

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA, AMBIENTALE E
DEI MATERIALI

Corso di Laurea Magistrale

in

INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

ANALISI DEL COMPORTAMENTO DELLE ACQUE POTABILI

IN CONDUTTURE DI CEMENTO AMIANTO

NELLA RETE URBANA DI BOLOGNA

CANDIDATO

Lorenzo Cipriani

RELATORE:

Prof. Ing. Maurizio Mancini

CORRELATORE:

Ing. Carmine Fiorentino

A.A 2022/23

INDICE

INTRODUZIONE.....	3
1. ACQUA POTABILE, AMIANTO E NORMATIVA	5
1.1 Ciclo della filiera dell'acqua.....	5
1.2 Definizione di amianto e cemento amianto	8
1.2.1 Caratteristiche del cemento amianto.....	12
1.3 Condotte in cemento amianto	16
1.3 Normativa acque potabili e amianto	18
2. CARATTERISTICHE DELLE ACQUE POTABILI.....	21
2.1 Parametri microbiologici	21
2.2 Parametri chimici.....	22
2.3 Parametri indicatori.....	25
3. FATTORI DETERMINANTI IL DETERIORAMENTO DEL CEMENTO AMIANTO.....	29
3.1 Deterioramento da agenti chimici.....	30
3.2 Deterioramento fisico.....	35
3.3 Deterioramento biologico	35
4. INDICI PER LA VALUTAZIONE DEL DEGRADO DELLE TUBATURE	37
4.1 Indice di Langelier (SI).....	37
4.2 Indice di Ryznar (RI)	39
4.3 Indice di Larson (LI).....	40
4.4 Indice di Riddick (RCI)	41
4.5 Indice di Aggressività (I.A.)	42
5. CAMPIONAMENTI PER LA VALUTAZIONE DELL'AMIANTO NELL'ACQUA POTABILE.....	44
5.1 Materiali e attrezzature	44
5.2 Procedura di prelievo	45
5.3 Conservazione e trasporto in laboratorio	46

5.4 Metodo di analisi per valutare la presenza di amianto mediante microscopia (Sem).....	46
6. VALUTAZIONE DEGLI INDICI AI CASI STUDIO PRESI IN ESAME.....	49
6.1 Ricerca dei parametri per il caso studio di Bologna e delle altre città analizzate.....	50
6.1.1 Dati medi raccolti per il caso di Bologna	50
6.1.2 Dati medi raccolti per le altre città	52
6.2 Applicazione degli indici di stabilità	54
6.2.1 Calcolo degli indici al caso di Bologna	55
6.2.2 Calcolo degli indici nelle altre città	62
6.3 Il caso studio di Bologna: andamento con valori reali.....	70
7. CONCLUSIONI.....	91
BIBLIOGRAFIA	92
SITOGRAFIA	96

INTRODUZIONE

Le risorse d'acqua potabile e la loro distribuzione nelle reti idriche cittadine sono un tema molto importante sia per la salute umana che per l'ambiente. Infatti è fondamentale una loro attenta gestione nonché la valutazione dei possibili rischi associati all'interazione con le condotte con le quali entrano in contatto, al fine di una corretta progettazione. Nel corso degli anni si è visto come la qualità delle acque in relazione al tipo di materiale utilizzato per le condutture abbia portato non poche volte a problematiche legate alla salute. Nello specifico quello che si vuole trattare nella seguente tesi è l'interazione delle acque ad uso domestico con delle condutture, in particolare in cemento-amianto. Come è ben noto il cemento amianto, un particolare tipo di cemento arricchito di minerali fibrosi, l'amianto appunto, è stato un materiale di gran lunga usato fin dai primi anni del '900 in numerose applicazioni (coperture per tetti, condutture ecc..) grazie alle sue ottime proprietà tecniche dal punto di vista ingegneristico. Tuttavia ciò che si scoprì in seguito fu catastrofico visto che le fibre che si disperdevano e venivano inalate durante la lavorazione o per semplice usura data dal tempo hanno portato allo sviluppo di tumori (asbestosi, mesoteliomi ecc..). Fu proprio per questo motivo che venne bandito l'utilizzo di questo materiale. Tuttavia ancora oggi, dopo tantissimi anni, per le tante applicazioni in cui venne impiegato, si trovano numerosi manufatti che necessitano di essere bonificati da professionisti e in sicurezza. L'interazione acqua-condutture in amianto non è di semplice trattazione poiché dai numerosi studi condotti negli anni, soprattutto in America, non si è riusciti ad avere dei validi riscontri sulla cancerogenicità data dall'ingestione delle fibre. Infatti vi sono studi ed articoli scientifici discordanti e che non hanno portato ad una conclusione concreta. Per questo motivo andremo ad analizzare solo l'interazione tra l'acqua potabile e le condotte nelle quali defluisce. Verrà approfondito il concetto di amianto e di cemento amianto e di come è stato ricavato, descrivendo le proprietà che lo hanno portato al suo ampio utilizzo negli anni. Si andrà a valutare la questione dell'acqua potabile, analizzando i parametri in gioco e i principali inquinanti da tenere monitorati secondo la normativa europea e quindi adottata anche in Italia e che viene costantemente revisionata ed aggiornata. Si contestualizzeranno le diverse tipologie di deterioramento delle condutture con l'acqua quindi i vari fenomeni che portano alla corrosione, abrasione, asportazione di materiale, favorendo la dispersione delle fibre nell'acqua. Verrà poi eseguito un confronto, prendendo in esame i dati pubblici medi offerti da Hera sul caso di Bologna e delle altre città nelle quali sono stati eseguiti i medesimi campionamenti. Infine per dare maggior valenza a ciò che si è studiato, si valuteranno i dati reali relativi a dei giorni precisi in due diverse aree urbane di Bologna,

svolgendo pertanto i calcoli di valutazione qualitativa degli indici in gioco nello stabilire se un'acqua sia aggressiva o meno oppure crei incrostazioni. Tuttavia si vuole avere l'obiettivo di giungere a delle valutazioni sullo stato delle condotte e sulla loro interazione con l'acqua. Valutazioni che pongano le basi per studi futuri sempre più mirati sull'argomento e che promuovano la sicurezza e la sostenibilità.

1. ACQUA POTABILE, AMIANTO E NORMATIVA

Il contesto dell'acqua potabile è un aspetto fondamentale da trattare essendo un bene essenziale per la vita e la salute umana. Tuttavia si riscontrano non pochi problemi legati alla sua scarsità o all'inquinamento in molti paesi del mondo. Infatti va intrapresa una gestione sostenibile e mirata delle risorse idriche e degli investimenti volti a garantire un accesso che sia equo per tutti ad una fonte sicura e pulita. Parallelamente si affronta anche un altro aspetto, oggetto di tesi, ossia l'amianto che nel corso degli anni ha suscitato sempre una maggiore preoccupazione per la sua pericolosità per la salute. Infatti nel campo dell'edilizia ha rappresentato un vasto impiego per la fabbricazione di diversi materiali, tra cui il cemento amianto, usato anche e non solo, per la fabbricazione di condutture. Dunque la sua rimozione e gestione sicura sono aspetti cruciali da considerare quando si parla di sanità pubblica. Proprio per questo sono stati redatti decreti rigorosi ed efficaci nell'ambito della normativa per controllare e regolare questa problematica. Inoltre è essenziale una costante revisione per adattarsi alle nuove scoperte scientifiche, garantendo un quadro legale corposo ed aggiornato. Pertanto la collaborazione tra settore privato, società civile e istituzioni è di fondamentale importanza per affrontare tutte le sfide che il futuro ci pone per garantire un ambiente sicuro e salubre anche alle generazioni future.

1.1 Ciclo della filiera dell'acqua

Le acque sia superficiali che sotterranee appartengono per legge allo Stato, il quale tramite delle concessioni ne affida la loro conduzione a dei gestori privati, pubblici o anche misti. Il sistema si basa sull'approccio del *Servizio Idrico Integrato* che mette in relazione il ciclo naturale con il ciclo tecnologico (quindi tutte le tipologie di trattamento, distribuzione e gestione di esse).⁽¹⁾

Il concetto su cui si basa è quello di una gestione unificata e ben coordinata di tutto ciò che riguarda la fornitura d'acqua potabile e delle acque reflue in una determinata area geografica, solitamente si suddivide in comuni o regioni. Essi si occupano della scelta della sorgente naturale da cui prelevare l'acqua, dello smaltimento e della depurazione. Fondamentale è l'attenzione all'aspetto relativo all'inquinamento e alla tutela dell'ambiente e dei cittadini. Pertanto la capacità di gestione è fondamentale per poter coordinare tutte queste attività nel modo più corretto possibile.

Inoltre questa capacità deve riflettersi anche sulla popolazione, promuovendo campagne di sensibilizzazione che favoriscano un corretto comportamento sostenibile e parsimonioso. Questa tipologia d'approccio integrato è entrata nella legge italiana nel 1994 con la legge Galli n.36, in cui si è voluto unificare la sorgente idrica potabile, la depurazione e lo smaltimento nello stesso processo tramite l'approccio (ATO) Ambito Territoriale Ottimale. Lo scopo è proprio quello di restituire l'acqua all'ambiente, una volta usata, così da ridurre il più possibile l'impatto. ⁽¹¹⁾

Di seguito verranno brevemente presentate le fasi dell'approccio integrato.

- **SISTEMA DI CAPTAZIONE**

Prima fase del processo, si basa sul captare, ossia prelevare l'acqua da una fonte e destinarla al consumo umano oppure industriale. Le sorgenti da cui si capta sono: fiumi, laghi, falde acquifere (cattate attraverso dei pozzi), o da precipitazioni atmosferiche come pioggia o neve tramite sistemi di raccolta d'acqua piovana.

- **TRATTAMENTI DI POTABILIZZAZIONE**

È una fase fondamentale del processo perché rende l'acqua utilizzabile senza comportare rischi per la salute umana. In questa fase si eseguono dei trattamenti (come la disinfezione o la sedimentazione) per migliorare le caratteristiche dell'acqua e rientrare nei valori soglia dei parametri stabiliti dalla normativa. In generale per essere considerata potabile non deve presentare tracce di sali tossici dati da metalli pesanti, o sostanze organiche, sempre tossiche, da decomposizione e quindi nemmeno batteri che potrebbero diventare patogeni. Come accennato le acque sono sottoposte a dei processi, che nel caso della disinfezione comporta il contatto con delle sostanze chimiche che possono alterarne alcune proprietà rendendole meno "gradevoli", quindi influenzando il sapore e l'odore.

- **DISTRIBUZIONE TRAMITE ACQUEDOTTI**

Il processo di distribuzione dell'acqua avviene tramite le reti acquedottistiche con le quali è possibile giungere all'uso finale. Vi sono due metodi differenti di distribuzione: nel primo si sfrutta il naturale scorrimento dell'acqua senza interventi antropici; nel secondo caso vengono utilizzate delle pompe che inducono la portata d'acqua ad un'altezza maggiore per poi lasciare che si distribuisca per caduta, facendole sfruttare

le leggi fisiche del moto. Una prima importante legge da considerare è *l'equazione di Continuità*, in cui la portata d'acqua che scorre in un tubo, senza avere perdite, deve essere costante. Quindi nei tratti di sezione in cui il diametro si allarga andrà più lentamente e viceversa nei tratti più stretti.

Poi va considerata un'altra legge, dei *vasi comunicanti*, in cui un liquido, nel caso della nostra trattazione l'acqua, giunge alla stessa quota nei collegamenti dei vasi e quindi delle tubature, qualsiasi forma si consideri. Infatti grazie a questa legge della meccanica dei fluidi, l'acqua tenderà a distribuirsi verso altezze inferiori. Tuttavia non si hanno mai situazioni di equilibrio, perché si considera un deflusso d'acqua continuo con prelievi costanti. Vanno quindi considerati anche altri parametri come il diametro, la pressione, l'altezza descritti dalla *legge di Bernoulli*.^(III)

$$p + \rho \frac{u^2}{2} + \rho gh = \text{costante}$$

Dove:

p: la pressione

u: la velocità

h: l'altezza

ρ : densità

- **RACCOLTA FOGNARIA**

In questa fase abbiamo una rete di condotte fognarie che servono a raccogliere le acque scaricate per convogliarle verso gli impianti di depurazione. Vi sono anche qui due tipi di scarichi delle acque reflue: industriali; quindi, scarichi di acque che sono state utilizzate per processi produttivi e sono molto inquinanti; domestiche, quindi acque che derivano da scarichi di abitazioni.

- **PROCESSO DI DEPURAZIONE**

È il processo finale che ha lo scopo di bonificare e quindi depurare le acque reflue che derivano da utilizzo industriale o domestico. Quest'ultima fase è molto importante perché l'acqua che verrà trattata sarà poi reimpressa nell'ambiente.^(II)

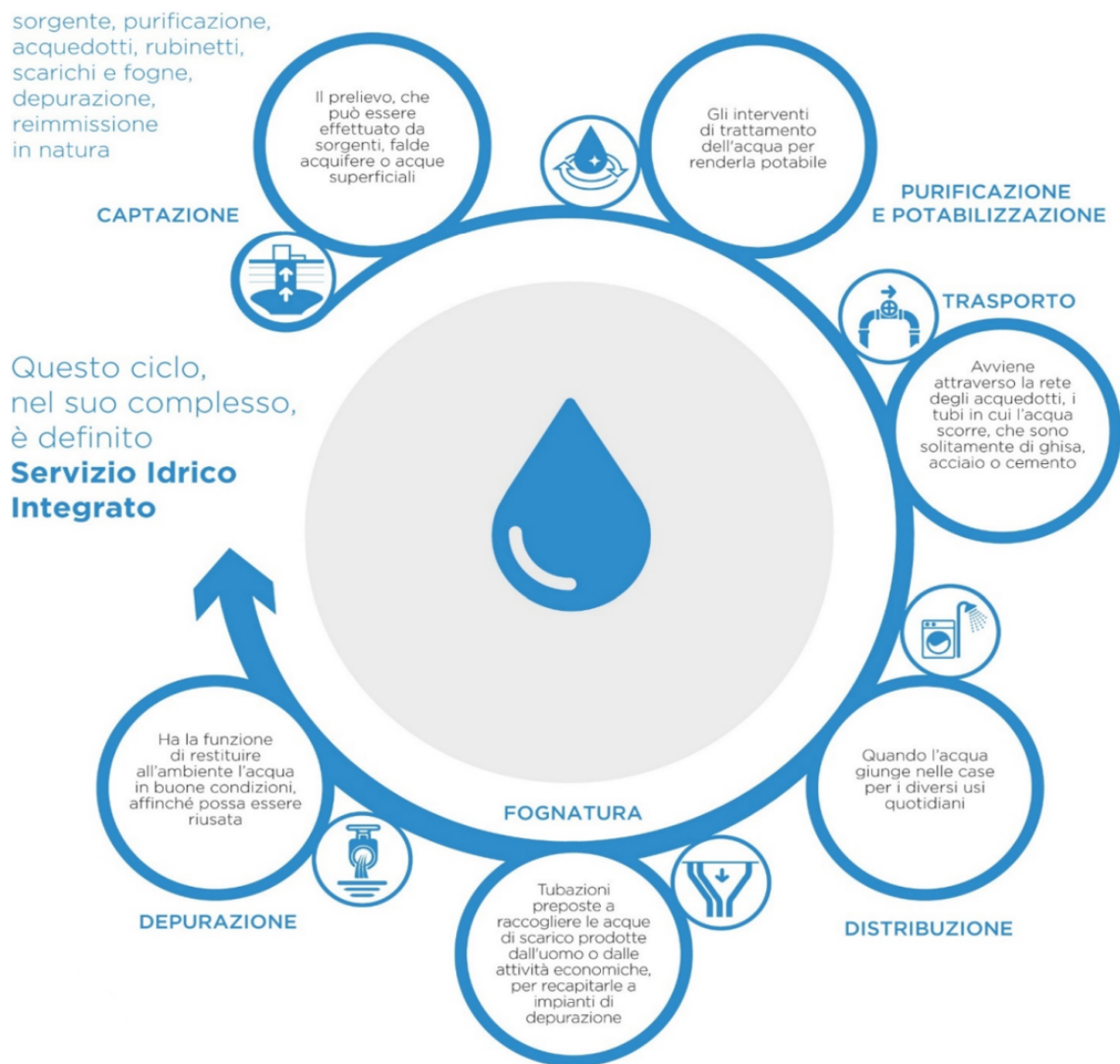


Figura 1 “Ciclo dell’acqua secondo il sistema del Servizio Idrico Integrato”⁽¹⁾

1.2 Definizione di amianto e cemento amianto

Il termine "amianto" ha radici che risalgono all'antica lingua greca, derivando da "amiantos", che significa "inestinguibile" o "indelebile".^(V) Questo nome riflette la resistenza del materiale a sbalzi termici, ad agenti chimici, atmosferici, biologici e la sua durabilità nel tempo, qualità che hanno contribuito al suo vasto utilizzo attraverso i secoli. L'amianto, o asbesto, costituisce un gruppo di minerali fibrosi naturali dell'insieme degli inosilicati (serie degli anfiboli) e dei fillosilicati (serie del serpentino). Sono caratterizzati dalla presenza di sottili e flessibili fibre che conferiscono loro proprietà uniche. I minerali primari devono subire degli specifici processi

idrotermali di bassa temperatura e pressione. Inoltre, è solitamente formato da fibre singole lunghe circa 5 µm e con un rapporto tra lunghezza e larghezza di circa 3:1. ^(IV)Le più importanti tipologie di amianto, che sono sei in totale, appartengono a due serie mineralogiche:

- *Serpentini*: una molteplicità di minerali di antigorite e lizardite con struttura fibrosa caratterizzata da lucentezza, morbidezza e da una visibile arricciatura, di cui fa parte:
 1. il crisotilo (anche conosciuto come amianto bianco)
- *Anfiboli* (magnesio idrati e silicati di calcio) di cui distinguiamo:
 1. l'amosite (anche detto amianto bruno);
 2. la crocidolite (amianto blu);
 3. l'actinolite (verdastro);
 4. l'antofillite (giallo-bianco);
 5. il tremolite (grigio-bianco). ⁽¹⁾⁽²⁾⁽²³⁾

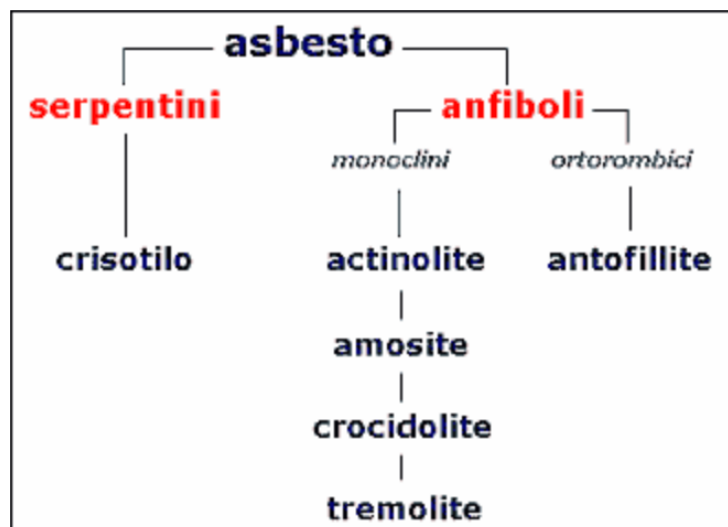


Figura 2 "Suddivisione dell'asbesto" ^(V)

Questi minerali cristallini erano ben noti per la loro resistenza a variazioni termiche quindi al calore, ad agenti chimici, fisici e biologici. Qualità che ne hanno facilitato l'ampio utilizzo in diversi settori dell'industria, tra cui troviamo appunto l'edilizia e la produzione di manufatti come tetti, condutture, rivestimenti. Fin da tempi remoti, l'amianto è stato impiegato in numerosi contesti, dalla produzione di materiali da costruzione all'abbigliamento protettivo.

Tuttavia il problema venuto alla luce successivamente, risiede negli impatti devastanti che si sono riscontrati sulla salute. In particolare, quando le sottili fibre di amianto vengono rilasciate nell'ambiente e diventano assai pericolose se inalate. Malattie associate all'esposizione di queste fibre sono l'asbestosi da cui prende il nome per l'appunto il minerale, il mesotelioma e altri problemi respiratori. ⁽¹⁾

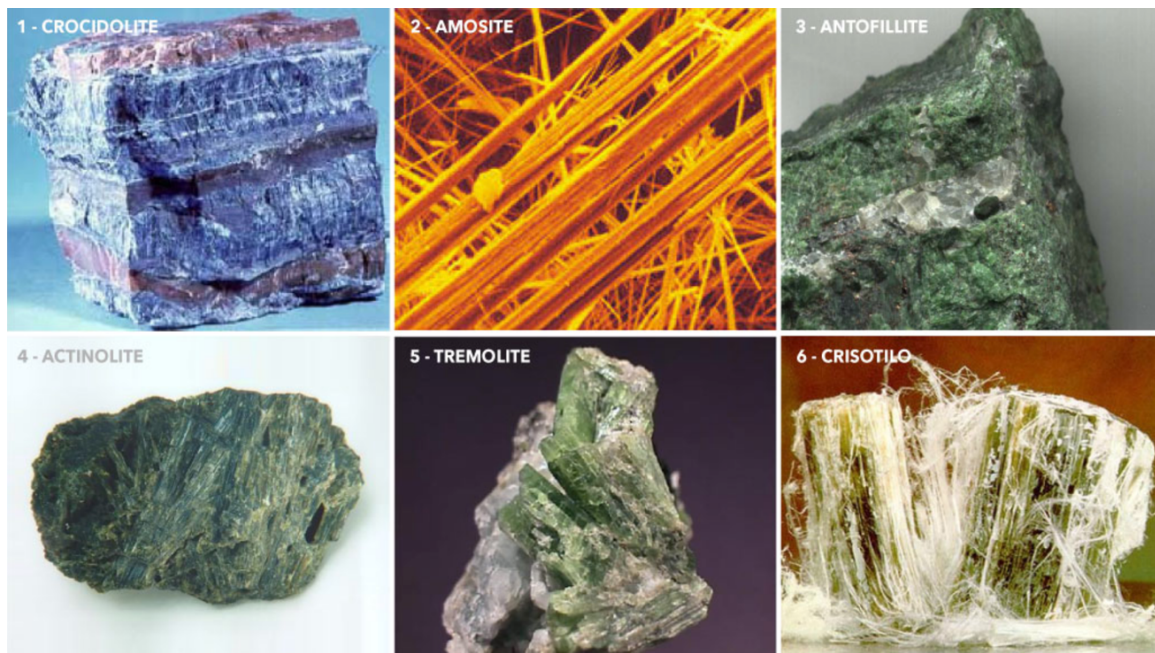


Figura 3 " Tipologie di asbesto " ^(VI)

Dunque, le preoccupazioni ambientali e sulla salute si concentrano sulla possibile ed inevitabile dispersione di fibre nell'aria durante attività come la demolizione, la lavorazione o la rottura di materiali che contengono amianto. Una volta disperse nell'ambiente, le particelle di amianto possono persistere per periodi molto lunghi. Una delle applicazioni più comuni dell'amianto è stata nella produzione di materiali da costruzione, tra cui il cemento amianto. Il cemento amianto, anche noto con il nome di Eternit, dal suo maggior produttore, deriva dal latino "aeternus", ossia eterno ed è un materiale formato da un legante, il cemento, impastato con le fibre di asbesto. Da questo materiale sono stati prodotti molteplici manufatti nel corso del XX secolo tra cui condotte per il deflusso dell'acqua potabile nelle abitazioni, cisterne, canne fumarie, pannelli di rivestimento, ecc... Il motivo dell'utilizzo di questo materiale è stato proprio per le sue ottime proprietà (termiche, dielettriche, fonoassorbenti, resistenza meccanica, ad agenti chimici, fisici) che verranno poi analizzate più avanti. L'inventore di questo materiale

fu Ludwig Hatschek, imprenditore austriaco figlio di birrai, il quale a seguito dell'acquisto di macchine da un'attività inglese per la produzione di filature in amianto, cominciò a produrre tessuti, carta e cartone in amianto. In seguito, grazie alle eccellenti proprietà di questi filamenti decise di mescolarlo al cemento ottenendo un nuovo materiale, l'Eternit, nome che fu usato anche per il brevetto. ^(VII)

Oggetto d'esame e di analisi della tesi sono le tubature fabbricate in cemento amianto. Queste condotte sono formate da una specifica malta di cemento che utilizza come inerte le particelle di amianto. L'amianto, analizzato dal punto di vista chimico, è un *silicato idrato di magnesio* ($MgSiO_3$), dunque un minerale fibroso che fin nell'antichità era ben noto per le sue ottime proprietà e longevità. L'impiego di questo materiale, iniziato nei primi decenni del 900 (1913-1922), è dovuto a Adolfo Mazza, un ingegnere della Eternit S.p.A. (che fu l'ideatore del processo di produzione e della prima macchina testata per fabbricare il cemento amianto). Da quel periodo in poi vi fu un'esplosione nell'utilizzo del materiale fino a che non si scoprirono le terribili conseguenze che poteva e avrebbe portato sull'ambiente e sulla salute umana. Fu per questo motivo che intorno agli anni '90 fu stipulata una legge, la 257 del 27/03/1992 che ne bandì l'uso, riconoscendone la pericolosità. ⁽²⁾ Tuttavia è necessario analizzare un aspetto che è cruciale ai fini delle analisi e delle discussioni. Infatti va precisato che l'amianto risulta cancerogeno e quindi può portare all'insorgenza di tumori a seguito dell'inalazione. Quindi la sua principale pericolosità è circoscritta al momento della sua lavorazione, al contatto all'interno degli ambienti di produzione ed al materiale stesso. Nel tempo può degradarsi a seguito di molteplici fenomeni e diventare friabile, con la conseguente dispersione di fibre. Tuttavia se si considera l'acqua che scorre nelle condotte, non presenta elevate concentrazioni di fibre (in accordo con gli studi effettuati dalla ricerca scientifica americana). Inoltre altro aspetto fondamentale, è che l'amianto risulta nocivo dal punto di vista polmonare, ma non è stata ancora dimostrata una particolare influenza se ingerito cioè danni all'apparato digerente. Sebbene non sia ancora stata fatta chiarezza sulla pericolosità da ingestione, va comunque monitorata la situazione ed affrontato il problema alla radice. Infatti vi sono ancora tantissime condotte in funzione e per questo va fatta una valutazione accurata della pericolosità per l'esposizione e per la rimozione ed eventuale sostituzione con materiali più sostenibili e sicuri.

