

PROGETTO DI RESTAURO
DEL COMPLESSO MONUMENTALE
DELLA FONTANA DEL NETTUNO

**Qualità delle acque.
Stato attuale di funzionamento
della fontana monumentale:
scenario invernale.**

Relazione a cura di:
**Prof. Maurizio Mancini
Ing. Elisa Franzoni**

Bologna, 30/03/2016



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

INDICE

1. Individuazione schematica del sistema di approvvigionamento, pompaggio, ricircolo, trattamento delle acque del Nettuno
2. Sopralluoghi
3. Analisi e determinazione dei principali parametri indicatori della qualità delle acque con riferimento agli effetti sui materiali del monumento.
Analisi eseguite:
 - In situ con strumentazione portatile - DICAM-UNIBO
 - In laboratorio di Scienza e Tecnologia dei Materiali (LASTM)-DICAM-UNIBO
4. Valutazione degli effetti incrostanti o aggressivi su condotti, materiali lapidei e fregi metallici del monumento procurati dalle acque utilizzate in ricircolo e reintegro.
5. Descrizione degli impianti di trattamento e condizionamento delle acque esistenti e necessità di eventuali integrazioni o completamenti.

1. INDIVIDUAZIONE SCHEMATICA DEL SISTEMA DI APPROVVIGIONAMENTO, POMPAGGIO, RICIRCOLO, TRATTAMENTO DELLE ACQUE DEL NETTUNO

La fontana, ubicata in piazza maggiore in zona ricompresa fra Palazzo Re Enzo e Palazzo Comunale, ha funzione prettamente monumentale. I getti d'acqua, distribuiti sull'intero perimetro del monumento, sono alimentati da una condotta di mandata messa in pressione attraverso una dedicata stazione di pompaggio sotterranea. Nel medesimo locale sotterraneo, che si trova al di sotto del Palazzo Comunale, è collocata la vasca-serbatoio che riceve per caduta tramite condotta l'acqua di ritorno dagli sfiori della vasca di raccolta della fontana.



GRAFICO 1: Schema dell'attuale sistema di pompaggio, ricircolo e trattamento.

Il locale sotterraneo sopraindicato ospita sia l'opera di presa acqua proveniente dalla rete acquedottistica di Bologna, per il reintegro dell'acqua dispersa in aria e nel suolo, sia il sistema di condizionamento e trattamento cui sono sottoposte le acque di ricircolo prima del ritorno alla pompa di mandata alla fontana. Non esiste un percorso praticabile e diretto di collegamento fra tale locale tecnico e la camera sottostante il monumento. A tale camera sotterranea, che ospita le opere di ripartizione delle tubazioni ai singoli ugelli è possibile giungere tramite cunicolo ad altezza ridotta cui si accede da corridoi non aperti al pubblico della limitrofa Sala Borsa.

2. SOPRALLUOGHI

2.1. Primo sopralluogo

Un primo sopralluogo è stato effettuato in data 18/01/2016 dal gruppo incaricato dell'analisi dell'impianto idraulico e delle acque (Mancini, Naldi, Bragalli, Cristino, Franzoni), alla presenza del geom. Marchi della Ditta incaricata della manutenzione.

Durante il sopralluogo sono state esaminate le sottostrutture della fontana recanti le condutture dell'acqua e le valvole di alimentazione degli ugelli. I tunnel sotterranei si presentavano notevolmente umidi, tanto nel piano di calpestio (con presenza di pozze d'acqua) quanto nelle strutture murarie, all'apparenza assai umide e caratterizzate anche da percolazione di acqua.

È stato poi condotto un esame visivo della fontana stessa, al momento solo parzialmente alimentata d'acqua. Risultano ben visibili le lacune nelle malte di stilatura degli elementi in pietra della fontana stessa e dei gradini, che certamente contribuiscono all'infiltrazione delle acque meteoriche nel sottterraneo.

