i>	1,2	7,0	16,4	6,7	59,8	7,9	3,0	4,3	104,0	2,8
<i>Marzo</i>	10,8	10,3	109,2	11,7	7,0	12,5	41,2	11,2	116,0	7,0
<i>Aprile</i>	29,0	14,8	76,8	13,5	91,4	14,2	70,2	13,1	76,2	13,5
<i>Maggio</i>	25,2	20,8	37,8	20,8	47,0	19,5	7,4	21,6	68,4	15,9
<i>Giugno</i>	50,6	23,5	61,0	23,1	48,0	24,9	38,2	28,7	51,8	22,0
<i>Luglio</i>	38,8	23,7	44,6	26,5	70,4	25,7	1,2	27,4	79,0	23,1
<i>Agosto</i>	56,0	25,9	36,0	26,7	90,0	24,6	4,4	29,7	25,2	24,5
<i>Settembre</i>	16,2	20,6	71,2	19,0	121,4	20,4	107,6	20,4	80,2	20,4
<i>Ottobre</i>	74,4	15,7	26,4	16,2	72,2	15,6	76,2	12,9	87,2	16,1
<i>Novembre</i>	72,2	9,8	69,4	7,8	61,8	11,6	161,2	9,8	113,8	9,8
<i>Dicembre</i>	42,8	6,3	9,8	3,2	100,0	6,3	47,8	5,6	85,6	5,6

Tabella 5a – Pioggia cumulata mensile e temperatura media mensile degli anni dal 2000 al 2010

	2005		2006		2007		2008		2009		2010	
	PIO.(mm)	TEMP.(°C)										
<i>Gennaio</i>	1,8	3,0	28,0	1,6	13,0	6,5	38,2	5,5	82,0	2,0	65,0	1,9
<i>Febbraio</i>	28,2	3,6	48,8	4,7	31,4	7,8	17,8	7,0	49,6	5,9	66,0	4,9
<i>Marzo</i>	20,0	9,5	33,2	8,7	107,8	10,8	32,2	10,3	115,6	10,6	92,6	8,9
<i>Aprile</i>	104,6	13,1	39,0	14,4	25,0	17,1	69,0	13,5	126,6	14,6	64,0	14,3
<i>Maggio</i>	38,2	19,7	36,8	19,0	54,4	20,6	115,6	18,7	16,2	21,6	98,4	18,3
<i>Giugno</i>	5,6	24,1	24,6	23,6	104,6	23,0	152,8	22,8	20,0	23,4	104,2	23,1
<i>Luglio</i>	31,2	25,6	12,0	27,3	4,4	26,8	34,0	25,6	26,8	26,3	5,6	27,2
<i>Agosto</i>	0	22,6	62,8	22,4	29,4	24,2	72,8	26,1	42,6	26,8	51,6	24,3
<i>Settembre</i>	0	20,5	131,2	21,1	59,3	19,5	14,4	19,6	49,0	21,4	50,2	20,3
<i>Ottobre</i>	2,4	14,1	19,0	15,1	124,4	14,4	26,8	16,4	40,8	14,8	99,4	15,4
<i>Novembre</i>	97,0	7,7	33,4	8,9	45,2	8,4	203,8	9,5	73,4	9,8	122,6	9,3
<i>Dicembre</i>	91,4	3,0	22,4	3,9	22,8	4,1	111,2	4,2	81,2	3,3	69,2	4,0

Tabella 5b - Pioggia cumulata mensile e temperatura media mensile degli anni dal 2000 al 2010

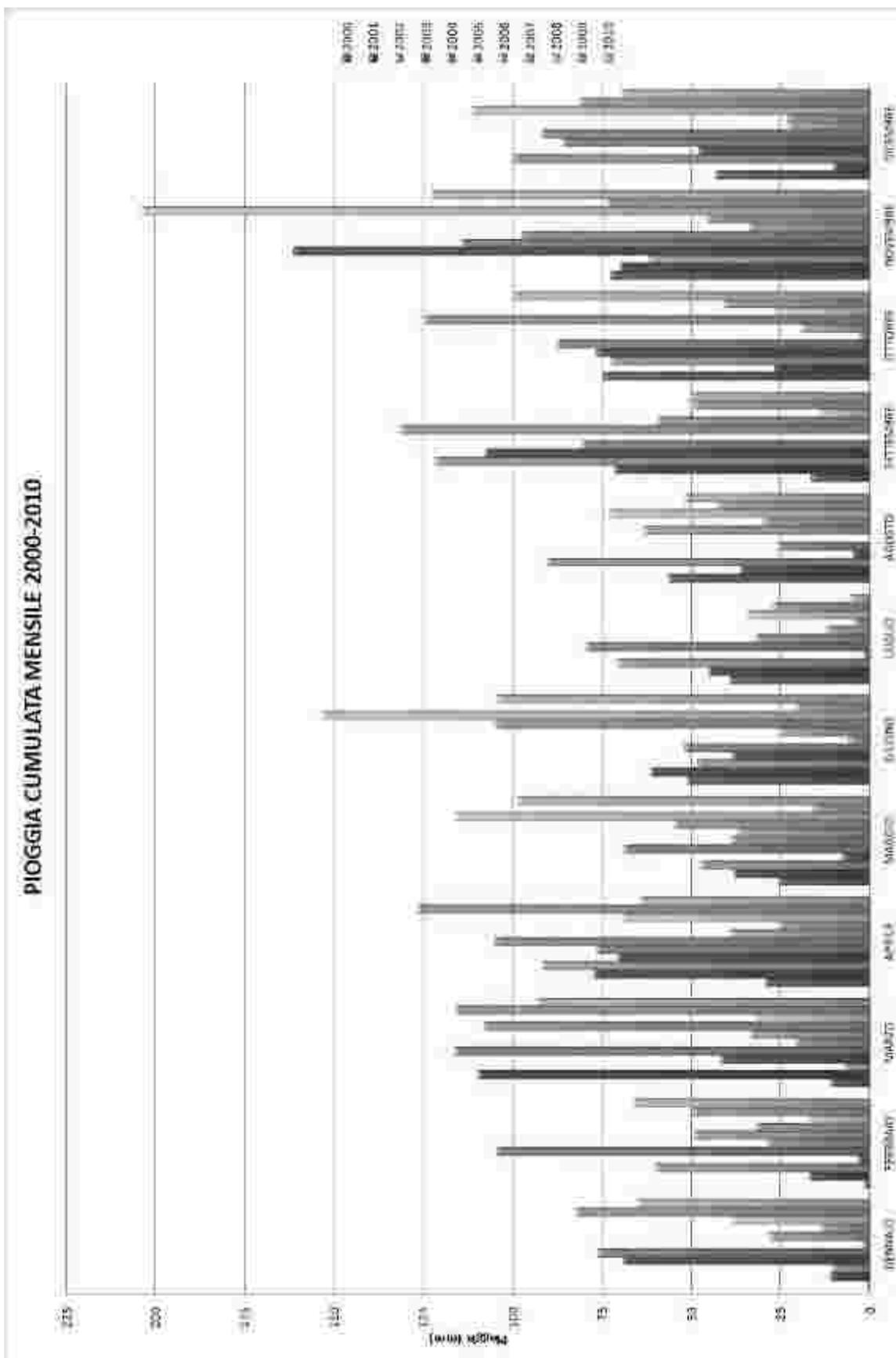


Figura 69 - Pioggia cumulata mensile dal 2000 al 2010

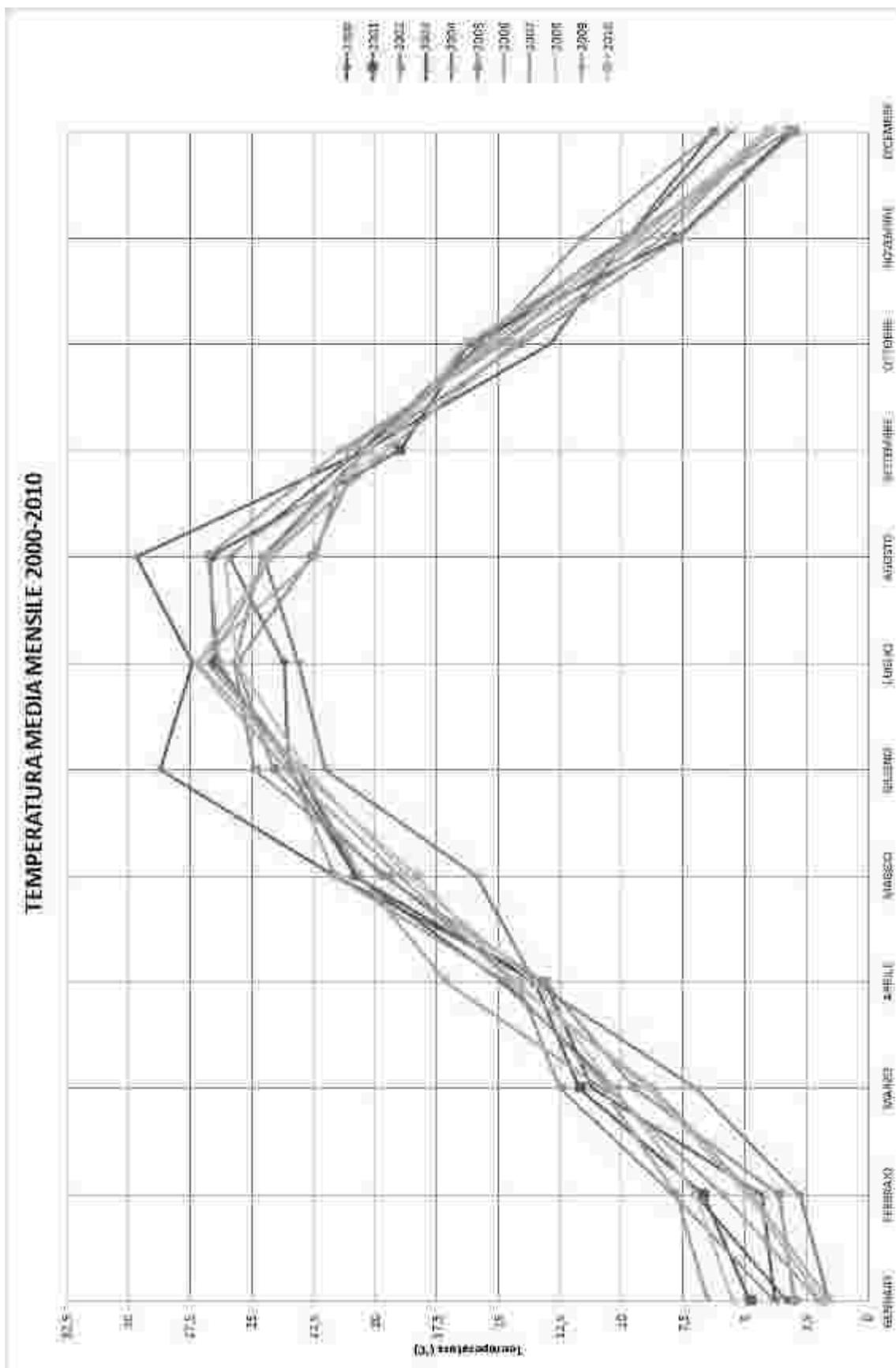


Figura 70 - Temperatura media mensile dal 2000 al 2010

Dal grafico della pioggia cumulata mensile, si nota che durante i periodi estivi si hanno valori mediamente minimi, in particolare nei mesi di Luglio e Agosto, caratterizzati da scarsità di precipitazioni. Nel resto del periodo considerato, le precipitazioni cumulate sono variabili, con un andamento che nel complesso presenta due incrementi: nel periodo primaverile (mesi di Marzo e Aprile) e nell'autunno (mesi da Settembre a Novembre).

Per quanto riguarda il grafico delle temperature medie mensili, il suo andamento è piuttosto uniforme negli anni, con picchi nei mesi estivi (Luglio e Agosto in particolare) e minimi nei mesi invernali (Dicembre, Gennaio e Febbraio).

Si nota in oltre che nell'anno 2003, durante il periodo estivo si sono registrate temperature decisamente più alte della media degli altri anni.

3.3 Relazioni rotture – dati climatici

Per rappresentare la possibile correlazione tra l'andamento delle rotture, delle temperature e delle precipitazioni nell'arco temporale degli undici anni in esame, si è elaborato un grafico, di seguito riportato, che rappresenta le rotture totali mensili sovrapposte alle temperature medie ed alle precipitazioni cumulate, anch'essi di carattere mensile.

Dall'analisi del grafico in oggetto, sono poi state desunte tutte le considerazioni successive, ricercando una maggiore veridicità delle ipotesi introdotte sulla possibile esistenza di una qualche relazione tra i diversi fattori che condizionano le rotture delle tubazioni.

Obiettivo principale permane il verificare di una possibile, o meno, relazione tra rotture annuali e variazione delle condizioni climatiche.

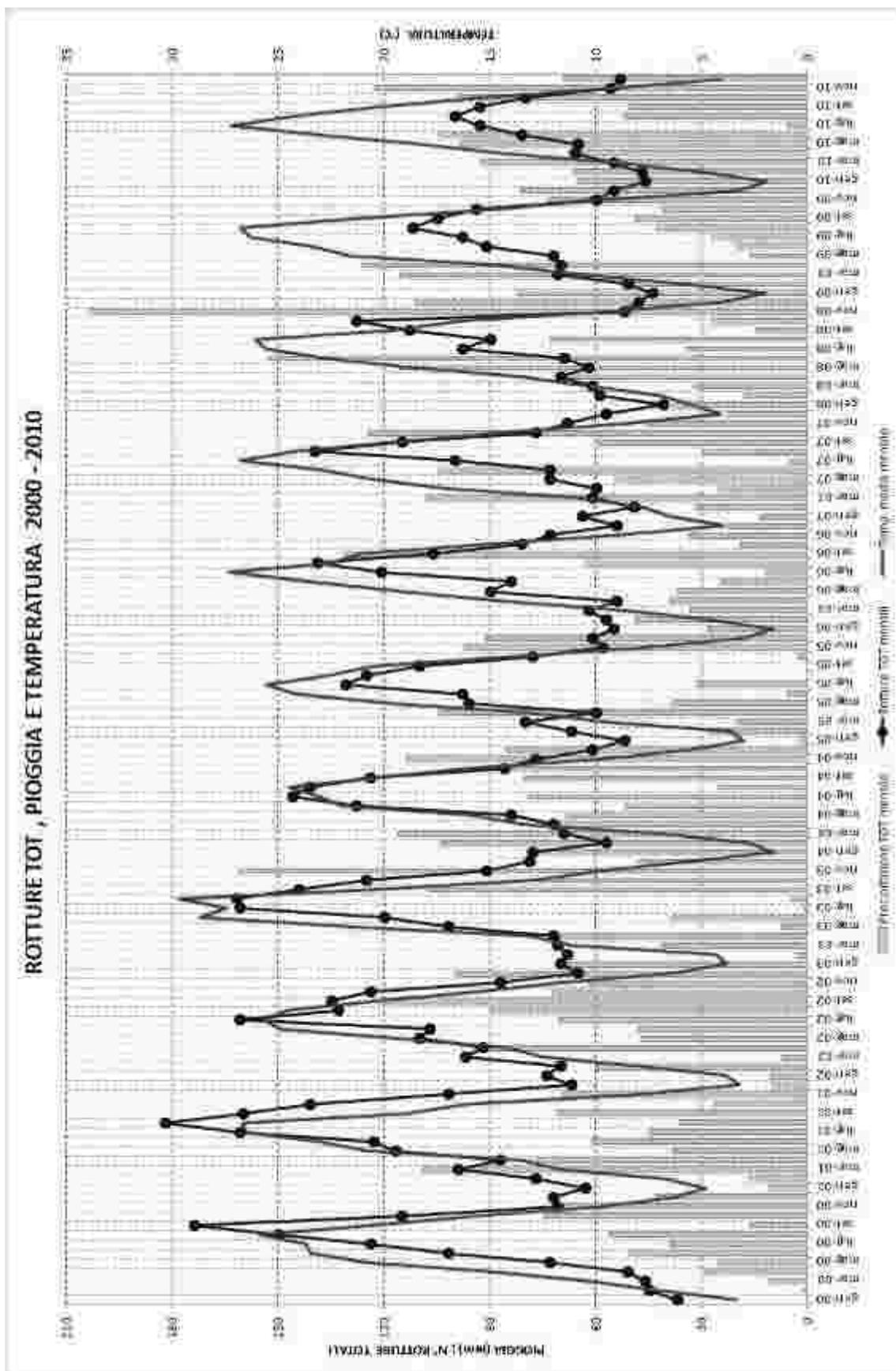


Figura 71 - Rotture totali, piogge cumulate e temperature medie, per ogni mese dall'anno 2000 al 2010

Da quest'ultimo grafico si nota un'evidente relazione fra gli eventi di rottura totali e la temperatura. Di fatti, l'andamento delle rotture totali è molto simile a quello delle temperature medie mensili: minimo nei periodi iniziali e finali dell'anno e massimo nei periodi estivi, con cicli annuali.

Si nota anche come i picchi degli eventi di rottura totali mensili corrispondano in media, salvo poche eccezioni, con i minimi delle piogge cumulate, registrati come ovvio in periodo estivo.

In oltre si può facilmente notare che in alcuni anni l'andamento delle rotture totali è leggermente scostato rispetto all'andamento delle temperature medie mensili; ovvero si nota che, in genere, i picchi delle rotture totali non coincidono esattamente con i picchi di temperatura media mensile, ma sono leggermente traslati verso destra, come ad indicare un ritardo fra temperatura media registrata e gli eventi di rottura.

Questo ritardo tra picco di rottura e picco di temperatura, risulta inoltre più accentuato nei periodi in cui vi è stata scarsità di precipitazione precedente agli eventi di rottura.

Possiamo quindi validare l'ipotesi di una qualche relazione fra eventi di rottura totali, variazione delle temperature e precipitazione cumulata.

Infine, come già osservato precedentemente, negli anni l'andamento degli eventi di rottura tende a diminuire, cioè il valore massimo degli eventi di rottura di ogni anno tende a calare con il passare degli anni.

Per meglio verificare le osservazioni desunte dai grafici precedenti, si è quindi deciso di ricercare una qualche forma di relazione tra le condizioni climatiche e le rotture stesse, disaggregando i dati in funzione del tipo di materiale.

Per quanto riguarda la relazione tra rotture e precipitazioni, si sono realizzati dei grafici che considerassero tutti i dati mensili di rottura a disposizione, distinti solo per materiale e posti in relazione con i livelli mensili di precipitazione cumulata, adimensionalizzati rispetto al massimo mensile osservato negli anni dal 2000 al 2010.

Per quanto riguarda la relazione tra rotture e temperature, si è realizzato un grafico con la medesima analisi della relazione precedente. Il grafico considera tutti i dati mensili di rottura a disposizione, distinti solo per materiale ed in relazione ai valori medi mensili di temperatura, adimensionalizzati rispetto al massimo registrato, dall'anno 2000 al 2010.

Infine, i medesimi dati di rottura sono stati aggregati per intervalli di temperatura e di precipitazione, per ogni materiale, rappresentandone l'andamento negli ultimi due grafici.

Polietilene ad alta densità:

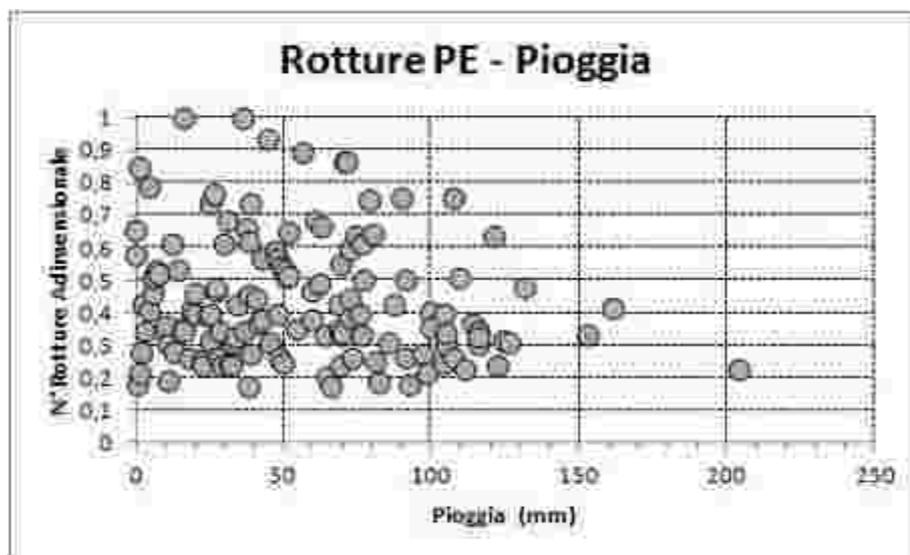


Figura 72 - Rotture del PE in relazione alla pioggia cumulata mensile

Dal grafico si nota che il maggior numero degli eventi di rottura è raggruppato in corrispondenza dei minimi valori di precipitazione, in particolar modo inferiori a circa 100mm.

Per quanto riguarda la temperatura, si nota come il polietilene ad alta densità presenti un'evidente andamento crescente delle rotture, approssimativamente lineare con l'aumento delle temperature.

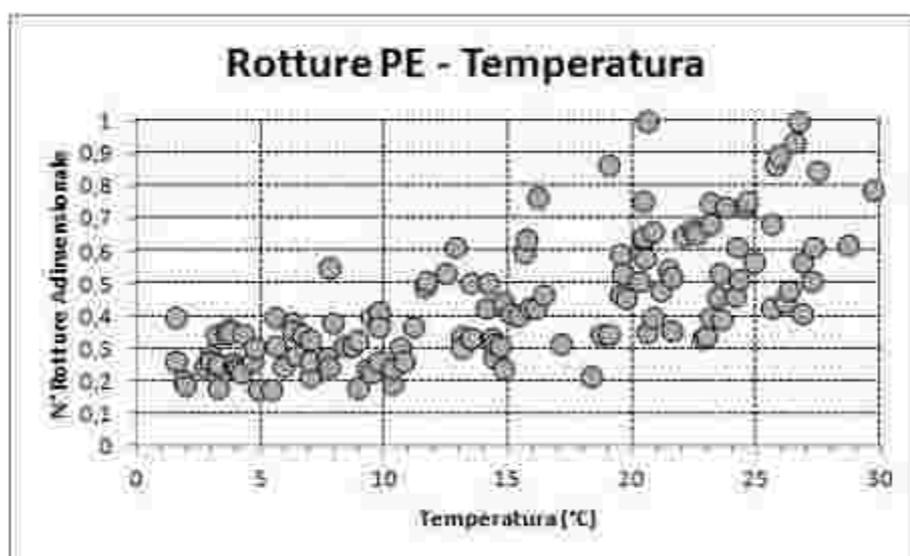


Figura 73 - Rotture del PE in relazione alle temperature medie mensili

Polietilene a bassa densità:

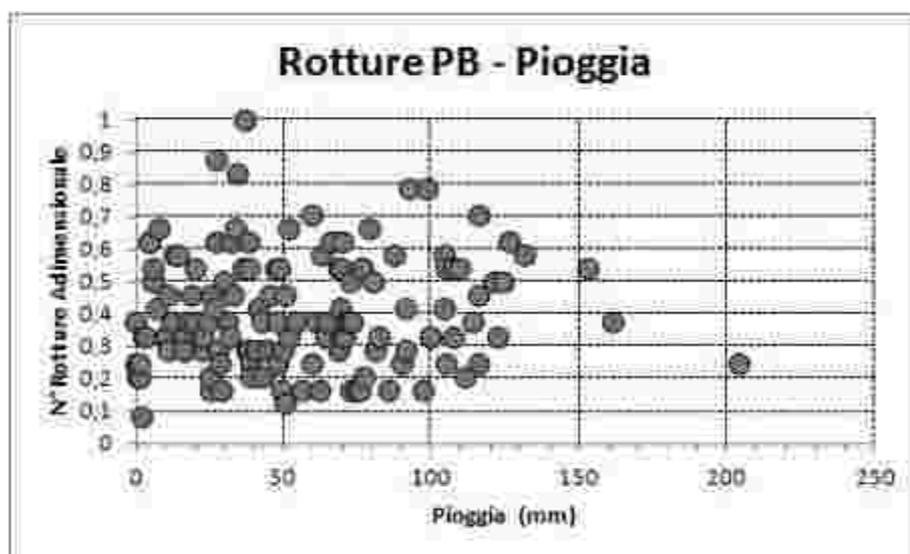


Figura 74 - Rotture del PB in relazione alla pioggia cumulata mensile

Dal grafico sopra si nota che gli eventi di rottura maggiori corrispondano a precipitazioni modeste.

Il grafico che mette in relazione rotture e temperature evidenzia che il numero di rotture maggiori si verifica a temperature medio - alte.

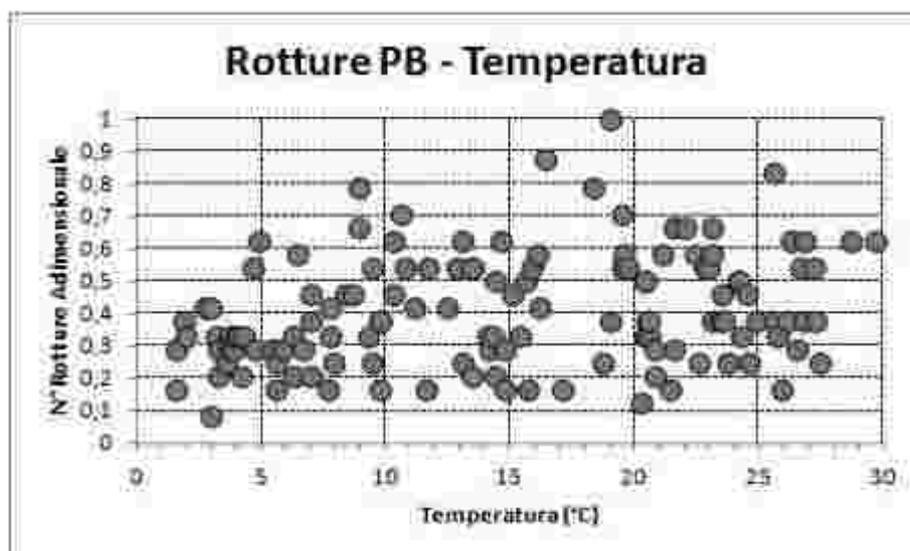


Figura 75 - Rotture del PB in relazione alle temperature medie mensili

Fibrocemento:

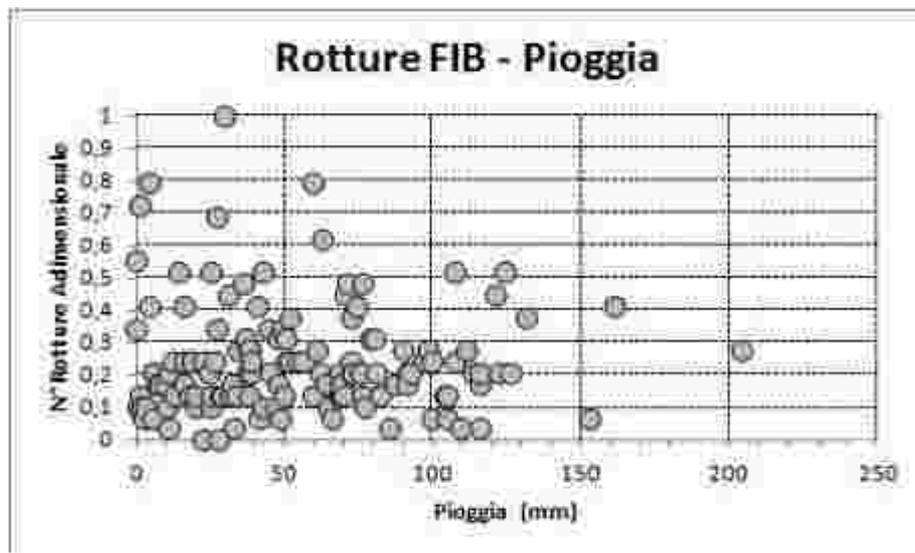


Figura 76 - Rotture del FIB in relazione alla pioggia cumulata mensile

Dal grafico sopra si nota che gli eventi di rottura per materiali in fibrocemento sono maggiori in corrispondenza di bassi livelli di precipitazione.

Dal grafico sotto invece, si nota come le rotture per il fibrocemento aumentino all'aumentare delle temperature, similmente al polietilene a bassa densità

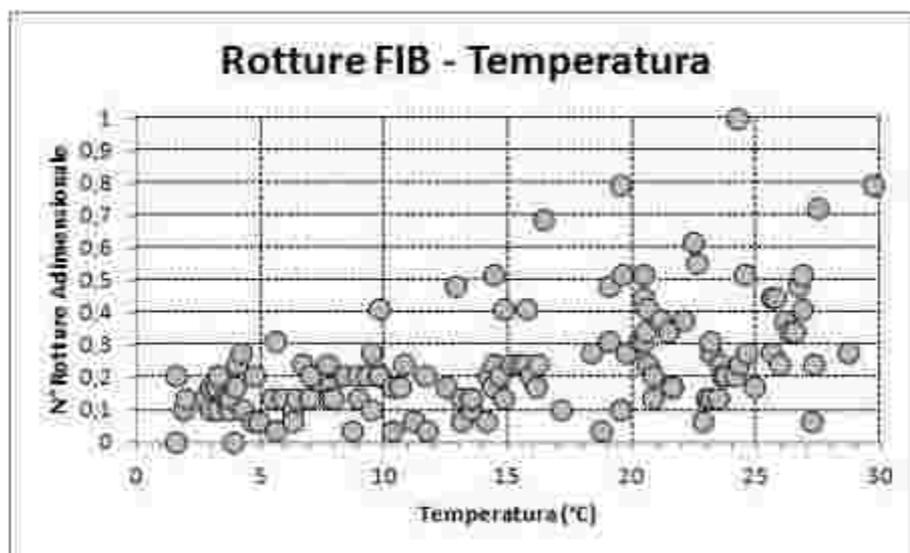


Figura 77 - Rotture del FIB in relazione alle temperature medie mensili

Acciaio:

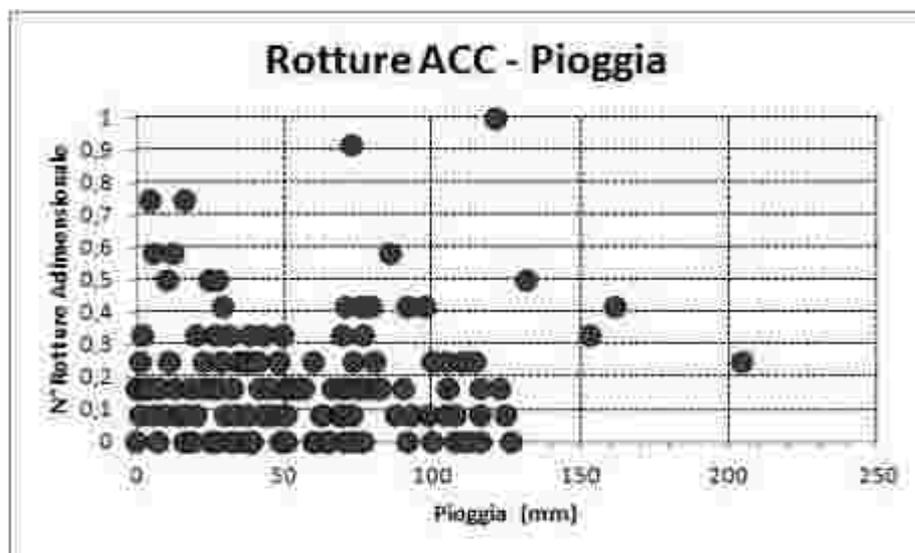


Figura 78 - Rotture dell'ACC in relazione alla pioggia cumulata mensile

Le rotture dell'acciaio in funzione della pioggia risultano più disomogenee che negli altri materiali (probabilmente anche per il minor numero di dati disponibili), ma si presentano comunque maggiori per basse precipitazioni.

Mentre dal grafico sottostante si nota come le rotture per l'acciaio possano essere correlate alla temperatura, con un lieve aumento delle rotture a temperature medio alte.