1.2.1 Caratteristiche del cemento amianto

Le eccellenti proprietà fisico-chimiche e la conseguente versatilità d'impiego, unitamente al basso costo, dovuto alla disponibilità e facilità di estrazione, hanno determinato un elevato impiego di questo minerale nel corso degli anni.

Per le sue caratteristiche uniche che lo ponevano ai vertici dei materiali più utilizzati e convenienti dal punto di vista tecnico, l'amianto è stato utilizzato in diversi settori ed applicazioni. Infatti, in breve tempo, è divenuto uno dei materiali più utilizzati, se non il più utilizzato in antichità, nell'industria edile e manifatturiera. Ora porremo l'attenzione sulle qualità che possedeva questo materiale e che ha permesso il suo largo impiego, prima di scoprire la sua pericolosità.

Una delle maggiori qualità del cemento amianto è la sua proprietà termoisolante. L'isolamento termico consiste nella capacità di certi materiali di resistere al trasferimento di calore. Lo sfruttamento tecnologico che ha subito l'amianto nel corso del XX secolo è dovuto in parte alla sua ottima capacità di fungere da termoisolante, garantendo così il contenimento del calore. ^(IX)

Inoltre la capacità delle fibre di interrompere il flusso di calore attraverso il materiale, fornisce al cemento amianto anche un'elevata resistenza termica. Questa caratteristica lo rende particolarmente adatto per applicazioni che richiedono tale caratteristica, come ad esempio nelle coperture di edifici e nelle infrastrutture soggette a variazioni di temperatura, fasciature delle tubazioni, tute ignifughe, pannelli antincendio, isolamento di caldaie o di forni.

Dunque risulta essere particolarmente utile per ridurre le perdite di calore in inverno e mantenere una temperatura interna più stabile.

Un'altra qualità importante è la sua stabilità termica alle alte temperature. Infatti l'amianto presenta una buona stabilità per cui non si modificano né lo stato fisico né i legami chimici con le variazioni di temperatura, entro certi limiti. Se lo si mescola ad altre sostanze, ha la caratteristica di resistere a temperature fino a circa 1000°C. ^(IX) Infatti proprio per questo, uno dei motivi principali per il quale è conosciuto ed è stato per lungo tempo utilizzato, è il suo elevatissimo potere coibentante, oltre al fatto che è estremamente resistente all'usura termica, all'abrasione ed all'azione degli agenti esterni.⁽¹⁾

Altro aspetto, che ha caratterizzato il suo largo impiego è la sua resistenza meccanica. Per definizione la resistenza meccanica è lo sforzo massimo che un generico materiale, fornita una specifica geometria, riesce a sopportare prima di giungere a rottura. In base al tipo di sforzo applicato avremo compressione, trazione e flessione. Si parlerà allora di resistenza meccanica a compressione, a trazione e a flessione. ^(VIII) Quest'altra proprietà ha riscontrato

molto successo in diversi impieghi. Infatti la resistenza meccanica delle fibre ha fatto sì che l'amianto venisse utilizzato per diverse applicazioni in cui erano richiesti sforzi di carichi. Miscelato al cemento donava a quest'ultimo maggiore resistenza a trazione. Talvolta unito al fatto del basso costo veniva preferito pure all'acciaio. Di seguito sono sinteticamente accennate le principali caratteristiche del cemento amianto dal punto di vista della resistenza meccanica:

- *Elevata resistenza a compressione*

Il cemento amianto presenta una notevole resistenza alla compressione, difatti ha trovato largo impiego in prodotti come sostegni strutturali ed applicazioni in cui è richiesta una resistenza significativa a carichi verticali.

- *Discreta resistenza a trazione*

Inferiore rispetto alla resistenza a compressione, tuttavia il cemento amianto conserva una discreta capacità di resistere a trazione.

- *Rigidità e stabilità dimensionale*

Altra proprietà importante è l'elevata rigidità che ne garantisce una buona stabilità strutturale. Quindi qualità che permettono di mantenere la forma e le dimensioni desiderate durante l'utilizzo e nel tempo.

- *Basso degrado nel tempo*

La resistenza meccanica dell'Eternit contribuisce anche alla sua durabilità. Infatti rispetto ad altri materiali che col passare degli anni deteriorano molto facilmente, il cemento amianto tende a mantenere la sua integrità e resistenza.

- *Facilità nella lavorazione e nella produzione*

il cemento amianto è noto per la sua semplicità nella lavorazione e produzione, essendo molto versatile nella creazione di forme e dimensioni diverse. Inoltre essendo leggero e resistente, può essere facilmente modellabile. La lavorazione agevole unita ai bassi costi di produzione ne hanno fatto una scelta economica e conveniente anche per progetti di grandi proporzioni, ed utilizzato molto per la fabbricazione di condotte per acque potabili. ^(VIII)

Poi troviamo anche altre qualità come quelle fonoassorbenti. Questa proprietà rese le fibre di amianto di gran lunga utilizzate per realizzare pannelli insonorizzanti. Quando un'onda sonora attraversa un corpo solido si ha quel fenomeno che viene chiamato assorbimento acustico e in base alla natura del solido, quindi di quanto è soffice, l'onda viene riflessa. Per questo motivo l'amianto ha trovato largo impiego in pareti e soffitti in cui servivano dei rivestimenti di pochi

centimetri e che garantissero l'ovattamento dei suoni con la conseguente riduzione del rumore.
(1)

Altra proprietà importante è la resistenza chimica. Infatti il cemento-amianto può mostrare una certa resistenza a sostanze come acidi e alcali, ma come per ogni tipologia di materiale nel tempo rappresentano comunque un fattore di deterioramento. Tuttavia in base alle condizioni ambientali e al tempo considerato la sua performance può variare.

Ecco alcune caratteristiche:

- *Resistenza agli acidi e basi deboli:* può resistere a soluzioni diluite di acidi e basi deboli. Tuttavia la resistenza può variare a seconda della concentrazione e del tipo di sostanza chimica.
- *Fragilità agli acidi e basi forti:* rispetto ad acidi e basi deboli l'Eternit è generalmente meno resistente agli acidi e basi forti. Più avanti verranno analizzate le varie tipologie di deterioramento chimico che possono causare l'instabilità della struttura nel tempo. Ad esempio, per l'attacco dei solfati e cloruri. (X)(XI)

Va poi considerata anche un'altra proprietà, che spesso è sintomo di deterioramento in manufatti in cemento-amianto ed anche per altre tipologie di materiali, ossia elevata resistenza agli agenti biologici. Infatti la resistenza all'attività di microrganismi può variare in base a diversi fattori, tra cui va valutata la tipologia di fibre di amianto utilizzato, la durabilità del materiale e le condizioni ambientali in cui si trova. Distinguiamo:

- *L'attacco da parte di microrganismi:* il cemento-amianto può essere soggetto all'attacco di diversi organismi come batteri. Questi microrganismi possono proliferare in condizioni di umidità, per temperature moderate e grazie alla presenza di nutrienti. Infatti la presenza di materiali organici può fornire una fonte di nutrienti per l'attività microbica.
- *La proliferazione di alghe e funghi:* in ambienti con elevata umidità, il cemento-amianto può diventare un ambiente favorevole alla crescita di funghi ed alghe. Infatti, questi organismi possono formare uno strato superficiale che, oltre a influire in maniera significativa sull'aspetto estetico, può soprattutto contribuire al suo deterioramento nel

tempo quindi tramite asportazione per l'effetto abrasivo del materiale, favorendo la dispersione di fibre. ⁽⁵⁾

- *Le condizioni climatiche:* le condizioni atmosferiche e metereologiche possono influenzare la resistenza del cemento-amianto all'insorgenza di agenti biologici. Ad esempio, regioni con frequenti pioggia alta umidità possono favorire la crescita di organismi biologici sulla superficie del materiale. Tuttavia se si considerano condotte per acque potabili, le condizioni atmosferiche non influiscono troppo per la presenza del terreno che funge da copertura. ⁽⁵⁾

Infine, ma non per minore importanza, abbiamo anche una buona capacità dielettrica che di fatto rendeva il cemento amianto utile in numerose applicazioni. Infatti poteva sopportare elevate tensioni elettriche senza però condurre corrente e, grazie alla sua resistenza, era utilizzato anche per creare materiali isolanti, garantendo una buona protezione alla conduzione di corrente. Questa proprietà era molto utile in ambienti in cui era necessario evitare dei cortocircuiti o dispersioni elettriche. ⁽⁴⁾

CEMENTO-AMIANTO	Ardesie-bordature, copponi-lastre-pianelle- tegole-caminetti-canne- fumarie-cassoni-cisterne- silos-amianto spruzzato in matrice cementizia- colonne-pilastri-parapetti- malte cementizie	-Termoisolanza -Fonoassorbente -Antirumore -Resistenza meccanica -Resistenza all'attacco chimico -resistenza ignifuga -capacità legante -sigillante
------------------------	--	--

Figura 4 “Tipologie di prodotti fabbricati col cemento amianto e le sue proprietà” ⁽³⁾

1.3 Condotte in cemento amianto

La finalità degli studi ed analisi della tesi riguarda il cemento-amianto di cui si è trattato nel paragrafo precedente, ma più nello specifico, riguarda le condotte fabbricate in cemento amianto per il trasporto di acqua potabile nelle abitazioni. Queste condotte, conosciute anche con il nome di fibrocemento o tubo C-A o anche talvolta tubo di transito, sono state ampiamente utilizzate, nel corso del tempo, per infrastrutture idriche e trasporto di fluidi, nel caso in esame l'acqua. Ma come si hanno pregi, grazie alle caratteristiche ingegneristiche del materiale, si hanno anche dei difetti, proprio per la pericolosità del materiale. (XIII)

Una condotta in cemento amianto è un recipiente di forma tubolare, adibito al trasporto di fluidi o anche di gas, composto per l'appunto da fibre di amianto. Tra i pregi, che per la maggior parte sono stati descritti nel paragrafo precedente, del cemento amianto, troviamo:

- *Buona resistenza a trazione*: quindi grande resistenza del materiale, il cemento da solo non è sufficiente e per questo veniva implementato con le fibre.
- *Garantiva anche un migliore deflusso*: la portata idrica poteva scorrere con maggior facilità grazie all'elevato coefficiente di deflusso
- *Le proprietà fonoassorbenti*: descritte in precedenza, nonostante la maggior velocità di deflusso si garantiva un buon isolamento acustico
- *Lunga durabilità*: infatti secondo l'istituto "Chrysotile Institute", i tubi potevano durare anche fino a 70 anni contro i 50 di altri materiali che ancora oggi si utilizzano, come i PVC.
- *Resistenza alla corrosione e deterioramento*: usato per acque aggressive grazie alla sua resistenza a corrosione ed inoltre non marciscono con facilità. Anche i roditori non riescono a cibarsene e deteriorarli.
- *Basso costo*: che ne ha favorito la popolarità nel suo utilizzo, rendendolo economicamente conveniente rispetto ad altri materiali sul mercato. Questo basso costo è attribuibile a più fattori, come ad esempio il fatto che il prezzo sia del cemento che dell'amianto è rimasto invariato negli anni. Il costo di produzione minore rispetto ad altre fabbricazioni, infatti richiede meno energia, circa il 20% in meno rispetto a dei tubi fabbricati in ghisa o fino al 40% in meno rispetto a tubi in PVC. Inoltre, essendo resistenti alla corrosione, non hanno la necessità di essere rivestiti da strati di zinco, cosa essenziale per i tubi metallici che altrimenti arrugginiscono con grande facilità

- *Una più semplice installazione:* essendo privi di rivestimenti in acciaio, tolte delle giunzioni e bullonature, risultano più leggeri e facili da maneggiare. Proprio per la presenza dei giunti, si è ovviato alla necessità di tagliare i tubi facilitando l'installazione ed a ridurre i rischi di dispersione di fibre. ^(XIII)

Tuttavia come si hanno questi pregi appena descritti, si hanno anche dei difetti che di fatto ne hanno portato all'abbandono come materiale. Primo tra tutti è il problema sulla salute pubblica che è il motivo principale per cui è stato bandito. Soprattutto nei primi tempi, quando ancora i tubi venivano tagliati, rilasciavano molte più particelle nell'aria e gli operatori rischiavano di ammalarsi di:

- *Asbestosi:* secondo il Center for Disease Control, l'inalazione durante le opere di taglio, o per dispersione nell'ambiente può cicatrizzare i polmoni e portare danni respiratori
- *Malattie alla pleura:* colpisce il rivestimento che ricopre i polmoni; quindi, la pleura che può presentare un accumulo di liquidi
- *Tumori:* può portare al cancro ai polmoni,
- *Mesotelioma:* può colpire sempre la pleura, ma è cancerogeno e non si manifesta subito, ma possono passare anche più di 30 anni dall'esposizione prolungata prima di sviluppare i primi sintomi

Inoltre il materiale si assottiglia con il tempo, portando a fessurazioni per via del deflusso dell'acqua e quindi rilascio di fibre. ^(XIII)

Dunque per tutta questa serie di fattori, è stata ritenuta urgente la necessità di bandire il suo utilizzo. Infatti sono stati introdotti decreti che ne sanzionassero e vietassero l'utilizzo ed attivati protocolli di rimozione e sostituzione con materiali più sicuri e longevi (come il PVC).



Figura 5 “Tubi in cemento amianto” (XII)

1.3 Normativa acque potabili e amianto

A seguito del riconoscimento della natura nociva dell'amianto per la salute dell'uomo, si è iniziata a introdurre nel 1992, a livello nazionale, una normativa che ne disciplinasse la sua completa rimozione. Infatti i quantitativi di materiali contenenti amianto sul territorio nazionale si aggirano intorno ai 32 milioni di tonnellate, derivanti, in gran parte, dai 2,5 miliardi di metri quadri di coperture - lastre ondulate o piane in cemento-amianto prodotte e presenti sul territorio nazionale sulla base dei dati forniti dal CNR^(XXXVIII).

La legge n. 257 del 1992 ha disciplinato la rimozione dell'amianto sul territorio italiano secondo un programma di dismissione biennale, in base al quale, alla data del 28 aprile 1994, veniva vietata l'estrazione, l'importazione, la commercializzazione e la produzione di amianto e di tutti i prodotti contenenti amianto. Altra normativa di riferimento è quella inerente alla bonifica di siti inquinati di cui alla legge n.426/1998 e del programmanazionale di bonifica e ripristino ambientale approvato con il D.M. 468/2001 e aggiornato con il D.M. 308/2006.

In particolare, la legge 426 del 9 dicembre 1998 ha affrontato, oltre a ribadire la cessazione dell'impiego dell'amianto, alcuni problemi considerati particolarmente rilevanti ai fini della tutela della salute pubblica, connessi alla presenza nell'ambiente di prodotti di amianto liberamente commercializzati ed installati in precedenza cui ha fatto seguito anche un

Programma nazionale di bonifica e ripristino ambientale approvato con D.M. 468/2001 e successive modifiche del D.M. 308/2006.

Al fine di una precisa e puntuale individuazione dei siti e zone maggiormente contaminate sul territorio nazionale l'art. 20 della legge n. 93 del 2001 stanziò 22 miliardi di lire per il triennio 2000- 2002 (pari a 11,4 milioni di euro circa).

Successivamente, nel marzo 2013 il Ministero della salute, dell'ambiente e del lavoro ha approvato il Piano nazionale amianto ^(XXXIX), il quale effettua un'analisi dettagliata a tutela della salute, dell'ambiente nonché aspetti di sicurezza sul lavoro e previdenziali. Nello specifico, tale Piano ha lo scopo di definire una mappatura dei materiali contenenti l'amianto al fine dell'accelerazione dei processi di bonifica, dell'individuazione di siti di smaltimento nonché tutte le necessarie azioni da intraprendere contro l'amianto a livello nazionale e locale sulla base della normativa di settore.

Infine, si rileva anche una normativa a livello nazionale volta a tutelare i lavoratori introdotta con il D. Lgs. 9 aprile 2008, n. 81^(XL), il quale sancisce gli obblighi in capo a ciascun datore di lavoro in ambito di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. L'art. 28 del sopra citato decreto impone al datore di lavoro una valutazione *ex ante* dei rischi, tra cui anche quelli derivanti dalle polveri provenienti dall'amianto e materiali contenenti lo stesso, all'esito della quale è tenuto a compilare un documento ufficiale di valutazione dei rischi, includendovi valori limiti soglia e grado di integrità cui seguirà un piano di campionamento con analisi periodiche dello stato dei luoghi.

Una volta conclusasi la valutazione del rischio, gli artt. 251- 259 del D.lgs. 81/2008 prevedono ulteriori obblighi in capo al datore di lavoro quali: adozione di misure di prevenzione e protezione, limitazione del numero lavoratori esposti alle polveri provenienti dall'amianto, dispositivi di protezione individuale delle vie respiratorie intervallato da periodi di riposo, luoghi di lavori con apposizione di appositi cartelli e limitati all'accesso dei soli lavoratori autorizzati, periodica misurazione dei livelli di amianto, informazione e periodica formazione ai lavoratori dei rischi connessi alla salute dovuta alla loro esposizione all'amianto, norme igieniche e misure di prevenzione e protezione da adottare nonché sorveglianza sanitaria triennale.

Dal punto di vista europeo l'utilizzo, la vendita e l'estrazione dei minerali di amianto è stata vietata nell'Unione Europea fin dal 2005 cui ha fatto seguito la risoluzione del Parlamento Europeo del 2021 al fine di introdurre un piano strategico d'azione comunitario contenente la bonifica, la lotta alle malattie causate dall'amianto e la protezione dei lavoratori.

La prima Direttiva Europea emanata in materia è del 2009 cui ha fatto seguito l'ultima e più recente n. 2668/2023^(XLI) di modifica e integrazione alla precedente volta ad inasprire la legislazione inserendo un metodo più aggiornato per il conteggio delle fibre di amianto attraverso la microscopia elettronica ottica (EM). Tale direttiva è entrata in vigore il 20 dicembre 2023, ma avrà attuazione a partire dal 21 dicembre 2025.

Nello specifico il punto 15 della Direttiva Europea, entro il 21 dicembre 2029 i datori di lavoro dovranno evitare l'esposizione a una concentrazione di amianto in sospensione nell'aria di ciascun lavoratore superiore a:

- 0,01 fibre per cm³ misurata in rapporto a una TWA (Time Weighted Average), ossia la concentrazione di una sostanza mediata su una giornata di 8 ore per 40 ore alla settimana (considerate fibre di larghezza inferiore a 0,2 micrometri);
- 0,002 fibre per cm³ misurata in rapporto a una TWA di 8 ore

Qualora i limiti sopra menzionati vengano superati, i lavoratori dovranno cessare immediatamente la loro prestazione d'opera e dovranno essere adottate quanto prima tutte le misure appropriate per ovviare alla situazione.

La Commissione Europea entro il 31 dicembre 2028 stabilirà la necessità di un ulteriore abbassamento dei valori limite sulla base delle diverse relazioni presentate dai diversi Stati membri, di prove scientifiche aggiuntive, sviluppi tecnici e possibili nuovi metodi di rilevazione e analisi di tale valore.

Per quanto riguarda la normativa sull'acqua potabile, vi sono due norme che sono state seguite riguardo i valori soglia dei parametri in gioco nello stabilire la qualità dell'acqua potabile. La prima è il D.lgs. n. 31/2001 che riguarda l'attuazione della Direttiva 98/83/CE riferita alla qualità delle acque potabili. All'interno vi sono tutti i valori limite e le definizioni degli inquinanti. Inoltre è stato preso come riferimento da Hera per confrontare i valori dei parametri riscontrati dai campionamenti. ^(XLIII) L'altra normativa, ossia l'aggiornamento di quella precedente, è la Direttiva 2020/2184 del Parlamento europeo, che si riferisce sempre alla qualità delle acque ad uso domestico. Va chiaramente citata poiché è l'ultimo aggiornamento inerente ai valori limite dei parametri di riferimento. Tuttavia anche in questa Direttiva non sono presenti voci inerenti alla concentrazione di fibre, pertanto le differenze per quanto riguarda il caso d'interesse sono poche. ^(XLII)

2. CARATTERISTICHE DELLE ACQUE POTABILI

Le acque potabili sono un benessere essenziale per la vita umana e della comunità. Prima di dare il consenso al loro utilizzo devono essere eseguiti numerosi controlli e monitoraggi ai fini della normativa vigente 2020/2184. Tuttavia all'interno di questa Direttiva non sono stati inseriti valori e riferimenti riguardo la presenza e concentrazione di fibre di amianto, esattamente come era avvenuto con la Direttiva precedente. Inoltre i valori di riferimento da cui sono stati presi i dati nei paragrafi successivi da Hera, fanno riferimento al D.lgs. n. 31/2001 e al Decreto del 5 settembre 2006, quindi si è convenuto di continuare a fare riferimento sempre a quest'ultimo, anche se va comunque citato il fatto che vi è stato un aggiornamento successivo. Dunque per stabilire se la qualità delle acque potabili è idonea, vanno considerati diversi parametri che poi andranno confrontati con i valori soglia forniti dalla legge, a livello nazionale, che derivano dall'applicazione di Direttive europee. Questi parametri li possiamo dividere in microbiologici, chimici, fisici e indicatori.



Figura 6 "Acqua" (XIV)

2.1 Parametri microbiologici

Per poter stabilire dei parametri microbiologici vanno fatte delle analisi. Queste valutazioni sono dei procedimenti svolti in laboratorio che hanno il compito di riconoscere, quantificare e valutare la presenza di qualsiasi tipologia di microrganismi in un dato campione. In particolare, ci riferiamo ad un procedimento che consente di individuare ogni tipologia di batteri e microrganismi nelle acque. L'obiettivo di questa analisi (determinato attraverso dei

campionamenti delle acque) è quello di stabilire dei valori che andranno confrontati con le soglie stabilite per legge. Inoltre si ha anche l'obiettivo di quantificare il numero di microrganismi presenti ed individuare quelli indicatori di buona qualità e quelli invece che risultano essere classificati come patogeni. ⁽⁶⁾

PARAMETRO	VALORE DI PARAMETRO	UNITÀ DI MISURA
Escherichia coli (E. Coli)	0	N°/100 ml
Enterococchi	0	N°/100 ml
Per le acque messe in vendita in bottiglia o contenitori sono applicati i seguenti valori:		
Escherichia coli (E. Coli)	0	N°/250 ml
Enterococchi	0	N°/250 ml
Pseudomonas aeruginosa	0	N°/250 ml
Conteggio colonie a 22 °C	100	N°/ml
Conteggio colonie a 37 °C	20	N°/ml

Figura 7 “Parametri microbiologici per le acque potabili riferiti al D.lgs. n. 31/2001” ^(XV)

2.2 Parametri chimici

Per quanto riguarda quest'altra tipologia di parametri, ossia i parametri chimici, ci si riferisce sempre a procedure di identificazione e valutazione delle proprietà chimiche presenti nelle acque destinate al consumo umano.