Infine, è stato esaminato il locale interrato dove è collocato l'impianto di ricircolo, chiedendo delucidazioni al geom. Marchi circa le parti dell'impianto funzionanti tra quelle visibili nel locale. Viene riferito che è funzionante in continuo solo un filtro meccanico, mentre la rimozione di materiale di ritorno dalla fontana (es. piume di volatili) viene effettuata a sfioramento nella relativa condotta appena a monte del serbatoio. Sono state chieste anche informazioni circa l'immissione del disinfettante nel serbatoio di raccolta dell'acqua per il ricircolo. L'immissione risulta essere effettuata mediante pastiglie di acido tricloroisocianurico (i cui contenitori in uso sono infatti visibili nel locale) direttamente nel serbatoio, ma non è possibile identificare una cadenza temporale per questa immissione. Durante questo sopralluogo viene effettuata una seconda lettura del contatore dell'acqua in ingresso dalla rete Hera, situato nel locale interrato di cui sopra: tale lettura indica ca. 1228,5.

2.2. Secondo sopralluogo e campionamento dell'acqua

A valle di una analisi di massima dell'impianto di ricircolo dell'acqua esistente, come identificato nel primo sopralluogo, è stato effettuato un secondo sopralluogo in data 03/02/2016 per il campionamento delle acque (Mancini, Franzoni, Cristino) in punti significativi dell'impianto di ricircolo.

Durante il sopralluogo e prima del prelievo, viene anche effettuata una ulteriore lettura del contatore dell'acqua, che segna 1229.

2.2.1. Campioni

Sono stati prelevati quattro campioni di acqua, uno dalla vasca della fontana e tre dall'impianto di ricircolo dislocato nel locale interrato. I punti di prelievo sono di seguito elencati e rappresentati:

- Campione 1: acqua di rete, per reintegro, prelevata dalla condotta Hera in ingresso (Fig. 1). Tale campione viene preso come riferimento per l'utilizzo di dati storici disponibili e per il confronto con le analisi dei campioni successivi.

- Campione 2: acqua “di ritorno” dalla fontana. Il campione è stato prelevato prima dell'immissione dell'acqua di ritorno nel serbatoio, nel punto indicato in Fig. 2 e viene preso a verifica delle variazioni complessive di qualità del fluido intervenute durante il tempo di permanenza in condotti di mandata, getti, vasca di raccolta e condotti di ritorno.
- Campione 3: acqua del serbatoio di accumulo (Fig. 3). A verifica di variazioni di qualità chimico fisica avvenute entro il serbatoio di accumulo.
- Campione 4: campione di acqua della vasca della fontana (Fig. 4). A verifica degli effetti sulle caratteristiche chimico fisiche procurati all'acqua, durante il tempo di esposizione alla radiazione solare, da biomasse vegetali adese al monumento e/o sospese in vasca.



FIGURA 1 dx: Punto di prelievo del campione di acqua N. 1.

FIGURA 2 sx: Punto di prelievo del campione di acqua N. 2.



FIGURA 3 sx: Punto di prelievo del campione di acqua N. 3.

FIGURA 4 dx: Punto di prelievo del campione di acqua N. 4.



3. ANALISI E DETERMINAZIONE DEI PRINCIPALI PARAMETRI INDICATORI DELLA QUALITÀ DELLE ACQUE CON RIFERIMENTO AGLI EFFETTI SUI MATERIALI DEL MONUMENTO.

3.1. Analisi effettuate il 03.02.2016 ore 10.00 -13.00	Conducibilità Cond.	($\mu\text{S}/\text{cm}$)
	Contenuto di ossigeno disciolto	O_2 (mg/l)
	Solidi totali disciolti	TDS (mg/l)
	Temperatura	T ($^{\circ}\text{C}$)
	Concentrazione ioni idrogeno	pH ()

Le analisi sono state effettuate direttamente in situ con strumentazioni portatili (pH-metro Cyberscan pH310 della Eutech Instruments e Sonda multiparametrica YSI 556 della Yellow Springs Instruments.

Cloruri	Cl^- (ppm)
Nitrati	NO_3^- (ppm)
Solfati	SO_4^- (ppm)
Contenuto di ioni calcio	Ca^{++} (mg/l)
Durezza calcolata	(°f)

La determinazione della natura e della quantità di sali solubili è stata svolta mediante cromatografia ionica (DIONEX ICS 1000) e la determinazione del contenuto di ioni calcio mediante titolazione con EDTA (metodo ISO 6068). Tali analisi sono state condotte presso i Laboratori del DICAM.