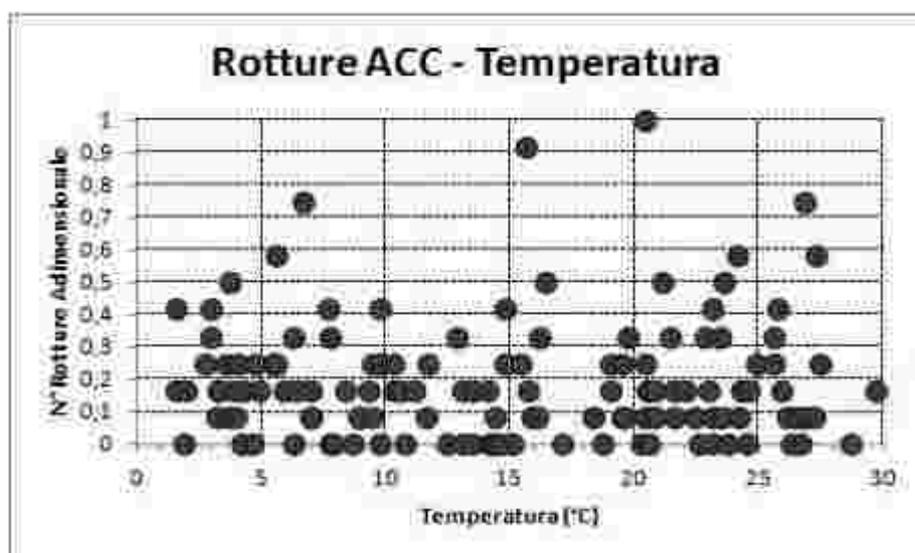


Figura 79 - Rotture dell'ACC in relazione alle temperature medie mensili

Polivinildoruro:

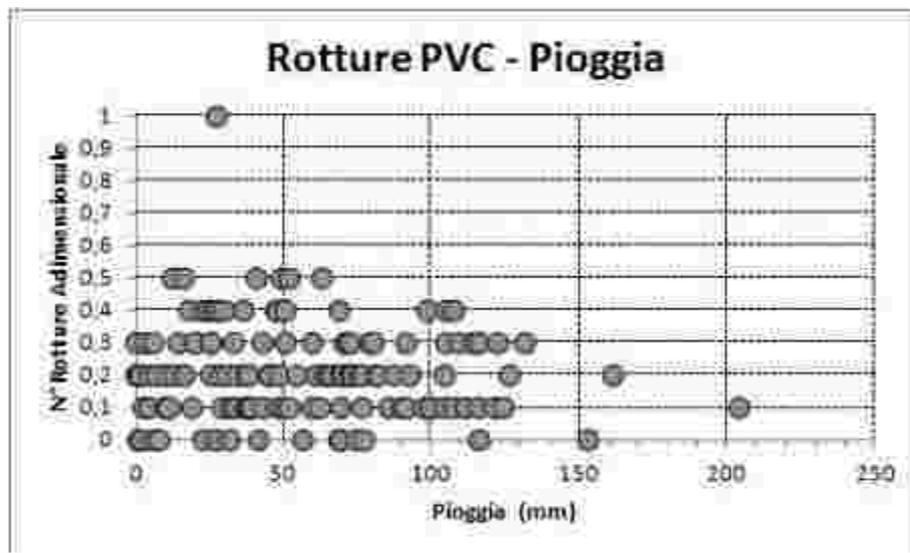


Figura 80 - Rotture del PVC in relazione alla pioggia cumulata mensile

Anche per il PVC, come per gli altri materiali, si nota che a precipitazioni basse corrispondono eventi di rottura maggiori; mentre, per quanto riguarda la relazione rotture-temperature, si osserva un lieve aumento, anche se minimo, delle rotture all'aumentare delle temperature.

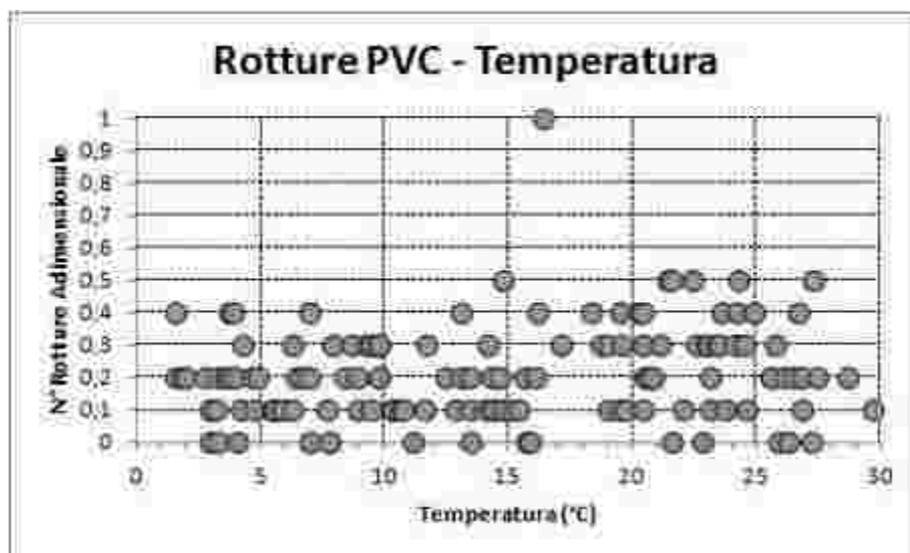


Figura 81 - Rotture del PVC in relazione alle temperature medie mensili

Ghisa:

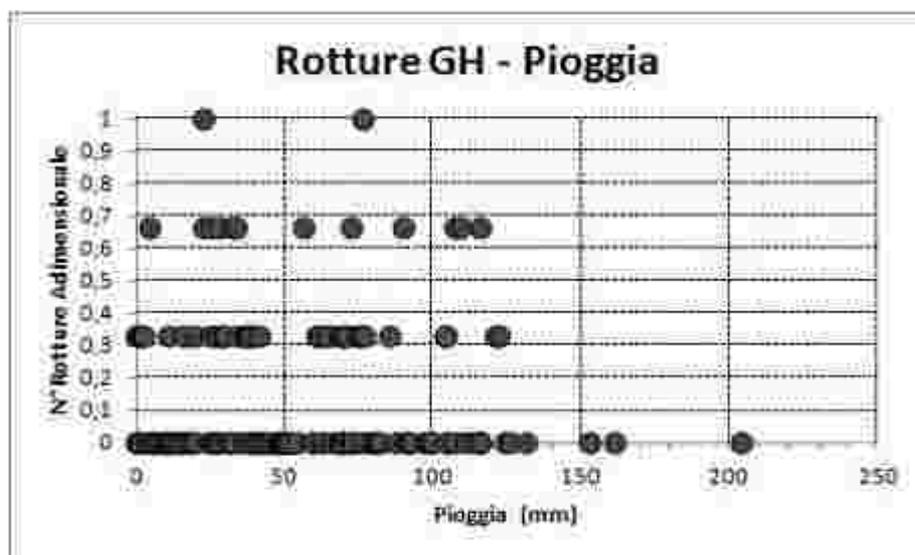


Figura 82 - Rotture della GH in relazione alla pioggia cumulata mensile

Come per gli altri materiali, anche la ghisa presenta un maggior numero di rotture corrispondenti a basse precipitazioni.

Per quanto riguarda la relazione fra temperatura e rotture, diversamente dagli altri materiali si evidenzia un comportamento opposto, con una diminuzione del numero di rotture all'aumentare delle temperature e quindi eventi di rottura maggiori a temperature medio - basse. Purtroppo però, si è limitati nell'analisi a causa della scarsità di dati.

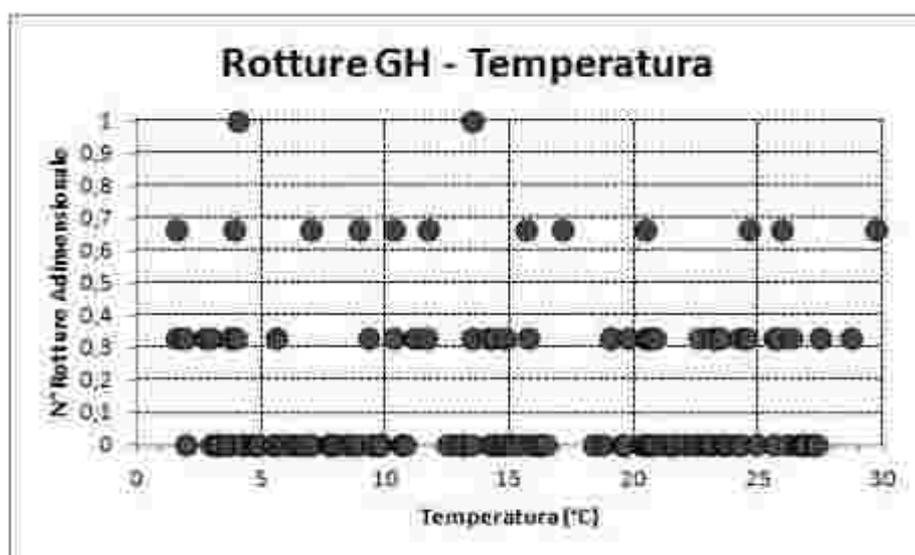


Figura 83 - Rotture della GH in relazione alle temperature medie mensili

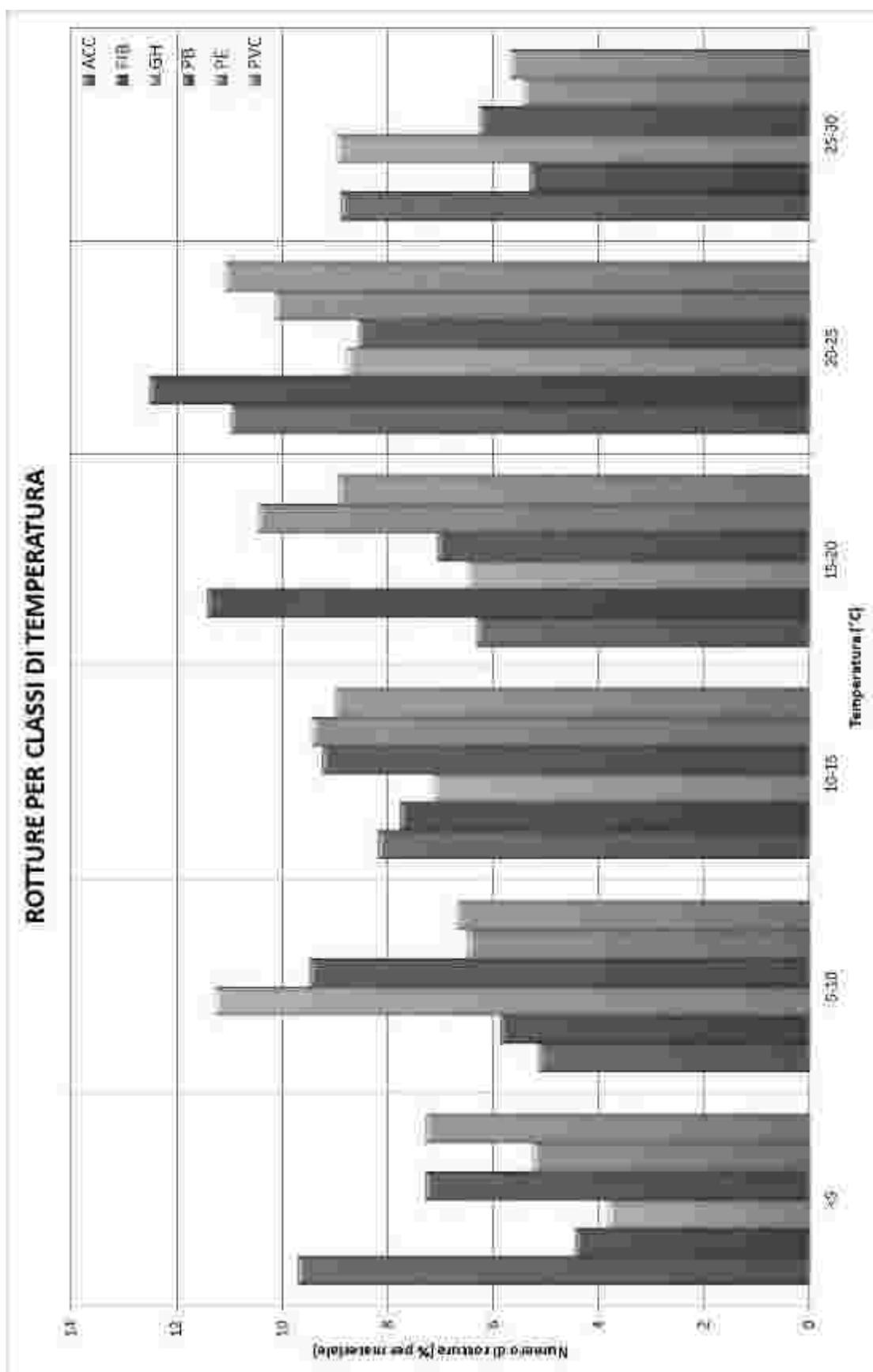


Figura 84 - Rotture in percentuale per ogni materiale aggregate in classi di temperatura

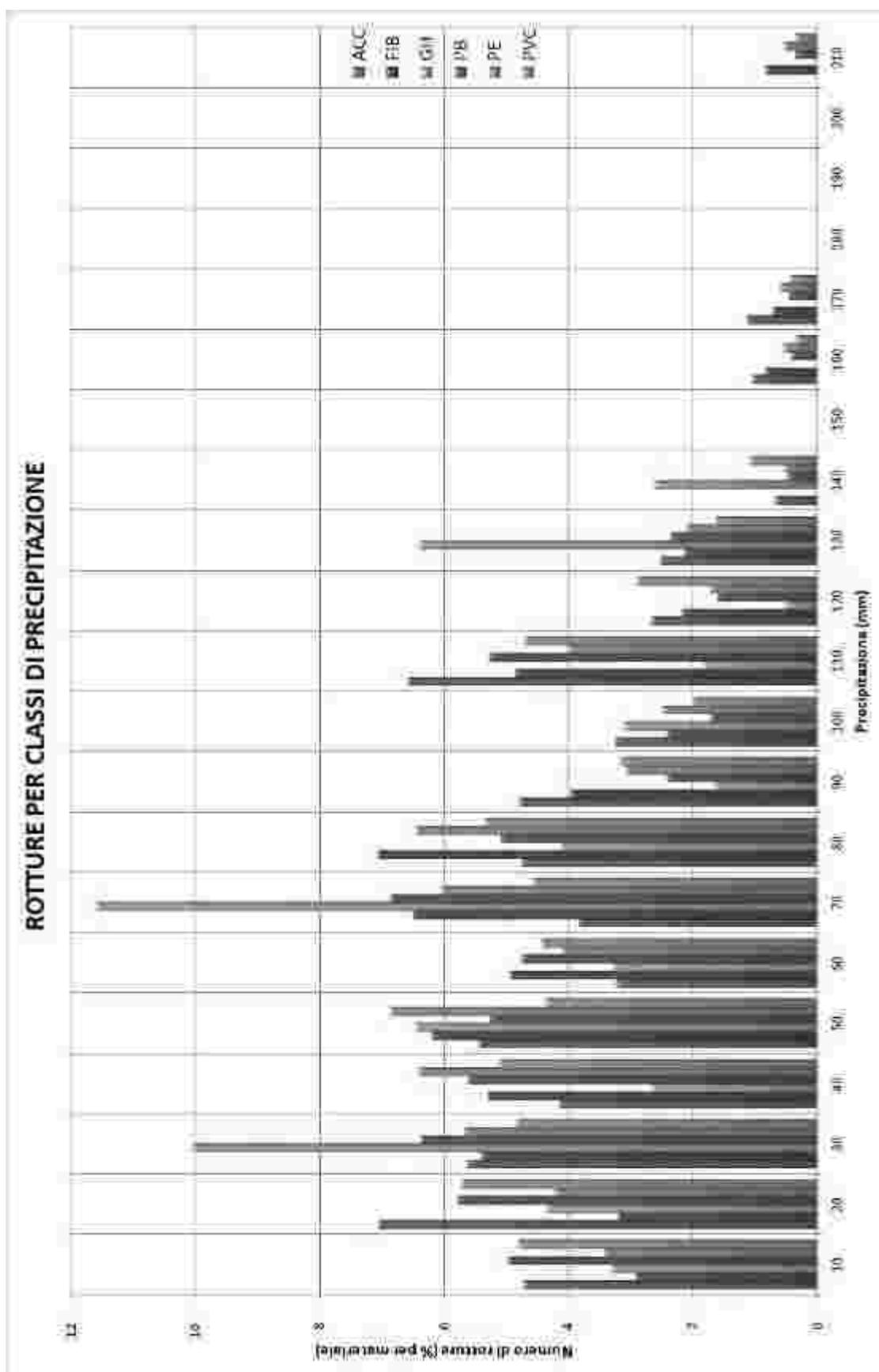


Figura 85 - Rotture in percentuale per ogni materiale aggregate in classi di pioggia cumulata

In generale, per quanto riguarda la relazione fra rotture e precipitazioni, si riscontrano risultati simili per la quasi totalità dei materiali analizzati, con gli eventi di rottura maggiori raggruppati nella parte sinistra del grafico, competente circa ad un range tra 0 e 80 mm di pioggia cumulata.

Anche per quanto riguarda i grafici relativi alla relazione fra rotture e temperature si nota un andamento simile nei vari materiali, ad eccezione della sola ghisa: l'andamento è crescente con la temperatura, con legami a volte ben evidenti. Inizialmente presentano un minimo nell'intervallo 0 – 10°C, per poi aumentare sino ad un massimo in corrispondenza dell'intervallo 20 – 25°C.

Ciò è evidente soprattutto nel polietilene ad alta e bassa densità (PE e PB) che, essendo materiali plastici, risentono in modo maggiore dell'effetto della temperatura, come descritto nel paragrafo 1.3.

CAPITOLO 4

Reti Neurali Artificiali

Al fine di ricercare un valido strumento in grado di ricreare quella che è la possibile relazione tra le rotture e gli agenti climatici come sin qui analizzato, e poter quindi procedere anche ad una successiva stima futura delle rotture stesse, si è scelto di ricorrere all'applicazione di una Rete Neurale Artificiale.

Questa scelta di utilizzare le Reti Neurali è stata indirizzata dall'analisi delle possibili correlazioni tra i dati di rottura, piogge e temperature eseguite nei capitoli precedenti, i quali hanno evidenziato l'esistenza di possibili legami tra i diversi fattori, ma senza far risaltare una loro rappresentazione con i tradizionali metodi di relazione funzionale (legami lineari, proporzionali, ecc.)

L'utilità dei modelli di Rete Neurale sta nel fatto che queste possono essere usate per comprendere una funzione utilizzando solo le osservazioni sui dati. Ciò è particolarmente utile nelle applicazioni in cui la complessità dei dati o la difficoltà di elaborazione rende la progettazione di una tale funzione impraticabile con i normali procedimenti di analisi manuale (e quindi esattamente come nel caso in studio).

Diverse applicazioni e metodologie di approccio sono già state comprovate in questo campo da diversi studiosi, e se ne possono trovare nella letteratura (Raed Jafar, et al., 2010; J. Izquierdo, et al., 2007;) i favorevoli risultati conseguiti, anche in confronto ad altre tecniche di modellazione statistica (H. D. Tran, et al., 2010; Shridhar Yamijala, et al., 2009) o altri programmi di controllo e previsione (B. B. Rajani, Y. Kleiner, 2001).

Le Reti Neurali, per come sono costruite, lavorano in parallelo e sono quindi in grado di trattare molti dati. Si tratta in sostanza di un sofisticato sistema di tipo statistico dotato di una buona immunità al rumore; se alcune unità del sistema dovessero funzionare male, la rete nel suo complesso avrebbe delle riduzioni di prestazioni ma difficilmente andrebbe incontro ad un blocco del sistema. Esse risultano efficaci quando si dispone di dati storici che possono essere trattati con gli algoritmi neurali, e ciò è di particolare

interesse perché permette di estrarre dati e modelli senza effettuare ulteriori prove e sperimentazioni.

Per contro, i modelli prodotti dalle Reti Neurali, anche se molto efficienti, non sono spiegabili in linguaggio simbolico umano: i risultati vanno accettati "così come sono", da cui anche la definizione inglese delle reti neurali come "black box": in altre parole, a differenza di un sistema algoritmico, dove si può esaminare passo-passo il percorso che dall'input genera l'output, una Rete Neurale è in grado di generare un risultato valido, o comunque con una alta probabilità di essere accettabile, ma non è possibile spiegare come e perché tale risultato sia stato generato. Come per qualsiasi algoritmo di modellazione, anche le reti neurali sono efficienti solo se le variabili predittive sono scelte con cura.

Le ANN (Artificial Neural Network) necessitano di una fase di addestramento del sistema che fissi i pesi dei singoli neuroni, e questa fase può richiedere molto tempo. Inoltre, non esistono teoremi o modelli che permettano di definire la rete ottima, quindi la riuscita di una rete dipende molto dall'esperienza del creatore.

Nei paragrafi seguenti, s'illustreranno le principali caratteristiche delle Reti Neurali, con brevi cenni sul loro sviluppo storico, descrivendone brevemente teoria e funzionamento, per poi esporre nei capitoli successivi la metodologia utilizzata ed i risultati conseguiti nell'applicazione di una Rete Neurale con i dati in nostro possesso.

4.1 Premessa

Gli esseri umani elaborano le informazioni relative all'interpretazione di una scena o alla comprensione di un discorso attraverso vari fattori quali, per esempio, la situazione nella quale si svolge o le sfumature del tono vocale; questi elementi devono essere valutati simultaneamente prima che il cervello possa realmente "capire" la scena o il discorso stessi.

I convenzionali sistemi di calcolo non sono adatti a trattare una tale moltitudine di fattori mutuamente interagenti, soprattutto se le informazioni ricevute sono specificate in modo estremamente preciso.

I modelli d'elaborazione chiamati Reti Neurali, Reti Neuronali, Modelli Connessionisti o Sistemi Neuromorfici, cercano proprio di risolvere tale limite attraverso il tentativo di riprodurre le strutture nervose dei tessuti cerebrali su strumenti di calcolo.

Tale disciplina, tuttavia, partendo da questi presupposti, sta gradualmente progredendo con l'individuazione di modelli matematici che hanno sempre meno a che fare con la biologia, la psicologia o la matematica.

A tutt'oggi, infatti, con il termine Reti Neurali Artificiali s'identifica una tecnologia d'elaborazione dell'informazione complementare all'informatica classica.

In particolare, i modelli neurali sono composti di un grande numero di "semplici elementi d'elaborazione, detti unità, ognuno dei quali interagisce con gli altri per mezzo di connessioni eccitatorie o inibitorie. Il grande numero di unità, congiunto al fatto che l'interconnessione è essenzialmente locale, introduce una notevole tolleranza di guasti e l'alterazione del grado d'interconnessione, come la modifica del peso associato ad una connessione, permette l'adattamento a nuove situazioni."

4.2 Fondamenti

4.2.1 Fondamenti biologici

Le reti neurali, dunque, sono nate con lo scopo di realizzare delle memorie associative con caratteristiche molto simili alle memorie degli esseri umani, vale a dire poco precise e poco capienti ma molto elastiche, robuste ed adattabili.

Per capire l'evoluzione di tali modelli, è dunque necessario studiare il funzionamento del cervello umano.

Esso ha circa 10 bilioni di cellule nervose (neuroni), connesse tra loro, nel sistema nervoso periferico o nel sistema nervoso centrale in vario modo: il numero stimato d'interconnessioni è dell'ordine del milione di miliardi. Queste complesse organizzazioni di cellule nervose, hanno il compito di riconoscere le configurazioni assunte dall'ambiente esterno, memorizzarle e reagire agli stimoli provenienti dallo stesso.

L'elemento principale del sistema nervoso, il neurone, è composto da tre parti principali:

- il Soma: il corpo cellulare;
- l'Assone: unica linea di uscita del neurone, ma che si dirama in migliaia di rami;
- il Dendrite: linea d'entrata del neurone, che riceve segnali in ingresso da altri assoni tramite le sinapsi.

Il punto di contatto tra due neuroni si chiama sinapsi: essa è una leggera intercapedine tra assone e dendrite, in cui il segnale proveniente dal primo si trasmette al secondo.

La comunicazione tra i neuroni spesso comporta un processo elettrochimico. L'interfaccia attraverso la quale essi interagiscono con i neuroni circostanti è costituita, come precedentemente indicato, da diversi dendriti (ingresso della connessione), che sono collegati tramite sinapsi ad altri neuroni, ed un assone (output della connessione). Se la somma dei segnali in ingresso supera una certa soglia, il neurone invia un

potenziale d'azione (AP "*Axon potential*" in inglese) presso l'assone e trasmette questo segnale elettrico lungo l'assone.

Quando un neurone è attivato, manda un impulso elettrochimico ai neuroni cui è connesso; l'operazione si ripete per ogni neurone e nell'intervallo di pochi centesimi di secondo sono coinvolte intere regioni del cervello. Lo spessore della sinapsi è dell'ordine di pochi nanometri (nm) e può variare nel tempo, provocando quindi un rafforzamento od un indebolimento della connessione tra due neuroni.

L'insieme dei valori di attivazione di tutte le cellule nervose rappresenta il contenuto informativo del cervello umano, mentre l'informazione equivale al flusso dei segnali fra i vari neuroni che si eccitano o si inibiscono a vicenda. Da ciò, la memoria è costituita dall'insieme delle sinapsi che formano addensamenti e rarefazioni nella rete neurale.

Nel cervello, quindi, l'informazione è distribuita su una moltitudine di unità elementari, di per sé semplici ma operanti in parallelo, e non c'è una netta distinzione tra memoria ed unità di elaborazione.

4.2.2 Fondamenti matematico/informatici

Una Rete Neurale Artificiale, normalmente chiamata solo "Rete Neurale" (NN "*Neural Network*"), è un modello matematico/informatico di calcolo basato sulle reti neurali biologiche. Tale modello è costituito da un gruppo di interconnessioni di informazioni costituite da neuroni artificiali e processi che utilizzano un approccio di connessionismo di calcolo. Nella maggior parte dei casi, una Rete Neurale Artificiale è un sistema adattivo che cambia la sua struttura basata su informazioni esterne o interne che scorrono attraverso la rete durante la fase di apprendimento.

In termini pratici, le reti neurali sono strutture non-lineari di dati statistici organizzate come strumenti di modellazione. Esse possono essere utilizzate per simulare relazioni

complesse tra ingressi e uscite che altre funzioni analitiche non riescono a rappresentare.

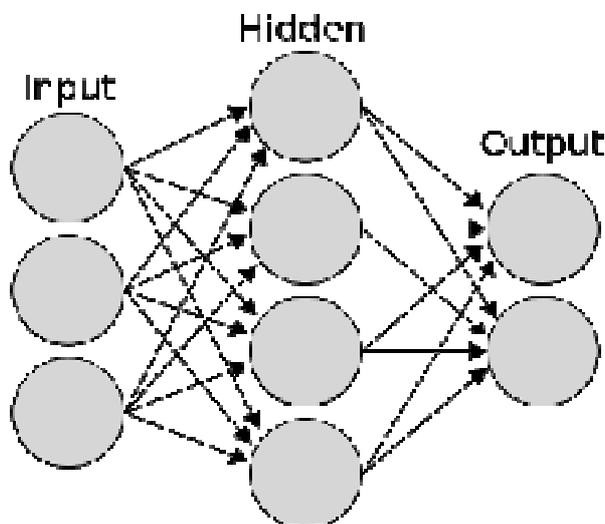


Figura 86 – Schematizzazione di una Rete Neurale Artificiale (da it.wikipedia.org)

Una rete neurale artificiale riceve segnali esterni su uno strato di nodi (unità di elaborazione) d'ingresso, ciascuno dei quali è collegato con numerosi nodi interni, organizzati in più livelli, come rappresentato dalla Figura 74. Ogni nodo elabora i segnali ricevuti e trasmette il risultato a nodi successivi.

Il neurone artificiale (detto anche formale) è l'unità fondamentale di una rete neurale. Esso è una schematizzazione del neurone biologico, nella quale le proprietà funzionali sono descritte da formule matematiche, senza preoccuparsi dei fenomeni elettrici, chimici e biologici che avvengono nella realtà.

Lo stato di eccitazione di un neurone è rappresentato da un valore di attivazione (p) espresso come numero reale. Il meccanismo di scarica dell'attivazione lungo l'assone, sarà rappresentato da una funzione di trasferimento ($f(x)$), che darà il valore dell'output (a) del neurone artificiale al valore dell'attivazione.

La sinapsi sarà chiamata peso (w), nel senso che quando due neuroni sono in stretto contatto si afferma che la loro connessione ha un forte peso.

Il neurone, dunque, può essere così schematizzato:

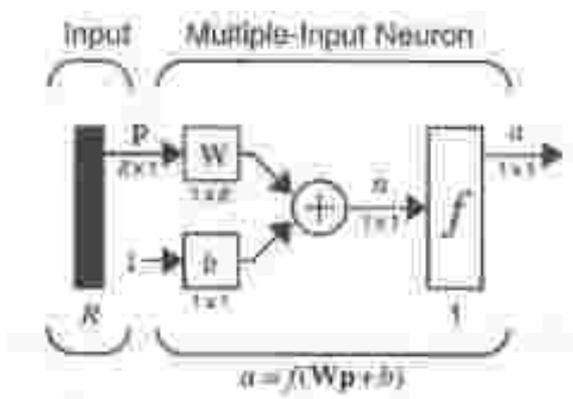


Figura 87 – Neurone formale (da Michele Gaier, 2001)

Come si può vedere dalla figura, il neurone ha R input moltiplicati per lo scalare $w_{i,j}$ (peso). È inoltre aggiunto un ulteriore input, uno, moltiplicato per un peso b noto come *bias*, il cui effetto è quello di controllare la traslazione della soglia di attivazione rispetto all'origine dei segnali.

I vari input connessi con il neurone formale concorrono a formare il suo stato di attivazione (n), che sarà dunque calcolato come sommatoria pesata tra i valori di attivazione (p) ed i pesi ($w_{i,j}$):

$$n = w_{1,1} p_1 + w_{1,2} p_2 + \dots + w_{1,R} p_R + b.$$

Questa espressione può essere riscritta in forma matriciale:

$$n = \mathbf{Wp} + b$$

Infine, il valore dell'output del neurone formale sarà dato dall'applicazione della funzione di trasferimento:

$$a = f(\mathbf{Wp} + b).$$

La funzione di trasferimento, di cui ne esistono diverse, ha lo scopo di “trattenere” l’attivazione all’interno dell’unità fino ad un certo livello di soglia, oltre il quale il neurone formale si “scarica”.

Esistono diversi modelli e strutture di Reti Neurali, che possono essere riassunti nell’elenco che segue:

- Reti *non ricorrenti*: in cui le connessioni vanno in un solo senso, dall’input all’output. È il contrario di reti *cicliche*.
- Reti *totalmente connesse*: in cui ogni unità è connessa con tutte le altre (generalmente esclusa se stessa). Si noti che una connessione fra due unità con peso nullo, $w_{i,j} = 0$, è equivalente all’assenza di connessione. Per comodità di calcolo si utilizzano spesso reti totalmente connesse in cui la topologia è definita azzerando alcuni pesi.
- Reti a *livelli*: nelle quali le unità sono organizzate in insiemi separati e disgiunti di cui generalmente uno è il livello di input, uno di output e gli altri livelli sono chiamati *nascosti* o *intermedi*.
- Reti *simmetriche*: in cui la connessione fra due qualsiasi unità è uguale in entrambi i sensi, $w_{i,j} = w_{j,i}$.
- Reti *autoassociative*: in cui le unità di input coincidono con quelle di output. Il compito di queste reti è di ricevere uno stimolo dall’esterno e di farlo evolvere, fornendo come risultato una versione modificata dell’input ricevuto.
- Reti *stocastiche*: in cui vi è una certa probabilità che un’unità non sia attivata anche quando riceve stimoli.
- Reti *asincrone*: in cui le unità non sono attivate tutte contemporaneamente, ma una alla volta secondo un ordine casuale.

4.3 Storia

Lo studio delle Reti Neurali inizia nel 1943, con la pubblicazione da parte di W. S. McCulloch e Walter Pitts del (poi) famoso articolo “*A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*”, il quale schematizza un primo modello formale di neurone. Un numero opportuno di tali elementi, connessi in modo da formare una rete, è in grado di calcolare semplici funzioni booleane.

Nel 1949, Donald Hebb ipotizzò nel libro “*The organization of behavior*” l’apprendimento biologico come fenomeno sinaptico: quando una cellula A partecipa ripetutamente e persistentemente ad attivare una cellula B, allora l’intensità con cui A attiva B viene incrementata. Da ciò si arrivò alla formulazione matematica oggi nota come legge di Hebb.

Nel 1958, J. Von Neumann nella sua opera “*The computer and the brain*”, esaminò le soluzioni proposte dai precedenti autori sottolineando la scarsa precisione che queste strutture possedevano per potere svolgere operazioni complesse.

Nonostante i limiti suddetti, cominciò comunque a crescere l’entusiasmo verso questi modelli che sembravano in grado non solo di svolgere svariate funzioni, ma anche di imparare da soli il compito loro richiesto.

Infatti, nello stesso anno F. Rosenblatt, nel libro “*Psychological review*”, ideò ed introdusse il primo schema di rete neurale, detto *Perceptron* (perceptrone), antesignano delle attuali Reti Neurali. Esso rappresentava un sistema nervoso ipotetico, progettato per illustrare alcune proprietà fondamentali dei sistemi intelligenti, senza prestare attenzione a dettagli e meccanismi tipici di organismi particolari, e costituì un progresso decisivo al modello binario di McCulloch e Pitts in quanto i pesi sinaptici erano variabili, e quindi il percettore è in grado di “apprendere”. Esso dimostrò inoltre la robustezza e la flessibilità tipica dei sistemi biologici: a differenza dei computer, un guasto o un errore nell’input non comprometteva l’intera elaborazione ma provocava solo un lieve degrado delle prestazioni.