Le analisi chimiche di una campionatura d'acqua hanno come obiettivo di valutare se la concentrazione di minerali rilevati, rientrino nei valori soglia accettabili per legge e quindi non risultare nocivi per la salute dell'uomo.

I parametri più importanti da considerare sono tutte le sostanze chimiche che in base alla loro concentrazione determinano la qualità dell'acqua. Abbiamo l'azoto ammoniacale e i nitriti che possono essere indicatori di decomposizione organica e quindi può esserci della contaminazione microbiologica. Poi vi sono i nitrati che rappresentano la fine del processo e

indica che la contaminazione non è in atto, ma è già avvenuta. Altro parametro è la presenza di *ferro*. Se si hanno concentrazioni elevate, oltre il limite consentito, può alterare le proprietà organolettiche e si avrà dell'acqua con odore e sapore metallico, che risulterà sgradevole. Poi vi è il *manganese*, che pure, come il ferro, influenza le proprietà organolettiche e dà la tipica colorazione scura. Poi vanno sempre tenuti sotto controllo i livelli di *piombo*, che può risultare tossico e dannoso.

Un altro parametro importante è l'*alcalinità*, che esprime la tendenza dell'acqua a reagire con l'idrogeno, quindi, quantifica la resistenza dell'acqua in funzione del pH. Normalmente è data dagli ioni bicarbonato (HCO_3) e carbonato (CO_3) e dagli ioni ossidrili, nel caso in cui presenti un livello del pH elevato. Va poi chiarito che l'alcalinità è inversamente proporzionale all'aggressività e al crescere diminuisce l'azione aggressiva di solubilizzare. ^(XXXIII)

Altro aspetto è il *residuo fisso* che deriva dal contenuto di sali totali e va sicuramente considerata perché l'organismo umano necessita di un certo quantitativo. ⁽⁶⁾ Tuttavia una concentrazione troppo elevata potrebbe portare ad un'eccessiva *durezza*, traducendosi in danni alle condotte e quindi alla salute.

Inoltre quando si parla di qualità delle acque, va fatto riferimento anche ad un altro parametro importante che è la *durezza dell'acqua*, descritto più nel dettaglio nei parametri indicatori.

PARAMETRO	VALORE DI PARAMETRO	UNITÀ DI MISURA
Acrilammide	0,10	µg/l
Antimonio	5,0	µg/l
Arsenico	10	µg/l
Benzene	1,0	µg/l
Benzo(A)pirene	0,010	µg/l
Boro	1,0	mg/l
Bromato	10	µg/l
Cadmio	5,0	µg/l
Cromo	50	µg/l
Rame	1,0	mg/l
Cianuro	50	µg/l
1,2 dicloroetano	3,0	µg/l
Epicloridrina	0,10	µg/l
Floruro	1,50	mg/l
Piombo	10	µg/l
Mercurio	1,0	µg/l
Nichel	20	µg/l
Nitrato (come NO ³)	50	mg/l
Nitrito (come NO ²)	0,50	mg/l
Antiparassitari	0,10	µg/l
Antiparassitari tot.	0,50	µg/l
Idroc. p.a. (IPA)	0,10	µg/l
Selenio	10	µg/l
Tetracloroetilene + Tricloroetilene	10	µg/l
Triometani - Totale	30	µg/l
Cloruro di vinile	0,5	µg/l
Clorito	700	µg/l
Vanadio	140	µg/l

Figura 8 “Parametri chimici riferiti al D.lgs. n. 31/2001” ⁽⁶⁾

2.3 Parametri indicatori

Questa tipologia di parametri presenti sempre nel Decreto legislativo n.31/2001 e 2020/2184 sono riferiti all'aggressività o capacità incrostante dell'acqua. Principalmente questo genere di parametri si applicano a quelle acque che hanno subito dei trattamenti come l'addolcimento, osmosi inversa, demineralizzazione ecc. Ad esempio, per acque potabili ottenute da trattamenti come la demineralizzazione o addolcimento molto significativo, si possono aggiungere dei sali di magnesio e calcio per calibrarne la durezza e ridurne l'aggressività e quindi diminuirne l'impatto negativo sulla salute. Tra i parametri da considerare qui abbiamo: *il pH*, che è l'indice per stabilire la basicità o acidità di un'acqua e che verrà trattato anche nel capitolo successivo inerente al deterioramento delle tubature. Infatti un ambiente alcalino (o acido) può intaccare la superficie delle condotte, creando abrasione ed asportazione di materiale o addirittura giungere a rottura rilasciando sostanze tossiche come, ad esempio, il piombo o nel caso di condotte in Eternit, le fibre di amianto. Poi vi sono i parametri legati alle *caratteristiche organolettiche*, quindi parliamo di parametri quali: sapore, odore, torbidità, colore. Queste caratteristiche sono importanti perché rendono gradevole l'acqua, dissetante ed accettabile da parte di chi la consuma. Tra i parametri abbiamo dunque il *colore*, infatti un'acqua che presenta buone caratteristiche deve essere trasparente. L'*odore*, se presenta il classico odore sulfureo può significare contaminazione da processi di putrefazione. Il *sapore*, deve esserci, altrimenti si tratterebbe di acqua distillata; invece, i sali minerali, nelle giuste concentrazioni, devono essere presenti. Tuttavia, devono risultare sempre gradevoli altrimenti potrebbe trattarsi di contaminazione. Poi vi è la *torbidità*, che si verifica quando si perde la cristallinità e trasparenza dell'acqua. Talvolta può essere innocua e non rappresentare una minaccia, altre volte può essere causata da contaminazione patogena e quindi va ben valutata ed analizzata. ⁽⁷⁾ Poi vi è la *durezza dell'acqua*, già accennato in precedenza, parametro fondamentale da considerare e che dà un ottimo indice di qualità appunto. Si considera un valore che indica il contenuto totale di ioni magnesio (Mg^{2+}), calcio (Ca^{2+}) e spesso in concentrazioni minori lo ione ferroso (Fe^{2+}). Essi sono solitamente presenti sotto forma di bicarbonati, solfati o nitrati e la loro concentrazione determina la durezza dell'acqua; quindi, maggiore è il contenuto maggiore sarà la durezza. ^(XVI) Questi sali sono generalmente solubili e per evaporazione o riscaldamento precipitano generando delle incrostazioni di calcare o di altra natura. Infatti avere un'elevata durezza può creare problemi. Con la formazione di questi precipitati di calcare si ha la formazione d'incrostazioni che possono danneggiare ad esempio macchine industriali o domestiche o ancora peggio, se sono acque potabili, possono portare nel lungo termine

all'insorgere di calcoli renali. ⁽⁸⁾Inoltre vi è anche una stretta connessione con il pH. Infatti avremo acqua dolce se abbiamo livelli di pH sotto al sette, quindi acidi, mentre avremo acqua dura e ricca di calcare per livelli di pH superiori e quindi basici. Per quanto riguarda l'unità di misura si usano normalmente le moli in rapporto al metro cubo (mol/m³). Tuttavia in Italia vengono usati più comunemente i *gradi francesi*. Si consideri che un grado °f è uguale a 10 mg di carbonato di calcio (CaCO₃) in funzione di un litro d'acqua. (1 °f = 10 mg/l = 10 ppm). ^(xvii)Di seguito si riporta la classificazione delle acque in base al parametro della durezza.

- 1 °f < durezza < 4 °f: molto dolci
- 4 °f < durezza < 8 °f: dolci
- 8 °f < durezza < 12 °f: medio-dure
- 12 °f < durezza < 18 °f: discretamente dure
- 18 °f < durezza < 30 °f: dure
- >>30 °f: molto dure. ^(xviii)

Solitamente quando si considera la durezza ci riferiamo alla durezza totale; ossia la somma della durezza permanente e della durezza temporanea. Dunque ora vediamo a che cosa corrispondono:

- *Durezza permanente (legata al residuo fisso)*: s'intende la durezza che permane anche dopo l'ebollizione e il successivo essiccamento in una stufa, sempre ad elevate temperature. È data principalmente dalla presenza di altri sali come solfati, cloruri e nitrati di magnesio e calcio che non andranno a decomporsi a seguito del riscaldamento. La sua caratteristica e differenza con la durezza temporanea è che a seguito dell'ebollizione i sali non subiscono alterazioni e permangono in soluzione.
- *Durezza temporanea*: è invece legato alla presenza di idrogenocarbonati solubili (bicarbonato di calcio e magnesio), che per mezzo dell'ebollizione vengono resi insolubili (quindi carbonati) e che precipiteranno:

(calore da riscaldamento)



Quindi avremo che dalla molecola iniziale di bicarbonato per effetto dell'ebollizione si avrà anidride carbonica, carbonato di calcio ed H₂O. Si può anche ottenere tramite semplice calcolo, ossia sottraendo la durezza permanente da quella totale.

- *Durezza totale*: sarà data dalla somma delle altre due; quindi, permanente più temporanea e coincide con i sali totali di calcio e magnesio presenti in acqua. Di fatto è il parametro a cui ci faremo riferimento più avanti nei calcoli. ^{(XVI)(XIX)}

$$\begin{array}{rcc}
 \text{durezza totale} & = & \text{durezza temporanea} + \text{durezza permanente} \\
 \text{tutti i sali di} & & \text{bicarbonati di} & & \text{altri sali di} \\
 \text{Ca}^{++} \text{ e Mg}^{++} & & \text{Ca}^{++} \text{ e Mg}^{++} & & \text{Ca}^{++} \text{ e Mg}^{++}
 \end{array}$$

Figura 9 "Schema della durezza dell'acqua" ^(XVII)

PARAMETRO	VALORE DI PARAMETRO	UNITÀ DI MISURA	NOTE
Alluminio	200	µg/l	
Ammonio	0,50	mg/l	
Cloruro	250	mg/l	1
Clostridium perfr. (spore comp.)	0	N°/100 ml	2
Colore – Odore Sapore - Torbidità	Accettabile per i consumatori e senza variazioni anomale		
Conduttività	2500	µScm ⁻¹ 20°C	1
pH	6,5 ÷ 9,5	Unità pH	1 e 3
Ferro	200	µg/l	
Manganese	50	µg/l	
Ossidabilità	5,0	mg/l O ₂	4
Solfato	250	mg/l	1
Sodio	200	mg/l	
Cont. Colonie a 22°C	Senza variaz. anomale		
Batteri coliformi 37°C	0	N°/100 ml	5
Carb. Org. Tot (TOC)	Senza variaz. Anomale		6
Durezza	Valori consigliati: 15-50°F		
Residuo secco 180°C	Valore max consigliato: 1500 mg/L		
Disinfettante res.	Valore min 0,2 mg/L consigliato		

Figura 10 “Parametri indicatori di riferiti al D.lgs. n. 31/2001”⁽⁶⁾

3. FATTORI DETERMINANTI IL DETERIORAMENTO DEL CEMENTO AMIANTO

Le condutture in cemento amianto si deteriorano allo stesso modo del cemento tradizionale. Il cemento che viene maggiormente utilizzato è il cemento Portland ed è composto da alluminato e ferro alluminato di calcio, da silicato tricalcico e bicalcico e da anidridi. Attraverso le reazioni chimiche di idratazione ed indurimento si danno luogo a silicati bicalcico e tricalcico, alluminato e ferro alluminato di calcio idrati e viene liberato *idrossido di calcio* ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). I composti vengono poi mescolati e la massa che si ottiene presenta delle cavità molto piccole. In questi pori vi rimane l'acqua in eccesso dalla reazione che può evaporare oppure essere riassorbita. L'Idrossido di calcio che si libera è il componente che risulta più solubile e quindi anche il suo punto debole. Con l'asportazione della calce (o idrossido di calcio) si ha aumento della porosità e quindi anche aumento della velocità delle dissoluzioni chimiche successive. Dunque a causa di diversi fattori vi è accelerazione ed aumento dell'attacco. ⁽⁹⁾

Componente	Formula chimica	Percentuale in peso
Silicato tricalcico	$\text{C}_3\text{S} = 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	45-60%
Silicato bicalcico	$\text{C}_2\text{S} = 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	5-30%
Alluminato tricalcico	$\text{C}_3\text{A} = 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	6-15%
Ferroalluminato tetracalcico	$\text{C}_4\text{AF} = \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	6-8%
Gesso	$\text{CS} = \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3-5%

Figura 11 "Componenti del cemento Portland" ^(XX)(10)

Ora verranno analizzati tutti i fattori che comportano il deterioramento del cemento e quindi anche del cemento amianto a contatto con l'acqua.

3.1 Deterioramento da agenti chimici

Lisciviazione ed aggressività dell'acqua

Il deterioramento delle condotte in cemento-amianto è un aspetto assai cruciale da dover analizzare. Nel caso delle condotte in cui scorre acqua potabile, come già discusso, può essere favorita la dispersione di fibre. Quando l'acqua entra in contatto con la superficie della tubatura, se presenta altri radicali: acidi, solforico e nitrico tenderà a dissolvere, più o meno rapidamente a seconda della concentrazione, l'idrossido di calcio (o calce) liberato durante la reazione d'idratazione. Processo che serviva per mantenere l'indurimento della pasta cementizia. Infatti da questo processo si può provocare abrasione ed andare a corrodere la struttura. Si avrà il fenomeno detto *lisciviazione*, ossia separazione tra componenti solubili da una certa matrice solida tramite un solvente. ⁽¹³⁾ Per distinguere il tipo di reazione si fa riferimento al pH dell'acqua, parametro fondamentale nel distinguere se un'acqua è *acida o basica*. Quando si rileva un pH inferiore a sette viene detta acida, se consideriamo un pH superiore indica invece alcalinità. Le acque che presentano un pH uguale a sette sono dette neutre. Il cemento-amianto può essere sensibile alle variazioni del pH dell'acqua, specialmente quando ci troviamo in presenza di condizioni estreme. Infatti se è molto acida o alcalina, oltre i valori soglia stabiliti, può reagire negativamente e in modo diverso. In un ambiente altamente acido, il cemento può deteriorare per processi di corrosione che indeboliscono tutta la struttura. Mentre in un ambiente estremamente alcalino può essere favorita la sedimentazione calcarea e quindi creare incrostazioni. Queste, col tempo e con l'azione meccanica dell'acqua, possono favorire l'asportazione di materiale e quindi portare alla possibile liberazione di fibre di amianto. Le incrostazioni, quindi, sono un altro problema da dover considerare quando si valutano le condotte nelle reti idriche. Infatti si tratta della sedimentazione del calcio e magnesio, due sali importanti perché stabiliscono appunto la durezza. ⁽¹¹⁾ La quantità di sedimento che si forma è influenzata da diversi fattori quali:

- la temperatura
- la durezza dell'acqua o qualità
- La portata in metri cubi di acqua utilizzata. (V)

Il calcio e il magnesio con l'aumentare della temperatura risultano meno solubili, contrariamente ad altri sali. Dunque il rischio di provocare incrostazioni è molto elevato là dove si ha riscaldamento. Le incrostazioni più note si hanno nelle reti d'acqua calda di origine

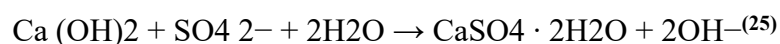
sanitaria, nei rubinetti per l'erogazione e negli scambiatori. ^(XXV)Quando, invece, parliamo di *aggressività dell'acqua*, ci riferiamo alla sua capacità di solubilizzare ed attaccare un materiale. In questo caso è l'idrossido di calcio che risultando altamente solubile, favorisce l'aumento della porosità e quindi di fessurazioni. Proprio da questo processo si provocherà, in condotte di cemento-amianto, la dispersione di fibre che verranno poi trasportate dall'acqua che vi defluisce. La gestione dell'aggressività dell'acqua è una questione assai importante perché in base ad essa si vanno ad apportare correzioni del pH per ridurre il rischio di danni seri alla struttura. Inoltre vi sono sempre dei limiti stabiliti per legge che vengono monitorati annualmente proprio per evitare che avvenga ciò.

Deterioramento da parte dei solfati

Il deterioramento per mezzo dei solfati è un fenomeno molto importante da considerare quando si parla di corrosione delle condotte in cemento-amianto. È un processo che può verificarsi quando il cemento è esposto a soluzioni contenenti solfati. Lo ione solfato (SO₄) può risultare pericoloso. Infatti a seguito della reazione con i prodotti derivanti dall'idratazione della matrice cementizia, si ha la formazione di composti che hanno maggior volume. Quindi si favoriscono fessurazioni e sgretolamento. ⁽²⁵⁾ Questo, nel tempo può portare a danni permanenti della struttura. Distinguiamo tre principali tipologie di deterioramento da parte dei solfati:

- *Deterioramento solfatico esterno:*

questa tipologia di deterioramento si verifica quando i solfati contenuti nell'acqua che deve essere un'acqua aggressiva, o nei terreni circostanti penetrano all'interno del calcestruzzo. Essi innescano delle reazioni chimiche tra l'idrossido di calcio e il solfato che portano alla formazione di gesso:



Una volta avuta questa formazione, il gesso presente nell'acqua reagisce con l'alluminato tricalcico contenuto nel cemento della condotta e porta alla formazione di Ettringite (trisolfato alluminato di calcio). ^(XXI)

L'Ettringite è un composto mineralogico con struttura cristallina che può causare espansione e fessurazione del cemento amianto, quindi aumento di volume. Infatti se viene prodotta nei primi momenti della messa in opera, quindi durante il processo d'idratazione, può svolgere una funzione positiva e viene detta Ettringite primaria. La sua funzione è molto importante perché

rallenta l'idratazione e permette di regolare la presa, altrimenti non si avrebbe il tempo di gettare il composto e modellarlo poiché indurirebbe immediatamente.

Tuttavia se l'Ettringite si forma dopo del tempo e quindi a seguito dell'indurimento, l'aumento di volume che essa provoca può portare a fessurazioni e danni alla struttura, con deformazioni e distacchi per via dell'aumento di peso. ⁽²⁵⁾ In questo caso si parlerà di Ettringite secondaria o colloidale e si presenta come piccoli cristalli aghiformi che sono appunto in grado di assorbire l'acqua. Qui di seguito si riporta la formula:

- (C – A – H): Illuminati idrati di calcio
- CaSO₄: Solfato di calcio (gesso)
- Al₂O₃: Ossido di alluminio

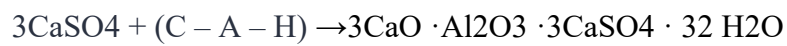


Figura 12" Ettringite" (XXIII)

In determinate condizioni climatiche (quindi temperature tra gli 0-10° C, con UR>95% (umidità relativa) e con il carbonato di calcio (CaCO₃) che risulta essere finemente disperso nellamatrice cementizia, si ha la formazione della Thaumassite. Tale processo è uno dei più

distruttivi tra quelli derivanti dall'attacco dei solfati poiché comporta una diminuzione, se non perdita, di resistenza meccanica derivante dalla decalcificazione: ^(XX)



Figura 13 “Thaumasite” ^(XXIV)

- *Deterioramento solfatico interno:*

tale processo oltre che dall'esterno, può avvenire anche dall'interno. Si verifica quando il cemento o cemento-amianto presenta tracce di solfati all'interno. Quindi negli aggregati che costituiscono la condotta sotto forma di impurità naturali o anche di gesso. Infatti il gesso degli aggregati ha dei volumi maggiori se confrontato con il gesso aggiunto alla pasta cementizia durante l'atto di presa. Pertanto risulta essere meno solubile a contatto con l'acqua. Dunque gran parte del gesso all'interno degli aggregati del cemento non parteciperà alle reazioni per formare Ettringite primaria, ma parteciperà in seguito per la formazione di Ettringite secondaria. Quindi si avrà la distruzione della struttura nel tempo, portando a fessurazioni e deterioramento della resistenza del materiale, allo stesso modo di prima. ^(XX)

- *Deterioramento solfatico acido:*

L'attacco solfato acido si verifica quando il cemento è esposto a soluzioni acide che contengono solfati. Questo può verificarsi in ambienti industriali dove sono solitamente presenti composti acidi oppure in luoghi in cui vi è il contatto con sostanze acide. ⁽¹²⁾

La reazione produce solfati di calcio che portano sempre al danneggiamento della struttura. ^{(XX)(XXII)} I solfati, dunque, reagiscono con la calce libera formando solfato di calcio idrato (gesso). Il gesso e la ettringite formati occupano un volume decisamente maggiore (dal 123 al 224%) di quello che era occupato dai solidi preesistenti. ⁽¹³⁾ Questo causa, prima un rigonfiamento e poi la distruzione della porzione di condotta in cemento amianto interessata. La parte di superficie in cui sono presenti fibre di amianto rimane esposta e quindi vulnerabile all'erosione: inizia così il rilascio nell'acqua. Di seguito è stata esposta una tabella fornita dall'Inail, in cui vengono messi in relazione i valori soglia sia per i solfati che per il pH. Valori che sono stati registrati dagli enti americani ASTM (American Society for Testing and Materials) e AWWA (American Water Works Association). ⁽¹²⁾

	VALORI SOGLIA	EFFETTI	TIPOLOGIE DI TERRENO
pH	< 6,3	1) Dissoluzione della matrice cementizia 2) Perdita di leganti 3) Riduzione dello spessore e della resistenza	Comune in terreni molto umidi dovuti alla decomposizione della vegetazione o in terreni contaminati
CONTENUTO DI SOLFATI	> 1000 mg/l (con pH ≥ 7) < 1000 mg/l (con pH < 7)	1) Rigonfiamento del conglomerato 2) Espansione e distacco della superficie esterna e perdita di resistenza	Diffusi in regioni costiere, in regioni associate alla presenza di corsi d'acqua dolce, in aree agricole, industriali ed impianti fognari

Figura 14 “Valori soglia per i solfati e il pH” ⁽¹²⁾

3.2 Deterioramento fisico

Variazione di temperatura

Il cemento può degradarsi a seguito di sbalzi termici, e di seguito sono presentati i seguenti effetti. Possiamo avere *espansione e contrazione da sbalzi termici*: il cemento è suscettibile a questo fenomeno a causa della sua composizione chimica. Infatti le variazioni di temperatura possono portare a cambiamenti dimensionali. L'alternanza di cicli di riscaldamento e raffreddamento ripetuti nel tempo possono causare tensioni all'interno del materiale, portando a microfessurazioni e alla frammentazione graduale del cemento. ⁽¹⁰⁾ Un altro fenomeno che possiamo trovare è *il processo di congelamento e scongelamento (gelo e disgelo)*. Questi fenomeni scaturiscono dalla variazione climatica e in base alle stagioni. Quando l'acqua presente nel cemento si congela, essa si espande, generando delle pressioni interne che possono causare danni a tutta la struttura. Nella fase di scongelamento, le fessure create possono permettere una maggiore penetrazione d'acqua, contribuendo ulteriormente al deterioramento e quindi all'erosione della struttura. Dunque trattandosi di cemento amianto questo fenomeno favorirebbe il rilascio di fibre nell'acqua. Inoltre il processo avviene anche in concomitanza con l'azione delle piogge acide. Tuttavia essendo le condotte situate nel terreno, è meno influente rispetto all'azione provocata dalle variazioni termiche. ⁽¹⁰⁾⁽⁹⁾

3.3 Deterioramento biologico

Il deterioramento biologico delle condotte in cemento e quindi anche in cemento amianto può essere causato da diversi microrganismi che possono proliferare all'interno del sistema idrico. Tra i problemi più comuni si riscontrano la formazione di biofilm, la crescita di alghe, di batteri e funghi. Per questo motivo prende il nome di *biodeterioramento*, ossia il degrado irreversibile, derivante dal metabolismo di popolazioni batteriche, quindi microrganismi autotrofi ed eterotrofi. ⁽¹⁴⁾ Il deterioramento biologico si suddivide principalmente in tre fasi: contaminazione della superficie, proliferazione di microrganismi e la colonizzazione. Per quanto riguarda le cause che ne favoriscono lo sviluppo abbiamo la luce solare, la concentrazione di ossigeno, l'H₂O, la quantità di anidride carbonica e di sali minerali. ⁽¹⁶⁾ I *biofilm* sono delle popolazioni microbiche che si aggregano e aderiscono alle superfici delle condotte formando una sorta di rivestimento viscoso. Poi nel tempo, secernono sostanze che formano una matrice protettiva. La problematica associata al biofilm è che può causare ostruzioni, quindi diminuire il flusso dell'acqua, e può proteggere i batteri all'interno dalla

disinfezione, procedimento usato per distruggere tutti i microrganismi che possono diventare patogeni e portatori di malattie. ^(XXVI)Inoltre può influire sulla qualità dell'acqua poiché alcuni microrganismi nel biofilm possono produrre sostanze che alterano il sapore o l'odore dell'acqua. Poi abbiamo le *alghe* che possono svilupparsi all'interno delle condotte in cemento quando sono esposte alla luce solare attraverso delle crepe o giunture non sigillate. L'accumulo di alghe può portare a ostruzioni, riducendo il flusso dell'acqua e causando potenziali problemi di intasamento. Per questo motivo vi è la tendenza a sigillare le giunture e minimizzare l'esposizione alla luce solare. Troviamo poi i *batteri eterotrofi, autotrofi e solfito-riduttori*. Tra i microrganismi autotrofi distinguiamo i solfobatteri che sono composti da solfiti e solfati e i nitrobatteri che sono composti da nitrati e nitriti. Tra i microrganismi eterotrofi invece troviamo appunto i batteri e funghi. La crescita batterica può causare cattivi odori, deteriorare la qualità dell'acqua e contribuire alla formazione del biofilm. Alcuni batteri possono anche causare corrosione direttamente alle condutture. *I funghi* possono prosperare nelle condotte, specialmente in ambienti umidi e scarsamente illuminati. Inoltre la crescita fungina può contribuire alla formazione di biofilm, intasare le condutture e causare deterioramento strutturale. Alcuni funghi possono produrre sostanze tossiche, dunque è molto importante prevenire la loro formazione per evitare che vengano rilasciate nelle acque potabili e causino problemi alla salute dell'uomo. ⁽¹⁵⁾

4. INDICI PER LA VALUTAZIONE DEL DEGRADO DELLE TUBATURE

Per valutare il deterioramento e quindi l'erosione o la capacità d'incrostazione che si possono generare nelle condotte vengono considerati degli indici di stabilità. Essi in base al tipo di materiale e al tipo d'acqua presentano valori diversi e dunque risposte diverse. È bene fin da subito ricordare che servono come linee guida qualitative e non danno una stima effettiva e quantitativa del livello di aggressività o incrostazione in atto. Pertanto sono una base di partenza per fare analisi mirate e capire lo stato delle condotte.