3.2. Risultati delle analisi

Prima campagna di analisi: **Condizioni invernali**

Si riportano di seguito i risultati delle analisi chimico-fisiche condotte in situ:

Campione	Descrizione	T ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Conducibilità ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	O_2 (mg/l)	TDS (mg/l)
1	Acqua di rete Hera	16.6	8.03	370	9.16	295
2	Acqua di ritorno	11.2	8.03	391	10.35	352
3	Acqua del serbatoio	11.1	7.91	384	11.54	354
4	Acqua della vasca della fontana	9.9	8.08	380	11.75	355

Si riportano di seguito i risultati dell'analisi dei sali solubili effettuata in laboratorio:

Campione	Descrizione	Cloruri (Cl ⁻ , ppm)	Nitrati (NO ₃ ⁻ , ppm)	Solfati (SO ₄ ⁼ , ppm)
1	Acqua di rete Hera	25	2	45
2	Acqua di ritorno	92	2	45
3	Acqua del serbatoio	93	3	45
4	Acqua della vasca della fontana	95	3	48

Si riportano infine i risultati dell'analisi del contenuto di ioni calcio effettuata in laboratorio:

Campione	Descrizione	Contenuto Calcio Ca ⁺⁺ (mg/l)	Durezza calcolata* (°f)
1	Acqua di rete Hera	55	13.8
2	Acqua di ritorno	68	16.9
3	Acqua del serbatoio	68	16.9
4	Acqua della vasca della fontana	66	16.6

4. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI INCROSTANTI O AGGRESSIVI SU CONDOTTI, MATERIALI LAPIDEI E MANUFATTI METALLICI DEL MONUMENTO PROCURATI DALLE ACQUE UTILIZZATE IN RICIRCOLO E REINTEGRO.

4.1. Discussione dei primi risultati

Il presente rapporto preliminare rende conto di uno scenario di funzionamento tipicamente invernale caratterizzato da cinetiche chimico biologiche limitate se non addirittura inibite da condizioni di temperatura ed irraggiamento medio bassi. Ciò viene comprovato dai valori poco discosti per tutti i parametri monitorati alle tre sezioni di controllo (mandata, ritorno, vasca esterna) rappresentative delle acque in ricircolo alla fontana, rispetto a quanto misurato in acqua di rete acquedottistica.

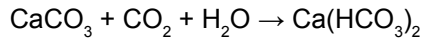
Tuttavia già in questa fase preliminare, in attesa di poter effettuare ulteriori necessari campionamenti in condizioni climatiche differenti, attraverso i grafici di seguito riportati è possibile ricavare un primo inquadramento generale sullo stato di equilibrio fra gli effetti aggressivi/incrostanti/corrosivi in atto ad opera delle acque sulle parti solide del monumento.

4.1.1. Preliminari valutazioni su aggressività o potere incrostante

Sulla base dei risultati fin qui ottenuti dalle analisi delle acque relative al campionamento del 3/2/2016, è possibile effettuare le seguenti considerazioni:

- nello scenario analizzato il pH dell'acqua nel circuito di ricircolo esistente è, in generale, confrontabile con quello dell'acqua di rete (solo nel serbatoio è leggermente inferiore) e debolmente basico;
- il contenuto di ioni calcio porterebbe a classificare l'acqua di rete come "moderatamente dura". L'acqua di ricircolo nella fontana, pur rimanendo nella stessa classe di durezza, presenta però un contenuto di ioni calcio più elevato. In parte ciò potrebbe essere attribuito all'evaporazione dell'acqua durante il tempo di scorrimento sul monumento e di permanenza all'interno delle vasche della fontana, tuttavia poiché lo scenario oggetto del presente rapporto non può essere di certo considerato favorevole a tale fenomeno, pare ragionevole temere anche che sia in atto una non trascurabile solubilizzazione di ioni calcio provenienti dai materiali calcarei della fontana stessa (marmi, malte etc.). Il valore della durezza calcolata colloca peraltro le acque di rete nella fascia tipica delle acque dolci, mentre il limite superiore di tale intervallo (15 °f) viene superato, con ingresso nella fascia di acque "dure", in tutte le sezioni di campionamento del ricircolo (mandata, ritorno, vasca della fontana) e ciò confermerebbe la dinamica di arricchimento in calcio a causa del processo di solubilizzazione per contatto fluido-materiali.
- il contenuto di nitrati e solfati nella fontana si mantiene nel circuito simile a quello dell'acqua di rete, mentre il contenuto di cloruri risulta notevolmente più elevato. Ciò può essere ricondotto con ragionevole certezza al tipo di agente disinfettante attualmente in uso.