L'opera di Rosenblatt stimola una quantità di studi e ricerche che dura per un decennio, e suscita un vivo interesse e notevoli aspettative nella comunità scientifica, destinate tuttavia ad essere notevolmente ridimensionate nel 1969, quando Marvin Minsky e Seymour A. Papert, nell'opera "*An introduction to computational geometr*", mostrano i limiti operativi delle semplici reti a due strati basate sul perceptrone e dimostrano l'impossibilità di risolvere per questa via molte classi di problemi, ossia tutti quelli non caratterizzati da separabilità lineare delle soluzioni (funzione *or esclusivo* XOR).

Di conseguenza, a causa di queste limitazioni, ad un periodo di euforia per i primi risultati della cibernetica (come veniva chiamata negli anni sessanta), segue un periodo di diffidenza durante il quale tutte le ricerche in questo campo non ricevono più alcun finanziamento dal governo degli Stati Uniti d'America; le ricerche sulle reti tendono a ristagnare per oltre un decennio e l'entusiasmo iniziale risulta fortemente ridimensionato.

Il contesto matematico per addestrare le reti MLP (*Multi-Layers Perceptron*, ossia perceptrone multistrato) fu stabilito dal matematico americano Paul Werbos nella sua tesi di dottorato del 1974. Non fu dato molto peso al suo lavoro, tanto fu forte la confutazione dimostrata da Minsky e Papert anni prima, e solo l'intervento di J. J. Hopfield nel 1982 si oppose in modo diretto alla confutazione di Minsky, riaprendo così degli spiragli per la ricerca in questo campo.

Ma solo alla fine degli anni ottanta, gli studi di David E. Rumelhart, G. Hinton e R. J. Williams risvegliarono l'interesse sulle Reti Neurali con il cosiddetto algoritmo di retropropagazione dell'errore (*error backpropagation*), più precisamente proposto nel 1986, il quale modifica sistematicamente i pesi delle connessioni tra i nodi, così che la risposta della rete si avvicini sempre di più a quella desiderata.

Tale lavoro fu prodotto riprendendo il modello creato da Werbos. L'algoritmo di *backpropagation* (BP), tra i metodi più noti ed efficaci per l'addestramento di una rete, è una tecnica d'apprendimento tramite esempi, costituente una generalizzazione dell'algoritmo d'apprendimento per il perceptrone sviluppato da Rosenblatt nei primi anni '60.

La potenzialità deriva dall'utilizzo di neuroni "nascosti", che imparano dai propri errori. In altre parole, i due studiosi dimostrarono l'esistenza di reti neurali in grado di scoprire nuove conoscenze anziché assimilare quelle altrui. L'architettura di queste reti, dunque, è di particolare interesse perché sembra rispecchiare fedelmente le reti nervose biologiche.

Tale algoritmo consente di superare le limitazioni del perceptrone e di risolvere il problema della separabilità non lineare (e quindi di calcolare la funzione XOR), segnando il definitivo rilancio delle reti neurali, come testimoniato anche dall'ampia varietà di applicazioni commerciali: attualmente la BP rappresenta un algoritmo di largo uso in molti campi applicativi.

4.4 Teoria e paradigmi di apprendimento

Il concetto di Rete Neurale si pone perché una funzione $f(x)$ è definita come una composizione di altre funzioni $g(x)$, che possono a loro volta essere ulteriormente definite come composizione di altre funzioni. Questo può essere convenientemente rappresentato come una struttura di reti, con le frecce raffiguranti le dipendenze tra variabili. Una rappresentazione ampiamente utilizzata è la somma ponderata non lineare:

$$f(x) = k\left(\sum_i w_i g_i(x)\right)$$

dove k è una funzione predefinita.

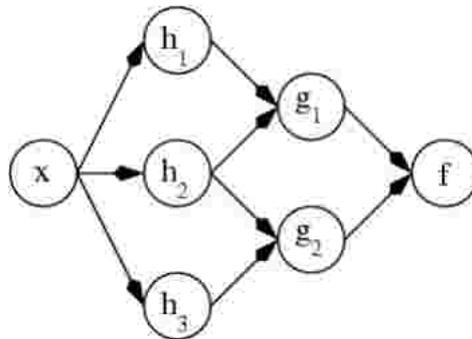


Figura 88 - Grafico di dipendenza di una rete neurale (da it.wikipedia.org)

La figura esemplifica una decomposizione della funzione f , con dipendenze tra le variabili indicate dalle frecce. Queste possono essere interpretate in due modi:

1. Il primo punto di vista è la vista funzionale: l'ingresso X è trasformato in un vettore a 3-dimensioni, che viene poi trasformato in un vettore bi-dimensionale g , che è poi finalmente trasformato in f . Questo punto di vista è più comunemente riscontrato nel contesto dell'ottimizzazione.
2. Il secondo punto di vista è la vista probabilistica: la variabile casuale $F = f(G)$ dipende dalla variabile casuale $G = g(H)$, che dipende da $H = h(X)$, che dipende a sua volta dalla variabile casuale X . Questo punto di vista è più comunemente riscontrato nel contesto dei modelli grafici.

I due punti di vista sono in gran parte equivalenti. In entrambi i casi, per questa particolare architettura di rete, i componenti dei singoli strati sono indipendenti l'uno dall'altro (ad esempio, le componenti di g sono indipendenti l'uno dall'altro, dato il loro ingresso h). Questo, naturalmente, permette un certo grado di parallelismo nella costruzione del sistema.

Reti, come ad esempio quelle precedenti, vengono comunemente chiamate *feedforward*, perché il loro è un grafico aciclico diretto. Reti con cicli al loro interno, sono comunemente chiamate *reti ricorrenti* e caratterizzate da una dipendenza temporale implicita che non è possibile dimostrare. Questo significa in pratica che il valore di f ad un certo punto nel tempo t dipende dai valori di f al tempo zero o su uno o più altri punti temporali.

Tuttavia, la funzionalità più interessante di queste funzioni, ciò che ha attirato l'interesse e lo studio per la maggior parte delle reti neurali, è la possibilità di apprendimento, che in pratica significa la seguente:

- dato un compito specifico da risolvere, ed una classe di funzioni F , apprendimento significa impiegare un set di osservazioni, al fine di trovare $f^* \in F$ che risolve il problema in modo ottimale.

Ciò comporta la definizione di una funzione di costo $C : F \rightarrow \mathfrak{R}$ tale che, per la soluzione ottimale $C(f^*) \leq C(f) \forall f \in F$ nessuna soluzione ha un costo inferiore al costo della soluzione ottimale. La funzione di costo C è un concetto importante nell'apprendimento, poiché si tratta di una misura di quanto è lontana da noi la soluzione ottimale del problema che vogliamo risolvere. Quindi vi sono una serie di algoritmi di apprendimento che cercano nello spazio delle soluzioni al fine di trovare una funzione che abbia il minor costo possibile. Per applicazioni in cui la soluzione dipende da alcuni dati, il costo deve essere necessariamente funzione delle osservazioni.

4.4.1 Paradigmi di apprendimento

Vi sono tre grandi paradigmi di apprendimento, ciascuno corrispondente ad un particolare compito astratto di apprendimento. Si tratta dell'apprendimento *supervisionato*, apprendimento *non supervisionato* e l'apprendimento *per rinforzo*. Di solito un tipo di architettura di rete può essere impiegato in uno qualsiasi di tali compiti.

- un apprendimento *supervisionato* (*supervised learning*), qualora si disponga di un insieme di dati per l'addestramento (o *training set*), comprendente esempi tipici d'ingressi con le relative uscite loro corrispondenti: in tal modo la rete può imparare ad inferire la relazione che li lega. Successivamente, la rete è addestrata mediante un opportuno algoritmo (tipicamente, la *backpropagation* che è appunto un algoritmo d'apprendimento supervisionato), il quale usa tali dati allo scopo di modificare i pesi ed altri parametri della rete stessa in modo tale da minimizzare l'errore di previsione relativo all'insieme d'addestramento. Se l'addestramento ha successo, la rete impara a riconoscere la relazione incognita che lega le variabili d'ingresso a quelle d'uscita, ed è quindi in grado di fare previsioni anche laddove l'uscita non è nota a priori. Per fare ciò, la rete deve essere infine dotata di un'adeguata capacità di generalizzazione, con riferimento a casi ad essa ignoti. Ciò consente di risolvere problemi di regressione o classificazione.
- un apprendimento *non supervisionato* (*unsupervised learning*), è basato su algoritmi d'addestramento che modificano i pesi della rete facendo esclusivamente riferimento ad un insieme di dati che include le sole variabili d'ingresso. Tali algoritmi tentano di raggruppare i dati d'ingresso e di individuare pertanto degli opportuni *cluster* rappresentativi dei dati stessi, facendo uso tipicamente di metodi topologici o probabilistici. L'apprendimento non supervisionato è anche impiegato per sviluppare tecniche di compressione dei dati.

- un apprendimento *per rinforzo* (*reinforcement learning*), avviene attraverso un opportuno algoritmo che si prefigge lo scopo di individuare un certo modo operandi a partire da un processo d'osservazione dell'ambiente esterno; ogni azione ha un impatto sull'ambiente, e l'ambiente produce una retroazione che guida l'algoritmo stesso nel processo d'apprendimento. Tale classe di problemi postula un agente, dotato di capacità di percezione, che esplora un ambiente nel quale intraprende una serie di azioni. L'ambiente stesso fornisce in risposta un incentivo o un disincentivo, secondo i casi. L'apprendimento con rinforzo differisce da quello supervisionato poiché non sono mai presentate delle coppie *input-output* di esempi noti, né si procede alla correzione esplicita di azioni subottimali.

Diverso è invece l'algoritmo di apprendimento *Hebbiano*, che si basa sul semplice principio che se due neuroni si attivano contemporaneamente, la loro interconnessione deve essere rafforzata. La regola di Hebb è la seguente: l'efficacia di una particolare sinapsi cambia se e solo se c'è un'intensa attività simultanea dei due neuroni, con un'alta trasmissione di input nella sinapsi in questione.

In questo modo le connessioni possono solo irrobustirsi e tali si considerano quando le unità presinaptica e postsinaptica sono d'accordo, altrimenti s'indeboliscono.

4.5 Funzionamento

Le Reti Neurali si basano principalmente sulla simulazione di neuroni artificiali opportunamente collegati. Il modello rappresentato nella figura sotto è quello proposto da McCulloch e Pitts.

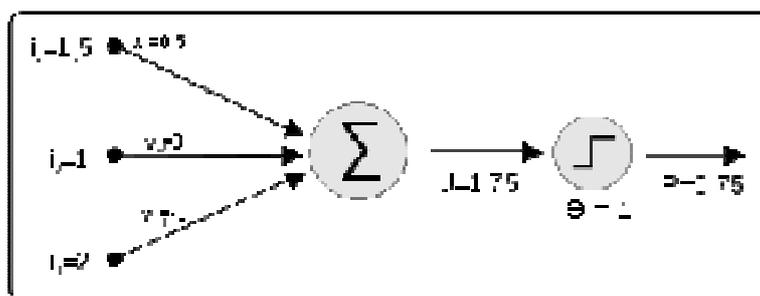


Figura 89 - Schema del neurone artificiale proposto da McCulloch e Pitts
(da it.wikipedia.org)

I suddetti neuroni ricevono in ingresso degli stimoli e li elaborano. L'elaborazione può essere anche molto sofisticata, ma in un caso semplice si può pensare che i singoli ingressi vengano moltiplicati per un opportuno valore detto peso; il risultato delle moltiplicazioni viene sommato e se la somma supera una certa soglia il neurone si attiva attivando la sua uscita.

Il peso indica l'efficacia sinaptica della linea di ingresso e serve a quantificarne l'importanza: un ingresso molto importante avrà un peso elevato, mentre un ingresso poco utile all'elaborazione avrà un peso inferiore. Si può pensare che, se due neuroni comunicano fra loro utilizzando maggiormente alcune connessioni, allora tali connessioni avranno un peso maggiore, fino a che non si creeranno delle connessioni tra l'ingresso e l'uscita della rete che sfruttano "percorsi preferenziali". Tuttavia, è sbagliato pensare che la rete finisca col produrre un unico percorso di connessione: tutte le combinazioni, infatti, avranno un certo peso e quindi contribuiscono al collegamento ingresso/uscita.

Il modello nella figura seguente rappresenta una classica rete neurale a più layer pienamente connessa.

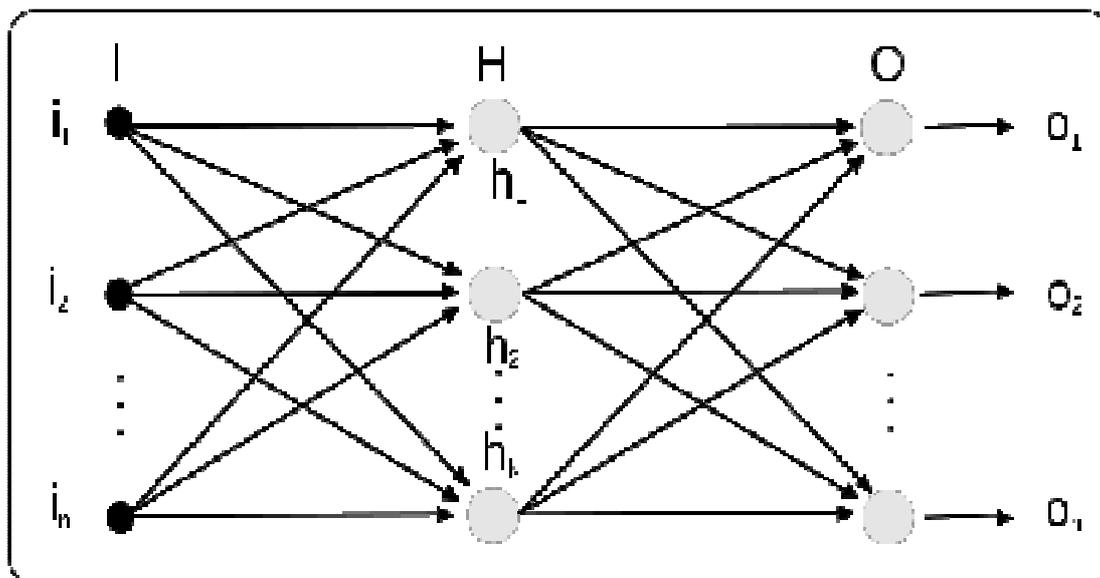


Figura 90 - Schema dei collegamenti di una classica Rete Neurale multilayer pienamente connessa (da it.wikipedia.org)

I singoli neuroni vengono collegati alla schiera di neuroni successivi, in modo da formare una rete di neuroni. Normalmente una rete è formata da almeno tre strati. Nel primo abbiamo gli ingressi (I): questo strato si preoccupa di trattare gli ingressi in modo da adeguarli alle richieste dei neuroni; se i segnali in ingresso sono già trattati, può anche non esserci. Il secondo strato è quello nascosto (H, hidden): si preoccupa dell'elaborazione vera e propria e può essere composto anche da più colonne di neuroni (quindi più strati nascosti, *hidden layer*). Il terzo strato è quello di uscita (O): esso si preoccupa di raccogliere i risultati ed adattarli alle richieste del blocco successivo della rete neurale. Queste reti possono essere anche molto complesse e coinvolgere migliaia di neuroni e decine di migliaia di connessioni.

Per costruire la struttura di una rete neurale multistrato, si possono inserire N strati hidden; vi sono però alcune dimostrazioni che mostrano che con 1 o 2 strati hidden si ottiene una stessa efficace generalizzazione da una rete rispetto a quella con più strati. L'efficacia di generalizzare di una rete neurale multistrato dipende ovviamente dall'addestramento che ha ricevuto e dal fatto di essere riuscita o meno ad entrare in un minimo locale buono.

4.5.1 Algoritmo di backpropagation

L'algoritmo di backpropagation è utilizzato nell'apprendimento con supervisione. Esso permette di modificare i pesi delle connessioni in modo tale che si minimizzi una certa funzione errore, che chiameremo in generale E .

Tale funzione dipende dal vettore h-esimo di output \overline{out}^h , restituito dalla rete dato il vettore h-esimo di ingresso \overline{x}^h e dal vettore h-esimo di output \overline{y}^h che noi desideriamo (che fa parte del training set). Il training set è dunque un insieme di N coppie di vettori $(\overline{x}^h, \overline{y}^h)$, con $h = 1, \dots, N$.

La funzione errore che si deve minimizzare si può scrivere come:

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_h \sum_k (out_k^h - y_k^h)^2$$

dove l'indice k rappresenta il valore corrispondente al k-esimo neurone di output.

$E(w)$ è una funzione dipendente dai pesi (che in generale variano nel tempo) e per minimizzarla si può usare l'algoritmo della discesa del gradiente (*gradient-descent*). L'algoritmo parte da un punto generico $\overline{x}(0)$ e calcola il gradiente $\nabla f(\overline{x}^0)$. Il gradiente dà la direzione in cui muoversi, lungo la quale si ha il massimo incremento (o decremento, se considero $-\nabla$). Definita la direzione, ci si muove di una distanza η predefinita a priori e si trova un nuovo punto $\overline{x}(1)$ sul quale è calcolato nuovamente il gradiente. Si continua iterativamente finché il gradiente non è nullo.

L'algoritmo di backpropagation può essere diviso in due passi:

- Forward pass: l'input dato alla rete è propagato di livello in livello al successivo (il flusso di informazioni si sposta in avanti, cioè forward). Si calcola dunque l'errore commesso $E(w)$.
- Backward pass: L'errore fatto dalla rete è propagato all'indietro (backward) e i pesi sono aggiornati in modo appropriato.

Generalmente, in una rete multiplayer per misurarne la performance, si utilizza l'errore quadratico medio (in inglese $MSE = Mean Squared Error$): Se ogni possibile risultato ha la stessa probabilità di verificarsi, il MSE è proporzionale alla somma dei quadrati degli errori dati dalla differenza tra il dato reale, indicato come x_i , e il risultato finale dell'elaborazione, indicato da \hat{x}_i .

La formula generale per calcolarne il valore è la seguente:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}$$

4.5.2 Varianti alla backpropagation

L'algoritmo della backpropagation ha rappresentato la maggiore innovazione nell'ambito della ricerca sulle reti neurali. Ciò nonostante, l'algoritmo base può risultare troppo lento per alcune applicazioni pratiche.

In base a quanto detto precedentemente, la backpropagation è il più semplice algoritmo di minimizzazione nel calcolo del minimo della funzione obiettivo, e presenta quindi procedimenti di calcolo superati (che si traducono in tempi prolungati).

La ricerca di algoritmi più veloci si è nettamente divisa in due categorie:

- la prima si ricollega allo sviluppo di teorie *euristiche*, che si basano sullo studio dei diversi risultati dell'algoritmo standard della backpropagation. Tali teorie includono idee come la variazione del *learning rate* e l'utilizzo del momento;
- la seconda categoria di ricerca si è concentrata sulle tecniche di calcolo numerico per la ricerca del minimo. Ricordiamo tra queste il metodo di Newton, con tutte le sue varianti (ad esempio Gauss-Newton), quello del gradiente coniugato e l'algoritmo di Levenberg-Marquardt (diretta variazione di quello di Newton ed utilizzato per minimizzare funzioni date da somme di altre funzioni non lineari).

4.6 Applicazioni e proprietà

Le Reti Neurali sono una tecnologia che trova applicazione in numerosi campi: essa viene infatti definita da molti autori “tecnologia orizzontale”, perché non indaga nella specificità del problema, ma riconosce i legami che regolano processi anche molto complessi e possono essere usate per comprendere una funzione utilizzando solo le osservazioni sui dati.

Le Reti Neurali naturalmente non devono essere intese come un’alternativa al PC perché nei problemi deterministici il personal non è superato; i punti deboli, infatti, delle reti neurali sono:

- la scarsa capacità di calcolo;
- le scarse capacità logiche;
- l’incapacità di fornire una spiegazione dei risultati in linguaggio simbolico umano, anche se molto efficienti. Essi devono essere accettati “così come sono” in quanto, a differenza di un sistema algoritmico dove si può esaminare passo-passo il percorso che dall’input genera l’output, una Rete Neurale è in grado di generare un risultato valido, ma non è possibile spiegare come e perché tale risultato sia stato generato;
- sono efficienti solo se le variabili predittive sono scelte con cura (come qualsiasi algoritmo di modellazione);
- necessitano di una fase di addestramento del sistema che fissi i pesi dei singoli neuroni, e questa fase può richiedere molto tempo, se il numero dei record e delle variabili analizzate è molto grande;
- non esistono teoremi o modelli che permettano di definire la rete ottima, quindi la riuscita di una rete dipende molto dall’esperienza del creatore.

Le reti, dunque, non devono essere viste come un’alternativa, ma come un complemento prezioso, da utilizzare quando sia necessario impiegare capacità di associazione, trovando similarità e analogie, capacità di generalizzazione e capacità di resistenza al rumore, in accordo con quelli che sono i loro pregi:

- capacità di trattare molti dati, in quanto per costituzione lavorano in parallelo;
- buona immunità al rumore (cioè capacità della rete di operare anche in presenza di dati incerti, incompleti o leggermente errati): se alcune unità del sistema dovessero funzionare male, la rete nel suo complesso avrebbe delle riduzioni di prestazioni ma difficilmente andrebbe incontro ad un blocco del sistema;
- da un punto di vista industriale, risultano efficaci quando si dispone di dati storici che possono essere trattati con gli algoritmi neurali. Ciò è di interesse per la produzione, perché permette di estrarre dati e modelli senza effettuare ulteriori prove e sperimentazioni.

Riportiamo una lista di applicazioni menzionate dalla letteratura:

- *Riconoscimento/Classificazione di immagini, testi, voce, segnali.*
- *Filtri di rumore sui segnali.*
- *Controllo di processo e qualità.*
- *Supporto alle decisioni.*
- *Compressione e trasmissione di dati.*
- *Diagnostica medica.*
- *Analisi finanziaria dei mercati.*
- *Difesa.*
- *Previsioni meteorologiche.*

CAPITOLO 5

Metodologia della ricerca

Una Rete Neurale Artificiale è una struttura matematica in grado di identificare complesse relazioni non lineari tra due set di dati, definiti in entrata come *input* ed in uscita come *output*.

Nel seguente capitolo si presenta la procedura utilizzata nella ricerca, al fine di identificare la migliore struttura e l'idoneo numero di nodi di una Rete Neurale multistrato.

Il problema della scelta dell'architettura di rete e, quindi, del modello da adottare, si presenta assai complesso, in quanto le variabili in gioco sono numerose. Per tale motivo, la ricerca della rete che meglio simula l'andamento temporale delle rotture non può essere condotta casualmente, bensì necessita della stesura di una procedura formale di ricerca.

La suddetta procedura si è articolata in due fasi a cascata, attraverso le quali si perviene ad un set di reti ordinato dal quale si può procedere alla scelta del modello che meglio approssima l'andamento reale delle rotture.

Nella prima fase, l'obiettivo principale è quello di scegliere il numero di layer nascosti e di nodi interni costituenti la Rete Neurale (e quindi la struttura interna). Ricordando, infatti, che queste variabili rappresentano i parametri fondamentali delle Reti Neurali, in questa fase si procede ad una loro variazione entro un range limitato dall'architettura stessa del programma, per diverse combinazioni di dati in input.

Un altro obiettivo è dato dal fatto che bisogna selezionare un numero limitato di Reti Neurali sulle quali poter effettuare analisi successive più dettagliate. Dall'insieme di tutte le reti generate dalle diverse simulazioni, infatti, è inizialmente scelto un set circoscritto di reti attraverso il criterio classico del $\min(\text{MSE})$.

A questo punto si passa alla seconda fase, quella della calibrazione vera e propria: di tutte le reti selezionate, mediante una fase di *test*, in cui si valuta l'errore commesso nella previsione di dati di rottura inerenti a un anno non utilizzato nelle precedenti simulazioni, si ricerca la rete migliore.

Questa valutazione della rete che meglio approssima valori già noti, per poterne definire le caratteristiche ottimali intese come combinazione di dati in input e struttura interna (hidden layer e nodi), sarà utile non solo per identificarla come la più precisa tra tutte quelle testate, ma anche per poterla poi applicare a diversi set di dati.

Con quest'ultima serie di applicazioni, se ne valuta così la duttilità di utilizzo e la capacità d'impiego anche con combinazioni di dati in ingresso diversi da quelli con cui è stata calibrata, determinandone l'attendibilità o meno dei risultati forniti.

5.1 Caratteristiche della Rete Neurale utilizzata

Al fine di ricercare la correlazione tra i dati di rottura e gli agenti climatici, intesi come piogge e temperature, osservata nell'analisi effettuata nei capitoli precedenti, si è scelto di ricorrere all'applicazione di una Rete Neurale Artificiale.

Questa scelta è stata indirizzata dalle analisi eseguite nei capitoli precedenti, i quali hanno evidenziato l'esistenza di possibili legami tra i diversi fattori, ma senza far risaltare una loro rappresentazione con i tradizionali metodi di relazione funzionale (legami lineari, proporzionali, ecc.).

L'utilità dei modelli di Rete Neurale sta nel fatto che questi possono essere usati per comprendere una funzione utilizzando solo le osservazioni sui dati. Essi, infatti, per loro stessa costituzione, lavorano in parallelo e sono quindi in grado di trattare molti dati, risultando efficaci quando si dispone di serie storiche osservate che possono essere trattate con gli algoritmi neurali.

Il modello di Rete Neurale non è stato realizzato ad hoc, data l'evidente complessità dell'operazione, le necessarie conoscenze statistiche e informatiche e, non ultimo, l'ampio tempo necessario per tale operazione, ma si sono confrontati tra loro diversi modelli open source, prodotti con finalità diverse dalla nostra, valutandone l'effettiva applicabilità al contesto di nostro interesse.

Citiamo alcuni interessanti modelli tra quelli indagati:

- Modello per lo studio dei flussi e deflussi di bacini appartenenti all'alto Piave, con linguaggio di programmazione Matlab;
- Modello di classificazione Sharky Neural Network;
- Modello di previsione Simbrain, in linguaggio di programmazione Java;
- Alcuni modelli di classificazione e previsione in Excel, con linguaggio di programmazione Visual Basic.

Di questi ultimi con interfaccia Excel, si è scelto di utilizzare il modello NNPred, seppur realizzato con lo scopo iniziale di prevedere il trend delle vendite future di automobili (in funzione della cilindrata, del peso, della potenza, ecc.), perché si è reputato fosse dotato di una buona duttilità e quindi adattabile all'applicazione di nostro interesse.

NNPred è un modello di previsione che genera Reti Neurali feedforward (con grafico aciclico diretto), mediante un paradigma supervisionato, e utilizza l'algoritmo di apprendimento Vanilla Backpropagation con funzione errore MSE (errore quadratico medio). L'algoritmo Vanilla Backpropagation è l'algoritmo di apprendimento più comune, utilizzato come standard e già introdotto da D. E. Rumelhart nel 1986. Esso è chiamato anche Online Backpropagation (o semplicemente di Backpropagation) perché aggiorna i pesi dopo ogni schema di "allenamento".

Tra le sue caratteristiche si evidenziano:

- la possibilità di trattare dati sia di tipo categorico (classificazioni) che continui (valori numerici);
- la possibilità di esaminare contemporaneamente fino a dieci variabili di output e massimo cinquanta in input, di cui quaranta possono essere categoriche;
- la possibilità di generare reti multistrato a 2 livelli, composte da 1 a 20 nodi per layer;
- per ogni epoca di calcolo, restituisce il valore dell'MSE e dell'ASE (Average Squared Error), memorizzando i pesi dei rispettivi nodi in un foglio separato, associati al minimo MSE del ciclo di training o validazione a scelta.

Variando i parametri di input del modello, è possibile generare reti formate da uno o due layer nascosti, entrambi con un numero di nodi variabile da 1 a 20. È così possibile testare un elevato numero di diverse configurazioni di rete per uno stesso set di dati, essendo così fattibile una ricerca della struttura più appropriata per lo studio in oggetto.

Altra caratteristica importante osservata durante l'utilizzo del modello, è la semplicità di trattare grandi entità di dati, senza mostrare eccessivi cali di prestazione o velocità anche per le più laboriose configurazioni.

5.2 Suddivisione dei dati

Definiti i dati di input, ossia le serie storiche delle rotture nella rete acquedottistica e i dati di pioggia e temperatura inerenti allo stesso intervallo temporale (come descritto nei capitoli precedenti), si deve procedere alla suddivisione del data set nei periodi di *Training*, *Validazione* e *Test*.

A tal proposito, sono stati considerati i seguenti periodi:

1. **Training:** da *marzo del 2000* a *dicembre del 2006*;
2. **Validazione:** da *gennaio 2007* a *dicembre 2009*;
3. **Test:** l'intero anno da *gennaio a dicembre 2010*.

Per meglio comprendere il significato della suddivisione delle serie storiche nei tre sottoinsiemi citati, analizziamo di seguito singolarmente ciascun periodo nel dettaglio.

Per quanto riguarda il periodo di *Training*, esso rappresenta la fase di addestramento del modello per la taratura dei parametri. Tale fase è necessaria per qualsiasi tipo di modulo e, dunque, anche per la struttura a Reti Neurali. Specificatamente, in quest'ultima i parametri sono i pesi che attivano i singoli neuroni, responsabili del funzionamento del modello stesso.

La scelta del periodo sopraccennato, inoltre, è stata fatta in modo tale da includervi un numero congruo di anni significativi, ossia di anni in cui le rotture, la pioggia e la temperatura presentassero variazioni considerevoli di segno positivo ma anche negativo, così da analizzare una serie rappresentativa di dati. Si ritiene, infatti, rilevante valutare e conoscere come variano le grandezze considerate durante i dodici mesi, poiché essi rappresentano un andamento ciclico simile di anno in anno.

Si vuole inoltre portare l'attenzione sul dettaglio dell'inizio della serie dei dati di *Training*: esso è posto dal mese di marzo (e non come apparentemente più ovvio in gennaio) è ciò è dovuto al fatto che, tra le possibili sequenze utilizzabili come dati di input, compare anche una "cumulata 0_3 mesi" inerente alle piogge, e non è quindi possibile disporre di valori se non prima dal terzo mese di osservazioni del primo anno.

Il periodo di *Validazione* è utilizzato per simulare il modello e ciò è eseguito ad ogni epoca con i parametri calibrati dal Training.

Come noto dalla teoria delle Reti Neurali, per ogni diverso ciclo di calcolo in cui sono elaborati nuovi pesi dei nodi, l'MSE relativo al Training è sempre più piccolo (in quanto il metodo del Gradient Descent è convergente), mentre l'MSE relativo alla Validazione presenta un minimo assoluto, oltre il quale la configurazione diverge perdendo di concretezza. Esso è quindi utilizzato nella scelta dell'architettura della rete con migliori performance.

In ultimo, il periodo di *Test*: esso è finalizzato alla verifica della risposta fornita delle reti con miglior risultato nel periodo di Validazione, confrontandone i risultati con una previsione riferita ad un periodo mai utilizzato prima dal programma, composto da dodici valori (l'ultimo anno appunto), utile anche alla scelta della configurazione con migliori performance.

5.2.1 Statistiche utilizzate

Uno degli aspetti preminenti in una procedura sostanzialmente analitica, come quella impostata, è costituito dalla definizione di alcune grandezze che permettano di valutare la capacità del modello di simulare le rotture della rete acquedottistica studiata.

In letteratura ci sono numerosi riferimenti per la stima dell'errore, ma il più diffusamente utilizzato è il Mean Squared Error (MSE o errore quadratico medio).

Esso rappresenta la misura dell'errore in senso assoluto, a differenza dell'errore medio che descrive l'errore sistematico commesso dal modello.

Il MSE, specificatamente, come indicato in precedenza, è definito come segue:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}$$

dove n è la numerosità del set su cui si calcola la statistica, x_i sono i dati osservati e \hat{x}_i sono i dati simulati. Dalla definizione data, si deduce che il valore ottimo della statistica considerata è pari a 0.

Nelle reti neurali studiate, il MSE ha in ogni simulazione valori più bassi in fase di Validazione rispetto ai periodi di Training, e questo perché è proprio il minimo di Validazione che si ricerca, mentre il corrispettivo di Training non raggiunge mai un minimo assoluto. Inoltre, nella quasi totalità dei casi, l'MSE assume valori inferiori rispetto alle altre fasi nel periodo di Test.

Il programma NNPred fornisce di default per ogni epoca di calcolo l'MSE riferito sia al Training che alla Validazione, con la possibilità di salvare a scelta il minore tra i due e configurare i pesi dei nodi con gli associati valori.