4.1 Indice di Langelier (SI)

Viene anche detto indice di saturazione ed indica la tendenza dell'acqua a generare o no depositi di carbonato di calcio. L'indice non è propriamente correlato ad una misura dell'aggressività, ma fa riferimento alla sedimentazione di una sorta di pellicola, ossia l'incrostazione di carbonato di calcio che si forma sulla superficie. Se ciò non avviene significa che l'acqua sarà aggressiva ed andrà pertanto a solubilizzare l'idrossido di calcio della tubatura. Pertanto, si causerà deterioramento della struttura ed eventuali problemi di salute legati alla dispersione di particelle. Esse possono essere di piombo o particelle di altro genere, come le fibre di amianto. Nel ricavare l'indice di Langelier (SI), viene considerato un pH compreso tra 6,5 e 9,5 come range di valori, mentre il pHs di saturazione è calcolato nel seguente modo:

$$\text{pHs} = (\text{pk}_2 - \text{pks}) + \text{pCa} + \text{pAlk}$$

dove:

- $\text{Pk} = \log(1/x)$ con x che rappresenta la costante di equilibrio di una reazione chimica reversibile
- Alk : che rappresenta l'alcalinità totale in funzione del litro
- Ca : la concentrazione di ioni di calcio espressi in moli/litro
- K_2 : rappresenta la seconda costante di dissociazione dell' H_2CO_3 che viene modificata in base a temperatura e forza ionica

- K_s : prodotto della solubilità del carbonato di calcio che viene fatto variare sempre in base a temperatura e forza ionica, come per il parametro K_2 ⁽¹⁸⁾

Tuttavia la formula operativa che di solito si usa per la determinazione del pH_s è la seguente:

$$pH_s = (9,3 + A + B) - \log_{10} [Ca] - 0,4 - \log_{10} [Alk]^{(XXVII)}$$

con le costanti A e B che considerano già la variazione causata dalla forza ionica e dalla temperatura e sono calcolate nel seguente modo:

- $A = (\log_{10}[TDS] - 1) / 10$
- $B = -13,12 \times \log_{10}(^{\circ}C + 273) + 34,55^{(XXVII)}$

I parametri in gioco nel calcolo dei coefficienti A e B e per il calcolo dell'indice di Langelier (SI) sono:

- TDS in milligrammi/litro riferito ai solidi totali disciolti, dato ricavato dalla conduttività a 25 °C o 77 °F (in gradi francesi) ($\mu S/cm$)
- pH dell'acqua riferito alla concentrazione di ioni idrogeno
- Temperatura in gradi centigradi ($^{\circ}C$)
- L'alcalinità totale in milligrammi/litro di $CaCO_3$
- La durezza calcica in milligrammi/litro di $CaCO_3$ ⁽²⁰⁾

Dunque l'indice di Langelier (SI) è dato dalla differenza tra il pH e il pH_s effettivo di saturazione:

$$SI = pH - pH_s$$

- Se $SI > 0$ allora l'acqua risulterà sovrasatura di carbonato di calcio e quindi si avrà la tendenza ad avere depositi e incrostazioni
- Se $SI < 0$ allora l'acqua risulterà più aggressiva, ossia tenderà a sciogliere il carbonato di calcio depositato favorendo l'azione corrosiva
- Se $SI = 0$ allora si avrà equilibrio. ⁽¹⁷⁾

Pertanto risulterà che:

Se il $pH_s = pH$, l'acqua sarà in equilibrio;

se il $pH_s < pH$, l'acqua sarà non aggressiva;

se il $pH_s > pH$, l'acqua sarà aggressiva. ⁽¹⁹⁾

Va comunque precisato che il valore di SI non è una misura quantitativa poiché vi sono diversi parametri che possono influenzare in maniera indipendente la formazione di carbonato di calcio. Ad esempio, acque dolci con bassa alcalinità e pH possono risultare aggressive, anche se ciò non viene stimato da Langelier. Questo è reso possibile dal fatto che non vi sono concentrazioni disponibili a sufficienza di carbonato di calcio ed alcalinità per formare la pellicola protettiva. Allo stesso modo valori elevati di pH ed alcalinità possono avere tendenza aggressiva poiché il calcio e il magnesio non possono partecipare attivamente al processo di formazione del calcare. Anche la presenza di solfato e cloruro può ostacolare la formazione della pellicola di carbonato. A causa di questi fattori l'indice va considerato solo per range di pH tra 6,5 e 9,5 e per valori di alcalinità elevati superiori a 40 mg/l. ⁽¹⁹⁾

4.2 Indice di Ryznar (RI)

Tale indice è basato su quello di Langelier, infatti, compare il parametro pH_s di saturazione che è lo stesso che andava calcolato per l'indice di Langelier. Esso considera il livello di saturazione e cerca di valutare la formazione di incrostazioni nelle condotte in funzione del livello di saturazione del carbonato di calcio. Pertanto ha una stima simile all'indice di Langelier e viene calcolato con la seguente formula:

$$RI = 2 pH_s - pH \quad (18)$$

La zona considerata "neutra" è circa per valori intorno al 6. Più in generale avremo:

- Per valori di $RI < 4-5$ si avrà la tendenza a formare molti strati di carbonato di calcio e quindi risulterà essere molto incrostante
- Per valori di $RI < 6$ si avrà la tendenza a formare strati di carbonato di calcio e quindi sarà incrostante. Si considera una tolleranza fino a 5

- Per valori di $6 < RI < 6,5$ si rientrerà nella zona debolmente incrostante
- Per valori di $6,5 < RI < 7$ si rientrerà nella zona debolmente aggressiva
- Per valori di $RI > 7$ si avrà che l'acqua tenderà a dissolvere il carbonato di calcio e quindi avremo un'attitudine corrosiva. ^{(XXVIII)(XXXIV)}
- Per valori $> 8-9$ si avrà un'attitudine molto aggressiva. ⁽²⁶⁾

4.3 Indice di Larson (LI)

L'indice di Larson-Skold è un indice sviluppato per valutare la corrosività dell'acqua rispetto all'acciaio "dolce" ossia una tipologia di acciaio con un basso quantitativo di carbonio o anche detto "con basso tenore di carbonio" e generalmente varia tra 0,05% e 0,25%. Viene utilizzato per un'analisi qualitativa dell'interazione dell'acqua aggressiva di grandi laghi con l'acciaio ed anche utilizzato per la scelta del materiale più adeguato alla fabbricazione di tubazioni. È stato considerato come indice poiché teneva conto dei solfati e cloruri. Parametri che, come visto nel capitolo precedente, influenzano il deterioramento delle condotte in cemento-amianto. ^(XXVII)Viene espresso con:

$$LI = \frac{Cl + SO_4}{Alk}$$

Con

- SO_4 : concentrazione di solfati in milligrammi/litro
- Cl : concentrazione di cloruri in milligrammi/litro
- Alk : alcalinità totale in milligrammi/litro

Tutte le concentrazioni sono espresse in milligrammi/litro. ^{(18)(XXX)}

L'interpretazione può essere fatta nel seguente modo:

- Se $LI < 0,8$ avremo che i solfati e i cloruri non ostacolano la formazione del film sulla superficie del materiale e non risultano corrosivi
- Se $0,8 < LI < 1,2$ vi è la possibilità di corrosione

- Se $LI > 1,2$ si prevede la possibilità di corrosione ^(XXIX)

4.4 Indice di Riddick (RCI)

Questo indice si basa su diversi parametri che possono avere influenza sull'effetto corrosivo dell'acqua per le parti metalliche tra cui: tenore di cloruri e nitrati, l'ossigeno disciolto e durezza. La formula empirica da cui deriva è:

$$RCI = \frac{75}{Alk} [CO_2 + \frac{1}{2} (Durezza - Alk) + Cl^- + 2N] \frac{10}{SiO_2} \frac{D.O. + 2}{Sat. D.O.} \quad (18)$$

Avremo i seguenti parametri:

Durezza: che viene espressa in mg/l di CaCO₃

N: che esprime la concentrazione di nitrati in mg/l

Cl⁻: che esprime la concentrazione di cloruri in mg/l

CO₂: sempre in mg/l di CaCO₃

D.O.: esprime l'ossigeno disciolto in mg/l

Sat.D.O.: saturazione dell'ossigeno disciolto in mg/l

Inoltre per valori di:

- $0 < RCI < 25$ si considera di avere un'acqua non corrosiva;
- $26 < RCI < 50$ si considererà una tipologia d'acqua mediamente corrosiva;
- $51 < RCI < 75$ si avrà un'acqua corrosiva;

per valori superiori a cento si avrà una acqua eccessivamente corrosiva. Tuttavia questo indice viene considerato quando si vogliono valutare acque dolci, quindi ad esempio acqua piovana che contiene solo lo ione sodio, ma non viene usato per acque dure quindi quelle acque

collegate alla rete idrica. Inoltre anche il livello di precisione non è elevato per la difficoltà nella determinazione di alcuni parametri non facilmente stimabili e campionabili. ⁽¹⁸⁾

4.5 Indice di Aggressività (I.A.)

Questo indice è quello che viene considerato per valutare qualitativamente l'aggressività dell'acqua nei confronti di condotte in cemento-amianto o fibrocemento. Dunque è dalla sua stima, fatta preliminarmente, che si deduce la pericolosità nel rilasciare fibre di amianto. L'indice si calcola così come segue:

$$I.A. = pH + \log_{10} (Alk \cdot H)$$

in cui:

- pH = valore del pH dell'acqua presa in esame
- *Alcalinità* = alcalinità totale dell'acqua in esame in milligrammi/litro CaCO₃
- *H(Durezza)* = durezza calcica dell'acqua in esame in milligrammi/litro CaCO₃ ⁽²³⁾

E poi interpretare i risultati così:

- I.A. < 10 acqua molto aggressiva in condotte in cemento amianto
- I.A. da 10 a 12 acqua moderatamente aggressiva
- I.A. > 12 acqua non aggressiva

Quindi l'I.A. deve essere superiore a 12 se si vuole essere sicuri di non avere un'acqua aggressiva. Quando invece è inferiore si può avere un'accelerazione del processo di separazione, quindi lisciviazione. L'indice di Aggressività è stato adottato anche nella normativa italiana, per valutare appunto l'aggressività delle acque sulle superficie delle condotte in cemento-amianto, con Circolare Ministeriale 1° luglio 1986, nr.42. ^{(XXXI)(18)(19)}

CARATTERISTICHE CORROSIVE	INDICE DI LANGELIER	INDICE DI AGGRESSIVITÀ
Altamente aggressive	< -2	< 10
Moderatamente aggressive	Da -2 a 0	Da 10 a 12
Non aggressive	> 0	> 12

Figura 15 “Comparazione tra gli indici SI e I.A. in funzione dell’aggressività dell’acqua”⁽¹⁹⁾

5. CAMPIONAMENTI PER LA VALUTAZIONE DELL'AMIANTO NELL'ACQUA POTABILE

Nel seguente capitolo si vuole dare un quadro generale di quello che riguarda i campionamenti d'acqua potabile adottati dalla normativa italiana per la stima della concentrazione di fibre. Questa procedura consiste proprio nel prelevare una piccola porzione di materiale. Nel caso in esame, ossia l'acqua, si ha il fine di fornire un campione rappresentativo di tutti i parametri da considerare nella zona e adibito a prove ed analisi di valutazione in laboratorio. Vista la grande distribuzione di condotte in cemento-amianto, in tutta l'Emilia-Romagna, da circa 15 anni, si effettuano operazioni di monitoraggio della qualità delle acque potabili. Le aziende di sanità locale hanno il compito di controllare e gestire questi lavori, avvalendosi dell'aiuto di Arpa e del laboratorio integrato della sezione di Reggio Emilia. Tutti i servizi AUSL di Parma, Modena, Bologna, e Reggio Emilia stanno effettuando campionamenti nelle acque potabili per ricercare le fibre di amianto che potenzialmente sono rilasciate dalle condotte. ⁽²²⁾ Sebbene sia una questione molto delicata e sensibile, non vi è una norma né europea né nazionale che sancisca un criterio preciso da seguire nello svolgimento dei campionamenti e nella preparazione dei campioni. Tuttavia nel Dlgs 31/2001, all'art. 4, vi è un enunciato dell'Istituto superiore di sanità in cui, nel 2011, ha valutato come idonea la metodologia svolta da Arpa Emilia-Romagna nello stabilire la presenza di fibre di amianto nelle acque adibite al consumo umano. ⁽²¹⁾ ⁽²²⁾ Va tra l'altro considerato che le procedure di campionamento e conservazione sono molto delicate. Quindi se non si adopera una buona gestione e criterio nelle procedure, possono influenzare a livello qualitativo e quantitativo i dati e creare errori grossolani che compromettono le analisi.

5.1 Materiali e attrezzature

Tra i dispositivi e imateriali utilizzati ai fini di un campionamento abbiamo:

- *I rubinetti*: sono dei rubinetti specifici di prelievo nella rete dedicati appositamente. Per quanto riguarda la linea di prelievo, deve seguire dei requisiti. Deve avere una lunghezza minore; le condotte devono essere fabbricate con i materiali idonei al flusso d'acqua che sarà adibito al consumo umano; evitare il più possibile giunzioni, quindi collegamenti che potrebbero creare volumi stagnanti; garantire un semplice accesso ed avere i giusti spazi per effettuare le operazioni di campionamento. ⁽²⁴⁾

- *Contenitori*: sono fondamentali per la conservazione dei campioni prelevati. Devono rispettare anch'essi dei criteri generali legati alla composizione dei materiali con cui vengono fabbricati. Infatti non devono disperdere o assorbire sostanze di nessuna natura; devono avere buone proprietà di resistenza alla sostanza che costituisce il campione. Quindi a seconda della situazione e del tipo di campione che va effettuato, andrà scelto un contenitore realizzato con il materiale più idoneo. A seconda dei parametri da valutare vi sono materiali specifici. I materiali che più comunemente vengono usati per la creazione di contenitori per i campionamenti sono la plastica (per lo più polietilene e polimetilpentene PTX) e il vetro (Pyrex o borosilicato e Vycor ad alto contenuto di silicio).⁽²⁴⁾

5.2 Procedura di prelievo

Prima di procedere con le campionature è buona norma predisporre una check-list. Quindi definire tutte le apparecchiature e materiali da utilizzare ed avere tutte le concessioni. Una volta organizzato il tutto si avvia il prelievo, seguendo il metodo RDT, “random daytime sample”, ossia effettuare un prelievo in qualsiasi momento del giorno e della settimana. Per eseguire un prelievo andrà raccolto un piccolo volume che andrà a riempire il contenitore messo a disposizione. Inoltre per quanto riguarda i punti di prelievo, nel caso di rete di distribuzione, come la rete acquedottistica, i prelievi verranno effettuati:

- Nel punto iniziale d'immissione della rete. Va tenuto conto però degli impianti nei quali avvengono i trattamenti ed anche della struttura di tutto il sistema idrico;
- Nel punto di consegna, che di solito è il contatore, mediante un rubinetto specifico, ed è a carico del gestore della rete idrica interna;
- Presso le utenze domestiche, quindi dove il rubinetto è usufruito più frequentemente per uso potabile (es. la cucina).

Inoltre quando si considera la raccolta presso le utenze, l'intervallo di tempo in cui si farà scorrere l'acqua pre-campionamento non dovrà superare il minuto circa. In seguito le operazioni che verranno svolte saranno di sigillare il contenitore ed etichettarlo.⁽²⁴⁾

Anche *il volume di prelievo* deve essere prelevato con criterio, che cambia in base alla tipologia di parametri che si vogliono monitorare. Per campionature di acque potabili si utilizza come portata volumetrica 2,0 l che risulta sufficiente e significativa.

Inoltre nel caso in cui si abbia la necessità di dividere il campione per differenti tipologie di controllo analitico, bisogna preparare tutte le misure in maniera adeguata quindi evitare contaminazioni quando si è nella fase di ripartizione in differenti quote del campione e preparare il volume per ciascuna ripartizione in maniera idonea al tipo di prova o analisi a cui deve essere sottoposto. ⁽²⁴⁾

5.3 Conservazione e trasporto in laboratorio

La conservazione del campione è un aspetto cruciale ai fini di una buona analisi in laboratorio. Infatti tramite delle tecniche ben precise, è possibile ritardare consistentemente i processi biologici e chimici che continuano a svolgere le loro reazioni anche dopo il campionamento. Questo può indurre modifiche nel campione e generare errori di valutazione. Gli obiettivi che si vogliono raggiungere con una buona conservazione sono:

- Prevenire le contaminazioni del prelievo;
- Ritardare l'attività di microrganismi;
- Minimizzare la volatilità delle sostanze;
- Ridurre al minimo effetti di assorbimento

Inoltre tra il campionamento e l'analisi in laboratorio deve trascorrere poco tempo. Pertanto, anche il trasporto deve essere accurato. I campioni devono essere condotti in laboratorio tenendoli in ambienti privi di luce e con refrigerazione costante. Quindi vanno tenuti in contenitori termoisolanti, senza però giungere al congelamento. In laboratorio andranno tenuti a temperature tra 1-10 °C a meno di protocolli particolari. ⁽²⁴⁾

5.4 Metodo di analisi per valutare la presenza di amianto mediante microscopia (Sem)

Una volta in laboratorio, la metodologia utilizzata per valutare la presenza di fibre di amianto nelle acque potabili è quella della microscopia elettronica a scansione (Sem) e a trasmissione (Tem), messa in atto da Arpa Emilia-Romagna. Metodica che viene seguita, come accennato nel precedente, anche da tutti gli altri servizi in Italia. La prima dà la possibilità di effettuare l'analisi di 2,0 l di acqua filtrata, con una ridotta sensibilità, ma elevata affidabilità e in tempi minori rispetto alla seconda. Invece la scansione Tem permette di scansionare una particella d'acqua alla volta. La tecnologia Sem è consona per campioni che hanno basse concentrazioni di fibre per il fatto di avere una buona quantità di campione da esaminare

inizialmente, mentre la tecnologia Tem è adatta per campioni con alte concentrazioni di fibre, data la scarsa quantità per campione. Solitamente la metodologia utilizzata dai laboratori di Arpa segue la tecnologia Sem, vista la sua maggiore velocità nell'analisi. Essa si basa sul principio del riconoscimento tramite spettroscopia X a dispersione di energia di fibre in amianto. Le fibre risultano su di un filtro in policarbonato con un tasso di porosità di 0.8 µm. (21)(22)

Per quanto riguarda le attrezzature ed apparecchiature da avere e utilizzare, si hanno:

- Un Carbonizzatore (carbon coater)
- Delle bacchette in grafite da utilizzare per il carbonizzatore
- Filtri di policarbonato
- Un microscopio elettronico a scansione (Sem)
- Un porta-campioni realizzato in alluminio di diametro 36mm

Definito il materiale e l'attrezzatura si passa al procedimento di analisi. (21)

Previa agitazione manuale per rendere il campione omogeneo, verrà misurata una portata di 2,0 l di campione di acqua potabile. Si tende ad effettuare la filtrazione nel minor tempo possibile (pochi giorni), per evitare errori di lettura scaturiti dallo sviluppo di una microflora. Viene sistemato l'apparecchio di filtrazione sottovuoto, disponendo una membrana sulla cui parte lucida verrà versato il contenuto del campione. Le membrane che poi risulteranno a seguito della filtrazione dovranno essere lasciate ad asciugare ad una temperatura di circa 20°C per sei ore in ambiente sterile e lontano da fonti d'inquinamento che potrebbero danneggiare il provino. Una volta che la membrana sarà asciutta, trascorso il tempo necessario, verrà posta sul porta-campione in alluminio mediante le bacchette di grafite. In seguito, verrà steso interamente il filtro, evitando la fuoriuscita di polvere depositata. Mentre viene eseguito questo procedimento bisogna avere cura di non far formare bolle d'aria. Il campione verrà totalmente coperto di grafite all'interno del Carbon coater, così da porgere il filtro sul porta-campione. Poi verrà etichettato e registrata la posizione sul modulo di sequenza della strumentazione Sem. (21)

Una volta eseguita la procedura, si passa al conteggio delle fibre e anche qui si stabilisce un criterio. Infatti, tutte le fibre presenti di qualsiasi dimensione e con rapporto tra lunghezza e diametro superiore a 3:1 andranno considerate. Si definisce un campo di applicazione di 5000 x e tutte le fibre che risultano essere all'interno vengono valutate come una. Invece le fibre che si trovano sul bordo dello schermo ed hanno solo un'estremità visibile verranno contate come mezza fibra. Se si evidenzia un agglomerato di fibre, queste verranno contate singolarmente in base a quanto si riesce a distinguerle. Per quanto riguarda le condizioni imposte dal Sem,

(quindi l'angolo di tilt, distanza di lavoro, ampiezza, tempi che intercorrono) sono tutte calibrate mediante il posizionamento su una fibra di amianto di 0.2 µm di diametro, così da avere uno spettro ben visibile.