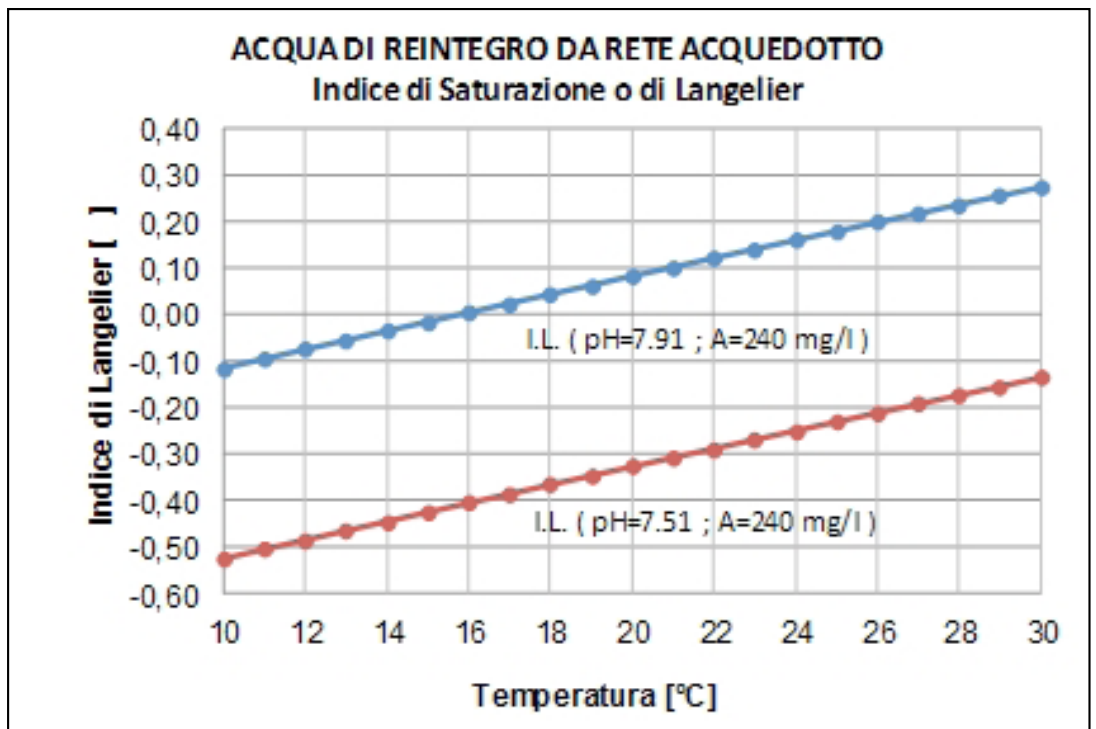
Definita “aggressività” la capacità di un’acqua di attaccare i materiali lapidei, questa caratteristica compare quando, in presenza di CO₂ ed acidità, l’equilibrio del carbonato di calcio si sposta verso la forma solubile del bicarbonato a scapito del CaCO₃ insolubile, secondo la reazione :



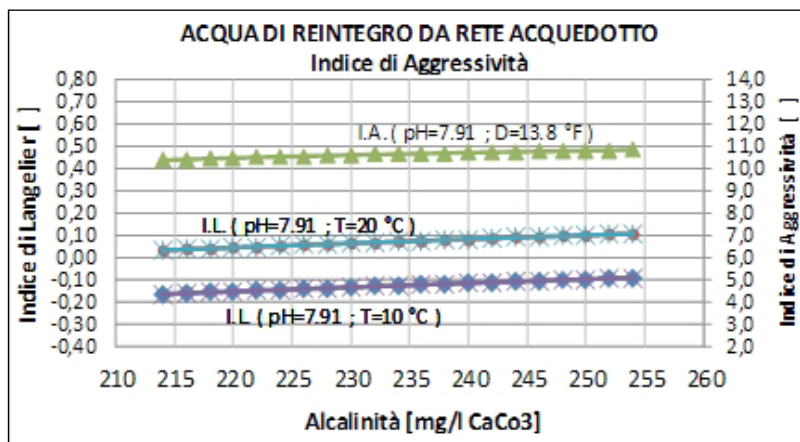
In queste condizioni l’acqua diventa aggressiva per marmi, malte e materiali calcarei in genere (come la pietra d’Istria). Viceversa il potere incrostante rappresenta la tendenza di un’acqua a depositare carbonato di calcio sulle superfici cui viene a contatto, cioè a spostare l’equilibrio della reazione di cui sopra verso sinistra (precipitazione del CaCO₃).