Affiancato ad esso, sempre in automatico, è calcolato ed esibito anche l'Absolute Relative Error (ARE o errore relativo assoluto) in forma percentuale, definito in generale come:

$$ARE = \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \cdot 100$$

con gli indici che assumono gli stessi valori già indicati in precedenza.

Esso fornisce però solo un valore indicativo della precisione raggiunta, in quanto non tiene conto della numerosità degli eventi e tende a presentare il minimo non congiuntamente all'MSE.

5.3 Metodologia di ricerca

In questo paragrafo si intende descrivere la metodologia adottata nel suo complesso, al fine di ricercare la Rete Neurale che meglio simula l'andamento delle rotture totali nella rete acquedottistica in oggetto nell'arco di un anno.

Come descritto nel Cap.4, le Reti Neurali sono degli articolati sistemi matematici in grado di identificare complesse relazioni non lineari tra diverse grandezze. Nel nostro caso, infatti, dobbiamo realizzare un modello che leghi le rotture agli aspetti climatici più rilevanti che, come osservato, è regolato da complessi rapporti non lineari.

Il vantaggio di questo tipo di struttura risiede nel non dover esplicitare e rappresentare matematicamente i processi interni che descrivono la correlazione tra i diversi fattori.

Come si riscontra in letteratura, infatti, la potenza simulativa di una Rete Neurale è nella maggior parte dei casi superiore a qualsiasi altro modello di tipo concettuale e statistico. Le esperienze precedenti (di H. D. Tran, et al., 2010 e Shridhar Yamijala, et al., 2009 per citare i più noti), hanno messo in evidenza quanto detto e, congiuntamente ad altri studi sulla capacità simulativa delle Reti Neurali, hanno reso la comunità scientifica concorde nell'affermare la validità di questo tipo di modellistica.

Da tali considerazioni si è deciso di indagare se le rotture della rete acquedottistica in oggetto di studio possano essere simulate tramite un modello black-box a Reti Neurali. Nel corso del paragrafo si presenterà la procedura utilizzata durante questo studio finalizzata all'identificazione della struttura di una rete multistrato.

Il problema della scelta dell'architettura di rete e, quindi, del modello da adottare si presenta assai complesso in quanto le variabili in gioco sono numerose. Per tale motivo la ricerca della rete che meglio simula l'andamento delle rotture, non può essere condotta casualmente, bensì necessita della stesura di una procedura formale di ricerca.

Nella *prima fase*, l'obiettivo principale è quello di scegliere il numero di layer nascosti e il numero di nodi interni. Ricordiamo, infatti, che queste variabili rappresentano alcuni

dei parametri fondamentali delle Reti Neurali ed in questa fase si procede ad una variazione di essi in corrispondenza di ciascuna rete.

Un altro obiettivo è dato dal fatto che bisogna selezionare un numero limitato di reti neurali sulle quali poter effettuare analisi successive più dettagliate. Dall'insieme di tutte le reti generate dalle diverse combinazioni di input, infatti, è inizialmente scelto un set circoscritto di reti. Su di esso, nel periodo di Validazione, si procede alla selezione delle prime n reti attraverso il criterio classico del $\min(\text{MSE})$.

A questo punto, si passa alla *seconda fase*, quella della calibrazione vera e propria. In particolare, sulle n reti scelte in precedenza che hanno fornito i migliori risultati, si effettua una previsione con una serie di dati sconosciuta al modello. Tramite questi valori, si ricerca la configurazione che meglio approssima le rotture note, effettuando così un vero e proprio Test di funzionalità, ottenendo la rete migliore.

5.3.1 Fase preliminare

Nella fase preliminare di questa procedura si definisce il set di reti tra cui ricercare la migliore.

Le grandezze in entrata alla rete sono scelte grazie all'esperienza del ricercatore, in quanto esse sono frutto di una sintesi di conoscenze idrauliche, idrologiche e meccaniche, come esposto nei primi capitoli. Tenendo conto dei diversi fattori in gioco e delle loro caratteristiche, anche attraverso l'analisi dei dati svolta in precedenza, si è dedotto che le rotture potessero essere influenzate in maniera evidente da eventi sviluppatisi in tempi precedenti, e quindi che le serie di dati utilizzabili dovessero comprendere istanti precedenti all'attuale.

Tutto ciò mette in luce che l'informazione da fornire alla rete deve essere una combinazione di grandezze puntuali definite a passi temporali fino a due mesi addietro, e grandezze cumulate che riferiscano lo stato della pioggia mensile per tempi fino ai 3 mesi.

La distinzione delle grandezze in questi due gruppi trova un forte riscontro in letteratura perché permette alla rete ed a qualsiasi altro modello di modulare l'informazione puntuale partendo da una condizione iniziale definita. Se la previsione delle rotture è effettuata al tempo (t), l'informazione puntuale di ogni grandezza è fornita al massimo fino al tempo ($t-2$).

Oltre alla scelta dei passi temporali più opportuni per la definizione dell'informazione, è necessario stabilire e caratterizzare l'informazione stessa, e cioè quali grandezze utilizzare per la descrizione del fenomeno delle rotture. La scelta di tali input è, logicamente, dettata dalle caratteristiche sopra menzionate del sistema e dai dati in nostro possesso.

Si sono così considerate come grandezze descrittive del fenomeno la pioggia e la temperatura media mensile, con i limiti definiti sopra, identificate temporalmente per ogni mese. Si deve infine valutare se e quali grandezze cumulate considerare.

Si intende per grandezza cumulata il seguente valore:

$$I_{cumulato}(t) = \sum_{k=i}^{k=f} I(t-t_k)$$

dove $I_{cumulato}(t)$ rappresenta il valore somma della grandezza tempo tra ($t-t_i$) e ($t-t_f$).

Reputando significativo un intervallo di tre mesi, si sono assunti i valori di $t_i = 0$ e $t_f = 3$, indicando da schema la cumulata 0_3 mesi. Attraverso un modello a reti neurali, infatti, considerare un valore cumulato o medio è la medesima cosa, in quanto il legame tra le due grandezze è di tipo lineare.

Per concludere, si sono quindi utilizzati i valori puntuali mensili delle rotture (inizialmente totali), di temperatura media mensile e di pioggia cumulata mensile, forniti sia al tempo (t), sia al tempo ($t-1$) che ($t-2$), ovviamente collegati da un indice temporale con riferimento sempre mensile. Inoltre, per le sole piogge, si è utilizzata anche una serie cumulata riferita ai 3 mesi precedenti.

Le diverse combinazioni di dati sono state utilizzate per formare una combinazione di 9 diverse Reti (che indicheremo con la lettera maiuscola per cercare di evitare disambiguità), riportate nel successivo schema.

N° rete	t		t+1		t+2		0_3mesi
	Pioggia	Temperatura	Pioggia	Temperatura	Pioggia	Temperatura	Pioggia cumulata
1	X	X					
2	X	X	X	X			
3	X	X	X	X	X	X	
4	X	X			X	X	
5	X	X					X
6	X	X	X	X			X
7	X	X	X	X	X	X	X
8	X	X			X	X	X
9			X	X	X	X	X

Tabella 6 – Schema dei dati componenti le Reti utilizzate

Si pone all’attenzione che tutte le Reti, ad eccezione della numero 9, utilizzano i dati di pioggia e temperatura relativi al tempo (t). Essa è stata volutamente privata di questa informazione per poterla valutare nel contesto di un’eventuale previsione futura delle rotture, dove non si avrebbero evidentemente serie di dati riferite all’istante ($t+1$).

5.3.2 Fase 1

Una volta definito il set di Reti da considerare, si deve ricercare quale tra queste simula meglio l’andamento delle rotture totali in un arco temporale, definito dal periodo di Validazione. La procedura si articola in due processi a cascata che permettono di classificare le Reti simulate.

L’obiettivo in questa prima fase è ricercare per ogni Rete il numero di nodi nascosti e la configurazione di hidden layer, selezionando la migliore impostazione e riducendo così il campo d’indagine.

Per effettuare quanto detto, è stato necessario suddividere le serie storiche di dati in un periodo di Training e in un periodo di Validazione. Come si è accennato nel par. 5.2, il periodo di Training risulta necessario per l'addestramento della rete, mentre il periodo di Validazione consente di valutare, come dice la parola stessa, la capacità simulativa della rete.

La procedura che il modello NNPred esegue simultaneamente, si articola come segue: con un complesso processo matematico, per ogni ciclo d' iterazione esso calcola, dai dati formanti il set di Training, dei pesi da associare a ciascun neurone componente la Rete Neurale e, contemporaneamente, utilizza gli stessi valori per eseguire una previsione sui dati del set di Validazione, computando per entrambi il rispettivo MSE associato.

Come discriminante tra le diverse configurazioni di rete, è stato quindi assunto il Mean Squared Error. Dalla teoria delle reti neurali, infatti, è noto che, aumentando il numero cicli, si presenta un valore del MSE in fase di Training sempre più piccolo. Se, invece, si calcola il MSE in fase di Validazione, si definisce una curva che presenta un minimo assoluto, identificato come $\min[\text{MSE}_{\text{Validazione}}]$, dove procedendo oltre, la rete entra in overfitting, perdendo la capacità di generalizzare l'informazione fornita. In termini più semplici, si può aggiungere che la rete neurale perde la capacità di apprendere e riconoscere la funzione che regola il meccanismo rotture-aspetti climatici, ma memorizza semplicemente i dati forniti nel periodo di Training.

Considerando, invece, il caso in cui i cicli utilizzati siano inferiori alla soglia corrispondente al $\min[\text{MSE}_{\text{Validazione}}]$, si può sicuramente affermare che il valore dei parametri non è il più soddisfacente per la descrizione del fenomeno.

Si può, dunque, utilizzare l'indicatore $\min[\text{MSE}_{\text{Validazione}}]$ non solo come indicatore dell'entrata della Rete in overfitting, ma anche come grandezza in grado di definire la capacità simulativa della singola Rete.

Si conclude, quindi, che il criterio di scelta della struttura migliore (intesa come layer nascosti e numero di nodi) di ogni Rete è:

$$(\text{Hidden Layer; Nodi nascosti}) = \min [\text{MSE}_{\text{Validazione}} (\text{Layer; Nodi})]$$

potendo variare i valori dei layer nascosti tra 1 e 2 e dei nodi nascosti tra 1 e 20.

Con tale criterio d'individuazione dell'architettura migliore, per ognuna delle 9 Reti definite inizialmente, si sono selezionate le 2 configurazioni considerate migliori (cioè con minore MSEvalidazione), rispettivamente aventi uno e due livelli nascosti, ottenendone un set composto ovviamente da 18 elementi. Questo processo rappresenta un utile criterio per la ricerca delle reti migliori, ben noto in letteratura.

Il periodo di Validazione è stato utilizzato quindi non solo per determinare il gruppo di reti migliori, ma anche la struttura della Rete Neurale associata, così da ottenere le migliori configurazioni possibili per una stessa Rete.

La calibrazione dei pesi di una rete neurale avviene tramite degli algoritmi di calcolo basati sulla ricerca del minimo di una funzione; i valori calibrati non dipendono unicamente dal tipo di training-set e dall'algoritmo di calcolo, ma anche dai valori iniziali assegnati ai pesi.

Esiste una vasta letteratura in proposito che in generale assegna valori casuali ai pesi; il valore, sebbene casuale, è scelto all'interno di un intervallo prestabilito.

Questo intervallo presenta dei valori limite stabiliti appunto dall'algoritmo di inizializzazione dei pesi. Tali valori possono essere assegnati attraverso delle funzioni che li legano all'architettura della rete oppure al tipo di dati di input. È infatti dimostrato che non è opportuno fissare i valori iniziali dei pesi pari a zero, in quanto l'origine dei parametri è tendenzialmente un punto di sella per la superficie di performance. In secondo luogo, non è neanche opportuno assegnare ai parametri un valore iniziale molto grande, perché la superficie di performance presenta delle regioni molto piatte che allontanano dal punto di ottimo (Michele Gaier, 2001).

I pesi definiti nell'input layer di NNPred, sono quindi stati posti compresi nell'intervallo [-0.5;0.5].

Da queste considerazioni si deduce che una medesima rete con stessa architettura e identici dati di input può, variando i pesi iniziali considerati, variare il suo output.

Dall'esperienza accumulata in questo studio, inoltre, si è visto che facendo diverse prove per una stessa Rete con identica configurazione, i risultati variano anche significativamente, non escludendo totalmente risultati interessanti, in quanto per propria natura, il processo di formazione di una Rete Neurale non ripercorre mai la stessa direzione.

In definitiva, si può calcolare il numero di simulazioni effettuate durante questa prima fase: essendo il numero di Reti iniziali pari a 9, variando il numero di nodi interni tra 1 e 20 per ogni configurazione di layer nascosti, compresi a loro volta tra 1 e 2, si effettuano 40 prove per singola Rete e si ottengono complessivamente 360 simulazioni.

In conclusione, si può affermare che, nella Fase 1 della procedura qui esposta, si determinano per ogni Rete il numero di nodi, appartenenti all'hidden layer, e si definisce un nuovo set di reti "migliori" attraverso il criterio del minimo MSE calcolato nel periodo di Validazione.

5.3.3 Fase 2

Nella seconda fase della procedura adottata, si vuole determinare quale tra le 18 reti scelte come migliori approssimi meglio l'andamento delle rotture totali riferite al periodo di Test (l'ultimo anno nel nostro caso), mediante una previsione basata sui soli dati climatici.

In tale fase si effettua la vera e propria calibrazione del modello. La Fase 1, infatti, è finalizzata all'individuazione della configurazione di rete che fornisce il migliore riscontro sul piano della capacità simulativa, valutata considerando il $\min[\text{MSE}_{\text{validazione}}]$, dove però i dati di Validazione sono comunque utilizzati all'interno dei cicli di elaborazione dal programma.

Nella presente Fase 2, invece, immettendo i dati di pioggia e temperatura nel programma NNPred con struttura valutata precedentemente (e quindi layer e nodi nascosti determinati sia nell'architettura che nel valore dei pesi), secondo le rispettive combinazioni associate ad ogni Rete (vedi schema precedente), si effettua una vera e propria previsione dei dati di rottura totale.

Questi dati, confrontati con quelli realmente osservati per l'anno in oggetto, permettono di scegliere definitivamente la Rete con migliori performance e poter eseguire così successive simulazioni riferite anche a campi d'indagine differenti (ad esempio per rotture diversificate per materiale, per composizione, ecc.)

Una volta calcolate le 18 serie di dati annuali, è necessario determinare un valore statistico grazie al quale si può valutare l'accuratezza della singola configurazione di Rete, rispetto ai dati noti in possesso.

Si è scelto di considerare nuovamente il MSE, in quanto è una grandezza in grado di dare un'indicazione complessiva sull'errore commesso dal modello, calcolandolo in questo caso riferito specificatamente al set di dati di Test.

Detto tutto ciò, è infine possibile calcolare il numero complessivo delle simulazioni effettuate nella Fase 2: tenendo conto che le reti sono 18 (con struttura fissa perché determinata precedentemente), le serie di dati sono 12 (una al mese per un anno), le prove totali effettuate risultano essere 216.

CAPITOLO 6

Risultati della ricerca

Nel presente capitolo si riportano i risultati ottenuti dalla ricerca effettuata, precedentemente descritta, con la finalità di ricercare la Rete Neurale che meglio simula l'andamento delle rotture nella rete acquedottistica in studio.

La complessità del problema della ricerca dei possibili legami climatici con le rotture nelle tubazioni di una rete acquedottistica, nasce dall'incapacità di riprodurre gli effetti, diretti ed indiretti, osservabili solo grazie ad un'accurata analisi su considerevoli periodi temporali (come descritto nel presente elaborato).

Il problema della gestione di una complessa rete acquedottistica, in particolare, non può prescindere da quella che è la conoscenza, il controllo e, seppur in via molto approssimativa, la previsione delle rotture nelle tubazioni.

In questo senso, con un'ottica principalmente gestionale, il modello realizzato deve essere in grado di ricreare e prevedere l'entità delle rotture con bassi errori percentuali. Questo senza trascurare che, tra gli innumerevoli fattori che possono causare il default di una tubazione, gli aspetti climatici ricoprono solamente una porzione limitata di responsabilità, variabile da sistema a sistema.

Il modello oggetto di studio, vuole così essere non solo un buon simulatore, ma anche un utile previsore, atto ad indirizzare le possibili metodologie di intervento e manutenzione.

In questo capitolo saranno illustrati i principali risultati ottenuti, riprendendo fase per fase la metodologia della ricerca, fino a giungere alla definizione della rete neurale che meglio simula l'andamento delle rotture totali in studio.

6.1 Risultati Fase 1

Inizialmente, sono state assegnate diverse Reti tra cui ricercare la configurazione migliore (vedi cap.5), riportate in Figura 91.

Nella dicitura in figura, la previsione avviene con l'inserimento dei dati mensili di pioggia e temperatura riferiti al tempo (t), ($t-1$), ($t-2$) ed un valore cumulato della pioggia 0_3 mesi. Ad ogni diversa configurazione di dati, è stato assegnato un indice, riportato nella prima colonna, necessario per l'identificazione delle diverse reti (Rete 1, Rete 2, ecc.).

Definito il set di reti nella fase Preliminare, la procedura si è articolata in una sequenza di simulazioni, articolate in due fasi a cascata, attraverso le quali si è pervenuto ad un insieme di risultati utili alla scelta del modello.

L'obiettivo in questa prima fase è ricercare per ogni Rete il numero di layer e nodi nascosti costituenti la struttura interna del modello e, contemporaneamente, selezionare le due migliori configurazioni, sulla base dell'esame del MSE, riducendo il campo d'indagine.

Per meglio chiarire il procedimento sopra descritto, si riportano i risultati ottenuti dalle simulazioni per due Reti, rispettivamente la peggiore (Rete 1) e la migliore (Rete 7).

In figura, sono riportati i valori del MSE e dell'ARE relativi al periodo di Training e Validazione, così come forniti dal programma. Ad ogni valore, è associata la corrispondente epoca di individuazione (Epoch), identificata ovviamente dal minimo[MSEvalidazione]. Il tutto è suddiviso in due blocchi che identificano il numero di layer nascosti (L1 o L2).

Rete 1		MSE training L1	ARE training L1	MSE validation L1	ARE validation L1	Epoch	MSE training L2	ARE training L2	MSE validation L2	ARE validation L2
NODI	Epoch	MSE training L1	ARE training L1	MSE validation L1	ARE validation L1	Epoch	MSE training L2	ARE training L2	MSE validation L2	ARE validation L2
1	32	506,580	16,63%	311,980	18,69%	378	503,054	16,29%	295,365	18,26%
2	392	449,378	16,35%	259,597	16,54%	287	468,310	15,92%	303,429	18,48%
3	479	436,044	15,80%	266,676	17,28%	207	467,475	16,04%	263,961	17,47%
4	834	417,910	15,66%	293,827	17,99%	224	469,426	16,07%	263,082	17,23%
5	428	456,992	16,49%	258,527	16,46%	190	477,826	16,31%	257,649	16,47%
6	455	456,443	16,50%	257,251	16,46%	203	485,900	16,51%	242,834	16,17%
7	447	452,660	16,46%	265,018	16,74%	304	477,945	16,30%	249,154	16,61%
8	371	460,129	16,51%	257,283	16,54%	235	475,559	16,43%	266,785	17,28%
9	473	455,371	16,47%	260,233	16,58%	237	482,291	16,60%	254,553	16,68%
10	630	450,901	16,50%	265,379	16,50%	211	487,517	16,70%	247,637	15,98%
11	494	464,900	16,59%	248,393	16,29%	251	485,521	16,54%	236,072	15,95%
12	487	462,669	16,65%	251,362	16,18%	299	475,884	16,36%	247,170	16,37%
13	412	471,231	16,77%	254,948	16,34%	315	480,564	16,57%	245,247	16,21%
14	414	480,633	16,91%	240,508	15,81%	213	490,052	16,68%	237,410	15,88%
15	421	481,789	16,95%	244,540	15,99%	295	483,055	16,42%	238,408	16,11%
16	488	453,150	16,13%	251,310	16,60%	290	486,657	16,72%	239,371	15,92%
17	383	489,039	17,10%	237,058	15,84%	272	481,643	16,45%	241,067	16,21%
18	395	478,574	16,73%	235,308	15,86%	236	483,093	16,85%	237,972	16,45%
19	521	472,119	16,74%	241,575	16,00%	237	487,453	16,63%	244,342	16,07%
20	484	475,695	16,71%	239,961	15,80%	213	489,327	16,59%	238,721	16,04%

Tabella 7 - Risultati delle simulazioni per la Rete 1

Rete 7		MSE training L1	ARE training L1	MSE validation L1	ARE validation L1	Epoch	MSE training L2	ARE training L2	MSE validation L2	ARE validation L2
1	15	534,562	17,833%	178,990	14,57%	41	518,915	16,803%	206,038	16,98%
2	19	548,459	17,73%	161,409	14,34%	27	569,158	17,90%	159,365	14,31%
3	13	555,943	18,39%	169,043	13,74%	16	550,368	17,50%	159,600	15,06%
4	12	546,490	18,35%	178,386	14,19%	14	580,106	18,00%	150,158	14,51%
5	11	536,359	18,20%	183,010	14,28%	19	582,105	18,57%	155,566	13,54%
6	12	550,840	18,34%	167,594	13,81%	15	591,650	18,33%	153,634	13,94%
7	8	565,703	18,14%	152,549	13,69%	13	562,424	17,91%	171,348	14,87%
8	9	553,600	18,37%	165,577	13,72%	12	527,255	17,52%	183,785	15,32%
9	9	550,352	18,53%	170,716	13,73%	11	574,567	18,12%	169,071	15,01%
10	13	541,119	18,75%	195,290	14,34%	16	589,046	18,76%	158,533	13,83%
11	9	532,559	18,42%	188,670	14,12%	10	518,714	17,45%	194,269	15,54%
12	8	555,601	18,36%	176,056	14,09%	10	544,011	17,91%	191,720	15,49%
13	10	534,214	18,43%	180,232	13,76%	11	550,239	17,97%	177,773	14,88%
14	8	552,036	18,48%	175,655	14,27%	9	563,355	17,42%	184,348	16,09%
15	7	525,206	17,63%	186,736	14,74%	18	492,390	17,91%	200,571	14,84%
16	7	581,001	19,09%	157,877	13,28%	8	596,910	17,59%	187,274	15,94%
17	8	534,773	18,57%	179,374	13,85%	7	580,374	17,68%	200,039	17,13%
18	43	518,280	18,20%	201,331	15,03%	15	485,185	17,55%	201,511	14,86%
19	21	522,952	18,74%	197,892	14,79%	17	481,865	17,43%	203,321	14,81%
20	19	530,285	18,82%	195,576	14,65%	16	487,065	17,80%	204,423	14,84%

Tabella 8 Risultati delle simulazioni per la Rete 7

Nelle due figure, sono evidenziati in grassetto alcuni valori minimi del MSE: si nota, ad esempio, che per la Rete 7, la configurazione migliore è quella ad un layer con sette nodi, corrispondente ad un MSE pari a 152,55, definendo così chiaramente la struttura interna più efficace in questa fase.

Per una maggiore completezza operativa, si è in ogni caso scelto di testare la migliore configurazione di ogni Rete associata sia all'architettura ad un layer che a due.

Dal confronto delle due tabelle, appare chiaro come la Rete 1 restituisca valori in media più alti della Rete 7: questo è sicuramente dovuto alle diverse informazioni fornite in input, in quantità molto minori per la Rete 1, che ne comportano ovviamente una più scarsa capacità di apprendimento.

Inoltre, si evidenzia che per la Rete 1, il minimo del MSE è stato ottenuto per epoche di calcolo anche molto elevate (fino a 630): per consentire ciò, il programma NNPred è stato modificato nel linguaggio di programmazione, in quanto consentiva originariamente un numero di cicli massimo pari a 500, non sufficiente nel nostro caso. La Rete 7, a differenza della precedente, ritrova i minimi tutti all'interno di un massimo di 50 cicli: questo evidenzia, ancora una volta, quale sia l'influenza di una maggiore quantità di dati in possesso dell'elaboratore.

Di seguito, mostriamo a titolo rappresentativo l'andamento del valore minimo del MSE relativo al periodo di Validazione, a cui è associato anche il corrispettivo in fase di Training (il quale non ne rappresenta però ovviamente il minimo), in questo caso relativi alla sola Rete 7.

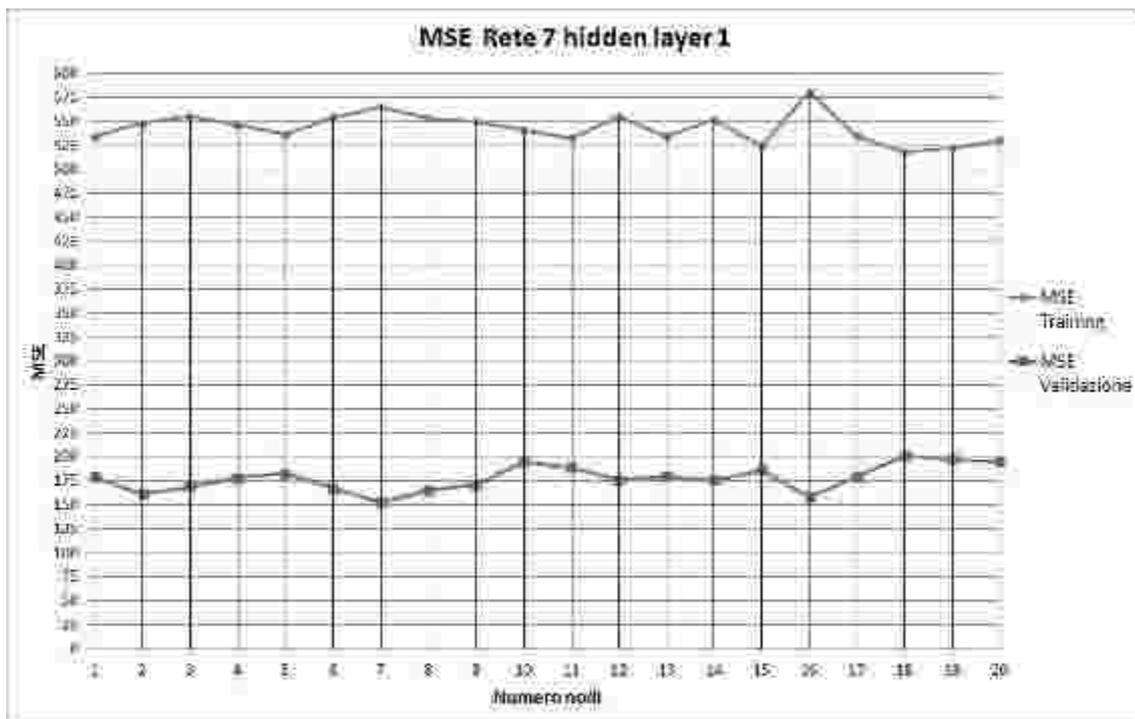


Figura 91– Andamento del MSE in funzione del numero dei nodi per la Rete 7 ad un layer nascosto

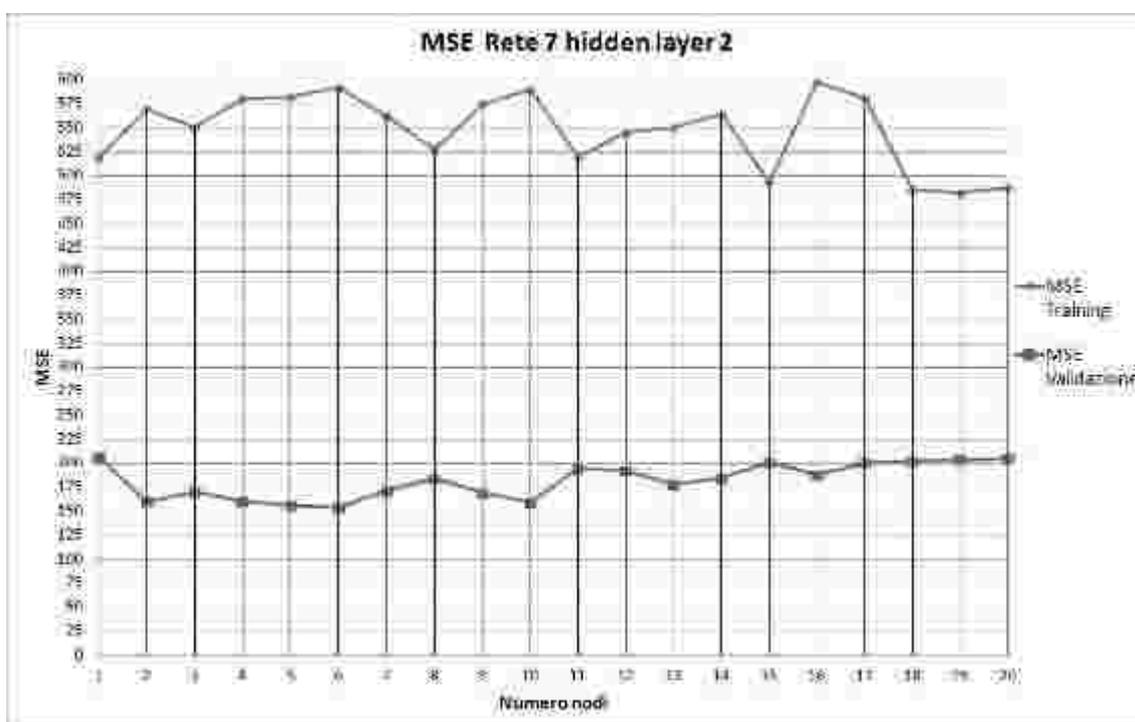


Figura 92 – Andamento del MSE in funzione del numero dei nodi per la Rete 7 a due layer nascosti

Il grafico evidenzia, in entrambi i casi, come i valori del MSE varino all'interno di un range ristretto; nonostante ciò, per il periodo di Validazione e soprattutto per la configurazione a due hidden layer, si nota un lieve andamento tendenzialmente crescente all'aumentare del numero dei nodi interni, a conferma di quanto già affermato sull'inefficienza dell'utilizzo di un elevato numero di nodi nascosti, a partire dal sesto-settimo nodo.

Per concludere, si riporta una tabella riassuntiva di tutti i valori caratteristici ricavati dalle simulazioni di ogni Rete. In essa, sono indicati la MEDIA del MSE di Training e di Validazione e il valore minimo del MSE di Validazione, con il numero dei nodi interni in cui è stato valutato, differenziati per il numero di layer nascosti (L1 o L2).

Queste diciotto configurazioni migliori, due per Rete appunto, sono poi state utilizzate nella successiva Fase 2, con i rispettivi pesi associati ai nodi (opportunamente salvati a parte), per ridurre il campo d'indagine e ricercare tra loro quella che fornisce le migliori performance di previsione.

	MEDIA [MSEtrain]L1	MEDIA [MSEvalid]L1	min [MSEvalid]L1	MEDIA [MSEtrain]L2	MEDIA [MSEvalid]L2	min [MSEvalid]L2
Rete 1	463,56	257,04	235,31	481,93	252,59	236,07
Rete 2	513,76	225,02	207,42	526,44	227,08	207,63
Rete 3	527,74	188,27	166,51	519,85	195,73	172,83
Rete 4	523,89	212,80	185,21	524,24	209,07	187,71
Rete 5	534,50	234,05	213,51	501,86	212,36	184,53
Rete 6	540,52	202,32	182,25	524,70	218,60	187,17
Rete 7	543,72	178,09	152,55	547,34	181,62	153,63
Rete 8	539,40	192,88	170,31	530,29	192,81	165,54
Rete 9	593,75	163,00	149,50	631,80	169,47	158,35

Tabella 9 - Valori notevoli ottenuti dalle simulazioni

In figura, sono evidenziati i valori inferiori della MEDIA e del MINIMO del MSE, la prima in corsivo e il secondo in grassetto (con i relativi nodi).

La media, indica quanto nel complesso la Rete sia efficace nel riprodurre i valori delle rotture: sorprendentemente, in entrambe le configurazioni, risulta ottimale a questo scopo la Rete 9. Per quanto riguarda invece il minimo, esso indica la configurazione migliore in assoluto, ma occorre comunque una verifica (Fase 2) prima di selezionare la Rete ideale. Anche in questo caso, quella apparentemente migliore risulta essere relativa alla Rete 9 con un layer nascosto, con a seguire la Rete 7 in entrambe le conformazioni.

Notiamo come, sia la media che il minimo del MSE, diminuiscono notevolmente passando da configurazioni che utilizzano pochi dati a configurazioni con molti dati in input. In ordine, considerando una media tra L1 e L2, riportiamo la classificazione in ordine decrescente di tutte le reti:

Rete 1	254,81
Rete 2	226,05
Rete 5	223,21
Rete 4	210,93
Rete 6	210,46
Rete 8	192,85
Rete 3	192,00
Rete 7	179,85
Rete 9	166,23

Questo elenco indica come si posizionano le diverse Reti secondo l'indice che le caratterizza: la Rete 1, la più povera di informazioni insieme alla Rete 2, restituisce di conseguenza risultati scadenti mentre, per contro, la Rete 7 e la Rete 9, formate dalla quasi totalità delle informazioni disponibili, offrono i risultati migliori.