I risultati di tale analisi vengono espressi con l'unità di misura fibre/ mm², la totalità delle fibre andrà trascritta sul foglio di conteggio e si riferiscono ad 1mm². Dai risultati si può rilevare la concentrazione di fibre/litro e questa è la formula di calcolo:

$$C = (n \cdot \pi \cdot d^2) / (4 \cdot N \cdot A \cdot V)$$

In cui abbiamo i seguenti parametri:

n= numero di fibre contate per litro

d= diametro del filtro in mm

C= fibre/litro

N= numero di campi analizzati per filtro

V= portata volumetrica d'acqua filtrata che viene espressa in litri

A= la superficie del campo d'applicazione a 5000 x ed espressa in mm

A questo punto gli operatori specializzati che hanno effettuato tutta la procedura di analisi dovranno riportare i risultati finali sul foglio di lavoro e consegnarli al RRAR, che sarà l'ente specializzato che dovrà verificarli e consegnarli allo sportello tecnico che avrà il compito di archivarli. (21)

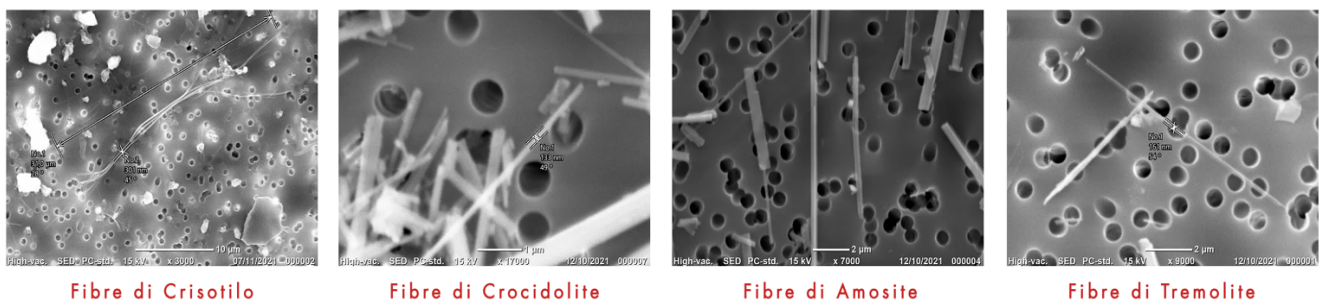


Figura 16 “Tipologie di fibre di amianto riconosciute con la microscopia Sem” (XXXIII)

6. VALUTAZIONE DEGLI INDICI AI CASI STUDIO PRESI IN ESAME

Dai campionamenti sulle acque si individuano tutte le concentrazioni dei parametri che andranno poi confrontati con la normativa per stabilirne la potabilità. Da questi parametri sono stati studiati ed elaborati degli indici di stabilità con i quali è possibile valutare qualitativamente lo stato della condotta in funzione dell'acqua. Per effettuare una corretta analisi del caso studio che verrà preso in esame, si è deciso di procedere con il calcolo di tutti gli indici, proprio per effettuare un confronto analizzando vari aspetti e parametri. Cosa che sarebbe difficile da determinare con solo lo studio di un unico indice. Inoltre utilizza alcuni degli indici presentati per dare una valutazione preliminare. Il caso in esame che verrà studiato sarà relativo alla città di Bologna. Si considereranno sia valori medi che puntuali, presi in giorni specifici e verranno confrontati tra loro e con altre città dell'Emilia-Romagna e zone limitrofe nelle quali Hera effettua i suoi controlli ogni anno.

La questione dell'acqua potabile deve essere ben gestita vista l'importanza che investe sul profilo sanitario. Proprio per questo vengono redatte delle tabelle nelle quali vengono riportati tutti i valori dei parametri da considerare per la valutazione della qualità dell'acqua. I parametri, che non sono tutti quelli presenti nella normativa, ma solo quelli più importanti ai fini del calcolo degli indici di stabilità, vengono selezionati sulla base di alcuni report internazionali e pubblici. Inoltre vengono anche confrontati con i limiti imposti per legge dal D.lgs. n. 31/2001 sulla qualità delle acque e quindi, dai prossimi campionamenti, anche dalla legge in vigore più recente 2020/2184. Va poi precisato che i dati non fanno riferimento ad eventuali modifiche che possono esservi nella rete interna delle abitazioni, quindi solo fino al contatore. ^(XXXI)

Dunque una volta selezionati i parametri da confrontare è possibile svolgere i calcoli degli indici per valutare il loro comportamento nei confronti delle condotte. Procedimento volto ad esaminare lo stato di aggressività o meno delle acque e che servirà poi per comprendere se nelle condotte in cemento-amianto, presenti in diverse zone, possa essere favorita la dispersione di fibre.

6.1 Ricerca dei parametri per il caso studio di Bologna e delle altre città analizzate

Tema centrale e aspetto culmine della tesi è valutare dunque il comportamento dell'acqua potabile nelle condotte, in particolare in cemento-amianto, tramite gli indici di stabilità. Per l'applicazione degli indici vi sono dei parametri in gioco che vanno misurati a seguito dell'attività di campionamento specifica. Per garantire una buona gestione della qualità dell'acqua potabile, il gruppo Hera, effettua monitoraggi previsti dalle norme vigenti. Tali dati vengono resi pubblici annualmente. Le città nelle quali opera la società HERA, tra cui Bologna, sono oggetto di campionamenti frequenti che pongono la loro attenzione su alcuni aspetti quali la purezza, l'assenza o presenza di contaminanti e la presenza o meno di elementi essenziali. Nei prossimi paragrafi ci soffermeremo sull'analizzare i dati offerti dai campionamenti e quelli che sono più importanti nel calcolo successivo degli indici.

6.1.1 Dati medi raccolti per il caso di Bologna

Come primo step ci siamo soffermati sul reperire i dati relativi ai parametri delle acque, utili per la valutazione degli indici di stabilità per il caso studio di Bologna. Infatti considerando i dati presi dai campionamenti svolti da Hera e pubblicati, è stata redatta una tabella con tutti i valori da tenere monitorati perché ritenuti più rischiosi. In diversi punti Hera ha effettuato dei campionamenti e i valori finali riportati sono stati stimati come medie ponderate di valori presi giornalmente. La scelta dei vari punti di campionamento è stata fatta accuratamente poiché doveva essere rappresentativa delle caratteristiche delle acque nelle diverse zone considerate. Quindi i valori rispecchiano pienamente lo stato effettivo della qualità delle acque nella rete idrica. I parametri che ora verranno riportati sono riferiti all'anno 2022. In questo paragrafo verranno riportati i valori medi riferiti al caso studio di riferimento, quindi alla città di Bologna.

PARAMETRI	D.LGS. N. 31/2001	BOLOGNA
ANNO		2022
Alcalinità da bicarbonati (mg/L)	-	280
Alcalinità tot. (mg/l)	-	230
Ammonio (mg/l)	0,5	0,02
Arsenico (microgrammi/l)	10	< 1
Cadmio (microgrammi/l)	5	< 0,5
Calcio (mg/l)	-	84
Clorito (microgrammi/l)	700	181
Cloro residuo (mg/l)	-	0,2
Cloruro (mg/l)	250	34
Concentrazione ioni idrogeno (pH)	6,5-9	7,5
Conduttività (μScm^{-1})	2500	659
Durezza tot. (F°)	15-50	28
Fluoruro (mg/l)	1,5	0,1
Magnesio (mg/l)	-	17
Manganese (microgrammi/l)	50	< 5
Nitrato (mg/l)	50	7
Nitrito (mg/l)	0,5	< 0,02
Piombo (microgrammi/l)	10	< 1
Potassio (mg/l)	-	2
Residuo secco a 180° (mg/l)	1500	355
Sodio (mg/l)	200	22
Solfato (mg/l)	250	66
Triometani tot. (microgrammi/l)	30	3

Figura 17 “Valori dei parametri dell’acqua nella città di Bologna nell’anno 2022” (XXXI)

Inoltre i valori riportati sono stati sempre confrontati con la normativa di riferimento all’epoca dei campionamenti, il D.lgs. n. 31 del 2001.

6.1.2 Dati medi raccolti per le altre città

Come è stato fatto per il caso di Bologna, si è andati a ricercare i parametri utili e considerati più a rischio anche per le altre città nelle quali Hera effettua i suoi controlli sistematici. Inoltre si precisa che, come fatto per il caso di Bologna, si sono confrontati i valori con la normativa dell'epoca, sempre per dare una corretta visibilità al fatto che rientrano ampiamente entro i limiti.

PARAMETRI	D.LGS. N. 31/2001	FERRARA	CESENA	MODENA	PADOVA	PESARO-URBINO	RAVENNA	RIMINI	TRIESTE
ANNO		2022	2022	2022	2022	2022	2022	2022	2022
Alcalinità da bicarbonati (mg/L)	-	231	256	242	265	299	232	259	218
Alcalinità tot. (mg/l)	-	189	210	198	217	245	189	213	179
Ammonio (mg/l)	0,5	<0,02	<0,02	<0,02	<0,05	<0,15	<0,02	<0,02	0,05
Arsenico (microgrammi/l)	10	1	<1	<1	1,7	<1	<1	<1	<1
Cadmio (microgrammi/l)	5	<1	<1	<1	0,5	<1	<0,5	<1	0,5
Calcio (mg/l)	-	63	69	108	58	93	62	73	55
Clorito (microgrammi/l)	700	341	321	<100	127	170	369	290	86
Cloro residuo (mg/l)	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Cloruro (mg/l)	250	35	22	96	10	31	40	31	15
Concentrazione ioni idrogeno (pH)	6,5-9	7,6	7,7	7,5	7,7	7,7	7,8	7,6	7,8
Conduttività (μScm^{-1})	2500	567	552	911	437	591	577	615	370
Durezza tot. (F°)	15-50	21	24	33	22	30	22	24	18
Fluoruro (mg/l)	1,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	<0,1
Magnesio (mg/l)	-	14	17	16	19	16	17	17	12
Manganese (microgrammi/l)	50	<5	<5	<5	5	2	<5	<5	<5
Nitrato (mg/l)	50	6	7	16	13	6	5	7	6
Nitrito (mg/l)	0,5	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,05	<0,02	<0,02	<0,02
Piombo (microgrammi/l)	10	<1	<1	<1	1	<1	<1	<1	<1
Potassio (mg/l)	-	3	2	2	1	2	4	2	<1
Residuo secco a 180° (mg/l)	1500	298	296	544	235	416	315	335	264
Sodio (mg/l)	200	20	15	55	5	24	25	21	9
Solfato (mg/l)	250	47	50	132	26	67	51	63	9
Trialometani tot. (microgrammi/l)	30	0,4	6	1	4	6	6	5	3

Figura 18 “Valori dei parametri dell’acqua nelle città di confronto con Bologna nell’anno 2022” (XXXI)

Altra precisazione che va fatta è che si sono raccolti anche i dati relativi al primo semestre del 2023, fatto solo per alcune città poiché Hera aveva effettuato campionamenti fino a quella data, a cadenza semestrale. Di seguito si riportano gli altri valori nella tabella dei parametri.

PARAMETRI	D.LGS. N. 31/2001	FORLÌ	IMOLA	SASSUOLO	CATTOLICA
ANNO		2023 I° semestre	2023 I° semestre	2023 I° semestre	2023 I° semestre
Alcalinità da bicarbonati (mg/L)	-	238	363	247	210
Alcalinità tot. (mg/l)	-	195	297	202	175
Ammonio (mg/l)	0,5	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,02
Arsenico (microgrammi/l)	10	< 1	< 1	< 1	< 1
Cadmio (microgrammi/l)	5	-	-	-	-
Calcio (mg/l)	-	71	123	139	62
Clorito (microgrammi/l)	700	-	-	-	-
Cloro residuo (mg/l)	-	0,1	0,2	0,1	0,04
Cloruro (mg/l)	250	21	65	144	14
Concentrazione ioni idrogeno (pH)	6,5-9	7,7	7,2	7,3	7,9
Conduttività (µS/cm ^-1)	2500	455	971	1311	416
Durezza tot. (F°)	15-50	25	44	43	20
Fluoruro (mg/l)	1,5	< 0,10	0,15	0,11	< 0,10
Magnesio (mg/l)	-	16	31	20	12
Manganese (microgrammi/l)	50	< 5	9	< 5	< 5
Nitrato (mg/l)	50	5	25	13	3
Nitrito (mg/l)	0,5	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Piombo (microgrammi/l)	10	-	-	-	-
Potassio (mg/l)	-	2	4	3	2
Residuo secco a 180° (mg/l)	1500	369	633	783	255
Sodio (mg/l)	200	13	43	98	8
Solfato (mg/l)	250	34	92	216	30
Trialometani tot. (microgrammi/l)	30	-	-	-	-

Figura 19” Valori dei parametri dell’acqua nelle città di confronto con Bologna nel primo semestre del 2023” (XXXI)

Tra i diversi parametri caratteristici abbiamo valori della durezza, in gradi francesi, bassi a Trieste, 18 °f ed anche a Cattolica con 20° f, segno di acque rilevate dolci. Inoltre si hanno valori elevati di nitrati, sodio, solfati e cloruri a Modena come anche ad Imola e Sassuolo probabilmente per via della percentuale salina presente nella sorgente di prelievo. Anche valori

più alti di calcio sono riscontrabili a Imola, Sassuolo, Modena, Pesaro-Urbino, segno in realtà positivo poiché il calcio è importante in una dieta ben bilanciata. Infatti è un componente molto importante nell'attività metabolica di ogni essere umano. Invece i valori che in media risultano essere maggiori per quanto riguarda i cloriti li riscontriamo a Ferrara, Ravenna e Cesena. Essi sono dovuti alla depurazione dell'acqua tramite dei trattamenti a base di biossido di cloro (ClO₂), gas solubile in acqua, utilizzato nella disinfezione di condotte estese e che presentano dei tempi di permanenza lunghi, favorendo la proliferazione batterica. (XXXI)

Inoltre vi sono anche dei parametri che vengono considerati pericolosi e che quindi devono essere monitorati a livello locale a causa dell'origine dell'acqua e delle tipologie di trattamento storicamente utilizzate. Infatti a Bologna e nelle zone di provincia vengono monitorati il tricloroetilene e il tetracloroetilene, che sono dei solventi antropici non presenti in natura. Il fatto che vengano considerati critici solo a livello locale è dato dalla presenza d'inquinanti nelle acque di falda presenti per attività antropiche. Altro esempio può essere fatto per Ferrara, dove si tengono sotto controllo costante gli antiparassitari del fiume Po. Anche l'alluminio va tenuto sotto controllo perché utilizzato nei processi di potabilizzazione. (XXXI)

6.2 Applicazione degli indici di stabilità

Una volta effettuata la raccolta dati, quindi estrapolati i valori dei parametri delle acque e riorganizzati in tabelle, si è passati all'applicazione degli indici di stabilità. Il procedimento che si è seguito è stato quello di calcolarli prima per il caso di Bologna e poi per le altre città, in modo tale da poter effettuare un primo confronto tra i valori medi. Gli indici applicati sono gli stessi che sono stati presentati nel capitolo precedente quindi Langelier e Ryznar per quanto riguarda la parte più legata alla temperatura, mentre Larsson e l'indice di aggressività per quanto riguarda l'aspetto di aggressività dell'acqua, dati da altri parametri come i cloruri, i solfati, la durezza e il pH. Va invece precisato che l'indice di Riddick non è stato possibile calcolarlo per nessuna zona esaminata poiché tra i parametri in gioco per il calcolo vi erano alcuni che non è stato possibile reperire, ossia l'ossigeno disciolto abbreviato con DO (Dissolved Oxygen) e che rappresenta un valore del quantitativo di O₂ in forma gassosa presente nell'acqua. Con questo valore si sarebbe potuto calcolare l'ossigeno disciolto a saturazione sat. DO, facendo il rapporto tra la misura di DO e la massima concentrazione di DO alla temperatura che si aveva al momento della misura. Altro parametro che non è stato possibile determinare la CO₂ in milligrammi/litro. (XXXV)(XXXVI)

6.2.1 Calcolo degli indici al caso di Bologna

A seguito della ricerca dei parametri si è passati al calcolo degli indici di stabilità e lo si è applicato come primo passaggio al caso studio di Bologna. Il primo considerato è stato l'indice di Langelier, visto che per il calcolo di Ryznar ci si basa sugli stessi parametri e anche l'indice di aggressività viene spesso correlato. Come già spiegato nel paragrafo introduttivo degli indici, l'indice SI viene calcolato dalla differenza tra il pH e il pHs, ossia di saturazione, e permette di valutare le capacità incrostanti dell'acqua. Per calcolare il pHs si è usata la formula già descritta in precedenza:

$$\text{pHs} = (9,3 + A + B) - \log_{10} [\text{Ca}] - 0,4 - \log_{10} [\text{Alk}]^{(\text{XXVII})}$$

per i termini riferiti ai logaritmi del calcio e dell'alcalinità si sono utilizzati i valori medi in milligrammi/litro riportati nella tabella dei dati riferita al caso di Bologna. Quindi rispettivamente, 84 mg/l e 230 mg/l. Per semplicità operativa si sono usati i valori in milligrammi/litro anziché le parti per milione poiché i valori riportati erano già convertiti in quell'unità di misura. Per la determinazione del parametro A, riferito ai solidi totali disciolti, si è utilizzato per la scelta del TDS di riferimento la tabella di conversione con la conduttività, visto che nei dati era presente il valore in μScm^{-1} (letteralmente sono i micro-Siemens su centimetro o anche mho, altro simbolo che può essere trovato nella tabella di conversione). Avendo una conduttività di $659 \mu\text{Scm}^{-1}$ si è scelto dalla tabella un valore di 275 mg/l di TDS.

Conductivity (micro-mho/cm)	TDS (mg/L as CaCO₃)
1	0.42
10.6	4.2
21.2	8.5
42.4	17.0
63.7	25.5
84.8	34.0
106.0	42.5
127.3	51.0
148.5	59.5
169.6	68.0
190.8	76.5
212.0	85.0
410.0	170.0
610.0	255.0
812.0	340.0
1008.0	425.0

Figura 20” Tabella di conversione dal parametro di conduttività in solidi totali disciolti TDS” (XXVII)

A questo punto è stato possibile procedere al calcolo tramite la formula già introdotta:

$$A = (\log_{10}[\text{TDS}] - 1) / 10^{(\text{XXVII})}$$

Stimato il parametro A, si è passati alla stima del parametro B, necessario poi ai fini del calcolo del pHs di saturazione. Il parametro viene espresso in funzione della temperatura dell’acqua che è influenzata in parte dall’ambiente esterno e quindi anche dalla stagionalità. Tuttavia vi è un range entro cui deve sottostare per evitare la formazione di microrganismi patogeni e quindi per ragioni di sicurezza. Infatti per evitare la proliferazione della legionella o di altri batteri molto pericolosi, si ritiene che l’acqua fredda debba stare al di sotto dei 25 °C. Mentre l’acqua calda debba essere superiore ai 50 °C. Solitamente si ritiene opportuno avere una temperatura tra i 55 °C e i 60 °C, perché si è riscontrato che batteri come la legionella abbiano la loro massima proliferazione tra i 25 °C e i 45 °C. (XXXVII)

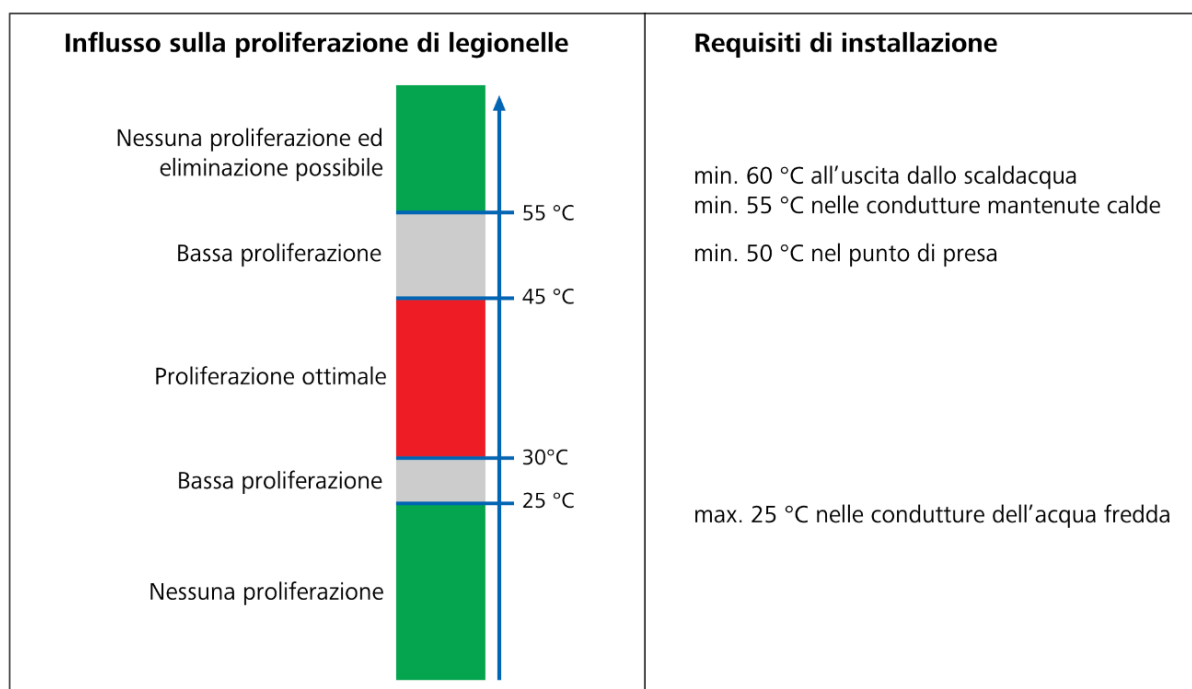


Figura 21 “Valori delle temperature in base alla quale vi è alta, bassa e nessuna proliferazione della legionella” (XXXVII)

Pertanto per il calcolo del parametro B si sono presi tre valori di riferimento inferiori a 25 °C dato che l’acqua effettivamente ritenuta potabile è quella fredda. Inoltre l’acqua calda è sempre erogata ad una temperatura tale per cui non si ha mai problemi di aggressività. I valori ipotizzati sono 10 °C, 15 °C e 20 °C, tutti valori altamente al di sotto dei 25 °C e che considerano le diverse temperature legate alla stagionalità. Nel calcolo di B si è utilizzata la formula già introdotta:

$$B = -13,12 \times \log_{10}(\text{°C} + 273) + 34,55^{(XXVII)}$$

Mentre il parametro A rimane invariato poiché non dipende dalla temperatura, il parametro B ed il pHs finale varierà. Per una temperatura di 10 °C si sono calcolati i seguenti valori:

	BOLOGNA
pHs	7,141
A	0,144
B	2,383

Figura 22 “Valori di A, B e del pHs ad una temperatura di 10 °C”

Per una temperatura di 15 °C sono stati calcolati i seguenti valori:

	BOLOGNA
pHs	7,041
A	0,144
B	2,283

Figura 23” Valori di A, B e del pHs alla temperatura di 15 °C”

Infine sono stati eseguiti i calcoli per una temperatura di 20 °C:

	BOLOGNA
pHs	6,943
A	0,144
B	2,185

Figura 24 “Valori di A, B e pHs alla temperatura di 20 °C”

Una volta individuati i parametri è stato possibile calcolare l’indice di Langelier, dato dalla differenza tra il pH e il pHs, ed è stato svolto il calcolo per i tre casi diversi considerati in base alla temperatura scelta in precedenza. Gli indici calcolati di (SI) sono i seguenti:

	INDICE DI LANGELIER (SI)
T=10°C	0,359
T=15°C	0,459
T=20°C	0,557

Figura 25 “Valori di SI in funzione della temperatura”

Dai valori finali riportati nella tabella precedente è possibile constatare come in funzione della temperatura vi sia differenza; infatti l’indice di Langelier aumenta all’aumentare della temperatura e viceversa. Inoltre per valori maggiori di zero si favorirà la formazione di carbonato di calcio e quindi deposito, mentre per valori minori di zero si avrà la tendenza all’aggressività. Questa tendenza è possibile individuarla dal seguente grafico:

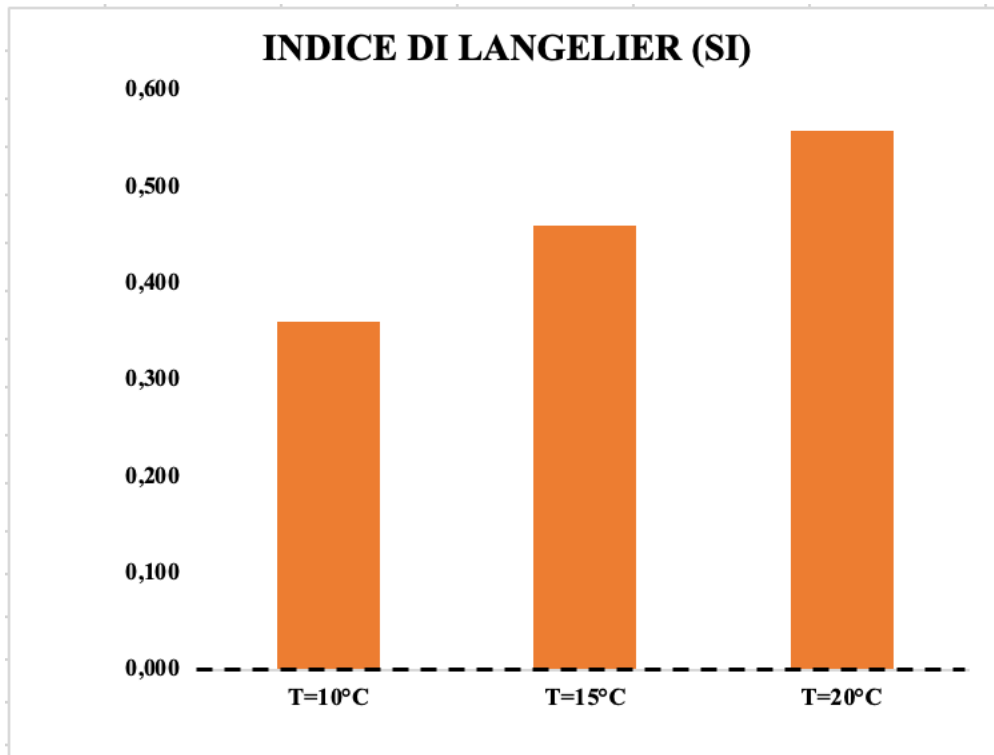


Figura 26 “L’indice di Langelier a confronto con le temperature ipotizzate”

Tuttavia dai valori che sono stati calcolati, è possibile notare come siano molto vicini lo zero e secondo la letteratura americana possono essere considerati plausibilmente in equilibrio. ⁽¹⁷⁾ Infatti la soglia di tolleranza per cui si ritiene in equilibrio è da -0,5 a + 0,5. ⁽²⁶⁾ Sfruttando i calcoli effettuati per l’indice di Langelier è stato possibile effettuare il calcolo di un altro indice strettamente correlato, ossia l’indice di Ryznar. I parametri nel calcolo sono gli stessi quindi sempre il pH e il pHs e la formula utilizzata è data semplicemente dalla differenza tra due volte il pHs e il pH ($RI=2pHs - pH$) quindi il risultato finale sarà sempre un valore positivo. Come per Langelier, si è riproposto lo stesso ragionamento, ossia ipotizzare delle temperature su cui basare i propri calcoli poiché il parametro della temperatura era importante anche per il calcolo di questo indice. Le temperature considerate sono state sempre 10, 15 e 20 °C, visto che erano abbastanza significative della variazione di temperatura delle reti d’acqua potabile nelle diverse stagioni. Gli indici calcolati sono i seguenti:

	INDICE DI RYZNAR (RI)
T=20°C	6,385
T=15°C	6,581
T=10°C	6,781

Figura 27 “Calcolo dell’indice di Ryznar per le tre temperature ipotizzate”

Per valori compresi tra 6 e 7 si è nella zona neutra, ma a differenza di Langelier, si riscontrano anche deboli livelli di aggressività o incrostazione, quindi tra 6 e 6,5 sarà debolmente incrostante e tra 6,5 e 7 sarà debolmente aggressiva. Inoltre alle diverse temperature si può notare come con l'aumentare della temperatura, intorno ai 20 °C, l'indice cala. Mentre al diminuire della temperatura, quindi intorno ai 10 °C, l'indice aumenta. Infatti da questo andamento è stato possibile dedurre che con il diminuire della temperatura l'indice aumenta fino a superare il valore di soglia sette e diventare dunque sempre più aggressiva e viceversa. Questo è il grafico relativo agli indici:

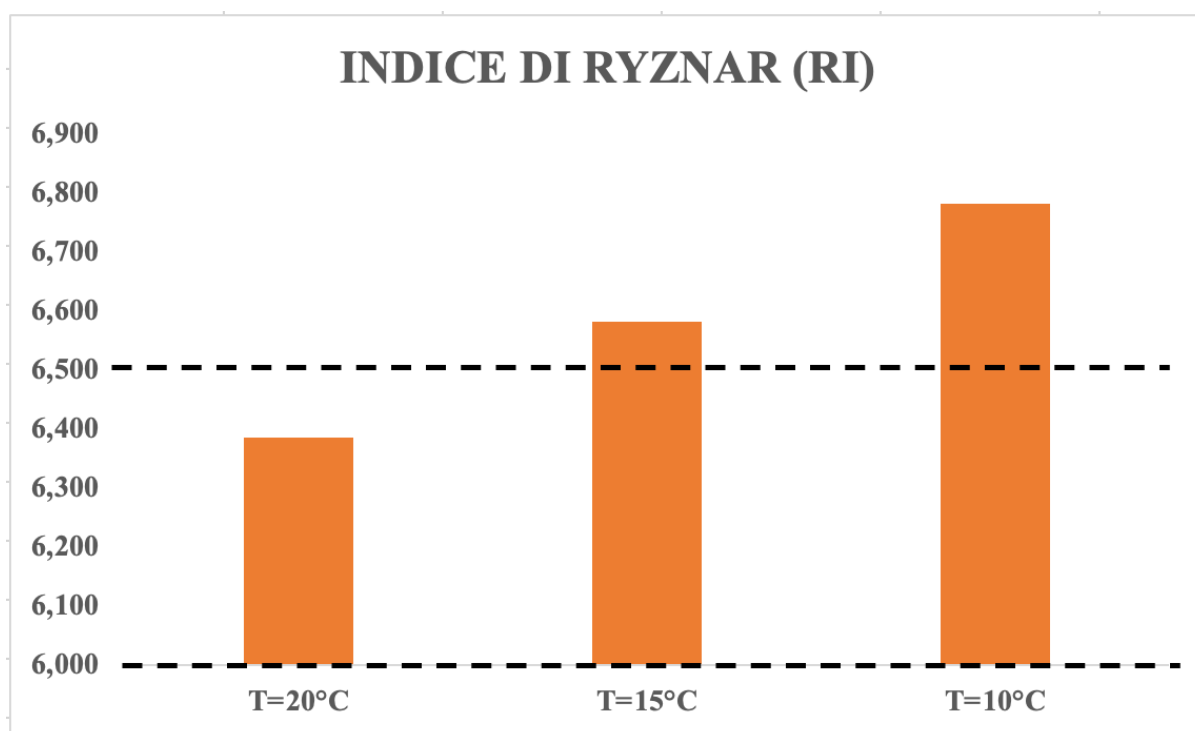


Figura 28 “L’indice di Ryznar a confronto con le temperature”

Ad ogni modo, la temperatura che deve raggiungere per risultare aggressiva è intorno ai 4-5 °C. Difficilmente l’acqua che passa in una condotta idrica potabile raggiunge una temperatura così bassa, solitamente 8-10 °C di minima nei mesi più freddi. Mentre considerando dei valori medi non si giunge mai a tale temperatura. Comunque il confronto con l’indice di Langelier va fatto, dato che entrambi si riferiscono ai medesimi parametri e soprattutto dipendono dalla temperatura. Infatti in base a ciò si è riscontrata una maggiore precisione con Ryznar, dato che per Langelier bisognava raggiungere temperature sotto lo zero per riscontrare aggressività.

Poi, una volta calcolati gli indici che erano in funzione della temperatura, si è passati al calcolo degli altri due che si basano invece su degli altri parametri. Il primo calcolato è l'indice di Larson-Skold il quale dipende dai parametri riferiti alla concentrazione di solfati (SO₄), cloruri (Cl) e all'alcalinità totale (Alk). La formula applicata e presentata nel paragrafo relativo agli indici è:

$$LI = \frac{Cl + SO_4}{Alk}$$

La sua differenza con gli altri è quella di valutare se la presenza di cloruri e solfati possa causare corrosività alle tubature. Anche in questo caso si sono utilizzati i valori relativi alle concentrazioni in milligrammi/litri, più precisamente:

- SO₄: 66 mg/l
- Cl: 34 mg/l
- Alk: 230 mg/l

e si è svolto il semplice calcolo.

	INDICE DI LARSON (LI)
BOLOGNA	0,435

Figura 29 “Valore dell’indice di Larson-Skold per il caso di Bologna”

Dal valore ottenuto di 0,435 è possibile constatare che la presenza di cloruri e solfati non ostacola la formazione del film protettivo. Pertanto non risulta essere corrosivo poiché il valore è inferiore a 0,8, valore soglia dal quale si comincia ad avere corrosione delle parti metalliche. L’indice si riferisce solo alla corrosività, quindi, non dà alcuna stima per quanto riguarda la possibilità di formazione di carbonato di calcio depositato, per questo sono stati applicati anche gli altri indici nella valutazione complessiva.

L’ultimo indice applicato per il caso di Bologna, che è anche l’indice più esaustivo per quanto riguarda lo studio che si prefigge la tesi, è l'indice di aggressività. È proprio dalla sua stima che si valuta il grado di aggressività dell’acqua nei confronti delle condotte in cemento-amianto, tema centrale della tesi. L’analisi non si è svolta solo con l’applicazione di questo indice, poiché spesso, come si è visto nel paragrafo riguardo al deterioramento del cemento-amianto, vi sono più fattori che possono influenzare il rilascio di fibre. Primo tra tutti la temperatura, considerata negli indici di Langelier e Ryznar. Spesso nelle analisi vengono affiancati più tipologie di calcolo al fine di valutare con una maggiore efficacia. L’indice di aggressività (I.A.) tiene conto dei seguenti parametri, già descritti in precedenza, tra cui il pH,

l'alcalinità totale in milligrammi/litro e la durezza, che viene espressa solitamente in gradi francesi e quindi è stata convertita in milligrammi/litro. Tale calcolo è stato effettuato moltiplicando per dieci. La formula che è stata applicata al caso di Bologna e riconosciuta anche dal gruppo Hera e da Arpa Emilia-Romagna, è la seguente:

$$I.A. = pH + \log_{10} (Alk \cdot H)$$

E dal calcolo è stato trovato il seguente valore:

	INDICE DI AGGRESSIVITÀ (IA)
BOLOGNA	12,309

Figura 30” Valore dell’indice di aggressività per il caso di Bologna”

Pertanto è stato possibile constatare che il valore di 12,309, essendo al di sopra del valore soglia di 12, denota una tipologia d’acqua non aggressiva poiché per esserlo sarebbe dovuto risultare inferiore a 12 o a 10, nel caso di acqua molto aggressiva.

6.2.2 Calcolo degli indici nelle altre città

Una volta applicati gli indici al caso studio preso in esame, ossia Bologna, si è poi deciso di svolgere i medesimi calcoli anche per altre città sempre considerando dei valori medi. Tali campionamenti sono sempre oggetto di analisi da parte del gruppo Hera. Si è proceduto inizialmente al calcolo dell’indice di Langelier per tutte le altre città delle quali sono stati presentati i valori medi dei parametri derivanti dai campionamenti di Hera all’inizio del capitolo. A differenza di quanto è stato fatto per il caso di Bologna, non si sono considerate nel seguente approccio più temperature, poiché dall’analisi effettuata per Bologna si è constatato che il range è all’incirca sempre lo stesso e non ha senso considerare temperature troppo elevate o troppo basse. Si è deciso di procedere ipotizzando una temperatura media di 20 °C. Il procedimento è stato sempre lo stesso quindi abbiamo calcolato i pHs per ogni città che andranno a sottrarsi ad ogni valore di pH ricavato dalle analisi di campionamento. Di seguito si riportano i coefficienti A, relativo ai TDS ovvero i solidi totali disciolti in acqua e B, relativo alla temperatura che risulterà essere la stessa per ogni città.

	FERRARA	CESENA	MODENA	PADOVA	PESARO-URBINO	RAVENNA	RIMINI	TRIESTE
A	0,135	0,134	0,158	0,124	0,140	0,139	0,141	0,119
B	2,185	2,185	2,185	2,185	2,185	2,185	2,185	2,185

Figura 31 “Valori riferiti alle medie ponderate effettuate nel 2022”

	FORLI'	IMOLA	SASSUOLO	CATTOLICA
A	0,128	0,162	0,177	0,123
B	2,185	2,185	2,185	2,185

Figura 32” Valori riferiti alle medie ponderate effettuate nel primo semestre del 2023”

Trovati i coefficienti A e B, è stato possibile svolgere i calcoli per ricavare tutti i pHs, dato che i valori in milligrammi/litro di calcio e dell'alcalinità totale erano presenti grazie ai campionamenti. Di seguito si riportano i valori del pHs e del pH, anche quest'ultimo presente come misura svolta da Hera.

	pHs	pH
FERRARA	7,5	7,6
CESENA	7,5	7,7
MODENA	7,3	7,5
PADOVA	7,5	7,7
PESARO-URBINO	7,3	7,7
RAVENNA	7,6	7,8
RIMINI	7,4	7,6
TRIESTE	7,6	7,8
FORLI'	7,5	7,7
IMOLA	7,1	7,2
SASSUOLO	7,2	7,3
CATTOLICA	7,6	7,9

Figura 33” Valori del pHs e del pH per ogni città”

Dalla differenza tra il pH e il pHs è stato possibile ricavare l'indice di Langelier (SI) e dare quindi già una prima stima dello stato d'interazione tra le condotte idriche e l'acqua potabile che vi defluisce.

	(SI)	STATO ACQUA-CONDOTTA
FERRARA	0,456	Equilibrio
CESENA	0,642	Poco incrostante
MODENA	0,587	Equilibrio
PADOVA	0,591	Equilibrio
PESARO-URBINO	0,833	Tendente ad incrostante
RAVENNA	0,645	Poco incrostante
RIMINI	0,566	Equilibrio
TRIESTE	0,589	Equilibrio
FORLI'	0,629	Poco incrostante
IMOLA	0,516	Equilibrio
SASSUOLO	0,487	Equilibrio
CATTOLICA	0,728	Poco incrostante

Figura 34 “Valori dell’indice di Langelier e stato dell’interazione tra la condotta e l’acqua”

Come è possibile constatare dalla tabella, l’indice SI risulta essere sempre maggiore di zero. Dunque si può affermare, sempre in maniera qualitativa, che non presenta caratteristiche di aggressività in nessuna delle zone esaminate. Inoltre secondo l’esperienza in letteratura vi è una soglia di tolleranza entro la quale è possibile trascurare l’eventuale tendenza dell’acqua ad essere aggressiva o ad avere capacità incrostante. Infatti a seconda dei testi, si tende a ritenere trascurabile range di valori tra -0,5 e + 0,5 o anche tra -1 e +1. ⁽¹⁷⁾⁽²⁶⁾

In questo caso si sono ritenuti i valori fino a 0,5 come in equilibrio, mentre per valori superiori, ma sempre inferiori ad 1, sono stati considerati con poca tendenza incrostante anche se va comunque tenuto conto che dalla letteratura per valori fino a 1, in valore assoluto, non si hanno problemi d’incrostazione o aggressività. I valori medi più elevati che si sono riscontrati sono a Pesaro-Urbino con 0,833 ed a Cattolica con 0,728. Di seguito si riporta anche il grafico inerente all’indice (SI) per tutte le città.

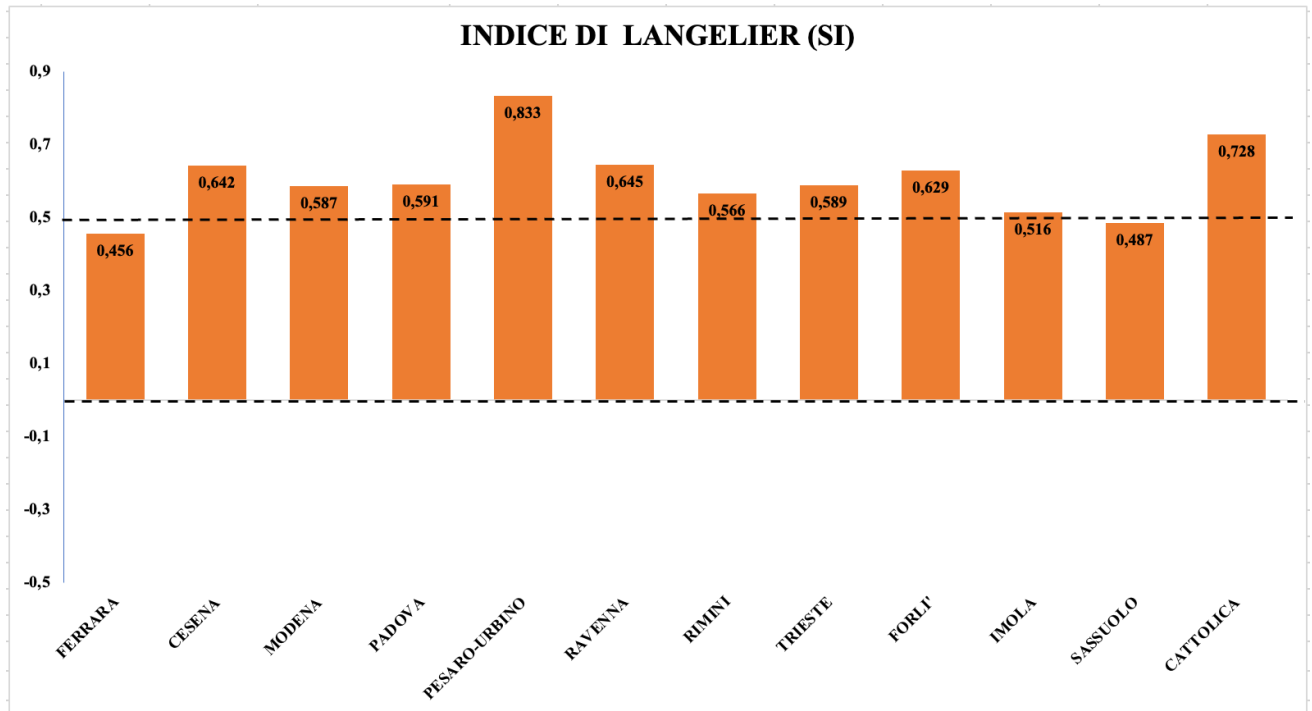


Figura 35 “Grafico relativo ai valori degli indici di Langelier”

A questo punto si è proceduto al calcolo dell’indice di Ryznar (RI) e ad effettuare il confronto con Langelier, dato che entrambi dipendenti dagli stessi parametri. In questo caso si è considerata sempre una sola temperatura media di riferimento di 20 °C. Per quanto riguarda i parametri si tratta sempre di una differenza tra pHs e pH, dunque i valori sono gli stessi, ma la differenza sta appunto nell’avere valori sempre positivi ed anche nella precisione. Di seguito si riportano i valori dell’indice di Ryznar (RI).

	(RI)	STATO ACQUA-CONDOTTA
FERRARA	6,688	Debolmente aggressiva
CESENA	6,416	Debolmente incrostante
MODENA	6,326	Debolmente incrostante
PADOVA	6,518	Equilibrio
PESARO-URBINO	6,034	Tendente ad incrostante
RAVENNA	6,510	Equilibrio
RIMINI	6,467	Debolmente incrostante
TRIESTE	6,621	Debolmente aggressiva
FORLÌ	6,443	Debolmente incrostante
IMOLA	6,169	Debolmente incrostante
SASSUOLO	6,327	Debolmente incrostante
CATTOLICA	6,445	Debolmente incrostante

Figura 36” Valori relativi all’indice di Ryznar e stato dell’interazione acqua-condotta”

Come è possibile osservare dalla tabella in alto, i valori sono tutti nel range tra 6 e 7, ciò indicache siamo nella zona neutra. Quindi, in generale, non vi è alcun dato significativo di aggressività o incrostazione che possa generare danni alla struttura. Tuttavia vi sono delle differenze con l'indice di Langelier che più che altro riguardano una maggiore precisione dello stato della condotta idrica. Infatti a Ferrara e a Trieste si può notare uno stato “debolmente aggressivo”, cosa che non era stata per nulla riscontrata con Langelier, anche se i valori sono molto prossimi alla soglia di equilibrio di 6,5, essendo rispettivamente 6,688 e 6,621. Pesaro-Urbino risulta essere la città con maggiore tendenza ad incrostazione e questo lo si era potuto notare anche con l'indice di Langelier, avendo dei valori più al limite rispetto agli altri, con 6,034. Anche Imola ha un valore prossimo al 6, ma lo si è considerato al limite e comunque con proprietà meno incrostanti rispetto a Pesaro-Urbino. Invece Padova risulta essere in equilibrio, come anche lo era con l'indice di Langelier, mentre Ravenna risulta in equilibrio con Ryznar, ma risultava incrostante con Langelier. Inoltre per le altre città si sono riscontrati stati di “debolmente incrostante” a differenziarsi da Langelier che considerava quasi tutte le città perfettamente in equilibrio. Dunque con Ryznar è stato possibile dare una classificazione più precisa, anche se il bilancio risulta essere sempre buono ed entro i limiti di stabilità. Qui di seguito si riporta il grafico per visualizzare meglio gli andamenti degli indici.

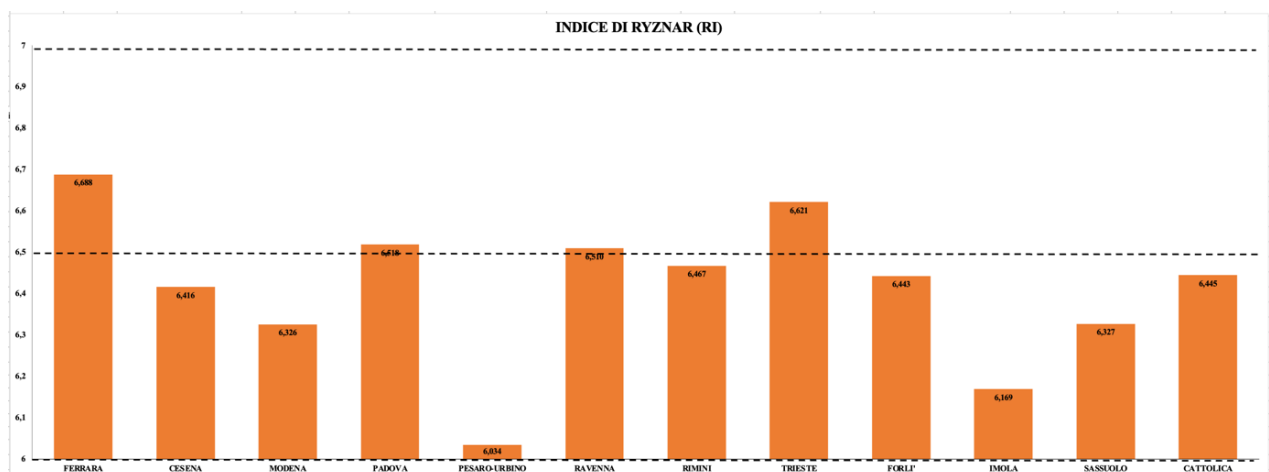


Figura 37” Grafico degli indici di Ryznar per ogni città”

Ora andremo ad analizzare gli altri due indici utilizzati. Verranno valutati a parte poiché fanno riferimento ad altri parametri. Abbiamo in primis l'indice di Larson-Skold (LI) e per il suo calcolo, come visto per il caso di Bologna, andavano considerati i valori riferiti ai solfati, cloruri ed alcalinità totale. Qui di seguito si riportano i valori delle medie ponderate in milligrammi/litro dei tre parametri per ogni città.

PARAMETRI	FERRARA	CESENA	MODENA	PADOVA	PESARO-URBINO	RAVENNA	RIMINI	TRIESTE
Alcalinità tot. (mg/l)	189	210	198	217	245	189	213	179
Solfato (mg/l)	47	50	132	26	67	51	63	9
Cloruro (mg/l)	35	22	96	10	31	40	31	15

Figura 38 “Valori dell’alcalinità totale, solfato e cloruro per ogni città nel 2022”

PARAMETRI	FORLI'	IMOLA	SASSUOLO	CATTOLICA
Alcalinità tot. (mg/l)	195	297	202	175
Solfato (mg/l)	34	92	216	30
Cloruro (mg/l)	21	65	144	14

Figura 39” Valori dell’alcalinità totale, solfato e cloruro per ogni città nel primo semestre del 2023”

In base ai valori riportati nelle tabelle soprastantisono stati poi svolti i calcoli dell’indice di Larson e sono stati riportati di seguito sempre per tutti i casi analizzati.