Dunque la precipitazione di incrostazioni di carbonato dipende:

- dalla concentrazione di bicarbonati,
- dalla concentrazione di calcio (e magnesio) e cioè dalla durezza dell’acqua,
- dal pH,
- dalla temperatura (al crescere della temperatura diminuisce infatti la solubilizzazione del carbonato di calcio CaCO₃ a parità delle altre condizioni.
- Va tenuto altresì presente che il potere incrostante (legato alla durezza dell’acqua) e il pH della stessa sono parametri che influiscono notevolmente anche sulla corrosione delle leghe metalliche, come quelle presenti nella fontana. Per valutare il potere incrostante/aggressivo di un’acqua si ricorre usualmente al pH di saturazione (pH_s), definito come il pH di equilibrio, a cui non si ha né dissoluzione né precipitazione di carbonato di calcio (Langelier). Per il calcolo del pH_s si ricorre a formulazioni empiriche di uso comune.
- I grafici seguenti riportano l’indice di Langelier (o di saturazione) per l’acqua di rete utilizzata per il reintegro dell’acqua in circolo a partire dai dati rilevati nella prima campagna di misure con particolare riferimento al valore di pH 7.91 misurato.
- Se ne riporta l’andamento in funzione della temperatura di esercizio con riferimento all’alcalinità totale media rilevata in rete negli ultimi tre anni ed in funzione dell’alcalinità totale a 10 e 20 °C assunta variabile nell’ambito dell’intervallo di oscillazione tipico per le acque di rete acquedotto della città così come ufficialmente pubblicati dal gestore.
- L’andamento di tale indice viene calcolato nel grafico seguente anche in riferimento ad un valore di pH pari a 7.51 ottenuto come valor medio dei valori di pH misurati in rete di Bologna negli ultimi tre anni.



Il grafico seguente mostra invece un riscontro ottenuto operando secondo la normativa italiana, e cioè attraverso la determinazione dell'indice di aggressività I.A. = $\text{pH} + \log(A \times H)$ dove A è l'alcalinità totale e H la durezza espressi in mg/l di CaCO_3 .



Il grafico indica che la condizione di equilibrio fra aggressività e potere incrostante (I.L.=0) si ottiene per temperature dell'acqua attorno a 16°C; al di sopra si ha precipitazione di calcare con effetti incrostanti, mentre al di sotto si attiva il processo di solubilizzazione del calcare (che è anche il costituente principale di marni e malte a base calce) con relativo effetto aggressivo su i materiali lapidei e le malte. Nel complesso viene rappresentata una condizione di medio rischio per i materiali calcarei.

Nelle more della disponibilità di dati tipici di scenari climatici tardo primaverili/estivi, si è effettuato anche il calcolo dell'indice di saturazione a $\text{pH} = 7.5$ (media dei dati ufficiali dei valori di pH dell'acqua di rete di Bologna). A tale pH l'indice si mantiene sempre a valori inferiori allo zero e sembra confermare quanto ipotizzato in prima analisi dei dati sullo ione calcio e cioè che vi sia una certa solubilizzazione in atto.