Come ovvio, risultano quindi più efficaci le Reti in cui sono utilizzati in input una vasta collezione di dati, risultando conseguentemente anche più performanti nella fase di elaborazione.

Secondo il criterio di scelta del numero di nodi, precedentemente ricordato, è possibile affermare che tendenzialmente il numero di nodi interni individuato, ad eccezione delle Reti con prestazioni più scadenti, oscilla tra quattro e otto.

Giunti a questa fase dell'esposizione dei risultati, è doveroso aggiungere alcune considerazioni sui tempi di elaborazione registrati durante l'esecuzione della procedura. Non disponendo di un preciso riferimento nel programma NNPred, essi sono stati valutati appositamente durante le simulazioni, mediante l'utilizzo di un cronometro.

Questi ultimi sono direttamente legati alle caratteristiche dell'elaboratore utilizzato, che nel nostro caso sono:

- Processore INTEL CORE DUO T2400 @ 1.83 GHz;
- 2048 MB di RAM;
- Clock 1828.9 MHz.

I tempi medi registrati, per 100 cicli di iterazione, oscillano tra i 17 secondi per un nodo ed un layer e i 41 secondi per due layer e venti nodi: essi dipendono principalmente dalla struttura interna della Rete Neurale che, ovviamente, se formata da più nodi, necessita di più operazioni di calcolo e quindi anche di un maggior tempo di elaborazione. Quasi influente è risultata essere la quantità di dati immessa in input: i tempi registrati per la Rete 1 sono assolutamente paragonabili a quelli registrati per la Rete 7.

Diversamente, aumentando il numero di cicli, i tempi si allungano notevolmente: con 300 iterazioni il range è compreso tra i 50 secondi ed oltre 1':30''. Appare quindi evidente la maggiore onerosità temporale richiesta da quelle Reti che fornivano il valore minimo del MSE solo dopo oltre 500 epoche.

Per quantificare il tempo impiegato nella simulazione di una comune Rete, occorre tenere conto di un tempo medio di 19 secondi per una struttura ad un layer e di 30 secondi per una struttura a due layer, per un totale di 40 prove. Il tempo totale impiegato è mediamente pari a 16 minuti e 20 secondi.

Concludendo, valutato il numero ottimo di nodi e dell'hidden layer per ogni singola rete, si è proceduto alla selezione di un numero limitato di modelli sui quali poter effettuare analisi successive più dettagliate.

Dall'insieme di tutte le configurazioni generate dalle diverse combinazioni di dati in input, infatti, è stato scelto un set circoscritto, composto da 18 reti valutate come le migliori 2 per ogni Rete.

A questo punto, si passa alla seconda fase della procedura di ricerca, finalizzata alla selezione della Rete migliore attraverso una vera e propria calibrazione.

6.2 Risultati Fase 2

Con la presente Fase 2 si vuole determinare quale, tra le 18 Reti scelte precedentemente come migliori, approssimi meglio l'andamento delle rotture totali. Ciò è stato eseguito mediante una previsione basata sui soli dati climatici, utilizzando il periodo di Test già identificato nell'anno 2010.

Si è proceduto immettendo mese per mese i dati di pioggia e temperatura nel programma NNPred, con struttura ogni volta relativa alla rete in esame valutata precedentemente: layer e nodi nascosti erano quindi determinati sia nell'architettura che nel valore dei pesi (appositamente salvati).

Con questo metodo, si è effettuata una vera e propria calibrazione, effettuando una previsione dei dati di rottura totale.

Calcolate per tutte le 18 Reti il set di dati corrispondenti all'anno 2010, è stato necessario determinare un valore statistico grazie al quale poter valutare l'errore commesso nelle simulazioni. Anche in questo caso, è stato utilizzato il MSE, in quanto è una grandezza in grado di dare un'indicazione complessiva sull'errore commesso dal modello.

Questi dati, confrontati con quelli realmente osservati per l'anno in oggetto, hanno permesso di scegliere la Rete che meglio approssima i risultati osservati.

Di seguito, si riportano le tabelle riassuntive di tutti i valori ottenuti nell'elaborazione finalizzata alla previsione delle rotture totali per l'anno 2010.

VALORI TEST		PREVISTI															
		RETE 1				RETE 2				RETE 3				RETE 4			
Tempo	Rott_TOJ	L1 18 nodi	L2 11 nodi	L1 4 nodi	L2 11 nodi	L1 6 nodi	L2 8 nodi	L1 5 nodi	L2 4 nodi	L1 6 nodi	L2 8 nodi	L1 5 nodi	L2 4 nodi	L1 5 nodi	L2 4 nodi		
2010: Gen	46	54,77	59,38	55,55	51,21	54,53	52,12	55,22	55,95	57,03	58,69	56,47	52,50	53,15	50,96	54,41	54,87
Feb	47	61,38	61,68	59,84	56,80	55,92	53,53	56,51	56,04	68,58	67,60	68,55	67,43	62,88	61,71	67,35	63,71
Mar	55	78,25	75,91	81,50	83,87	74,46	74,55	75,03	70,72	97,02	96,45	88,14	92,19	92,58	95,11	95,11	95,11
Apr	66	128,21	128,87	114,12	113,18	107,16	109,76	115,34	115,01	123,63	123,66	118,60	116,75	119,21	115,34	110,29	110,61
Mag	65	113,06	113,04	107,43	106,90	112,70	112,39	110,28	115,24	90,24	87,91	88,44	89,12	91,08	91,21	88,64	86,60
Giu	81	64,20	62,96	69,20	64,51	67,94	65,02	69,43	63,97	53,11	56,08	60,20	54,31	54,98	52,00	59,75	55,85
Lug	93	252,46	257,43	163,82	141,63	124,05	115,89	131,87	133,87	123,63	123,66	118,60	116,75	119,21	115,34	110,29	110,61
Ago	100	15,89	16,04	12,80	11,90	11,14	10,77	11,48	11,57	MSE =							
Set	93									RMSE =							
Ott	80									NNPred MSE valid =	235,31	236,07	207,42	207,63	172,83	185,21	187,71
Nov	56									Mean Squared Error = $MSE = \frac{[\sum_n (X_{real} - X_{pred})^2]}{n}$							
Dic	53																

Tabella 10a - Valori di previsione ottenuti dalla Fase 2

PREVISTI	RETE 5		RETE 6		RETE 7		RETE 8		RETE 9	
	L1 6 nodi	L2 6 nodi	L1 2 nodi	L2 8 nodi	L1 7 nodi	L2 6 nodi	L1 7 nodi	L2 4 nodi	L1 6 nodi	L2 8 nodi
	50,56	57,79	53,69	55,95	54,55	55,98	52,57	56,75	58,87	58,91
53,69	59,46	54,60	56,88	53,67	55,53	52,71	56,28	54,33	56,37	
58,27	62,64	57,75	59,78	55,76	57,08	55,39	57,38	55,66	57,52	
70,12	70,69	65,85	67,28	64,09	63,78	65,01	63,08	60,54	60,42	
78,18	76,50	77,49	77,53	73,36	71,84	73,21	68,41	68,35	66,93	
93,09	86,58	88,44	89,35	86,11	85,63	90,18	88,61	78,86	75,33	
117,97	113,74	113,60	111,66	111,60	119,40	112,65	112,63	97,78	91,20	
112,17	122,23	121,25	116,42	117,41	115,11	111,81	110,92	117,27	115,01	
105,76	120,69	108,55	109,09	111,16	111,82	112,10	116,22	116,44	116,27	
82,22	87,80	86,05	85,99	87,36	86,63	87,78	84,79	90,39	91,25	
64,11	64,41	64,56	65,82	65,72	64,04	67,17	64,61	67,92	68,72	
57,31	58,94	56,66	59,69	56,34	56,97	57,11	58,78	54,87	59,47	
MSE =	119,69	199,67	131,38	125,10	113,08	104,99	110,12	121,61	115,81	119,00
RMSE =	10,94	14,13	11,46	11,18	10,63	10,25	10,49	11,03	10,76	10,91
NNPred										
MSE valid=	213,51	184,53	182,25	187,17	152,55	153,63	170,31	165,54	149,50	158,35

Tabella 10b – Valori di previsione ottenuti dalla Fase 2

Nella Tabella 10a sono riportati i “valori test”, così definiti i dati delle rotture totali note dell’anno 2010.

Per ogni Rete, sono stati ricavati i medesimi valori di rottura, considerando le due migliori configurazioni neurali. Le più efficaci, valutate confrontando tra loro i rispettivi MSE appositamente calcolati secondo la formula riportata a piede tabella, sono state evidenziate in azzurro. Per completezza, sono anche stati riportati nell’ultima riga con dicitura “NNPred MSE valid”, i valori del MSE calcolati in precedenza dal programma (Fase 1). Il Root Mean Squared Error (RMSE) è stato inserito solo a titolo indicativo.

Si può notare come, nella quasi totalità dei casi, ad eccezione della Rete 1 e 5, i nuovi valori dell’errore risultino inferiori: questa è una conseguente conferma della capacità delle rete di aver efficacemente “appreso” dalle precedenti simulazioni, ben utilizzando anche i nuovi dati.

La rete con minore valore del MSE, risultante la Rete 7 (unica con MSE inferiore a 110), è stata evidenziata in giallo. Essa, nonostante si presentasse dalle precedenti iterazioni con risultati inferiori alla Rete 9, è comunque stata in grado di eseguire con più efficacia la previsione.

Di seguito, per meglio visualizzare i dati, si riportano i diagrammi di confronto per ogni Rete: essi rappresentano l’andamento delle rotture stimate e note, con grafici lineari e a dispersione.

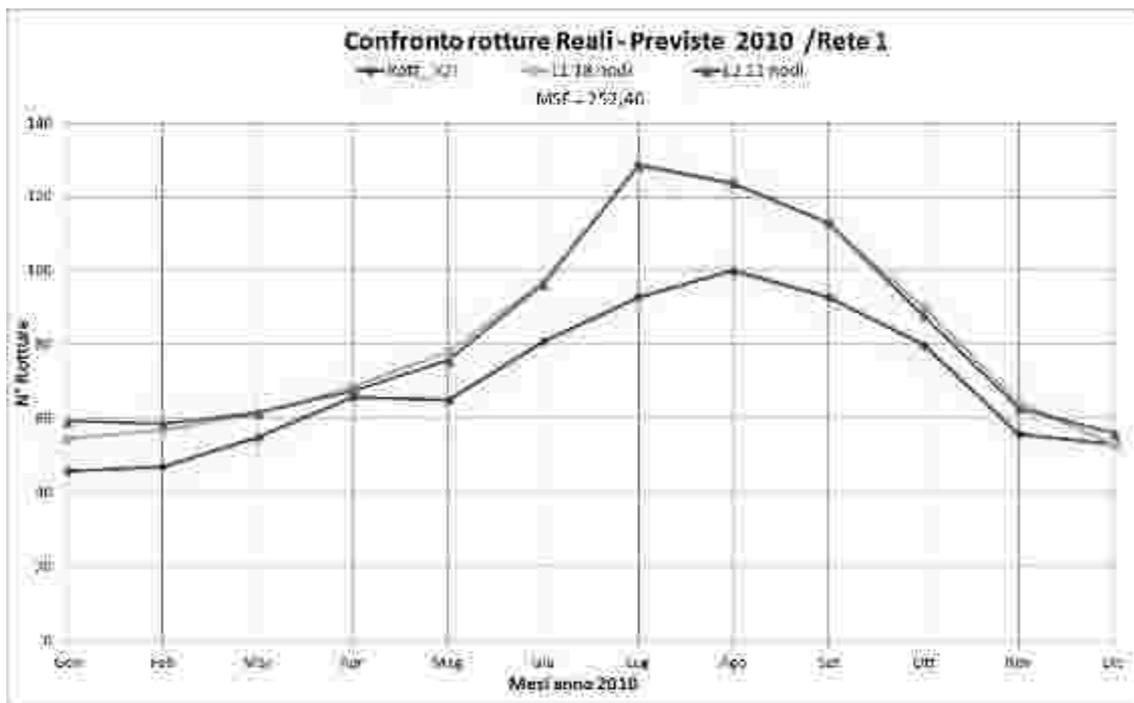


Figura 93 – Grafico a linee delle rotture Reali e Previste per la Rete 1

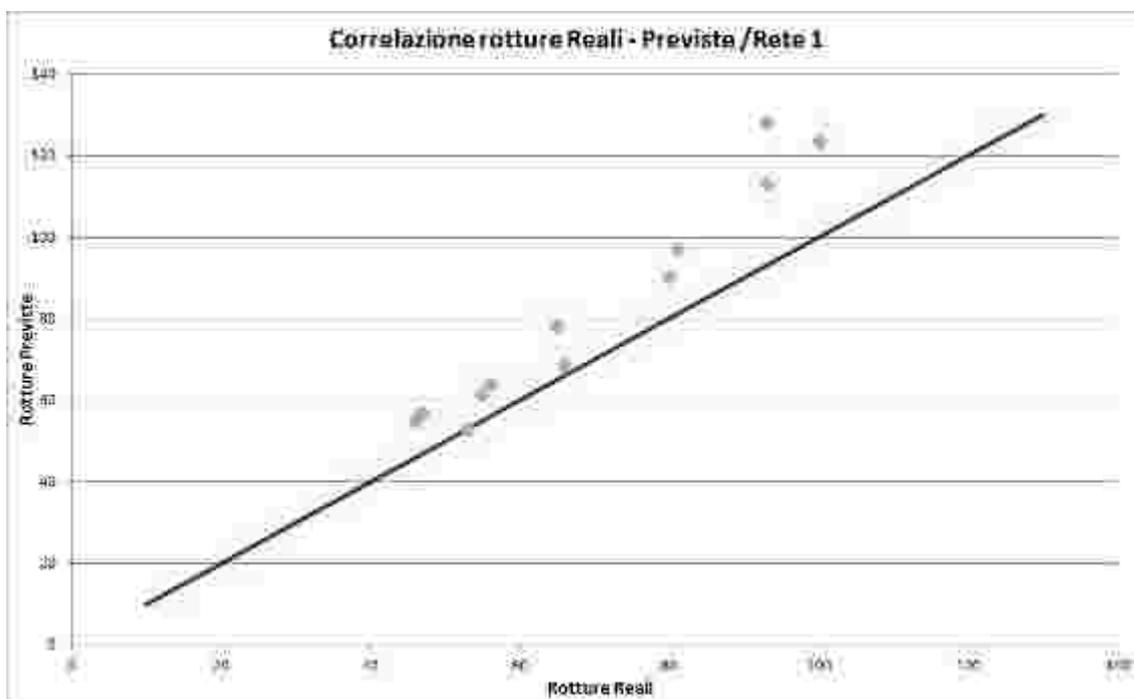


Figura 94 - Grafico a dispersione delle rotture Reali e Previste per la Rete 1

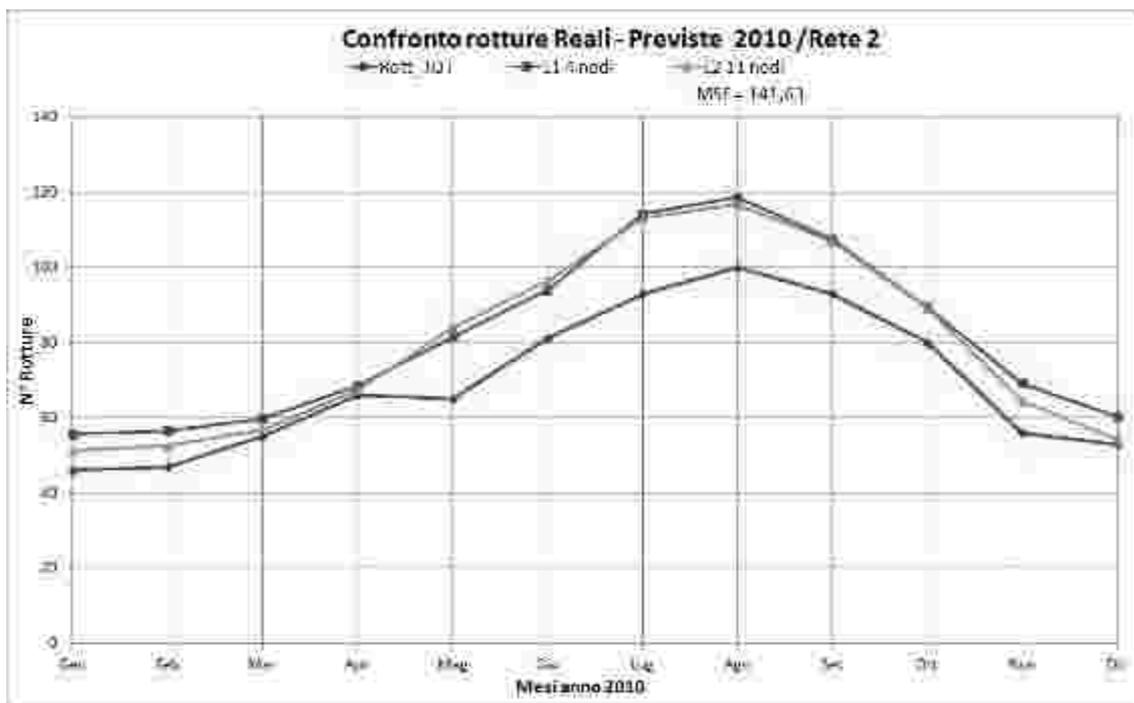
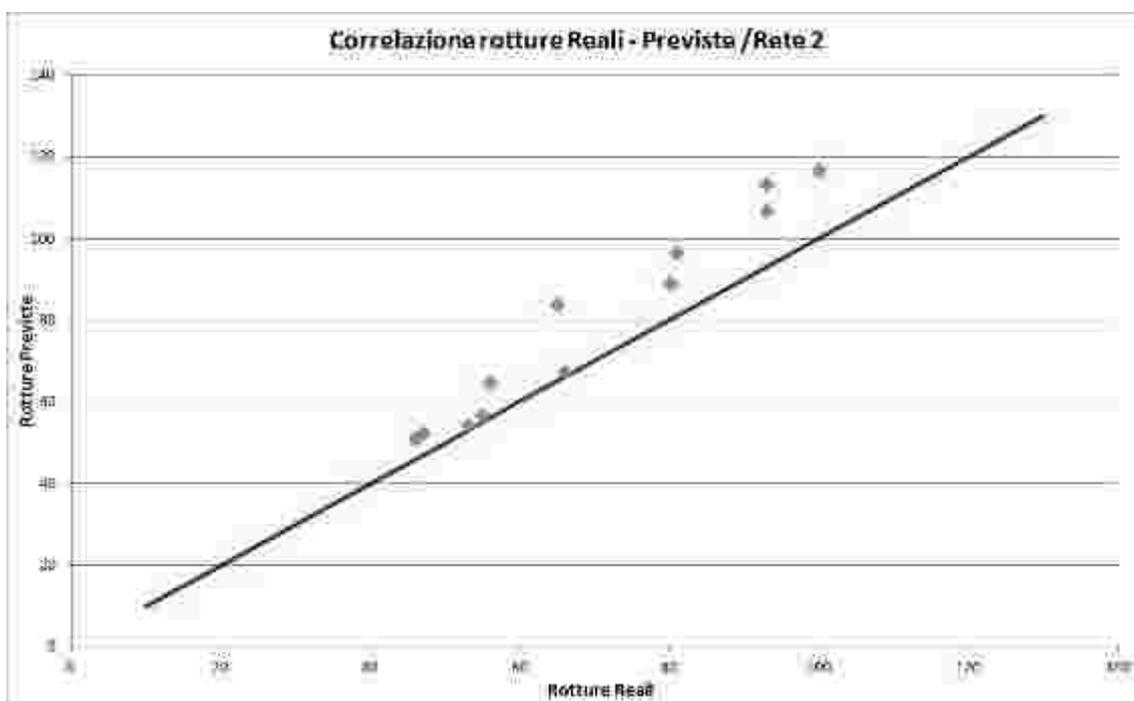