	INDICE DI LARSON (LI)
FERRARA	0,434
CESENA	0,343
MODENA	1,152
PADOVA	0,166
PESARO-URBINO	0,400
RAVENNA	0,481
RIMINI	0,363
TRIESTE	0,134
FORLI'	0,282
IMOLA	0,545
SASSUOLO	1,782
CATTOLICA	0,251

Figura 40” Valori dell’indice di Larson-Skold per ogni città”

Dai valori degli indici calcolati e riportati nella tabella è possibile riscontrare delle differenze con quanto visto per i primi due indici. Infatti considerando parametri diversi si può notare che Modena, con un valore di 1,152 rientra nel range soglia tra 0,8 e 1,2, e vi è la possibilità di corrosione e Sassuolo che con un valore di 1,782 supera di gran lunga il valore soglia di 1,2 e quindi qualitativamente significa che vi è corrosione. Per gli altri valori si è invece nel range di equilibrio, essendo tutti inferiori a 0,8. Di seguito nel grafico è possibile visualizzare meglio quanto detto.

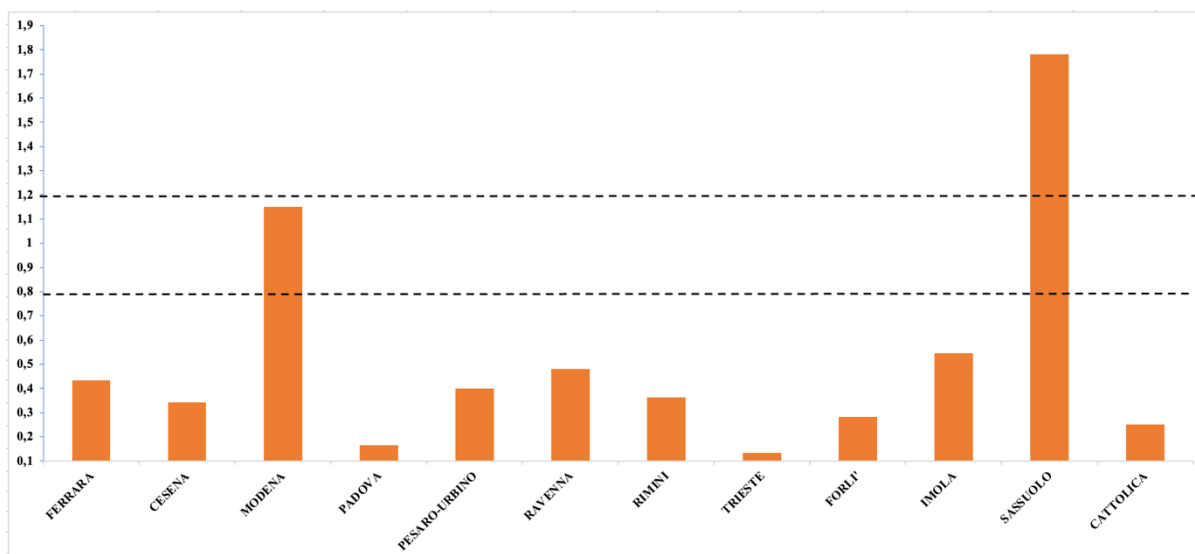


Figura 41” Grafico relativo agli indici di Larson-Skold per ogni città”

Infine si è considerato l’indice di aggressività (I.A) e sono stati svolti i calcoli per ognuna delle città analizzate, come è stato fatto per i casi precedenti. Si riportano qui di seguito i valori relativi ai parametri in gioco per il calcolo dell’indice di aggressività. Quindi pH, alcalinità totale e la durezza.

	FERRARA	CESENA	MODENA	PADOVA	PESARO-URBINO	RAVENNA	RIMINI	TRIESTE
pH	7,6	7,7	7,5	7,7	7,7	7,8	7,6	7,8
Alcalinità tot. (mg/l)	189	210	198	217	245	189	213	179
Durezza tot. (F°)	21	24	33	22	30	22	24	18

Figura 42 “Valori del pH, alcalinità totale e della durezza per ogni città in cui si sono svolti i campionamenti nel 2022”

	FORLI'	IMOLA	SASSUOLO	CATTOLICA
pH	7,7	7,2	7,3	7,9
Alcalinità tot. (mg/l)	195	297	202	175
Durezza tot. (F°)	25	44	43	20

Figura 43 “Valori del pH, alcalinità totale e della durezza per ogni città in cui si sono svolti i campionamenti nel primo semestre del 2023”

Attraverso questi parametri poi siamo andati ad applicare la formula relativa all’indice per ogni città ricavando i seguenti valori.

	INDICE DI AGGRESSIVITÀ (IA)
BOLOGNA	12,309
FERRARA	12,199
CESENA	12,402
MODENA	12,315
PADOVA	12,379
PESARO-URBINO	12,566
RAVENNA	12,419
RIMINI	12,309
TRIESTE	12,308
FORLI'	12,388
IMOLA	12,316
SASSUOLO	12,239
CATTOLICA	12,444

Figura 44 “Valori dell’indice di aggressività relativo ad ogni città”

Dunque secondo quanto si conosce riguardo ai valori stimati dall’indice di aggressività, si può facilmente evidenziare che sono tutti entro i limiti, ossia superiori a 12. Quindi risultano essere non aggressive per quanto concerne le condotte in cemento-amianto. Dal seguente grafico è possibile visualizzare gli andamenti e constatare che superano tutti la soglia limite.

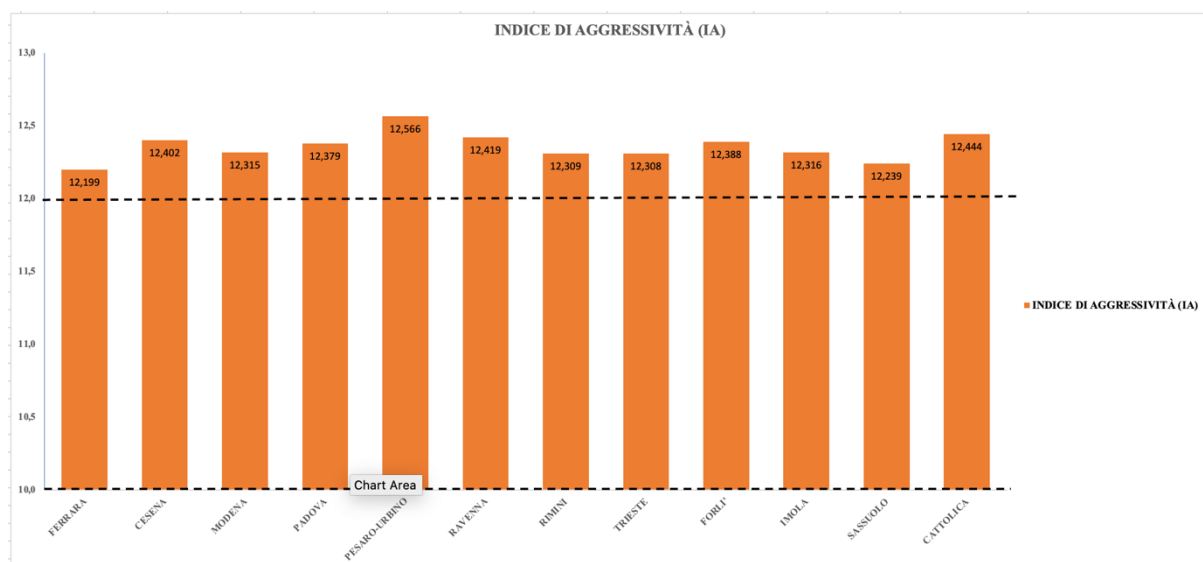


Figura 45 “Grafico relativo agli andamenti degli indici di aggressività per ogni città”

Infatti secondo gli studi fatti in passato, soprattutto nei paesi statunitensi, si è riscontrato che nelle condotte con acque incrostanti quindi con un’elevata formazione di calcare, si genera una sorta di pellicola protettiva che trattiene il rilascio di fibre, viceversa nelle acque aggressive si

favorisce il loro distacco. Inoltre sempre secondo gli studi americani, il livello di concentrazione massimo che si ritiene accettabile è di 7×10^6 ff/l, anche se nelle acque potabili, a meno di particolari fenomeni anomali che possono provocare aggressività, non si rilevano mai concentrazioni superiori a 1000 ff/l. Tuttavia proprio per la dubbia attendibilità e conoscenza in merito alla cancerogenicità delle fibre se ingerite, vengono sempre monitorate le acque e fatti i campionamenti laddove si individuano condotte in cemento-amianto ancora in funzione. ⁽²⁷⁾

6.3 Il caso studio di Bologna: andamento con valori reali

Una volta svolti i calcoli e discussi i vari andamenti che riguardavano Bologna e le altre città, partendo dai dati pubblici pubblicati da Hera, si è passati ad analizzare dei valori relativi al caso oggetto di tesi, ossia Bologna. Infatti mentre come già ampiamente spiegato, i valori considerati erano tutte medie ponderate annuali e semestrali, qui ci si è soffermati su dei dati, raccolti da Hera, relativi a dei prelievi effettuati in dei giorni precisi negli anni 2019, 2020, 2021 e 2022 in due diverse zone dell'area urbana di Bologna, che abbiamo identificato come Bologna ovest e Bologna sud. Questa tipologia di analisi è stata svolta proprio per effettuare un confronto e capire se andando a considerare andamenti giornalieri più specifici, essi possano risultare discordanti o meno con quanto già valutato precedentemente con i valori medi. Si vuole stabilire se questi risultati possano cambiare la valutazione qualitativa finale.

Nei dati che andremo a presentare, sono stati riportati quelli più utili al fine dei calcoli degli indici di stabilità. Quindi tali dati saranno minori rispetto ai parametri presentati a inizio capitolo. Di seguito si riporta la tabella con tutti i valori:

	Date prelievo	Alcalinità tot.	Calcio	Cloruro	pH	Conduttività	Magnesio	Nitrato	Potassio	Sodio	Solfato	Temperatura
BOLOGNA OVEST	12/03/19	139,5	55	31	7,97	411	10,3	1	1,8	21,3	63	11,2
BOLOGNA OVEST	11/04/19	140	57	37	7,54	460	10,6	1,1	2	25,1	49	14,3
BOLOGNA OVEST	19/06/19	163,3	61	29	7,98	481	11,8	1	2,7	21,1	44	23,8
BOLOGNA OVEST	26/08/19	177,4	110	48	7,45	842	24,1	12,2	2,3	30,5	67	22,5
BOLOGNA OVEST	23/10/19	309,1	98	40	7,49	807	21,9	11,4	2,4	34,6	58	16,9
BOLOGNA OVEST	23/12/19	303,6	96	41	7,63	830	20,4	10,8	2,4	29,3	64	14,1
BOLOGNA OVEST	05/02/20	148,9	55	21	7,72	423	8,8	1,3	1,7	16,4	31	9,7
BOLOGNA OVEST	01/04/20	161,5	51	28	7,61	429	8,3	1,3	1,6	17,3	35	10,7
BOLOGNA OVEST	24/06/20	150	47	20	7,69	410	7,8	0,6	2,1	15,3	29	22,9
BOLOGNA OVEST	03/08/20	143,5	47	24,2	7,33	366	7,8	2	2	14,1	26	23,3
BOLOGNA OVEST	14/10/20	156,4	58	39	8,05	463	9,7	2,9	1,8	18,4	43	15,6
BOLOGNA OVEST	02/12/20	88,1	71	35,1	7,72	542	13,2	3,2	2,5	24,6	52	10,2
BOLOGNA OVEST	19/02/21	165,2	57	30,9	8,03	452	9,3	2,2	1,7	16,5	42	7,7
BOLOGNA OVEST	28/04/21	142,1	52	26,4	8,24	428	8,9	1,1	1,8	16,2	42	13,8
BOLOGNA OVEST	23/06/21	300	127	47,3	7,35	861	24,7	12,3	2,7	33,9	87	21,2
BOLOGNA OVEST	02/09/21	305,5	106	52,6	6,74	854	21	14,5	2,3	27,7	88	19,3
BOLOGNA OVEST	09/11/21	141,9	53	33,3	7,56	462	9,5	2,1	1,9	18,2	43	13,2
BOLOGNA OVEST	23/12/21	206,5	84	32,4	7,49	621	14,7	5,4	2	22,3	65	8,2
BOLOGNA OVEST	10/03/22	169,5	59	36,5	7,91	503	10,4	1,8	1,7	18,9	62	7,6
BOLOGNA OVEST	03/06/22	133,7	57	26,9	7,51	458	10,8	0,6	2,3	20,5	49	23,1
BOLOGNA OVEST	27/07/22	298,8	105	54,9	6,92	730	21,5	15,6	2	26	83	19,7
BOLOGNA OVEST	31/08/22	311	115	47,6	7,63	913	23,3	13,8	2,3	30,1	104	18,3
BOLOGNA OVEST	13/10/22	309,6	115	46,5	7,01	865	24,8	14,6	2,7	33,9	82	17,7
BOLOGNA OVEST	30/12/22	123,2	39	14,8	7,49	293	6,2	1,7	1	7,8	19	12,9

Figura 46 “Tabella con i valori dei parametri utili per il calcolo degli indici di stabilità nell’area di Bologna ovest”

	Date prelievo	Alcalinità tot.	Calcio	Cloruro	pH	Conduttività	Magnesio	Nitrato	Potassio	Sodio	Solfato	Temperatura
BOLOGNA SUD	19/02/19	154,5	58	22	7,5	413	10	2,3	1,5	19,3	35	8,3
BOLOGNA SUD	17/04/19	125,9	62	33	7,47	470	10,7	1,6	2	24,3	56	13,7
BOLOGNA SUD	18/06/19	162,2	64	28	7,65	483	12,5	1	2,9	22,8	44	23,2
BOLOGNA SUD	20/08/19	118,9	47	21	7,71	367	9,8	0,8	1,9	14,2	23	23
BOLOGNA SUD	23/10/19	183,5	59	31	7,66	531	11,6	2,8	2,2	23,2	40	18,6
BOLOGNA SUD	17/12/19	148,9	56	29	7,67	457	8,5	1,9	1,9	17,7	29	10,9
BOLOGNA SUD	18/02/20	129,4	53	22	7,71	403	8,8	1,3	1,7	15,7	30	11
BOLOGNA SUD	21/04/20	141	53	18	7,71	394	9	0,9	2,1	13,8	34	14,8
BOLOGNA SUD	16/06/20	306,5	110	38	7,5	835	22,5	9,2	2,4	30	72	20,2
BOLOGNA SUD	12/08/20	215,7	73	34,1	7,19	606	14,7	6,3	1,2	16	55	22,8
BOLOGNA SUD	14/10/20	160,7	66	39,6	7,69	512	11,4	4,2	1,8	19,8	49	17,8
BOLOGNA SUD	02/12/20	229,7	86	41,9	7,55	659	16,9	6,7	2,5	28,2	62	12,4
BOLOGNA SUD	02/02/21	143	59	32,5	8,03	438	8,3	2,3	1,8	14,5	39	8,2
BOLOGNA SUD	06/04/21	141,5	66	23,8	8,08	443	12,1	1,2	2	19,5	45	13
BOLOGNA SUD	03/06/21	103,3	47	20,9	7,84	362	8,3	0,9	1,5	12,2	33	19,4
BOLOGNA SUD	03/08/21	303,6	125	48,4	7,36	832	28,8	12,5	3	34,3	76	19,7
BOLOGNA SUD	05/10/21	127,8	41	22,8	7,11	352	8	1,1	1,4	10,9	26	18,4
BOLOGNA SUD	01/02/22	152,3	60	29,6	7,31	474	10,4	2,3	1,4	16,1	44	7,8
BOLOGNA SUD	05/04/22	143,7	60	30	7,13	486	9,9	2,6	1,6	16,7	50	10,1
BOLOGNA SUD	07/06/22	159,6	49	27	7,69	433	9,2	0,7	1,9	17,1	48	23,4
BOLOGNA SUD	03/08/22	303	117	49,2	7,26	884	23,3	13,6	2,5	28,1	92	21,5
BOLOGNA SUD	12/10/22	307,3	114	47,8	6,96	874	24,7	14,2	2,7	33,3	87	17,1
BOLOGNA SUD	06/12/22	157,3	60	32,9	7,87	459	10,5	4	1,6	15,8	41	12,9

Figura 47 “Tabella con i valori dei parametri utili per il calcolo degli indici di stabilità nell’area di Bologna sud”

Come si può notare in entrambe le tabelle è stata inserita la data precisa del giorno in cui sono stati effettuati i campionamenti, proprio per avere maggiore precisione. Inoltre a differenza di quanto visto in precedenza, sono state inserite anche le temperature al momento del prelievo, visto che sono stati effettuati in stagioni diverse, sia in estate che in inverno. Quindi si avevano discrepanze nei valori legate anche alle temperature. Tuttavia salvo per qualche temperatura

relativamente bassa per via del periodo particolarmente freddo in cui si hanno valori appena al di sotto dei 10 °C, si è in linea con quanto ipotizzato nei casi medi descritti in precedenza. Infatti si rientra sempre sotto i 25 °C e in un range di 10-20 °C circa.

A questo punto passiamo alle operazioni di valutazione. Si è effettuato il calcolo dell'indice di Langelier per entrambe le zone e per ogni data presentata. Prima però sono stati stimati i parametri utili, ossia i solidi totali disciolti (TDS) in milligrammi/litro per ogni giorno tramite la tabella di conversione dalla conduttività, A, B e il pHs. Si riportano i parametri per entrambe le aree urbane:

TDS	A	B	pHs
170	0,123	2,358	7,497
192	0,128	2,297	7,423
200	0,130	2,111	7,143
353	0,155	2,136	6,901
338	0,153	2,245	6,817
347	0,154	2,301	6,890
175	0,124	2,389	7,500
178	0,125	2,368	7,478
170	0,123	2,129	7,303
155	0,119	2,121	7,311
190	0,128	2,271	7,341
226	0,135	2,379	7,618
188	0,127	2,429	7,483
178	0,125	2,307	7,463
361	0,156	2,161	6,636
358	0,155	2,198	6,743
190	0,128	2,318	7,470
260	0,141	2,419	7,221
190	0,128	2,125	7,271
305	0,148	2,191	6,742
382	0,158	2,218	6,723
362	0,156	2,230	6,734
120	0,108	2,324	7,651

Figura 48 “Valori del TDS, A, B e del pHs per l’area di Bologna ovest”

TDS	A	B	pHs
171	0,123	2,417	7,488
192	0,128	2,309	7,444
196	0,129	2,123	7,136
155	0,119	2,127	7,398
220	0,134	2,212	7,212
190	0,128	2,364	7,471
167	0,122	2,362	7,549
163	0,121	2,287	7,434
348	0,154	2,181	6,707
250	0,140	2,131	6,973
212	0,133	2,228	7,235
275	0,144	2,334	7,083
182	0,126	2,419	7,519
183	0,126	2,322	7,378
150	0,118	2,196	7,528
348	0,154	2,191	6,665
145	0,116	2,216	7,513
197	0,129	2,427	7,496
202	0,131	2,381	7,475
179	0,125	2,119	7,251
371	0,157	2,156	6,663
368	0,157	2,241	6,753
192	0,128	2,324	7,378

Figura 49” Valori del TDS, A, B e del pHs per l’area di Bologna sud”

Dai seguenti parametri si è poi calcolato l’indice di Langelier e si riportano i valori per entrambe le aree urbane e per ogni giorno in cui è stato effettuato il prelievo di controllo.

Date prelievo	(SI)
12-Mar-19	0,473
11-Apr-19	0,117
19-Jun-19	0,837
26-Aug-19	0,549
23-Oct-19	0,673
23-Dec-19	0,740
05-Feb-20	0,220
01-Apr-20	0,132
24-Jun-20	0,387
03-Aug-20	0,019
14-Oct-20	0,709
02-Dec-20	0,102
19-Feb-21	0,547
28-Apr-21	0,777
23-Jun-21	0,714
02-Sep-21	-0,003
09-Nov-21	0,090
23-Dec-21	0,269
03-Jun-22	0,239
27-Jul-22	0,178
31-Aug-22	0,907
13-Oct-22	0,276
30-Dec-22	-0,161

Figura 50'' Valori dell'indice di Langelier per l'area di Bologna ovest''

Date prelievo	(SI)
19/02/19	0,012
17/04/19	0,026
18/06/19	0,514
20/08/19	0,312
23/10/19	0,448
17/12/19	0,199
18/02/20	0,161
21/04/20	0,276
16/06/20	0,793
12/08/20	0,217
14/10/20	0,455
02/12/20	0,467
02/02/21	0,511
06/04/21	0,702
03/06/21	0,312
03/08/21	0,695
05/10/21	-0,403
01/02/22	-0,186
05/04/22	-0,345
07/06/22	0,439
03/08/22	0,597
12/10/22	0,207
06/12/22	0,492

Figura 51 “Valori dell’indice di Langelier per l’area di Bologna sud”

Da cui poi i valori sono stati graficati per visualizzare meglio l’andamento dell’indice e poter effettuare un confronto con quanto è stato visto in precedenza.

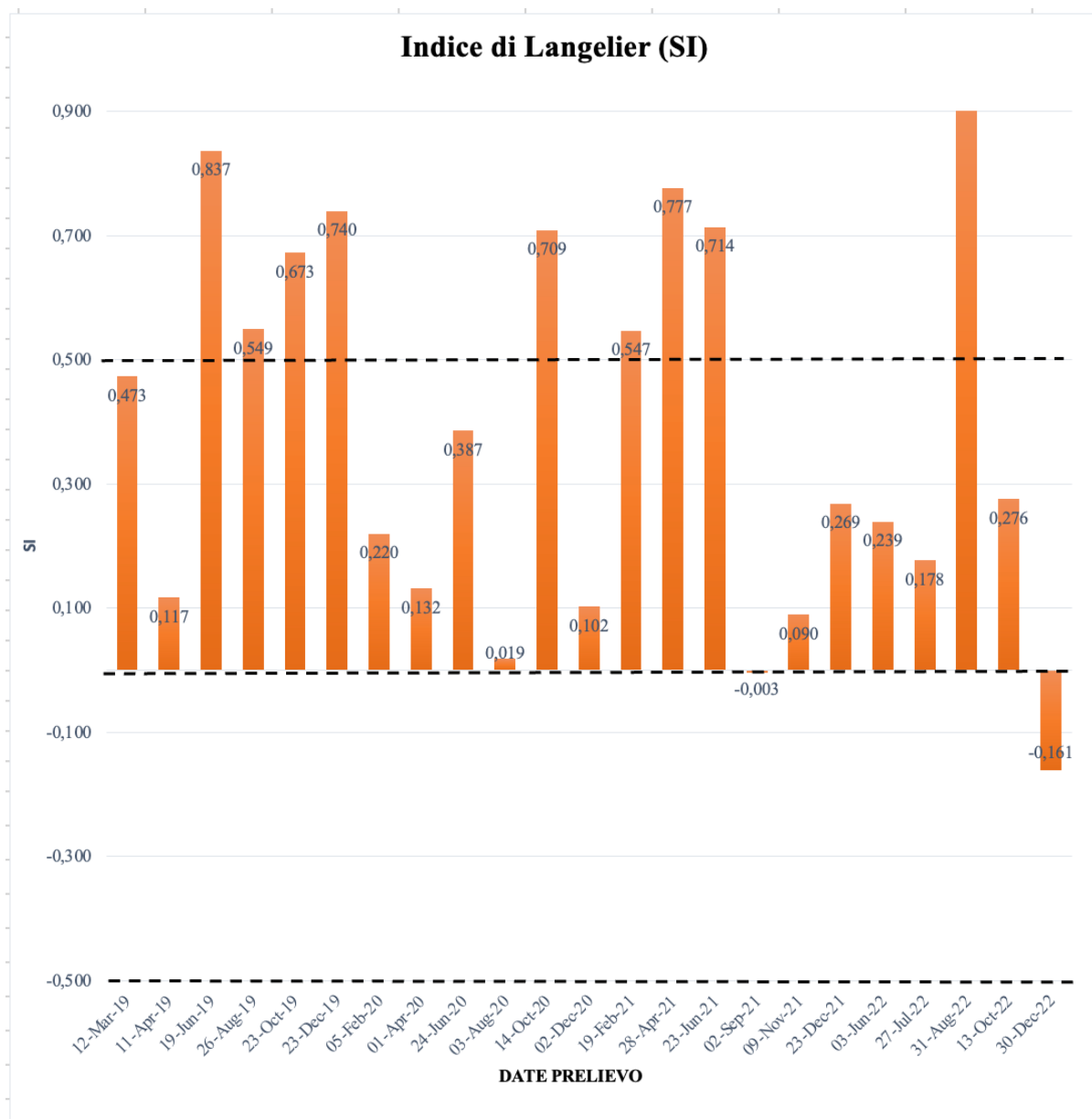


Figura 52” Grafico relativo all’andamento dell’indice di Langelier nella zona di Bologna ovest”

Come si può osservare dal grafico, per quanto concerne quest’area urbana non vi sono differenze sostanziali da individuare rispetto al caso dei valori medi. Infatti i valori rientrano per la maggior parte nel range -0,5 e +0,5. Ma vi sono diversi valori che risultano leggermente incrostanti, anche se mai particolarmente significativi. Solo un valore risulta negativo e denota acqua più aggressiva, ma è ampiamente sotto il -0,5 ed è un unico valore pertanto può essere trascurato. Tuttavia bisogna notare come possano essere individuate delle piccole differenze rispetto ai valori medi, ma anche in questo caso siamo in linea. Questa è la tabella redatta per la valutazione dello stato dell’acqua in funzione della condotta.