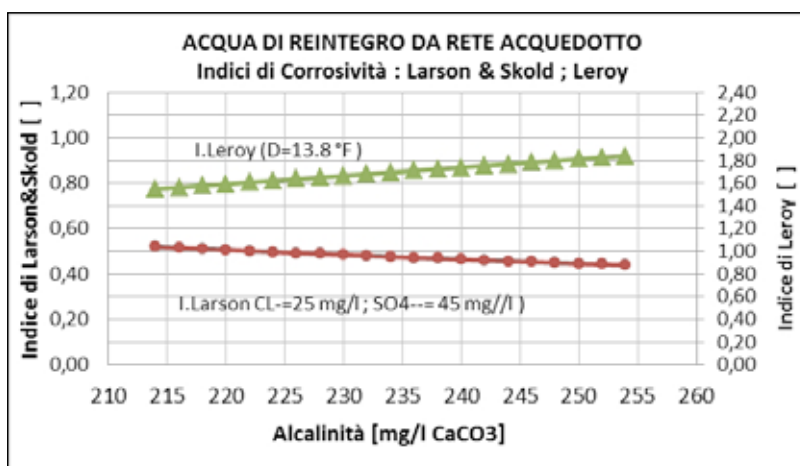
L'indice di aggressività, costantemente al di sotto del 12 anche a valori di pH pari a 7.91, pare confermare una condizione di rischio.

4.1.2. Preliminare valutazione sulla corrosività

Un'acqua si dice corrosiva quando, in presenza o assenza di ossigeno, attacca i materiali metallici grazie alla presenza di elettroliti forti (cloruri e solfati) in essa solubilizzati.

Nel caso di studio risultano interessati i tratti terminali dei condotti, i fregi e le figure in bronzo. L'azione è essenzialmente di tipo elettrochimico ed è legata all'attività ionica dell'acqua. I cloruri, e in misura minore i solfati, sono le specie anioniche più aggressive ad esempio per l'acciaio. La loro concentrazione, associata a quella degli ioni bicarbonato, è utilizzata come parametro di stima degli effetti corrosivi dell'acqua sui metalli. La salinità totale (TDS) è invece direttamente legata alla conducibilità elettrica, che rappresenta la caratteristica discriminante per avere corrosione elettrochimica. La conducibilità elettrica di un'acqua, che è l'inverso della sua resistività, è proporzionale al contenuto di sali disciolti. Si misura in $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, dove S è il Siemens, inverso dell'Ohm. Elevati valori di conducibilità favoriscono tutti i fenomeni di corrosione che avvengono con formazione di macrocoppie anodiche e catodiche e di corrosione bimetallica.

Avendo registrato nelle acque un pH intorno alla neutralità (compreso tra 7 e 9) ed avendo registrato un incremento, seppur limitato, di pH per le acque di rete una volta immesse nel circuito di ricircolo, ai fini del calcolo dell'indice di corrosività secondo Larson e Skold, si è ritenuto, in prima istanza, di considerare una quota contributo all'alcalinità totale per i carbonati pari al 10% anziché assumere tale quota del tutto trascurabile rispetto a quella dei bicarbonati.



Il grafico riporta l'andamento degli indici di corrosività di Larson & Skold e di Leroy sulla base delle analisi preliminari effettuate sull'acqua di rete. L'intervallo di variazione dell'alcalinità totale è stato definito sulla base dei valori ufficiali pubblicati relativi all'acqua della rete acquedottistica di Bologna. Valori dell'indice inferiori a 0.4 indicano che cloruri e solfati non hanno influenza sulla naturale formazione di scaglia calcarea protettiva, valori compresi tra 0.4 e 0.6 indicano che, ad opera di tali ioni, un'azione di ostacolo alla formazione del film protettivo sui metalli è in atto e che la velocità di corrosione comincia ad essere superiore alla norma. Valori superiori a 1.2, infine, lasciano intendere velocità di attacco localizzato molto significative.

I valori dell'indice di Larson calcolato nel caso in questione si mantengono superiori a 0.4 cioè si collocano al di sopra del valore al di sotto del quale possono essere esclusi effetti corrosivi sui metalli. Non risulta però superata la soglia di 0.6 al di sopra della quale l'effetto corrosivo è da ritenersi in atto in maniera importante.

L'indice di Leroy risulta invece costantemente e nettamente superiore all'unità, nonostante si sia assunto come riferimento il tenore di cloruri rilevato nell'acqua di rete (25 mg/l) e non quello misurato nell'acqua di ricircolo caricata di cloruri dall'agente disinfettante (oltre 90 mg/l). Pertanto anche tale indice evidenzia rischi di corrosione per le parti metalliche della fontana

La determinazione del residuo fisso ed ulteriori analisi chimiche a riscontro ed integrazione di quanto fin qui ottenuto sono tuttora in corso. In questa fase i risultati sono ottenuti in funzione di intervalli di variabilità determinati secondo quanto ufficialmente disponibile in termini di dati di qualità delle acque della rete acquedottistica cittadina.