Figura 95 - Grafico a linee delle rotture Reali e Previste per la Rete 2



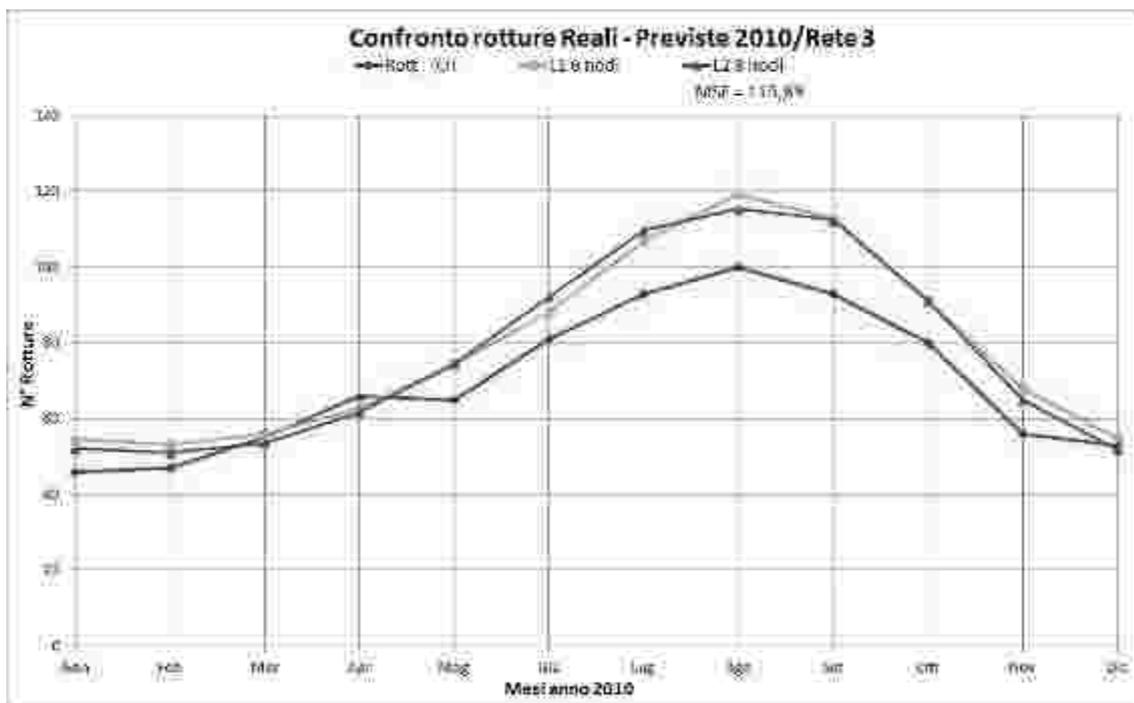


Figura 97 - Grafico a linee delle rotture Reali e Previste per la Rete 3

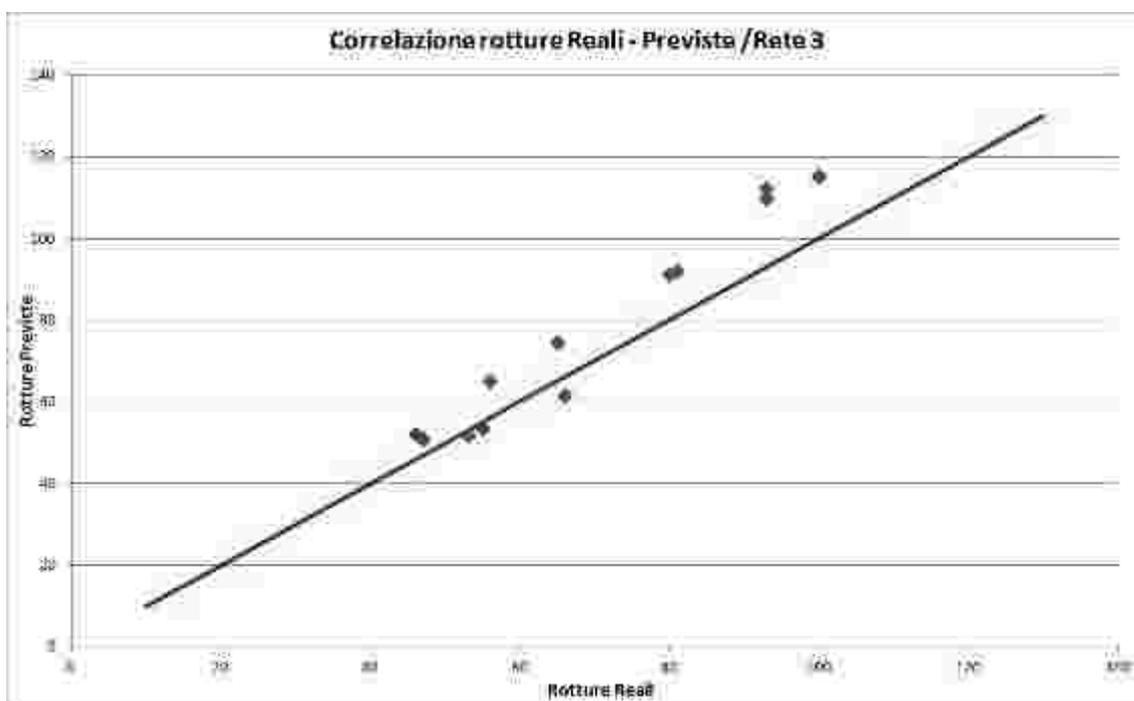


Figura 98 - Grafico a dispersione delle rotture Reali e Previste per la Rete 3

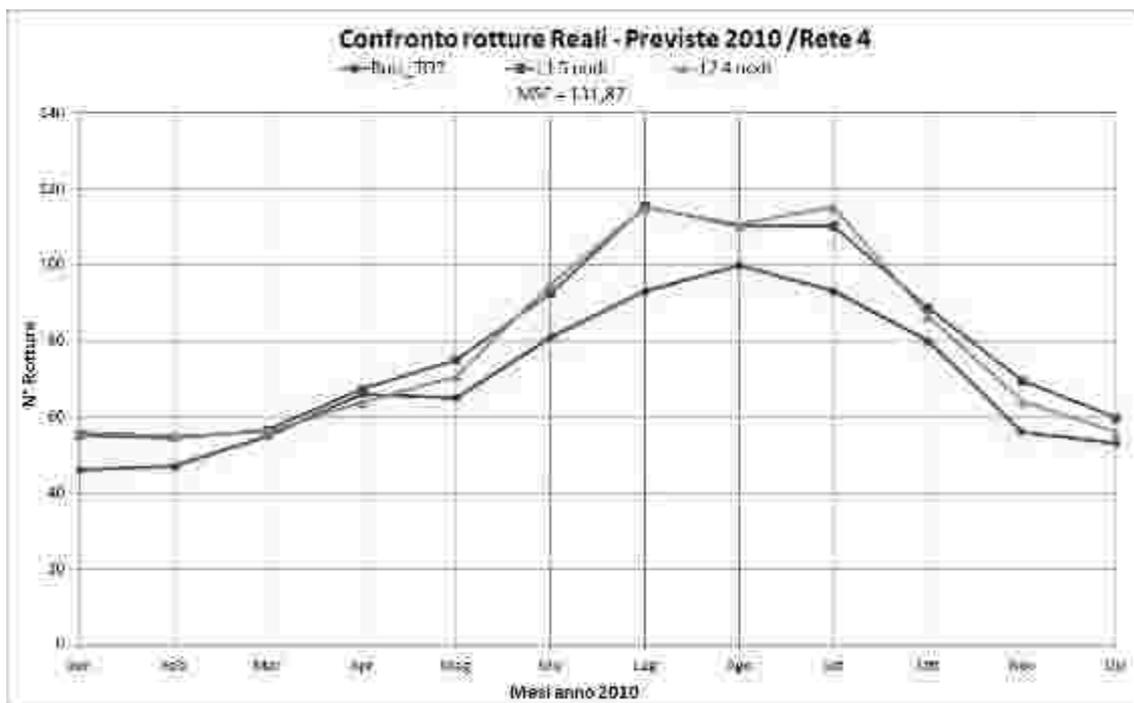


Figura 99 - Grafico a linee delle rotture Reali e Previste per la Rete 4

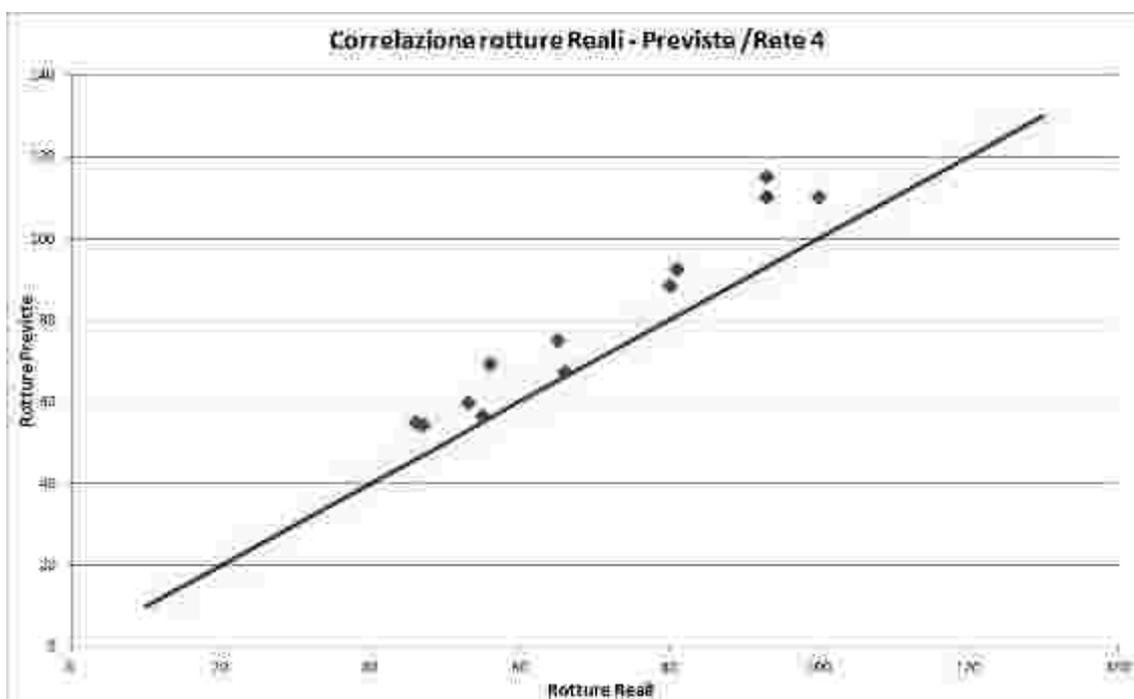


Figura 100 - Grafico a dispersione delle rotture Reali e Previste per la Rete 4

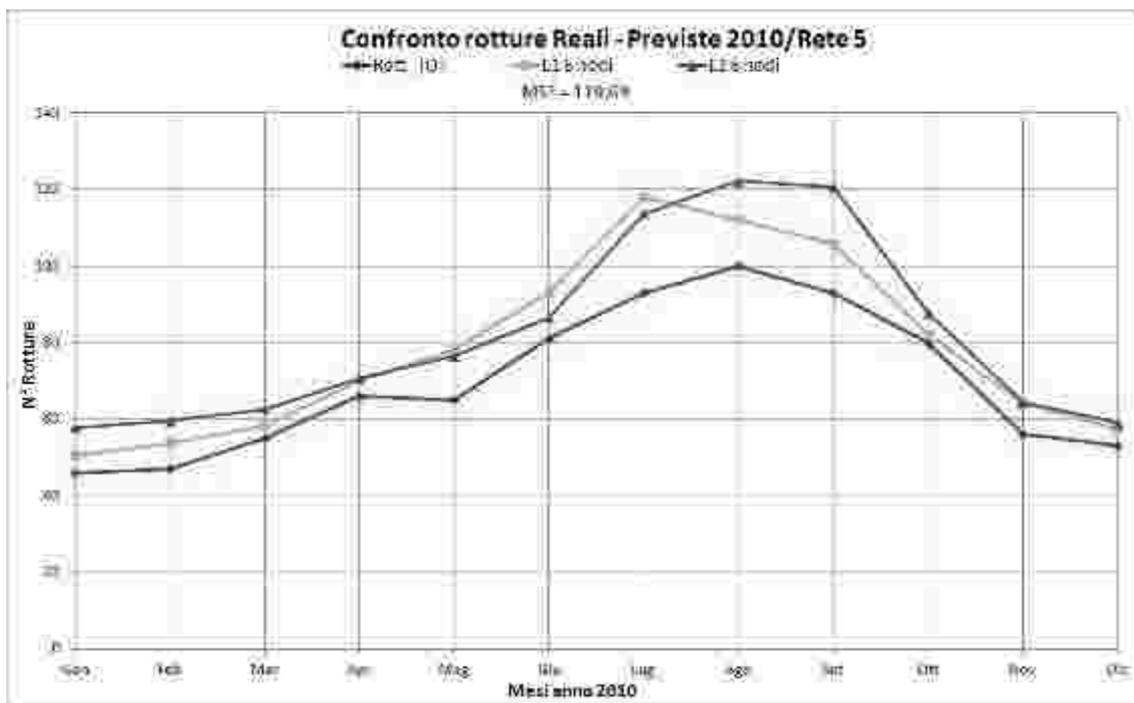


Figura 101 - Grafico a linee delle rotture Reali e Previste per la Rete 5

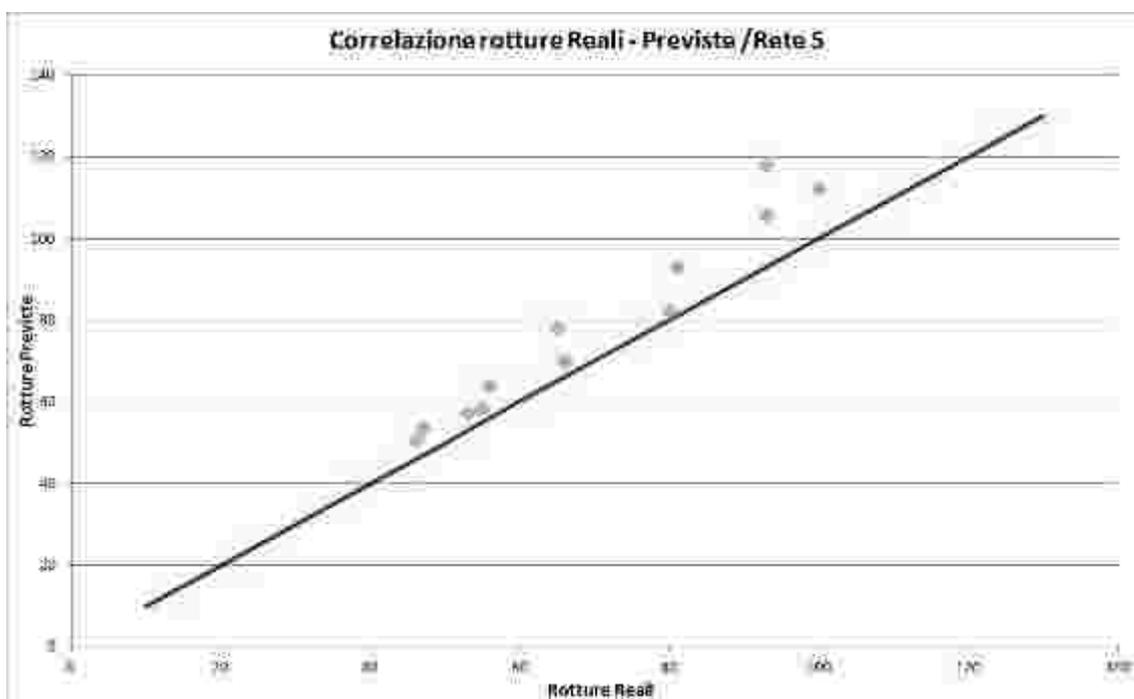


Figura 102 - Grafico a dispersione delle rotture Reali e Previste per la Rete 5

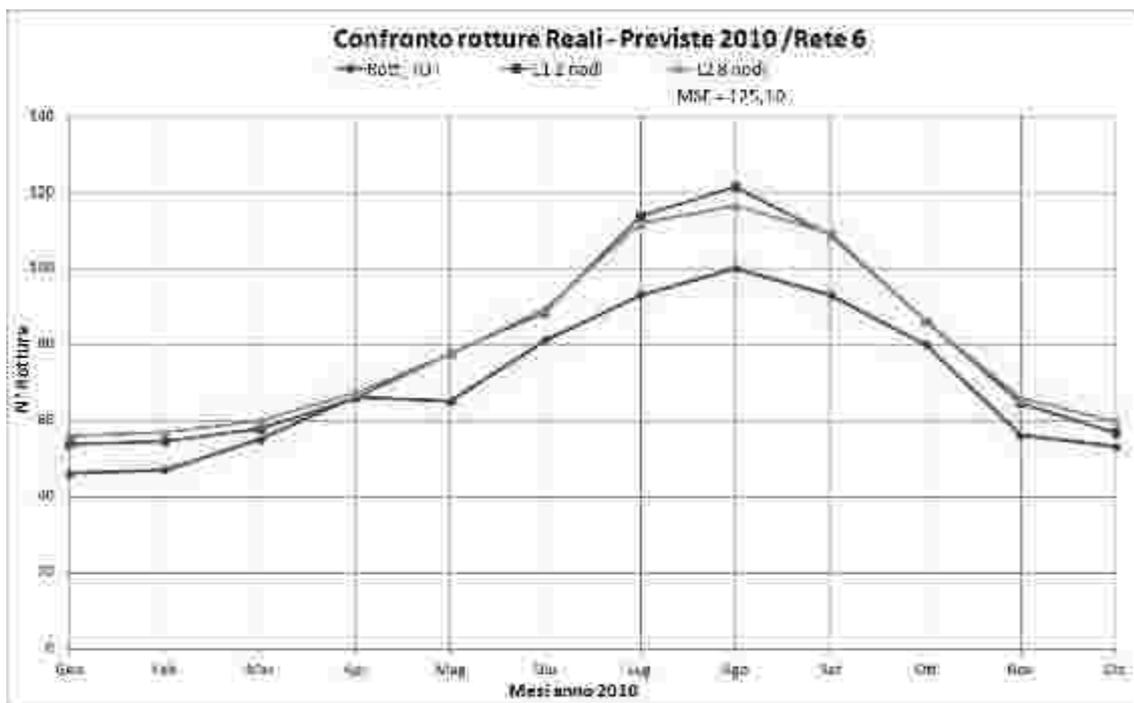


Figura 103 - Grafico a linee delle rotture Reali e Previste per la Rete 6

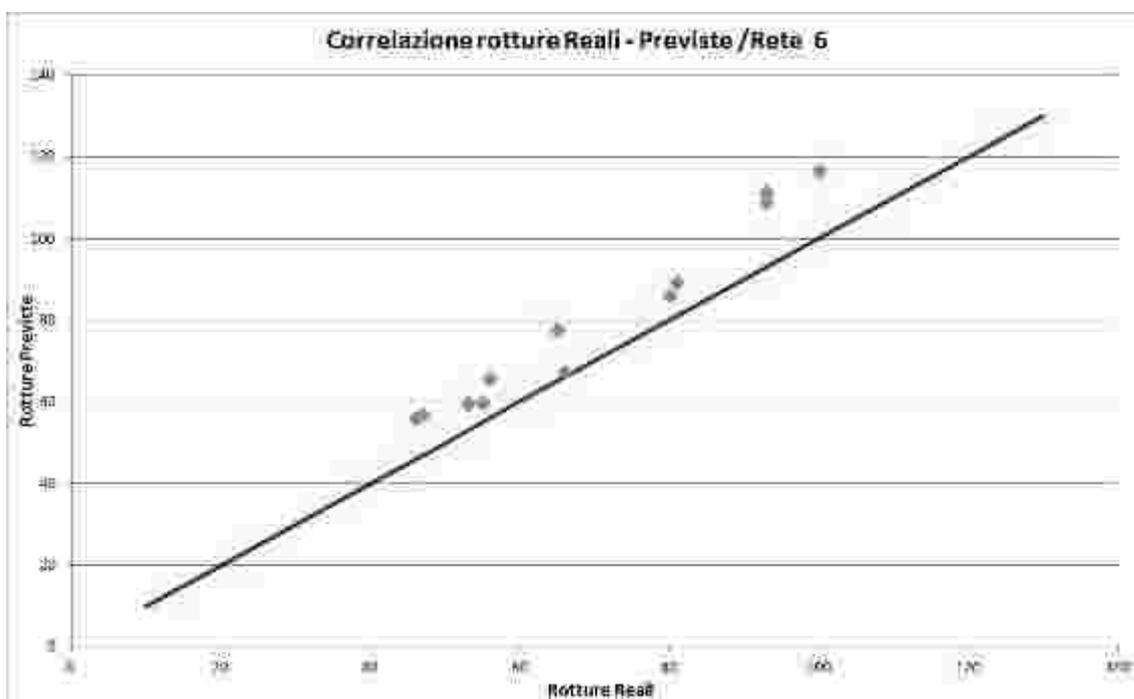


Figura 104 - Grafico a dispersione delle rotture Reali e Previste per la Rete 6

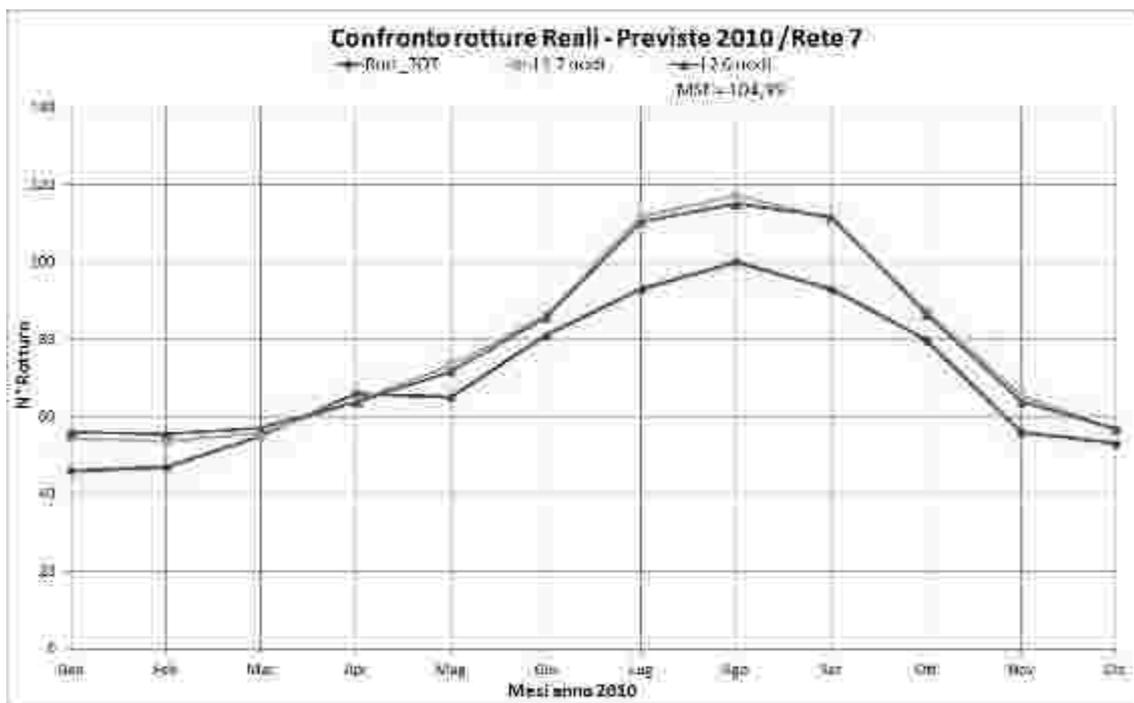


Figura 105 - Grafico a linee delle rotture Reali e Previste per la Rete 7

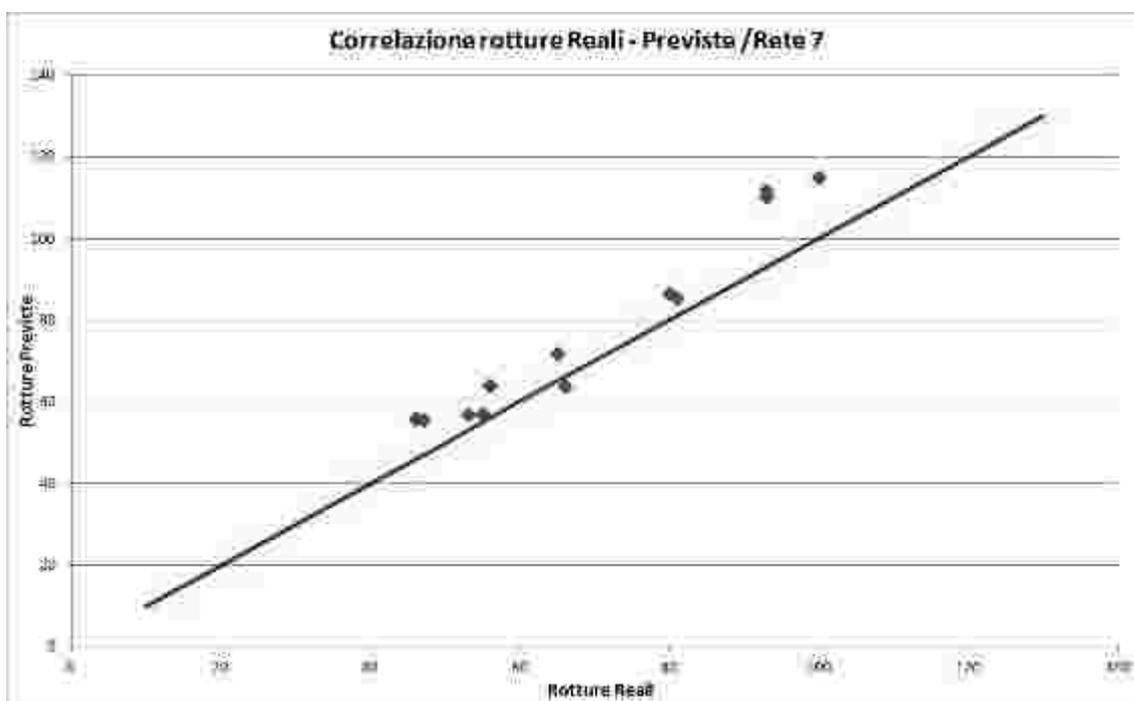


Figura 106 - Grafico a dispersione delle rotture Reali e Previste per la Rete 7

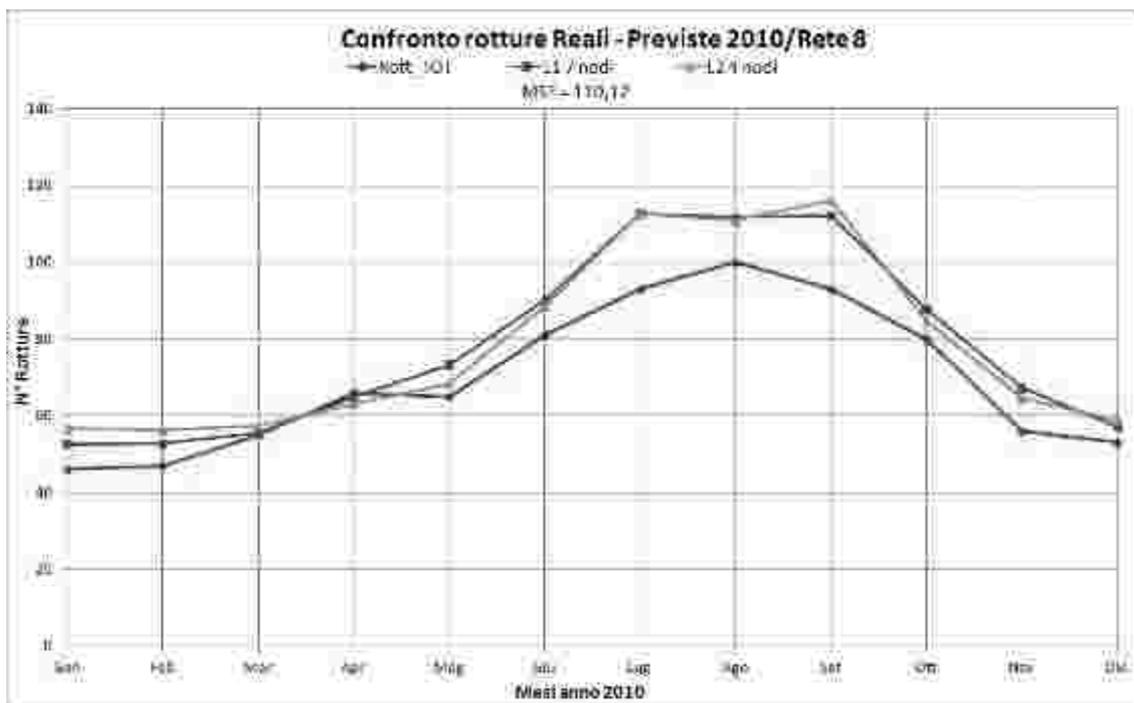


Figura 107 - Grafico a linee delle rotture Reali e Previste per la Rete 8

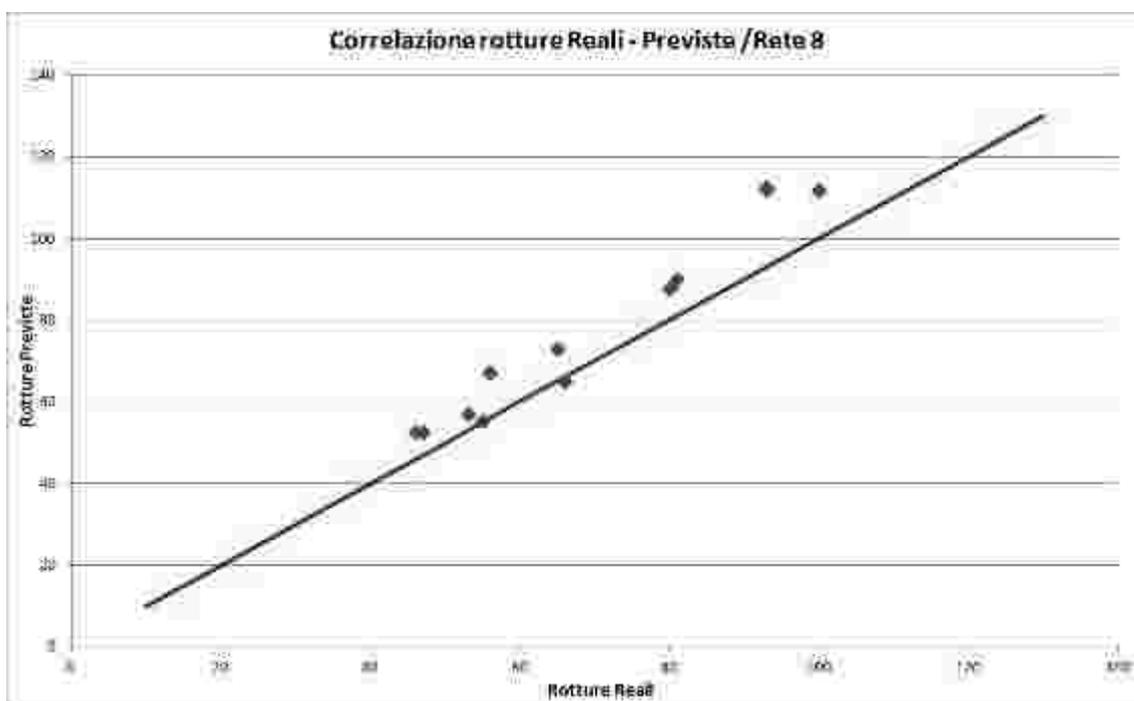


Figura 108 - Grafico a dispersione delle rotture Reali e Previste per la Rete 8

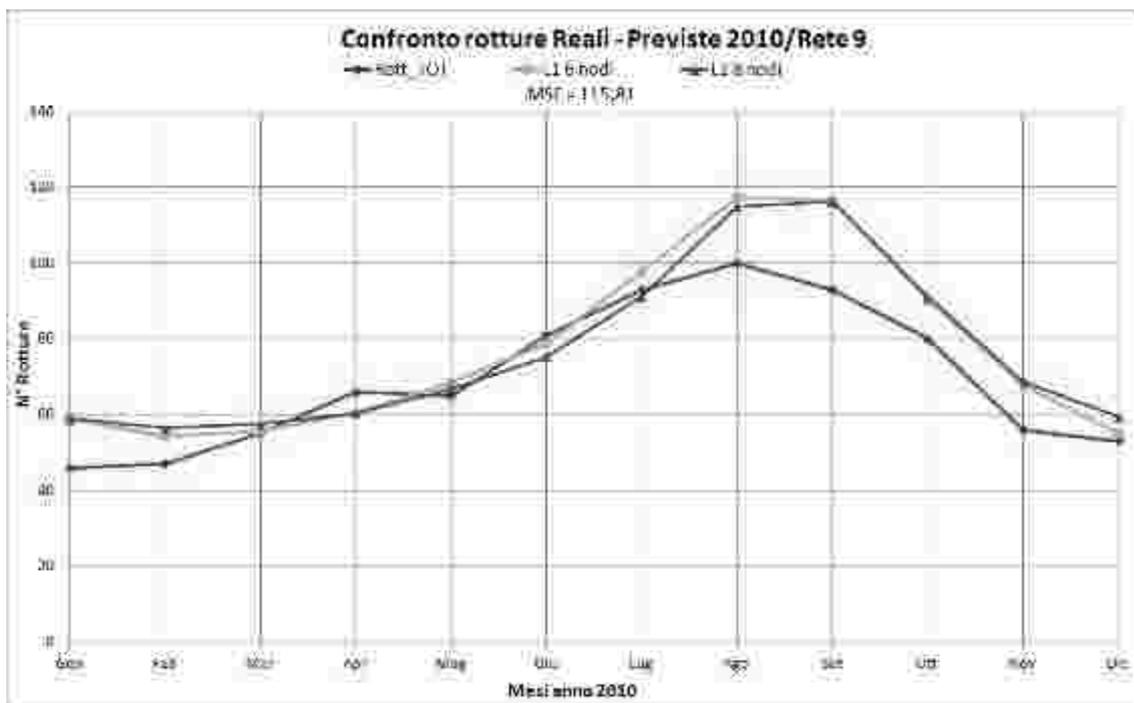


Figura 109 - Grafico a linee delle rotture Reali e Previste per la Rete 9

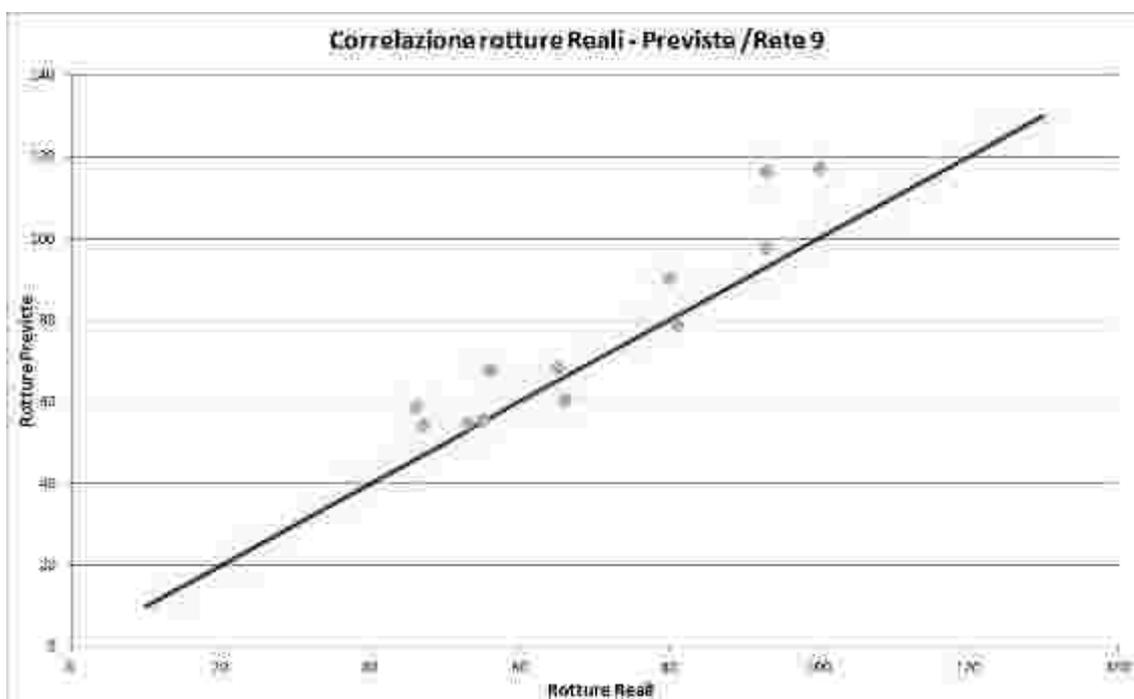


Figura 110 - Grafico a dispersione delle rotture Reali e Previste per la Rete 9

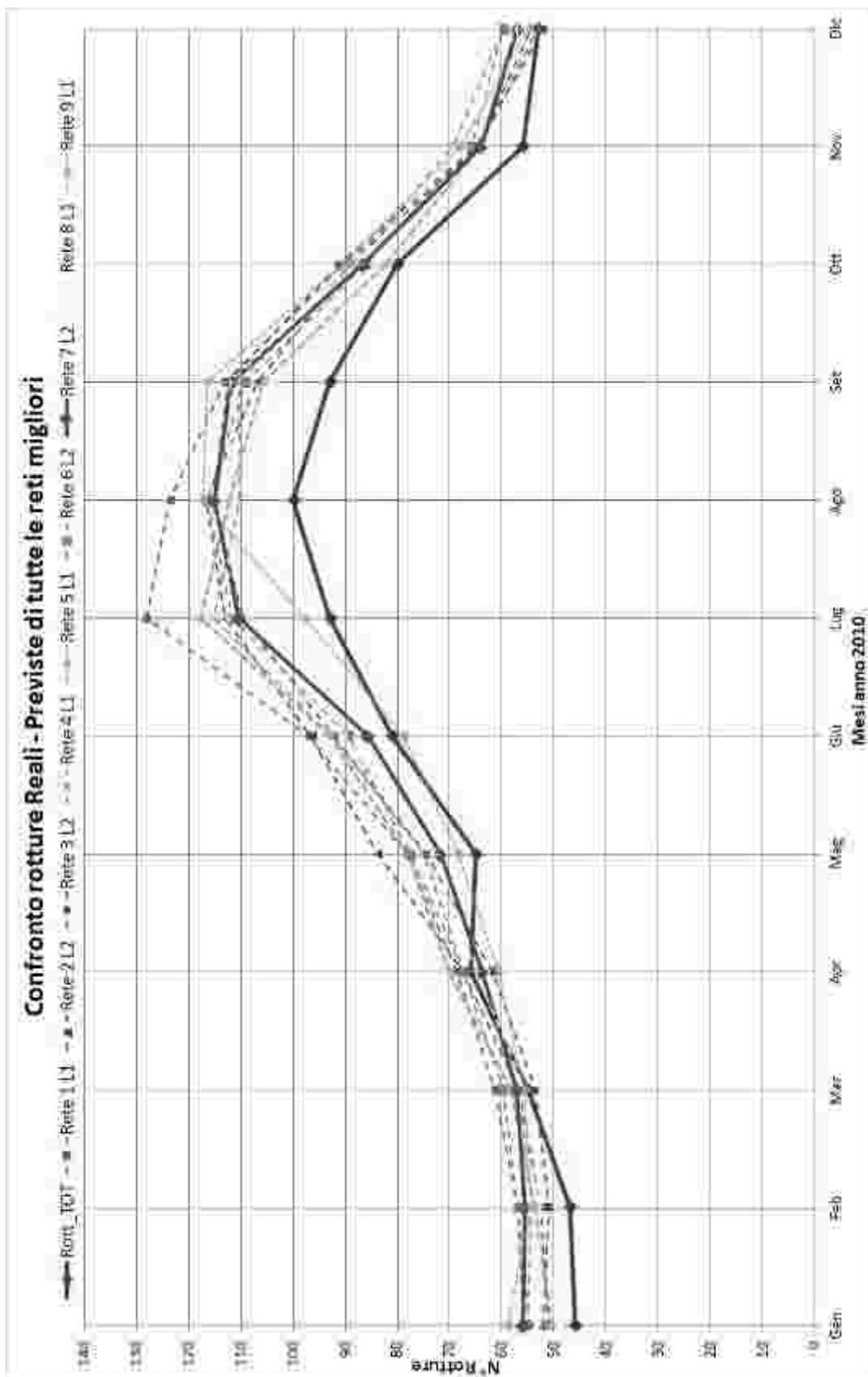


Figura 111 - Grafico a linee delle rotture Reali e Previste per ogni Rete

Tutti i grafici a linee (nella parte superiore della pagina), inferiormente alla definizione della Rete Neurale migliore tra le due indicate in Legenda, riportano per ogni rete il rispettivo valore del MSE.

I grafici a dispersione (nella parte inferiore della pagina), riportano invece solo i dati di rottura riferiti alla suddetta configurazione migliore: per una maggiore chiarezza, si è quindi deciso di rappresentarli con lo stesso colore utilizzato nel grafico precedente.

La retta che compare in essi, è stata appositamente realizzata per evidenziare il trend di stima dei valori previsti. Si osserva chiaramente, infatti, che la quasi totalità dei dati (fanno eccezione le Reti 3, 7, 8 e 9 per pochi valori ciascuna) giacciono superiormente al tale retta: ciò significa che i valori sono sovrastimati.

Questo, osservabile anche dai grafici a linee, può essere imputabile all'andamento decrescente delle rotture totali negli undici anni osservati. Come si ricorda dalle osservazioni effettuate nel Capitolo 3, negli anni l'andamento degli eventi di rottura tende a diminuire, cioè il valore massimo degli eventi di rottura di ogni anno tende a calare con il passare degli anni. L'anno 2010, presenta così il minor numero di rotture totali dell'intero periodo osservato, con picco quasi dimezzato rispetto ai primi anni.

Il trend sopra descritto rappresenta una particolarità della rete in studio, difficilmente valutabile ed ancor più difficoltosamente prevedibile dal modello.

Dall'ultimo grafico, rappresentante l'andamento delle rotture per l'architettura valutata migliore di ogni diversa Rete, è evidenziata in linea continua la Rete 7 (ed ovviamente le rotture reali), di riferimento in base al criterio del MSE.

Giunti a questo punto dell'esposizione dei risultati, si reputa opportuno riportare i valori dei parametri della Rete 7. Ricordiamo che essa è formata da 2 layer nascosti, composti ognuno da 6 nodi.

	Bias	Tempo	Uoggia (t)	Temperatura (t)	Uoggia (t-1)	Temperatura (t-1)	Uoggia (t-2)	Temperatura (t-2)	Uoggia sum (3 mesi)
	1	-0,0000	0,0000	-0,0500	0,0000	-0,0500	0,0000	-0,0500	-0,0500
Hdn1_bias	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Hdn1_Nrn1	0,7242	0,8843	0,2615	-1,5357	-0,0407	0,9301	0,1382	0,4655	0,6370
Hdn1_Nrn2	0,2138	-0,5720	0,2591	1,2910	-0,0525	0,7053	0,2159	0,8408	-0,7743
Hdn1_Nrn3	0,0189	-0,1228	0,0998	-0,4525	-0,3227	-0,5622	0,1078	-0,6030	0,2985
Hdn1_Nrn4	-1,2816	-0,7021	-0,6381	1,0025	-0,1198	1,1500	-0,0000	1,0703	-1,0404
Hdn1_Nrn5	-1,0762	-0,0270	-0,7558	1,9240	-0,0688	2,1258	-0,0372	0,0321	-0,8232
Hdn1_Nrn6	0,1669	-0,2943	0,4612	-0,3262	-0,2382	-0,3381	0,1583	-0,5361	0,7578
	1,0000	0,7097	0,3969	0,6708	0,1888	0,1526	0,5370		
Hdn2_bias	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Hdn2_Nrn1	0,2211	0,6208	-0,0304	-0,5551	0,0930	0,9338	0,4083		
Hdn2_Nrn2	0,2554	0,8887	-0,4324	0,5105	-1,0823	1,1404	0,7207		
Hdn2_Nrn3	-0,0031	-0,2782	0,4287	-0,4003	0,3371	0,0017	-0,3179		
Hdn2_Nrn4	0,2882	0,3554	-0,2602	-0,0688	-1,0394	-0,6408	0,4282		
Hdn2_Nrn5	0,0768	0,2897	-0,7951	-0,1175	0,0090	-0,4981	0,1640		
Hdn2_Nrn6	-0,0545	0,9890	-0,3120	-0,1333	-0,5552	-0,7507	-0,2321		
	1,0000	0,3305	0,7711	0,2918	0,5341	0,4768	0,3789		
Op_bias	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
Op_Nrn1	0,3200	0,9488	-0,0650	0,5193	-1,1703	-0,4598	-0,8170		
	1,0000	0,1170							

Tabella 11 – Parametri costituenti l’architettura della Rete 7

In conclusione, nel corso di questo capitolo sono stati esposti i principali risultati ottenuti, ripercorrendo le fasi della procedura di ricerca adottata ed individuando al termine, nella Rete 7 a 2 layer e 6 nodi, la configurazione neurale migliore nel problema della ricerca di un simulatore delle rotture totali, basandosi sui soli dati climatici.

Essa verrà utilizzata ora per ulteriori applicazioni integrative, con l’ulteriore fine di valutarne le effettive capacità di applicazione anche a casistiche differenti da quelle per cui è stata sviluppata.

Si vuole inoltre puntualizzare che la Rete 9, pur non costituendo la configurazione migliore, gode comunque di una notevole importanza, in quanto rappresenta l’unica rete realmente adatta ad un’applicazione di previsione futura, non richiedendo in input nessun dato riferito al tempo attuale t .

CAPITOLO 7

Applicazioni integrative

La metodologia di ricerca sin qui utilizzata, è finalizzata alla ricerca della Rete Neurale che meglio interpreta i legami climatici coinvolti nell'ampia casistica delle rotture nelle tubazioni acquedottistiche.

A questo scopo, nell'intero processo operativo, sono stati utilizzati i dati di rottura totali. Dagli studi effettuati preliminarmente, però, si è evidenziato come non tutti i materiali componenti una rete acquedottistica siano influenzabili in egual modo da fattori climatici esterni.

In particolare, per la rete acquedottistica in studio, si è infatti evidenziato come solo il polietilene ad alta densità (PE), a bassa densità (PB) e, in misura minore, il fibrocemento (FIB), presentino evidenti relazioni con pioggia e temperatura. Gli altri valori, rappresentanti le rotture di acciaio, ghisa e polivinilcloruro, compaiono quindi come informazione supplementare non necessaria, generando una sorta di “rumore di fondo” nel set di dati utilizzato.

Questo effetto è comunque limitato, poiché il PE, il PB e il FIB rappresentano insieme oltre il 90% dell'informazione relativa alle rotture totali.

Inoltre, ricordiamo che, come già evidenziato in precedenza, le rotture coinvolgono tubazioni sia componenti la rete principale che i soli organi di presa, dove quest'ultimi raccolgono la quantità di dati maggiore, costituendo così un grande insieme non diversificato nella composizione.

In questo capitolo, per verificare quanto la Rete 7M (chiameremo così, per una maggiore chiarezza, la Rete 7 a 2 layer e 6 nodi identificata nel capitolo precedente) sia effettivamente in grado di adattarsi anche all'utilizzo in contesti leggermente diversi da quelli in cui è stata generata e verificare la correttezza della metodologia utilizzata, si realizzeranno diverse applicazioni integrative.

7.1 Applicazione al solo PE

Con riferimento a quanto già detto all'inizio del presente capitolo, si è deciso di applicare la Rete 7M ad un set di dati in input identico, nella struttura, a quello già utilizzato in precedenza (cioè Training, Validazione e Test), ma composto questa volta dai soli dati di rottura del polietilene ad alta densità.

Questa scelta, oltre che per il legame con gli agenti climatici maggiormente evidenziato dal materiale stesso, è stata effettuata anche in funzione del numero di dati di rottura ad esso riferito, molto maggiore rispetto agli altri materiali componenti la rete.

Proceduralmente, quindi, si è chiesto al programma di prevedere, sempre riferendosi all'anno 2010 componente il periodo di Training, le rotture relative al solo PE, utilizzando però gli stessi valori dei parametri ricavati in precedenza (i pesi dei nodi).

Per effettuare una valida comparazione della capacità di adattamento della Rete 7M, si è deciso di ricercare nuovamente la migliore configurazione possibile della Rete 7 (che chiameremo Rete 7PE), utilizzando i dati relativi al solo PE. Si ripercorre così la Fase 1, anche se solo per una rete in particolare.

Così facendo, si è potuto confrontare i risultati anche rispetto a quelle che sono le migliori configurazioni (sempre a uno e due layer) ottenibili in questo contesto, oltre che, ovviamente, rispetto ai reali dati di rottura in nostro possesso.

Riportiamo quindi i risultati ottenuti dalle simulazioni per la Rete 7PE, rappresentando in tabella i valori del MSE e dell'ARE relativi al periodo di Training e Validazione, così come forniti dal programma. Ad ogni valore, è associata la corrispondente epoca di individuazione (Epoch), identificata ovviamente dal minimo[MSEvalidazione]. Il tutto è suddiviso in due blocchi che identificano il numero di layer nascosti (L1 o L2).

Nodi	Rete 7PE											
	Epoch	MSE training L1	ARE training L1	MSE validation L1	ARE validation L1	Epoch	MSE training L2	ARE training L2	MSE validation L2	ARE validation L2	Epoch	ARE validation
1	15	561,264	22,23%	92,868	16,49%	42	544,319	20,94%	117,528	20,40%		
2	14	577,381	22,77%	83,931	14,80%	27	590,952	22,34%	87,280	16,45%		
3	11	584,620	22,55%	86,892	16,40%	16	589,781	22,05%	88,490	16,86%		
4	10	579,633	22,72%	84,759	15,02%	14	604,032	22,44%	82,449	16,17%		
5	13	585,414	23,61%	83,271	14,80%	18	610,440	22,87%	81,437	15,90%		
6	9	566,695	22,56%	89,773	15,27%	15	621,911	23,85%	74,797	15,35%		
7	10	581,632	22,91%	83,067	14,81%	13	600,565	22,62%	82,546	16,04%		
8	10	582,226	23,22%	85,659	14,56%	12	571,918	21,86%	91,372	16,55%		
9	8	602,464	23,60%	75,271	14,18%	11	611,401	22,87%	80,289	15,86%		
10	10	579,582	23,55%	85,173	14,42%	16	632,314	23,39%	73,422	14,56%		
11	9	576,171	23,20%	87,127	14,42%	10	565,970	22,13%	93,500	16,44%		
12	9	592,199	23,41%	79,623	14,30%	10	590,162	22,64%	88,838	16,29%		
13	7	565,698	22,66%	90,391	15,10%	11	601,622	22,76%	82,534	15,68%		
14	6	583,503	23,22%	81,506	14,55%	9	612,399	22,11%	87,704	17,38%		
15	6	575,077	22,73%	87,059	14,87%	9	592,791	22,25%	96,656	17,47%		
16	6	608,452	22,62%	75,638	15,10%	9	584,385	22,71%	86,266	15,43%		
17	8	567,392	23,45%	91,797	14,56%	7	619,672	22,31%	96,422	18,45%		
18	40	575,174	23,85%	95,124	14,20%	19	525,503	21,68%	108,608	15,45%		
19	33	573,033	23,90%	96,787	14,36%	8	552,313	21,60%	103,664	16,43%		
20	22	575,694	24,23%	96,249	14,17%	7	569,475	22,01%	107,972	18,70%		

Tabella 12 - Risultati delle simulazioni per la Rete 7PE

Nella tabella, sono evidenziati in grassetto alcuni valori minimi del MSE: si nota che le configurazioni migliori risultano essere a 16 nodi per un layer nascosto e 15 nodi per due layer nascosti.

Queste due architetture della Rete 7PE sono poi state utilizzate, insieme alla Rete 7M, nella successiva fase di previsione. Con essa si effettua una comparazione tra i valori di rottura ottenuti dalla simulazione nel periodo di Training, ripercorrendo la già citata Fase 2.

Immettendo mese per mese i dati di pioggia e temperatura nel programma NNPred, con struttura relativa alla Rete 7 in studio (e quindi i rispettivi valori dei pesi per M e PE), si è ottenuta una serie di dati di rottura riferiti al solo polietilene ad alta densità per l'anno 2010.

Con questo metodo, si è effettuata una vera e propria calibrazione, effettuando una previsione dei dati di rottura totale. Questi dati sono poi stati confrontati con quelli realmente osservati per l'anno in oggetto, anche mediante l'utilizzo del MSE appositamente calcolato, valutando così le capacità di approssimazione delle reti.

Come in precedenza, si riporta la tabella riassuntiva dei valori ottenuti nell'elaborazione.

VALORI TEST		PREVISTI		
		RETE 7M	RETE 7PE	
Tempo	Rott. PE	L2 6 nodi	L2 9 nodi	L2 10 nodi
2010 Gen	31	39,28	35,98	38,33
Feb	26	38,90	35,09	37,69
Mar	27	40,26	37,22	39,27
Apr	50	46,19	44,15	44,18
Mag	33	53,34	50,33	50,29
Giù	60	65,56	62,41	60,60
Lug	77	87,53	80,33	75,74
Ago	78	91,70	82,87	82,23
Set	77	88,78	83,35	81,87
Ott	61	66,48	63,12	63,78
Nov	36	46,42	46,98	46,81
Dic	36	40,16	37,85	38,89
	MSE =	121,91	63,00	70,85
	NN_pred MSE valid	153,63	0,00	0,00

Tabella 13 - Valori di previsione ottenuti per sole rotture PE

Anche in questo caso come nei precedenti, i nuovi valori dell'errore risultano inferiori, evidenziando la buona capacità di adattamento delle reti.

La configurazione con minore valore del MSE, risultante ovviamente appartenente alla Rete 7PE, è stata evidenziata in giallo.

Di seguito, per meglio visualizzare i dati, si riportano anche i grafici lineari e a dispersione, per rappresentare l'andamento delle rotture stimate e note.

Nel grafico a linee (parte superiore della pagina), sono rappresentate con riga continua le rotture totali di PE e la rispettiva configurazione che meglio approssima tale andamento (Rete 7PE a 1 layer e 9 nodi). Le altre rotture sono identificate da un tratteggio.

Il grafico a dispersione (nella parte inferiore della pagina), riporta invece i soli dati di rottura della Rete 7M e della Rete 7PE migliore, sopraccitata, rispetto alle totali del PE. Essi sono rappresentati con lo stesso colore utilizzato nel grafico precedente, per una maggiore chiarezza.

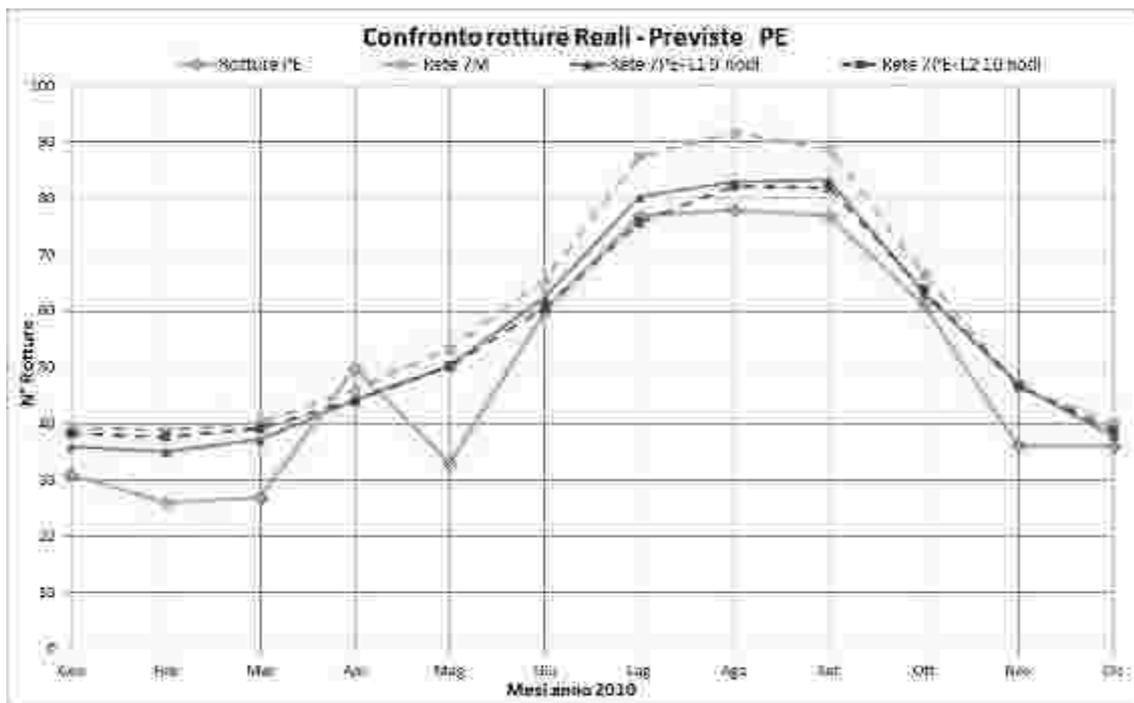


Figura 112 - Grafico a linee delle rotture Reali e Previste per solo PE

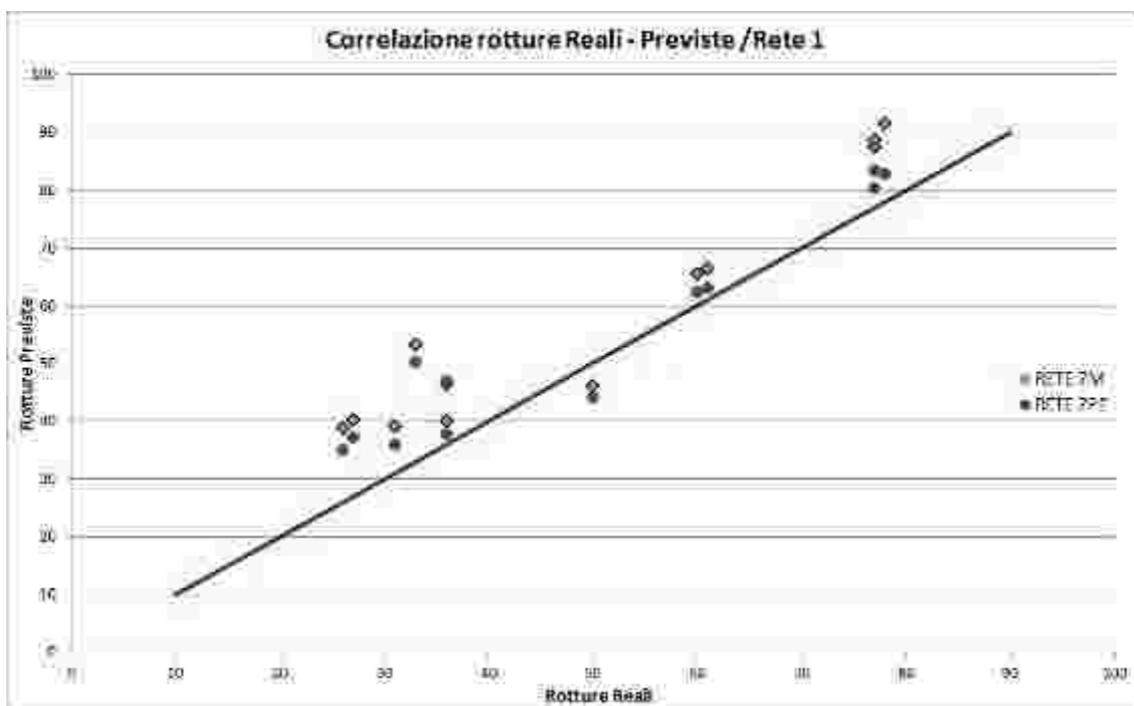


Figura 113 - Grafico a dispersione delle rotture Reali e Previste per solo PE

Osservando i grafici, si possono trarre alcune conclusioni:

1. Dal grafico a linee si osserva che, pur essendo la configurazione ad un layer associata alla Rete 7PE quella che meglio approssima l'andamento delle reali rotture, anche la Rete 7M presenta risultati tutto sommato accettabili.

Essa non si discosta eccessivamente dalle altre simulazioni, fornendo un riscontro analogo pur senza aver ripercorso tutto il processo di Training e Validazione necessario alla Rete 7PE, descritto nella Fase 1. Presenta perciò il grande vantaggio di un'applicazione immediata.

2. Dal grafico a dispersione si nota che, dalla disposizione dei dati rispetto alla retta, anche in questo caso i valori sono per la maggior parte sovrastimati. Questo, come già osservato, può essere imputabile all'andamento decrescente delle rotture negli undici anni osservati, fattore che si verifica ovviamente anche per il solo polietilene ad alta densità.

In definitiva, si può concludere che, nella presente applicazione sulle sole rotture riferite al PE, la Rete 7M abbia riportato una soddisfacente adattabilità di previsione, fornendo risultati quanto meno comparabili con il modello migliore, identificato dalla Rete 7PE appositamente realizzata.

Ciò fornisce anche un'ulteriore garanzia della funzionalità del programma NNPred e della validità della metodologia sin qui utilizzata.

7.2 Applicazione differenziata Prese/Condotte principali

Analogamente a quanto esposto nel paragrafo precedente, si è proceduto alla valutazione delle prestazioni della Rete 7M rispetto alle rotture differenziate, questa volta, tra rete principale e prese.

Si precisa che, per cercare di limitare le disambiguità, si è deciso di identificare la rete principale con l'analogo termine "condotte principali", utilizzato anche nel titolo del presente paragrafo.

La metodologia utilizzata è la stessa già descritta nell'applicazione vista precedentemente. Si procede quindi all'esposizione dei risultati e delle relative osservazioni.

7.2.1 Prese

Riportiamo quindi la tabella relativa ai risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate sulla Rete 7, appositamente modificata nei dati in input, così da valutare le sole rotture inerenti alle prese. Essa verrà indicata da ora in poi come Rete 7Prese.

In tabella sono rappresentati i valori del MSE e dell'ARE relativi al periodo di Training e Validazione, così come forniti dal programma. Ad ogni valore, è associata la corrispondente epoca di individuazione (Epoch), identificata ovviamente dal minimo[MSEvalidazione]. Il tutto è suddiviso in due blocchi che identificano il numero di layer nascosti (L1 o L2).

I valori evidenziati in grassetto, rappresentano i minimi del MSE: si nota che le configurazioni migliori risultano essere a 6 nodi per entrambe le impostazioni di hidden layer.

		Rete 7 Prese									
NODI	Epoch	MSE training L1	ARE training L1	MSE validation L1	ARE validation L1	Epoch	MSE training L2	ARE training L2	MSE validation L2	ARE validation L2	
1	16	578,578	21,12%	148,962	18,43%	41	578,795	19,88%	161,307	20,04%	
2	11	597,263	21,58%	194,230	17,03%	28	626,038	21,09%	124,990	18,16%	
3	10	611,066	21,49%	128,293	17,33%	17	614,823	21,11%	125,773	17,51%	
4	10	609,185	21,40%	127,886	16,94%	15	620,933	21,51%	119,187	16,99%	
5	11	601,361	21,21%	185,928	17,67%	19	631,790	21,90%	117,311	16,79%	
6	9	638,177	21,75%	119,050	16,37%	16	636,654	21,82%	112,553	16,54%	
7	11	619,542	21,39%	123,964	16,84%	13	635,674	21,31%	120,222	17,73%	
8	8	627,813	21,91%	121,469	16,33%	12	601,021	20,89%	181,378	18,23%	
9	7	618,662	21,59%	122,901	16,93%	11	645,983	21,50%	119,992	17,78%	
10	8	624,307	21,32%	120,325	16,93%	17	644,712	22,05%	114,391	16,43%	
11	10	580,024	21,39%	146,751	17,19%	10	589,453	20,63%	135,789	18,38%	
12	7	627,958	21,37%	118,216	16,80%	10	613,987	20,92%	181,207	18,37%	
13	8	587,352	21,09%	153,647	17,28%	11	632,195	21,10%	125,001	17,93%	
14	8	592,070	21,18%	139,043	17,23%	9	644,720	20,70%	131,464	19,10%	
15	6	610,898	20,82%	126,132	17,63%	9	612,338	20,62%	140,236	19,48%	
16	6	648,388	21,16%	116,013	17,31%	8	660,885	20,90%	130,743	18,84%	
17	50	593,955	22,10%	150,598	16,97%	7	642,312	20,75%	140,992	20,00%	
18	6	583,210	21,03%	141,807	18,04%	6	605,777	20,09%	156,058	21,04%	
19	50	660,552	22,44%	152,788	16,85%	8	584,815	20,00%	152,945	20,56%	
20	5	567,933	20,42%	149,469	19,00%	7	586,500	20,19%	158,822	20,90%	

Tabella 14 - Risultati delle simulazioni per la Rete 7Prese

Le due architetture evidenziate della Rete 7Prese sono poi state utilizzate, insieme alla Rete 7M, nella successiva fase di previsione, effettuando la comparazione tra i valori di rottura ottenuti dalla simulazione.

Immettendo mese per mese i dati di pioggia e temperatura nel programma NNPred, con i rispettivi valori dei pesi per Rete 7M e Prese, si è ottenuta una serie di dati di rottura riferiti alle sole prese per l'anno 2010.

Da questi dati è poi stato calcolato il rispettivo MSE per poter confrontare tra loro le diverse reti e valutare così le loro capacità di previsione. Nell'ultima riga, è stato riportato per completezza anche il valore del MSE di ogni configurazione, ricavato dalle precedenti fasi di validazione.

Si riporta quindi la tabella riassuntiva dei valori ottenuti nell'elaborazione, dove la configurazione migliore è evidenziata in azzurro e il valore più basso del MSE in giallo.

VALORI TEST		PREVISTI			
Tempo	Rott_Prese	RETE 7M	RETE 7Prese		
		L2 6 nodi	L1 6 nodi	L2 6 nodi	
2010 Gen	44	44,92	44,59	45,95	
Feb	44	44,52	43,52	45,69	
Mar	43	45,94	45,53	47,13	
Apr	55	52,16	51,83	53,06	
Mag	51	59,65	59,60	59,25	
Giu	69	72,46	69,11	69,71	
Lug	81	95,48	85,93	88,94	
Ago	82	99,86	93,13	92,19	
Set	82	96,80	89,88	89,65	
Ott	64	73,40	73,06	69,87	
Nov	45	52,41	56,59	52,73	
Dic	40	45,84	47,63	46,88	
		MSE =	85,78	48,00	38,58
		NN_pred MSE valid =	153,63	113,0498	112,5527

Tabella 15 - Valori di previsione ottenuti per sole rotture sulle prese

Anche in questo caso, i nuovi valori dell'errore risultano inferiori, evidenziando la buona capacità di adattamento delle reti.

Di seguito, per meglio visualizzare i dati, si riporta il grafico lineare che rappresenta l'andamento delle rotture stimate e note. In esso sono rappresentate con riga continua le rotture totali in Presa e la configurazione che meglio approssima tale andamento (Rete 7Presa a 2 layer e 6 nodi). Gli altri dati sono identificati da un tratteggio.

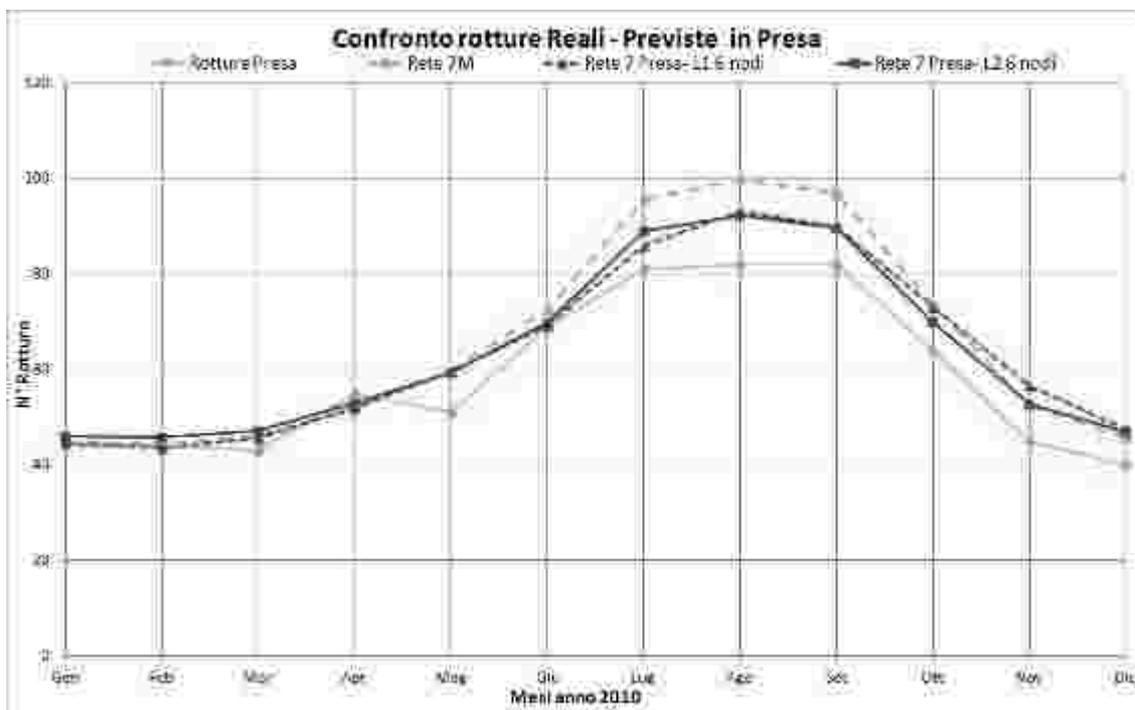


Figura 114 -- Grafico a linee delle rotture Reali e Previste per sole rotture in presa

Non è stato reputato necessario rappresentare i dati anche con un grafico a dispersione, in quanto è comunque ben evidenziata la tendenza del programma a sovrastimare le rotture, come già osservato in precedenza.

Anche in questa applicazione, i risultati forniti dalle Rete 7M sono accettabili e comparabili con quelli appositamente ricavati dalla Rete 7Presa, seppur ovviamente meno precisi.

In definitiva, la Rete 7M ha fornito nuovamente riscontri positivi.

7.2.2 Condotte principali

La tabella nella pagina seguente, rappresenta i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate sulla Rete 7, appositamente modificata nei dati in input, così da valutare le sole rotture inerenti alle condotte principali. Essa verrà indicata d'ora in poi come Rete 7Cond_pr.

In essa sono rappresentati i valori del MSE e dell'ARE relativi al periodo di Training e Validazione. Ad ogni valore, è associata la corrispondente epoca di individuazione (Epoch), identificata ovviamente dal minimo[MSEvalidazione]. Il tutto è suddiviso in due blocchi che rappresentano il numero di layer nascosti (L1 o L2).

I valori evidenziati in grassetto, rappresentano i minimi del MSE: le configurazioni migliori risultano essere a 3 nodi per un layer nascosto e 2 nodi per due layer nascosti.

Le due architetture evidenziate della Rete 7Cond_pr sono poi state utilizzate, insieme alla Rete 7M, nella successiva fase di previsione, effettuando la comparazione tra i valori di rottura ottenuti dalla simulazione.

Si riporta quindi, a seguire, la tabella riassuntiva dei valori ottenuti nell'elaborazione, dove la configurazione migliore è evidenziata in azzurro e il valore più basso del MSE in giallo.

Rete 7 Condotte Principali											
NOdi	Epoch	MSE training L1	ARE training L1	MSE validation L1	ARE validation L1	Epoch	MSE training L2	ARE training L2	MSE validation L2	ARE validation L2	ARE validation
1	194	24,894	43,92%	37,920	34,72%	184	24,696	44,01%	36,591	32,45%	
2	230	24,568	44,15%	37,983	36,31%	103	25,372	43,93%	35,293	32,94%	
3	241	24,335	43,50%	36,708	34,32%	80	24,215	42,64%	37,681	34,71%	
4	261	23,481	43,55%	39,213	36,98%	76	24,090	43,00%	36,720	33,59%	
5	245	23,938	43,77%	36,988	35,43%	74	23,880	43,22%	37,263	34,08%	
6	195	25,867	43,54%	39,767	37,36%	70	26,552	42,69%	37,215	33,78%	
7	210	23,960	43,61%	38,531	36,11%	63	24,276	43,41%	37,001	34,03%	
8	249	23,921	43,63%	38,668	36,79%	44	24,660	44,38%	37,041	33,57%	
9	285	23,816	43,52%	38,633	36,55%	57	28,779	43,11%	37,836	34,31%	
10	165	24,528	44,26%	39,912	37,91%	97	22,815	42,07%	37,489	34,41%	
11	19	25,532	45,52%	38,918	32,80%	82	29,008	42,15%	37,895	34,49%	
12	207	23,917	43,81%	39,372	37,28%	94	22,855	42,01%	37,992	35,24%	
13	19	25,010	45,12%	40,214	34,50%	102	22,116	41,26%	38,775	35,28%	
14	254	24,548	44,51%	39,962	38,12%	89	22,828	41,86%	37,942	34,31%	
15	178	24,669	44,47%	39,492	37,74%	106	22,972	42,16%	37,889	35,16%	
16	189	24,171	44,09%	40,495	37,57%	104	22,316	41,38%	38,166	34,66%	
17	19	24,936	44,48%	39,523	32,88%	100	22,462	41,36%	38,195	34,32%	
18	290	24,774	44,74%	40,045	38,16%	93	22,215	41,74%	38,802	34,48%	
19	282	24,714	44,83%	40,025	37,95%	101	21,850	40,79%	39,206	34,34%	
20	232	24,762	44,90%	40,795	38,28%	96	22,261	41,47%	39,513	35,11%	

Tabella 16 - Risultati delle simulazioni per la Rete 7Cond_pr

VALORI TEST		PREVISTI			
Tempo	Rete	RETE 7	RETE 7Cond_pr		
		L2 6 nodi	L1 3 nodi	L2 2 nodi	
2010 Gen	2	6,36	10,57	9,89	
Feb	3	6,23	9,08	9,13	
Mar	12	6,68	9,30	9,29	
Apr	11	8,62	10,49	10,34	
Mag	14	10,97	13,75	12,88	
Giu	12	14,98	16,44	15,67	
Lug	12	22,18	21,47	21,84	
Ago	18	23,55	29,47	28,33	
Set	11	22,59	23,13	23,99	
Ott	16	15,27	17,01	16,55	
Nov	11	8,70	12,96	12,31	
Dic	13	6,64	11,32	10,74	
		MSE =	33,04	42,82	41,82
		NN_pred MSE valid=	153,63	36,71	35,29

Tabella 17 - Valori di previsione ottenuti per sole rotture sulle condotte principali

In ultimo, si riporta il grafico lineare che rappresenta l'andamento delle rotture stimate e note. In esso sono rappresentate con riga continua le rotture totali nelle condotte principali e la configurazione che meglio approssima tale andamento: la Rete 7M. Gli altri dati sono identificati da una linea tratteggiata.

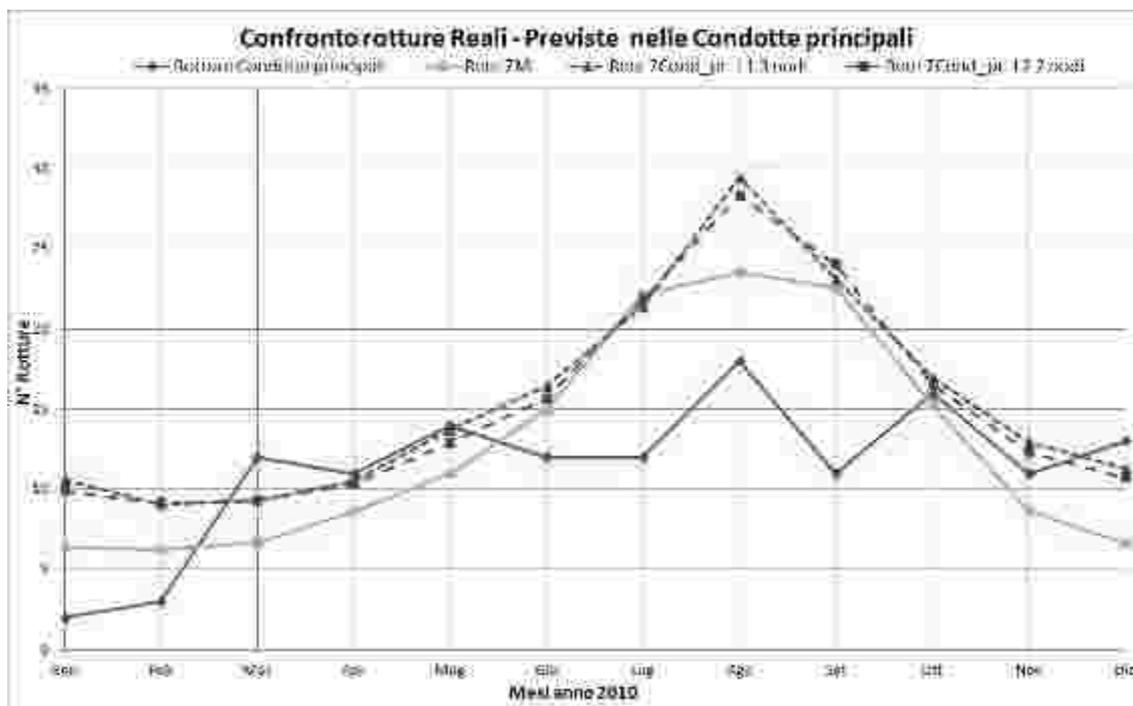


Figura 115 - Grafico a linee delle rotture Reali e Previste per sole rotture sulle condotte principali

Il grafico rappresenta un caso particolare: le rotture riferite alle condotte principali nell'anno 2010 (come negli ultimi della serie considerata), presentano un andamento molto discontinuo, che si discosta notevolmente dalla forma tipica, con picco nel periodo estivo e minimi ad inizio e fine anno.

Inoltre, il numero di rotture stesso è molto minore rispetto a quanto osservato per solo PE o nelle prese, limitando così le considerazioni di tipo statistico, in quanto il campione in esame risulta essere di scarsa entità.