Ribadendo che quanto registrato rappresenta condizioni di impatto medio basso, preme rimarcare che, nella stagione calda, l'evaporazione dell'acqua della fontana può notevolmente alterare le caratteristiche dell'acqua stessa e la concentrazione delle sostanze chimicamente aggressive in punti differenziati del monumento nonché ovviamente consentire fenomeni di proliferazione biologica di biomasse adese e sospese condizionanti le concentrazioni dei sali disciolti.

5. DESCRIZIONE DEGLI IMPIANTI DI TRATTAMENTO E CONDIZIONAMENTO DELLE ACQUE ESISTENTI E NECESSITÀ DI EVENTUALI INTEGRAZIONI O COMPLETAMENTI.

L'impianto di trattamento della acque attualmente in funzione si sviluppa secondo lo schema indicato nel diagramma seguente.



I dati di durezza rilevati non sembrano evidenziare, al momento del campionamento, particolari necessità di addolcimento, esiste attualmente una fase d'impianto a questo destinata, ma il trattamento in atto allo stato attuale sembra consistere essenzialmente nell'immissione manuale di acido tricloro isocianurico all'interno della vasca di accumulo a scopo disinfettante seguita da una filtrazione a maglia molto grossolana.

Vetustà di apparati e sistemi controllo e la modalità discontinua di somministrazione "chemicals" attualmente in essere rendono fin d'ora evidente la necessità di un completo rifacimento dell'impianto.

La permanenza di condizioni equilibrio continue fra effetti aggressivo/incrostanti sui materiali lapidei ed il controllo degli effetti corrosivi richiederanno l'adozione di sistemi automatici di dosaggio reagenti e rilevamento di qualità dell'acqua sia in reintegro che in ricircolo.

Stante la possibilità di contatto fra acque della fontana e visitatori, nonché l'immissione durante la permanenza in fontana di deiezioni da parte di volatili, l'adozione di una fase di disinfezione affidabile in termini di continuità ed efficienza sarà sicuramente necessaria. Andrà tuttavia considerata la possibilità di adottare tecniche a basso impatto chimico sul monumento completamente automatizzate ed autoregolanti. Occorre infatti disporre di opzioni di disinfezione dell'acqua diverse da quella chimica attuale, in quanto la presenza di cloruri innesca la formazione di prodotti corrosivi di varia natura sulle leghe di rame; tali prodotti, se confermati dalle indagini diagnostiche che verranno condotte sulle patine esistenti, recano

forte documento alla conservazione dei manufatti metallici della fontana.

Può prevedersi fin d'ora come necessaria una fase di filtrazione fine delle acque di ricircolo finalizzata sia a garantire la regolarità di funzionamento dell'impianto di condizionamento, sia a permettere rendimenti adeguati e continui alle fasi di disinfezione. La definizione di un adeguato ed aggiornato schema di trattamento e condizionamento, in termini definitivi, potrà essere fatta solo in fase conclusiva poiché richiede:

1. il completamento dei monitoraggi di qualità previsti per la stagione tardo primaverile/estiva;
2. la definizione precisa delle modalità di fruizione della fontana/monumento da parte dei visitatori con l'indicazione di eventuali sistemi di protezione;
3. il completamento del progetto del nuovo sistema di alimentazione ugelli nonché le specifiche gestionali di previsione dell'andamento stagionale del reintegro e dell'intervallo di oscillazione delle portate di ricircolo, dei tempi di residenza in fontana, di quelli all'interno della mandata in pressione, della vasca di accumulo e della condotta di ritorno per caduta;
4. la conoscenza dei processi di degrado in essere nei materiali lapidei e nelle leghe metalliche della fontana, così come identificati dalle indagini diagnostiche non distruttive e micro-distruttive che verranno effettuate sui prodotti di alterazione dei materiali stessi. Tale conoscenza è necessaria per verificare la correttezza dei meccanismi di degrado ipotizzati in fase di analisi della qualità delle acque.

Prof. Maurizio Mancini
Ing. Elisa Franzoni