La maggior precisione offerta dalla Rete7M, può essere quindi associata solo ad una casualità, in quanto i fattori sopraindicati limitano effettivamente l'applicabilità del modello a Reti Neurali sin qui utilizzato. Ciò è riscontrato anche dalla Rete 7Con_pr, che non restituisce risultati in grado di seguire, anche solo in modo approssimativo, l'andamento delle reali rotture.

Questo problema, può essere almeno limitato utilizzando diversi periodi in fase di Training, Validazione e Test, anche in funzione del trend decrescente delle rotture osservato negli anni, ed introducendo in input appositi indici.

7.3 Nuova ricerca per PE

Dalle applicazioni eseguite in precedenza, sono emersi diversi fattori che descrivono una funzionalità non ottimale del modello utilizzato. L'origine di questi fattori di incertezza, può essere identificata sia nella metodologia di ricerca che nei dati utilizzati nella Fase 2, preposta a testare le reti.

In particolare, l'anno scelto nel confronto con i dati previsti, il 2010, come già evidenziato in precedenza, risulta caratterizzato da un valore delle rotture al picco minore che in tutti gli altri anni in osservazione.

Dalle analisi precedenti, però, si è messo in evidenza che il modello non è in grado di prevedere questo andamento decrescente; esso, pur ritrovando una relazione tra i dati climatici e le rotture, è come se valutasse una media tra tutti gli anni, non considerando il generale trend della serie storica e generando delle sovrastime.

Inoltre, si è rilevato che esso fornisce buoni risultati per i materiali condizionati nelle rotture dagli ambienti climatici, come ottenuto dall'applicazione al solo PE, e per le rotture riferite alle sole prese. Non risultano invece riproducibili con buona attendibilità, gli eventi di rottura riferiti alle condotte principali, sia per la scarsa numerosità dei dati stessi che per la loro distribuzione annuale molto varia.

Questo comportamento rappresenta una limitazione all'applicabilità del modello a Rete Neurale studiato, seppur di entità poco rilevante.

Nel tentativo di migliorare i risultati ottenibili dal modello, si è quindi deciso di ripercorrere le fasi di apprendimento utilizzate nella metodologia di ricerca, utilizzando solo le reti migliori (Rete 7 e Rete 9) applicate alle rotture del solo polietilene ad alta densità, modificando i periodi di Training, Validazione e Test ed introducendo un nuovo indice come dato in input.

7.3.1 Nuova procedura

La procedura di ricerca utilizzata, ricalca nella metodologia quella già descritta ed utilizzata in precedenza; eviteremo pertanto di ripercorrerla dettagliatamente passo a passo, evidenziando invece gli elementi in cui si diversifica dalla precedente.

Innanzitutto, si sono modificati i dati corrispondenti ad ogni periodo del data set utilizzato in input. In particolare, se ne riportano per ognuno le nuove configurazioni:

1. **Training:** da *marzo del 2000 a dicembre del 2004, gli anni 2006 e 2007*;
2. **Validazione:** da *gennaio 2008 a dicembre 2010*;
3. **Test:** l'intero anno da *gennaio a dicembre 2005*.

Questa modifica è stata apportata per poter utilizzare in fase di Test un anno “medio” nel trend generale delle rotture. Il 2005, infatti, oltre che posizionarsi temporalmente a metà del periodo di undici anni considerato, rappresenta anche valori intermedi a quelli che sono i dati di default totali per ogni anno.

Si è comunque mantenuto un certo riguardo nel considerare, sia per il periodo di Training che per quello di Validazione, un numero congruo di anni significativi, in cui le rotture, la pioggia e la temperatura presentassero variazioni considerevoli, così da analizzare una serie rappresentativa di dati.

In secondo luogo, si è introdotto come dato di input, un nuovo coefficiente, denominato “Indice di Sostituzione del PE”. Esso è stato valutato nell'intento di identificare nel programma NNPred, anno per anno, la diversa numerosità delle rotture, relative ovviamente al solo polietilene.

Nello specifico, esso è stato ricavato nel seguente modo:

- Si è calcolato anno per anno il totale delle rotture;
- Degli undici valori annuali, se ne è valutata la media;
- Facendo il rapporto tra le rotture totali all'anno e la media, si è ottenuto il corrispondente valore dell'Indice ricercato.

Di seguito si riportano in tabella, per ogni anno, i corrispettivi valori dell'Indice di Sostituzione.

Anno	Rotture Tot PE	Indice di Sostituzione PE
2000	873	1,095
2001	1128	1,415
2002	1002	1,257
2003	962	1,207
2004	846	1,061
2005	773	0,969
2006	695	0,872
2007	628	0,788
2008	604	0,757
2009	667	0,837
2010	592	0,742
Rotture medie	797,28	

Tabella 18 – Rappresentazione annuale dell'Indice di Sostituzione del PE

Gli undici valori così ottenuti (uno per anno), sono stati inseriti nel data set di input in dodici serie mensili uguali in ogni anno. Questo è stato eseguito per le due configurazioni di Rete risultanti più efficaci nelle precedenti applicazioni (Rete 7 e Rete 9), formando così nuove combinazioni di dati utilizzabili.

Quindi, le reti utilizzate nella nuova ricerca hanno assunto una nuova variabile e sono pertanto state rinominate in Rete 7A e Rete 9A, come rappresentato nella tabella a seguire.

N° rete	Indice Sost. PE	t		t-1		t-2		0_3mesi
		Pioggia	Temp.	Pioggia	Temp.	Pioggia	Temp.	Pioggia cum.
7A	X	X	X	X	X	X	X	X
9A	X			X	X	X	X	X

Tabella 19 - Schema dei dati componenti le nuove Reti utilizzate

Ripercorrendo il procedimento già descritto per la Fase 1, si è ricercato per entrambe le Reti il numero di nodi nascosti e la configurazione di hidden layer, selezionando la migliore impostazione sulla base del MSE fornito in Validazione e riducendo così il campo d'indagine.

Con tale criterio d'individuazione, si sono selezionate le 2 configurazioni migliori (cioè con minore MSEvalidazione), rispettivamente aventi uno e due livelli nascosti, ottenendo così 4 reti significative.

Successivamente, ricopiando la seconda fase della procedura adottata, si è determinato quale tra le 4 reti scelte approssimi meglio l'andamento delle rotture riferite al solo PE. Ciò è stato eseguito, in riferimento al periodo di Test (l'anno 2005), mediante una previsione basata sui soli dati climatici: immettendo i dati di pioggia e temperatura nel programma NNPred con struttura valutata precedentemente (e quindi layer e nodi nascosti determinati sia nell'architettura che nel valore dei pesi), si è effettuata una vera e propria previsione dei dati di rottura.

7.3.2 Risultati ottenuti

Si riportano di seguito i risultati ottenuti da questa nuova elaborazione, iniziando dalle tabelle contenenti i valori del MSE per le simulazioni di ogni Rete.

I valori evidenziati in grassetto, rappresentano i minimi del MSE di validazione. Le configurazioni migliori, sono poi state riportate nella tabella a seguire, in cui si sono rappresentati a titolo comparativo anche i corrispettivi dati della Rete 7PE e Rete 9PE, precedentemente analizzate.

		Rete 7A									
NODI	Epoch	MSE training L1	ARE training L1	MSE validation L1	ARE validation L1	Epoch	MSE training L2	ARE training L2	MSE validation L2	ARE validation L2	
1	17	586,972	22,88%	45,226	13,41%	63	684,217	23,19%	111,949	22,53%	
2	12	686,710	24,67%	43,295	13,08%	21	745,515	24,70%	61,359	16,58%	
3	11	677,571	24,48%	40,492	12,56%	14	774,877	25,55%	52,474	14,77%	
4	15	643,115	23,87%	41,577	12,36%	18	759,577	24,94%	59,961	15,18%	
5	11	756,111	26,23%	37,087	11,72%	15	893,312	27,22%	50,256	14,31%	
6	11	586,735	23,19%	38,455	11,73%	15	828,711	26,04%	55,333	15,23%	
7	10	731,418	25,56%	37,699	12,17%	16	816,030	26,52%	42,639	13,07%	
8	12	734,691	25,62%	36,990	11,75%	11	849,246	26,99%	49,570	13,27%	
9	10	839,455	27,50%	34,938	11,43%	11	882,872	27,67%	40,877	12,72%	
10	8	788,976	26,62%	42,140	12,75%	12	905,339	27,66%	47,601	13,45%	
11	9	678,112	24,92%	35,084	11,42%	13	834,003	26,41%	47,049	13,85%	
12	9	828,513	27,41%	35,560	11,60%	11	838,806	27,02%	45,536	13,21%	
13	9	787,044	26,51%	35,431	11,21%	11	900,594	27,83%	43,414	12,96%	
14	8	748,913	25,80%	36,765	11,83%	10	906,858	28,58%	37,235	11,84%	
15	8	795,507	26,90%	37,834	11,93%	10	846,143	27,40%	41,521	12,65%	
16	9	863,954	28,49%	39,425	12,05%	12	865,828	28,20%	39,598	12,32%	
17	9	831,106	27,50%	36,802	11,72%	8	824,603	27,14%	38,605	12,17%	
18	7	794,365	26,80%	36,493	11,73%	10	904,579	28,58%	40,937	12,50%	
19	8	787,017	27,07%	36,900	11,46%	8	953,612	28,73%	40,120	12,50%	
20	10	812,912	26,77%	43,932	13,15%	9	906,449	28,61%	39,429	12,21%	

Tabella 20 - Risultati delle simulazioni per la Rete 7A

		Rete 9A													
NODI	Epoch	MSE training U1	ARE training U1	MSE validation U1	ARE validation U1	Epoch	MSE training L2	ARE training L2	MSE validation L2	ARE validation L2	Epoch	MSE training L2	ARE training L2	MSE validation L2	ARE validation L2
1	50	214,971	14,08%	61,242	15,53%	135	279,783	15,92%	107,631	21,77%					
2	61	245,308	14,35%	51,660	13,55%	71	350,174	16,57%	90,949	19,93%					
3	52	236,342	14,50%	50,465	13,62%	53	392,563	16,10%	71,236	17,10%					
4	49	230,597	14,35%	52,326	13,36%	53	375,685	17,63%	62,852	15,97%					
5	81	239,914	14,96%	51,780	13,36%	99	355,539	15,99%	64,563	15,14%					
6	49	269,101	16,65%	53,120	13,13%	55	386,101	17,93%	67,881	16,56%					
7	95	261,628	15,51%	50,521	12,92%	42	416,098	18,84%	62,109	15,13%					
8	41	291,194	16,85%	47,668	12,90%	62	277,596	15,74%	62,617	14,60%					
9	38	318,454	17,64%	48,328	12,99%	45	451,078	19,54%	60,641	14,56%					
10	37	323,761	17,94%	48,630	12,90%	45	375,602	17,32%	64,565	15,90%					
11	52	284,290	16,66%	52,202	13,24%	45	370,360	17,42%	57,632	14,93%					
12	41	371,053	19,28%	51,614	12,98%	49	467,280	19,92%	60,966	14,63%					
13	36	311,451	17,45%	49,701	12,87%	44	400,944	18,30%	60,017	14,85%					
14	38	333,116	18,10%	51,666	13,00%	43	424,875	18,53%	56,567	14,54%					
15	43	334,927	18,36%	52,734	13,09%	42	415,468	18,82%	55,949	14,34%					
16	38	358,890	18,70%	49,060	12,93%	49	431,795	19,35%	51,675	13,68%					
17	89	285,483	16,66%	50,945	12,76%	45	432,696	19,87%	50,390	13,20%					
18	42	350,703	18,52%	52,010	13,19%	37	445,497	19,82%	56,792	13,88%					
19	33	411,788	20,23%	49,220	12,74%	43	422,338	19,52%	50,717	13,96%					
20	35	401,813	19,84%	50,709	13,18%	48	443,580	19,85%	51,875	13,42%					

Tabella 21 -- Risultati delle simulazioni per la Rete 9A

	MEAN MSEval L1	MEAN MSEval L1	min MSEval L1	MEAN MSEval L2	MEAN MSEval L2	min MSEval L2
Rete 7PE	529,66	86,57	75,27	590,09	101,29	73,68
Rete 9PE	616,40	104,37	74,29	691,17	107,29	81,50
Rete 7A	747,96	30,61	34,94	845,73	39,97	37,23
Rete 9A	1003,74	51,31	47,83	1093,76	103,38	50,38

Tabella 22 – Configurazioni migliori delle reti per solo PE

Dalle tabelle riportanti i risultati delle simulazioni, si nota come la Rete 7A raggiunga ottimi valori del MSE: essi sono per la maggior parte identificati in un numero breve di cicli e variano all'interno di un range ristretto. La Rete 9A, invece, presenta valori più alti, generalmente individuati in un numero maggiore di epoche.

Per entrambe, va comunque sottolineato che la configurazione migliore risulta associata ad una struttura con un solo layer nascosto, per il quale si sono ottenuti anche migliori valori medi.

Dall'ultima tabella comparativa, riportante anche i valori riferiti alle Reti studiate per solo PE, si evidenzia come in quest'ultima simulazione siano stati ottenuti i migliori risultati in assoluto, con MSE di valore quasi dimezzato.

Le due migliori architetture di ogni Rete, riportate in Tabella 22, sono poi state utilizzate nella successiva fase di previsione (Fase 2): in essa, immettendo per ogni mese i corrispondenti valori dei dati formanti l'input della rete nel programma, si sono stimati i valori delle rotture del polietilene per l'anno 2005, componente il periodo di Test.

La comparazione con le rotture note, è stata effettuata calcolandone il MSE relativo. Si riporta quindi, a seguire, la tabella riassuntiva dei valori ottenuti nell'elaborazione, dove la configurazione migliore è evidenziata in azzurro e il valore più basso del MSE in giallo.

VALORI TEST		PREVISTI			
Tempo	Rott_PE	RETE 7A		RETE 9A	
		L1 9 nodi	L2 14 nodi	L1 8 nodi	L2 17 nodi
2005 Gen	42	34,04	34,88	42,71	41,30
Feb	52	33,66	34,40	37,02	37,08
Mar	60	37,92	38,22	36,37	36,46
Apr	46	39,42	39,40	41,05	40,73
Mag	69	51,66	50,23	49,19	47,08
Giu	70	65,50	63,07	69,20	67,15
Lug	103	79,74	79,13	87,75	85,87
Ago	99	82,62	83,11	94,25	92,02
Set	87	77,50	76,61	83,27	78,82
Ott	64	64,91	66,14	71,02	65,87
Nov	41	44,46	43,96	46,14	43,26
Dic	40	34,41	34,58	33,88	35,10
MSE =		182,93	187,62	131,91	144,60
NN_pred MSE valid=		34,94	37,23	47,67	50,39

Tabella 23 – Nuovi valori di previsione ottenuti per sole rotture sul PE

Analizzando i dati rappresentati in questa tabella, si può osservare che il MSE, calcolato in questa fase di previsione, risulta essere decisamente più elevato di quello valutato nelle simulazioni precedenti (riportato nell'ultima riga).

Riportiamo, per una comparazione completa, anche i valori del MSE ottenuti in fase di calibrazione per le Reti utilizzate nella previsione delle rotture del solo PE:

- Rete 7PE __ min MSE = 63,00
- Rete 9PE __ min MSE = 79,52

Anche confrontato con questi ultimi valori, quelli ottenuti nella previsione in oggetto risultano essere notevolmente più alti.

Evidenziamo inoltre che, in entrambi i casi, le Reti offrono risultati preferibili nella configurazione ad un solo hidden layer. Infine, la Rete migliore risulta essere la Rete 9A, nonostante nelle simulazioni precedenti avesse fornito risultati inferiori.

In ultimo, si riportano per ogni Rete i grafici a linee e a dispersione dei risultati.

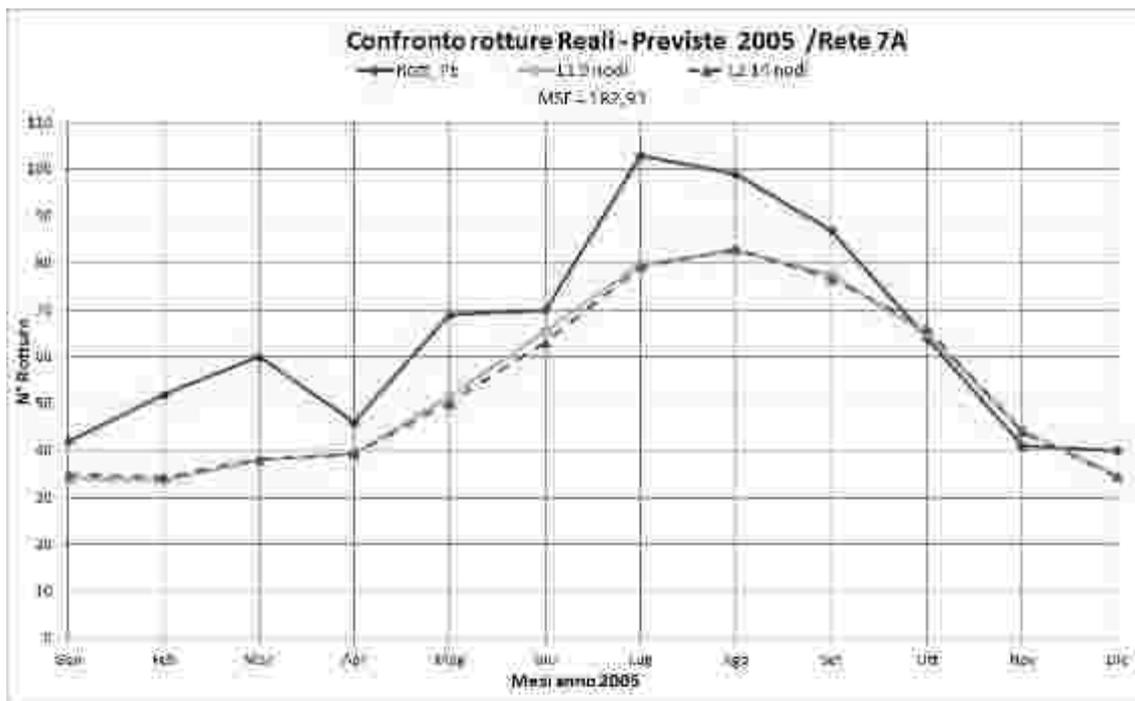


Figura 116 - Grafico a linee delle rotture Reali e Previste per la Rete 7A

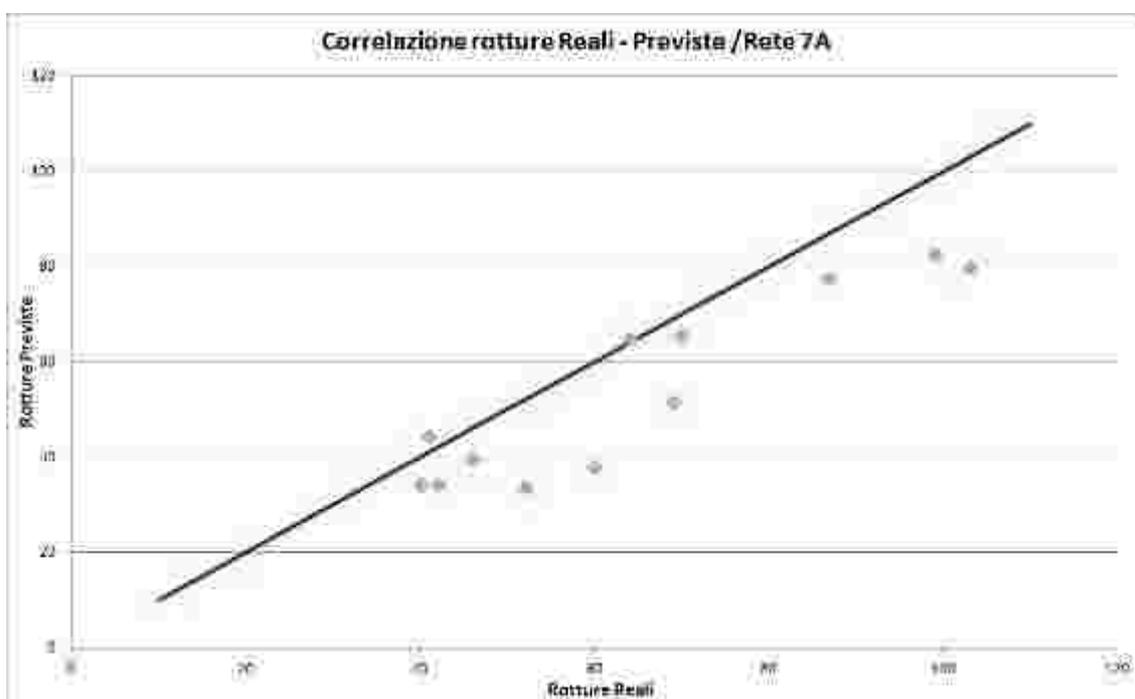


Figura 117 - Grafico a dispersione delle rotture Reali e Previste per la Rete 7°

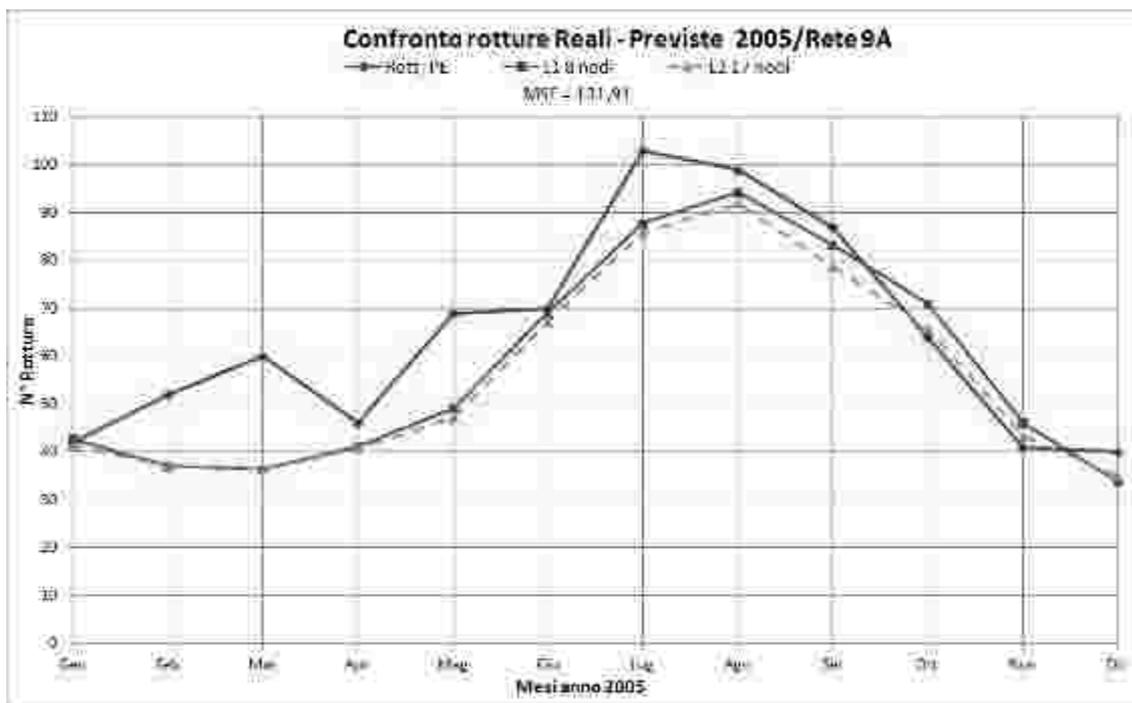


Figura 118 - Grafico a linee delle rotture Reali e Previste per la Rete 9A

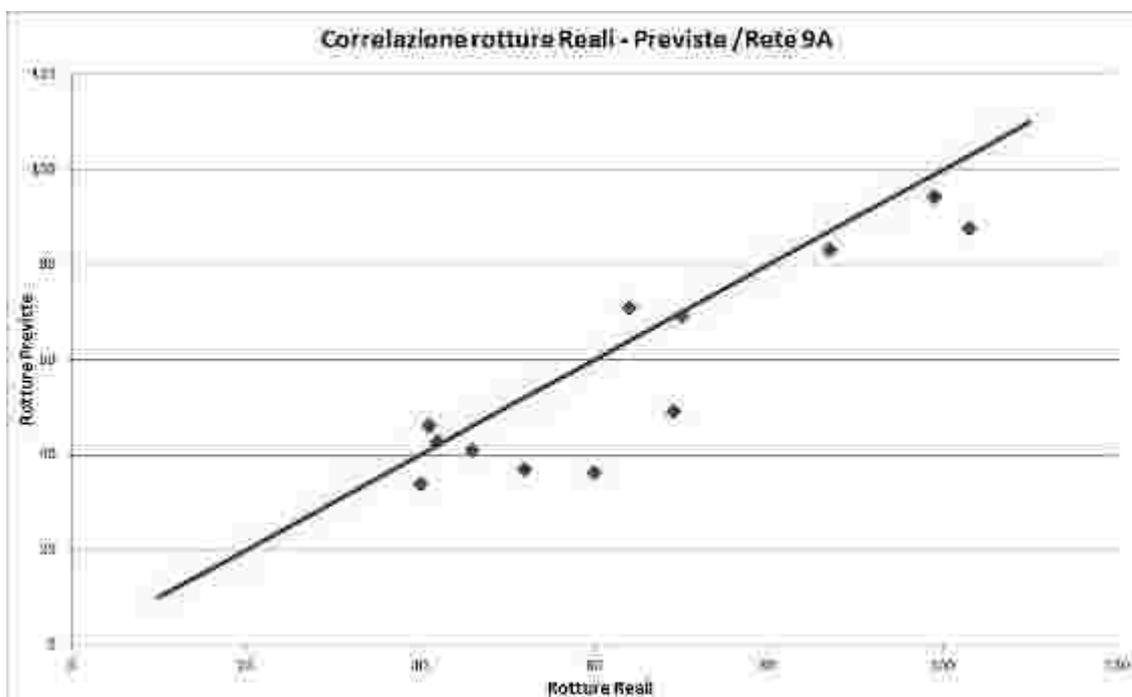


Figura 119 - Grafico a dispersione delle rotture Reali e Previste per la Rete 9°

I grafici a linee, sono stati realizzati rappresentando, con linea tratteggiata, l'andamento delle rotture che meno si avvicina a quella reale, sempre identificata dal tratto rosso. La linea continua, invece, identifica l'architettura migliore, sotto la quale, in legenda, si è anche riportato il rispettivo valore del MSE calcolato.

In essi, si nota come la Rete 9A fornisca decisamente i valori migliori. La flessione, rappresentata nei primi mesi dalle rotture note, rappresenta un elemento particolare, di difficile interpretazione e previsione da parte del modello.

I grafici a dispersione, realizzati inserendo i dati solo della migliore configurazione per ogni Rete (peraltro dello stesso colore del grafico a linee), evidenziano questa volta un trend sottostimante del modello, visibile soprattutto per la Rete 7A. Risultano molto più raggruppati lungo la retta, infatti, i dati relativi alla Rete 9A, che meglio approssima le rotture del polietilene per l'anno 2005.

In conclusione, in quest'ultima applicazione si è verificato come, modificando alcune impostazioni della procedura utilizzata nella ricerca, si possono limitare od eliminare alcuni fattori di incertezza emersi.

In particolare, il modello è risultato un buon previsore sia per le rotture del PE che delle sole prese, eliminando, con la modifica dei periodi di analisi e l'introduzione di un nuovo indice, la tendenza a sovrastimare gli eventi di rottura.

Conclusioni

La presente tesi di laurea è stata realizzata con lo scopo ultimo di creare un modello in grado di prevedere le rotture mensili di una rete acquedottistica situata nella regione Emilia Romagna.

A tal fine, si è fatto uso di una “scatola nera”, nella forma di rete neurale artificiale (ANN), poiché essa è una struttura matematica in grado di rappresentare complessi processi che collegano input ed output di qualunque sistema. Nel nostro caso, gli input sono grandezze quali la collocazione temporale, la temperatura, la pioggia e particolari indici appositamente ricavati, mentre l’output sono le rilevazioni storiche delle portate.

A tale scopo, sono state studiate varie tipologie di Reti Neurali Artificiali, caratterizzate ciascuna da diverse combinazioni di entrate e da differenti hidden layer e numero di nodi nascosti.

Il problema della scelta dell’architettura di rete e, quindi, del modello da adottare, si è presentato assai complesso, in quanto le variabili in gioco risultavano numerose. Per tale motivo, la scelta della rete migliore non poteva essere condotta casualmente, ma necessitava della definizione di una procedura di ricerca.

La maggior parte del tempo impiegato nello studio, infatti, è stato incentrato nella stesura della metodologia da adottare e nella conseguente applicazione al programma. In particolare, la procedura è stata articolata in due fasi principali a cascata, attraverso le quali si è pervenuti ad un set di reti dal quale si è potuto procedere alla scelta del modello migliore.

Ridotto, nella prima fase, il campo di indagine, si è effettuata la scelta del modello sulla base dei risultati forniti dalla statistica MSE. Tale scelta è stata effettuata alla luce dell’esperienza e anche di altre analoghe indagini riportate in letteratura.

Per validare definitivamente la rete prescelta, si sono effettuati diversi test di previsione delle rotture, verificando che l'errore commesso non fosse una grandezza significativamente elevata. Ciò ha permesso di confermare ulteriormente la scelta effettuata.

Inoltre, si è applicato il modello prescelto a particolari casistiche, cercando infine di migliorarne le caratteristiche risultate meno prestanti, modificando i periodi di apprendimento ed introducendo un coefficiente appositamente calcolato.

Si può quindi concludere che, il modello empirico ANN, come già sottolineato da altri ricercatori in opere precedenti, appare, alla luce di questo studio, un valido strumento operativo per la simulazione delle rotture nelle tubazioni acquedottistiche mediante, l'utilizzo dei fattori climatici esterni.

Riferimenti bibliografici

- [01] Marco Maglionico (2011) *Analisi delle rotture nelle tubazioni delle reti acquedottistiche* / *Acqua e città 2011 – Convegno Nazionale di Idraulica Urbana*, Venezia.
- [02] Valerio Milano, (1996), *Acquedotti: guida alla progettazione* / Milano: Casa editrice U. HOEPLI.
- [03] Luigi Da Deppo, [et al.], (2006), *Acquedotti* / 3^a ed. - Padova: Libreria internazionale Cortina.
- [04] Enrico Marchi, Antonello Rubatta, (1999) *Meccanica dei fluidi: principi e applicazioni idrauliche* / Rist.corretta – UTET – Torino.
- [05] Tiziano Consolini, (2011) *Analisi delle rotture nelle tubazioni dei sistemi acquedottistici* / Tesi di laurea – Università degli studi di Bologna – D.I.C.A.M.
- [06] Andrea Giusti (2007) *Analisi delle rotture nelle reti acquedottistiche con tecniche bayesiane* / Tesi di laurea – Università degli studi di Bologna – D.I.C.A.M.
- [07] E. Salvioi (2005) *Indagine sperimentale sullo stato di conservazione della rete di distribuzione idrica di un distretto della città di Modena* / Tesi di laurea – Università degli studi di Bologna – D.I.C.A.M.
- [08] Alberto Bizzarri, [et al.], (2000) *Reti di distribuzione idraulica urbana. Indagini di affidabilità* / FrancoAngeli s.r.l., Milano.
- [09] Sarplast, (2000, Gennaio) *Manuale tubi in PRFV* / Iniziative Industriali S.p.A.
- [10] Alberto Zaffagnini (2011) *Analisi delle rotture nelle tubazioni dei sistemi acquedottistici* / Tesi di laurea – Università degli studi di Bologna – D.I.C.A.M.
- [11] D. Citrini, G. Nosedà (1987) *Idraulica* / 2^a ed. – Milano: Casa editrice ambrosiana.

- [12] Michele Gaier (2001) *Impiego delle reti neurali per la previsione delle portate giornaliere in invasi artificiali. Applicazione ai bacini di S. Caterina e Comelico* / Tesi di laurea – Università degli studi di Bologna – D.I.C.A.M.
- [13] Raed Jafar, [et al.], (2010), *Application of Artificial Neural Networks (ANN) to model the failure of urban water mains* / Mathematical and Computer Modelling – Science Direct - Elsevier.
- [14] J. Izquierdo, [et al.], (2007), *Fault detection in water supply systems using hybrid (theory and data-driven) modelling* / Mathematical and Computer Modelling – Science Direct - Elsevier.
- [15] H. D. Tran, [et al.], (2010), *Markov and Neural Network Models for Prediction of Structural Deterioration of Storm-Water Pipe Assets* / Journal of Infrastructure System – ASCE.
- [16] Shridhar Yamijala, [et al.], (2009), *Statistical models for the analysis of water distribution system pipe break data* / Reliability Engineering and System Safety – Science Direct - Elsevier.
- [17] B. B. Rajani, Y. Kleiner (2001), *WARP – Water Mains Renewal Planner* / Institute for Research in Construction, Natural Research Council of Canada, Ottawa, ON Canada.