DATA PRELIEVO	(SI)	STATO ACQUA-CONDOTTA
12/03/19	0,473	Equilibrio
11/04/19	0,117	Equilibrio
19/06/19	0,837	Debolmente incrostante
26/08/19	0,549	Equilibrio
23/10/19	0,673	Equilibrio
23/12/19	0,740	Debolmente incrostante
05/02/20	0,220	Equilibrio
01/04/20	0,132	Equilibrio
24/06/20	0,387	Equilibrio
03/08/20	0,019	Equilibrio
14/10/20	0,709	Debolmente incrostante
02/12/20	0,102	Equilibrio
19/02/21	0,547	Equilibrio
28/04/21	0,777	Debolmente incrostante
23/06/21	0,714	Debolmente incrostante
02/09/21	-0,003	Equilibrio
09/11/21	0,090	Equilibrio
23/12/21	0,269	Equilibrio
03/06/22	0,239	Equilibrio
27/07/22	0,178	Equilibrio
31/08/22	0,907	Debolmente incrostante
13/10/22	0,276	Equilibrio
30/12/22	-0,161	Equilibrio

Figura 53” Stato acqua-condotta per la zona di Bologna ovest”

È possibile notare che lo stato dell’acqua in funzione della condotta risulta essere quasi sempre in equilibrio visto il range di trascurabilità. Passiamo adesso all’altra zona ed osserviamo l’andamento del grafico che si riporta di seguito.

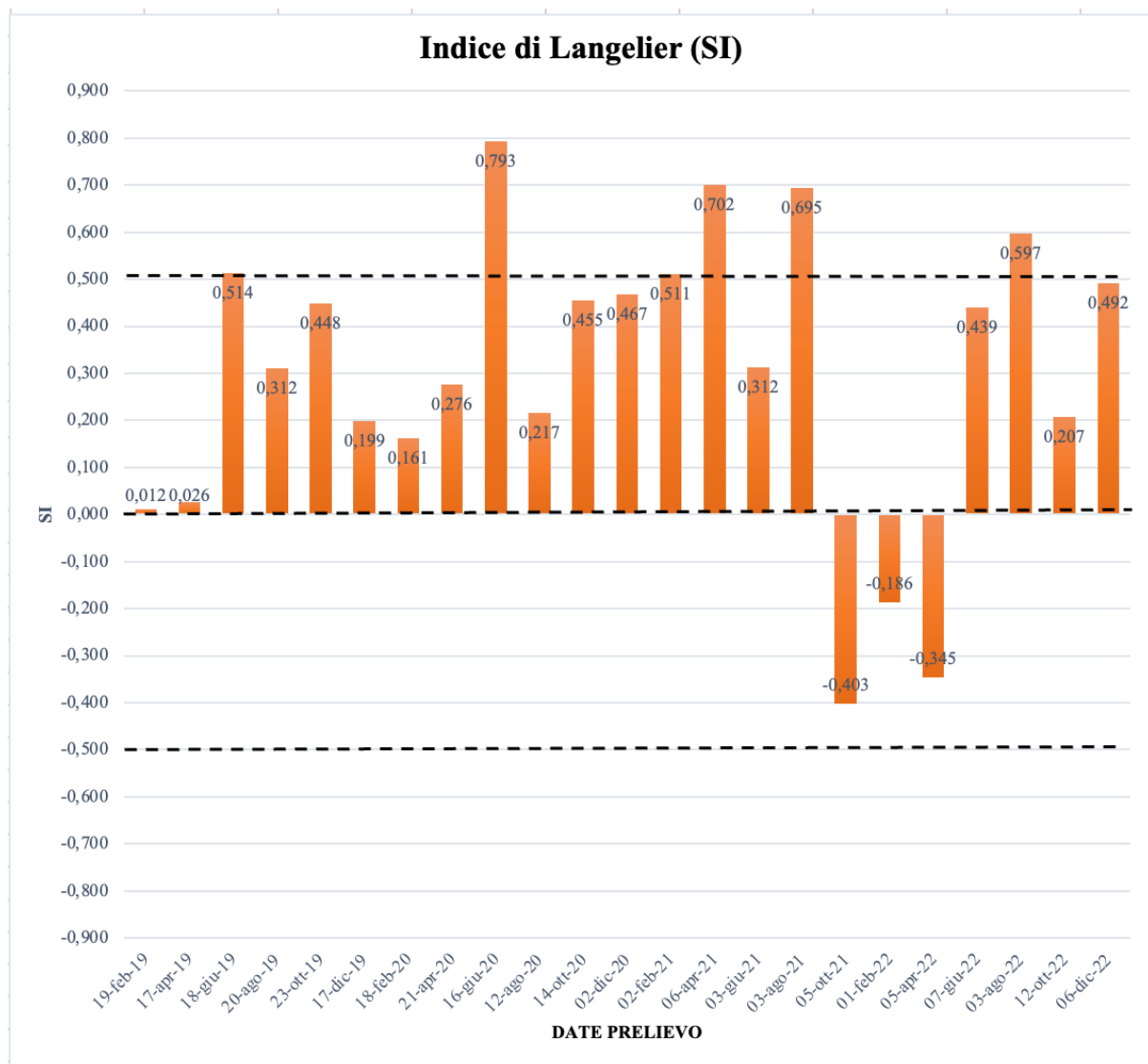


Figura 54” Grafico dell’andamento dell’indice di Langelier nella zona di Bologna sud”

Anche in questo caso non ci sono differenze significative. Infatti la maggior parte dei valori risultano essere all’interno del range di tolleranza adottato. Vi sono alcuni valori che risultano incrostanti, ma sono solo quattro. Molto meno rispetto all’altra zona. Inoltre rispetto all’area di Bologna ovest, si riscontrano tre valori negativi anche se sempre entro il range di $-0,5$. Ciò denota un andamento dell’acqua leggermente più aggressivo, con un valore relativo al prelievo del 5/10/21 che si avvicina al limite soglia con un valore di $-0,403$. Questo stato lo si può visualizzare anche dalla tabella dello stato tra l’acqua e la condotta che viene riportata di seguito.

DATA PRELIEVO	(SI)	STATO ACQUA-CONDOTTA
19/02/19	0,012	Equilibrio
17/04/19	0,026	Equilibrio
18/06/19	0,514	Equilibrio
20/08/19	0,312	Equilibrio
23/10/19	0,448	Equilibrio
17/12/19	0,199	Equilibrio
18/02/20	0,161	Equilibrio
21/04/20	0,276	Equilibrio
16/06/20	0,793	Debolmente incrostante
12/08/20	0,217	Equilibrio
14/10/20	0,455	Equilibrio
02/12/20	0,467	Equilibrio
02/02/21	0,511	Equilibrio
06/04/21	0,702	Debolmente incrostante
03/06/21	0,312	Equilibrio
03/08/21	0,695	Debolmente incrostante
05/10/21	-0,403	Equilibrio
01/02/22	-0,186	Equilibrio
05/04/22	-0,345	Equilibrio
07/06/22	0,439	Equilibrio
03/08/22	0,597	Equilibrio
12/10/22	0,207	Equilibrio
06/12/22	0,492	Equilibrio

Figura 55 "Stato acqua-condotta per la zona di Bologna sud"

Dal grafico si individuano tre valori negativi che però dalla tabella sono stati considerati in equilibrio, visto il range di tolleranza. Per quanto riguarda l'andamento generale risulta essere più in equilibrio rispetto al caso di Bologna ovest. Dunque dal primo indice considerato non si sono riscontrati degli andamenti molto diversi o quanto meno valori significativi che facciano pensare ad una qualche anomalia, nonostante si possano già notare delle piccole differenze date dal fatto che sono stati considerati valori reali puntuali e non delle medie annuali.

A questo punto si è passati al calcolo dell'indice di Ryznar, il quale è per l'appunto basato sulla stima degli stessi parametri. Il TDS, A, B, il pHs e i valori del calcio e dell'alcalinità totale. Per quanto riguarda l'area urbana di Bologna ovest questi sono i valori per ogni giorno in cui è stato effettuato il prelievo.

DATA PRELIEVO	Indice di Ryznar (RI)	STATO ACQUA-CONDOTTA
12/03/19	7,023	Aggressiva
11/04/19	7,306	Aggressiva
19/06/19	6,306	Equilibrio
26/08/19	6,351	Equilibrio
23/10/19	6,144	Debolmente incrostante
23/12/19	6,150	Debolmente incrostante
05/02/20	7,279	Aggressiva
01/04/20	7,346	Aggressiva
24/06/20	6,917	Debolmente aggressiva
03/08/20	7,292	Aggressiva
14/10/20	6,632	Equilibrio
02/12/20	7,515	Aggressiva
19/02/21	6,935	Debolmente aggressiva
28/04/21	6,686	Equilibrio
23/06/21	5,922	Incrostante
02/09/21	6,747	Debolmente aggressiva
09/11/21	7,380	Aggressiva
23/12/21	6,952	Debolmente aggressiva
03/06/22	7,031	Aggressiva
27/07/22	6,565	Equilibrio
31/08/22	5,815	Incrostante
13/10/22	6,458	Equilibrio
30/12/22	7,811	Aggressiva

Figura 56” Valori dell’indice di Ryznar nell’area di Bologna ovest e stato acqua-condotta”

Dai valori che sono stati calcolati, si è data anche qui la valutazione dello stato dell’acqua in funzione della condotta. Rispetto all’indice di Langelier si può notare come sia differente. Infatti si riscontra un’acqua più aggressiva, con valori che superano il range di trascurabilità tra 6 e 7, in cui si è nella zona di equilibrio. Di seguito si riporta il grafico:

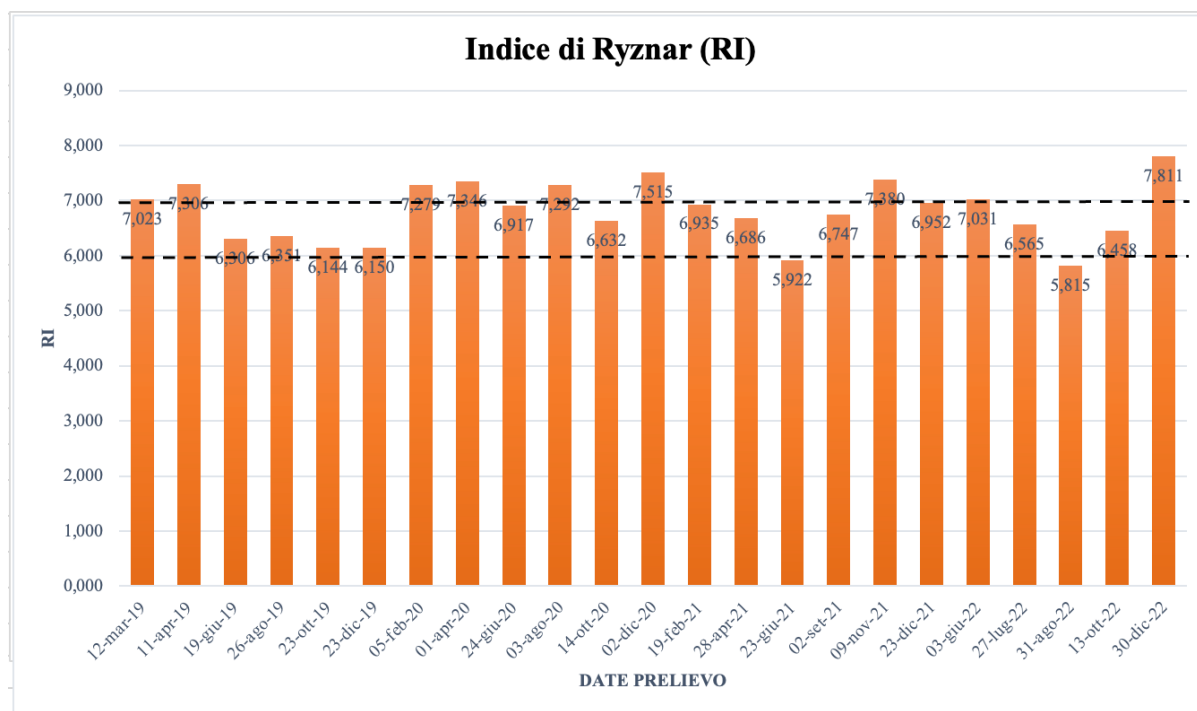


Figura 57” Grafico relativo all’indice di Ryznar nell’area di Bologna ovest”

Dal grafico è possibile visualizzare ancora meglio quanto stimato nella tabella soprastante. Infatti è possibile notare che diversi valori superano la soglia di 7. Inoltre nel giorno 30/12/22 il valore si avvicina ad 8, con 7,811, segno che in quel giorno molto probabilmente si aveva erosione. Mentre solo due valori risultano essere incrostanti, il 23/06/2021 e il 31/08/2022, con valori leggermente inferiori a 6. Tuttavia essendo un’analisi qualitativa giornaliera di casi specifici, non vanno considerati come preoccupanti, vista la minima entità. Infatti potevano essere legati al giorno preciso in cui potrebbero esserci stati dei lavori di rimozione o di pulizia delle condotte ed aver favorito un rilascio maggiore di sostanze o quanto meno influenzato alcuni parametri come il pH e l’alcalinità totale. Da queste cause potrebbe essere scaturito un maggiore stato di aggressività dell’acqua o viceversa un maggiore stato incrostante. La stessa cosa è possibile visualizzarla anche per l’altra area urbana analizzata.

DATA PRELIEVO	Indice di Ryznar (RI)	STATO ACQUA-CONDOTTA
19/02/19	7,476	Aggressiva
17/04/19	7,419	Aggressiva
18/06/19	6,622	Equilibrio
20/08/19	7,087	Aggressiva
23/10/19	6,763	Debolmente aggressiva
17/12/19	7,273	Aggressiva
18/02/20	7,387	Aggressiva
21/04/20	7,159	Aggressiva
16/06/20	5,914	incrostante
12/08/20	6,756	Debolmente aggressiva
14/10/20	6,779	Debolmente aggressiva
02/12/20	6,615	Equilibrio
02/02/21	7,007	Aggressiva
06/04/21	6,677	Equilibrio
03/06/21	7,216	Aggressiva
03/08/21	5,971	Incrostante
05/10/21	7,915	Molto aggressiva
01/02/22	7,681	Molto aggressiva
05/04/22	7,821	Molto aggressiva
07/06/22	6,812	Debolmente aggressiva
03/08/22	6,066	Debolmente incrostante
12/10/22	6,547	Equilibrio
06/12/22	6,886	Debolmente aggressiva

Figura 58” Valori dell’indice di Ryznar e stato acqua-condotta nell’area di Bologna sud”

La situazione è la stessa anche qua, si riscontrano diversi valori che differiscono, seppur non in maniera significativa, con quanto analizzato nei paragrafi precedenti. Anche qui si sono graficati tutti i valori per visualizzare meglio l’andamento.

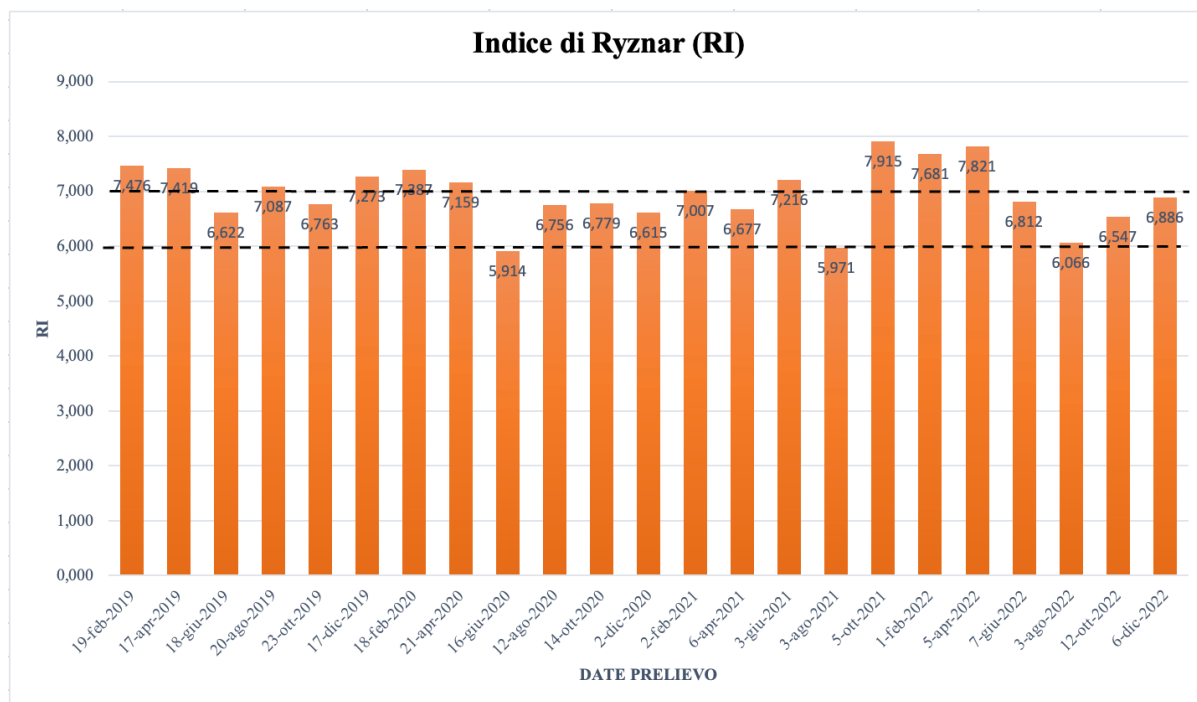


Figura 59” Grafico relativo all’indice di Ryznar nell’area di Bologna sud”

Con l’analisi dell’indice di Ryznar che, come detto in precedenza, è qualitativamente più preciso rispetto a Langelier, si può constatare un minore equilibrio e si rilevano delle zone con minore stabilità. A differenza dell’area ovest, i valori che vanno presi maggiormente in considerazione sono relativi al 5/10/21 che era un giorno in cui si è riscontrata aggressività dell’acqua anche con l’indice di Langelier ed in questo caso ha un valore abbastanza elevato, con 7,915. Ma anche altri due valori relativi al 1/02/2022 ed al 5/04/2022, risultano leggermente più bassi. Quindi si avvalora l’ipotesi di dover effettuare prelievi più frequenti e non basarsi solo su delle medie per poter valutare al meglio le varie situazioni così da riuscire a progettare l’intervento più idoneo al fine di rimuovere problemi di qualsiasi natura, qualora si presentassero situazioni critiche.

Ora passiamo al calcolo dell’indice di Larson-Skold. In questo caso dai valori medi per Bologna non si era riscontrato alcun tipo di instabilità, sia per quanto riguarda la corrosività che l’incrostazione. Di seguito si riportano i valori dell’indice calcolato per le due aree urbane di Bologna considerate e di cui si sono reperiti i dati di prelievo al giorno preciso. Si precisa che i parametri da cui dipendono sono diversi. Infatti sono le concentrazioni in milligrammi/litro di cloruri, solfati ed alcalinità totale. Pertanto si andrà ad effettuare un confronto per osservare se analizzando altri aspetti si riscontrano le medesime valutazioni.

Date prelievo	Indice di Larson (LI)
12/03/19	0,674
11/04/19	0,614
19/06/19	0,447
26/08/19	0,648
23/10/19	0,317
23/12/19	0,346
05/02/20	0,349
01/04/20	0,390
24/06/20	0,327
03/08/20	0,350
14/10/20	0,524
02/12/20	0,989
19/02/21	0,441
28/04/21	0,481
23/06/21	0,448
02/09/21	0,460
09/11/21	0,538
23/12/21	0,472
03/06/22	0,568
27/07/22	0,462
31/08/22	0,487
13/10/22	0,415
30/12/22	0,274

Figura 60'' Valori dell'indice di Larson nell'area di Bologna ovest''

Ora i valori appena trovati verranno graficati per renderli più chiaramente visibili.

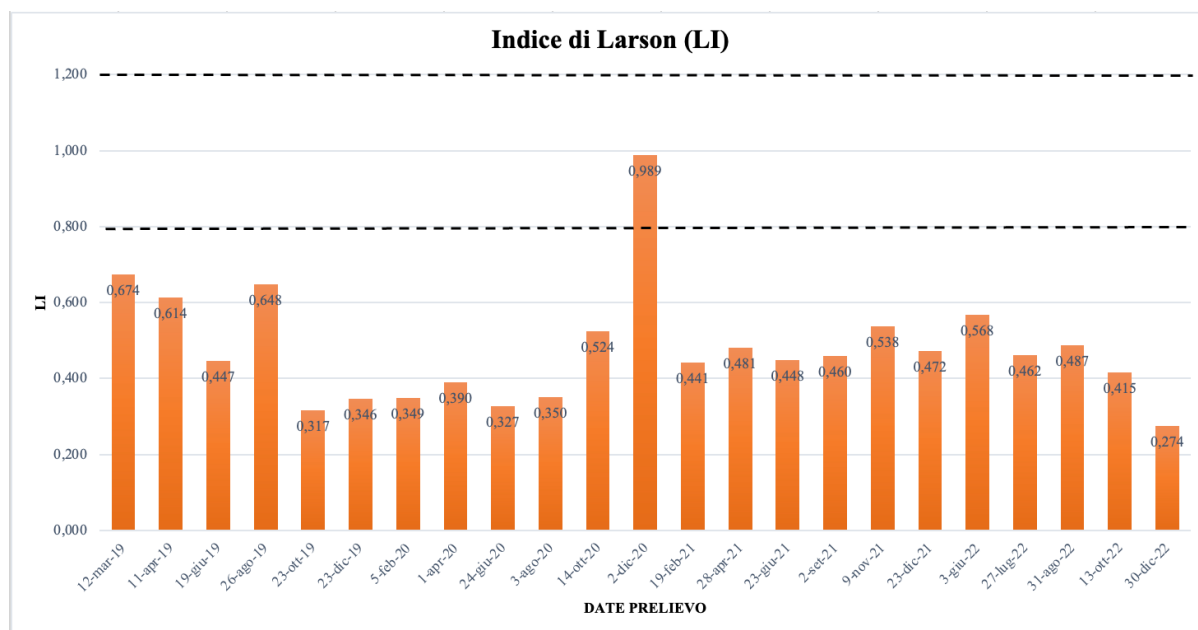


Figura 61” Grafico relativo ai valori dell’indice di Larson nell’area di Bologna ovest”

Da quello che si può notare i valori sono tutti ampiamente al di sotto della soglia di probabilità di corrosione che comincia da 0,8 e poi sopra 1,2 si ha maggiore certezza per la presenza di solfati e cloruri. Tuttavia nel giorno 02/12/20 si riscontra un valore di circa 1, segno che potrebbe esserci stata corrosione. La motivazione è difficile da determinare. Ma essendo un unico valore che si riferisce tra l’altro a qualche anno prima di quando sono state fatte le valutazioni, non è sicuramente indicativo. Anche alla luce del fatto che il valore dell’indice, al tempo in cui si sono analizzati i valori medi, era altamente al di sotto della soglia di corrosività. Ora esaminiamo l’altra area urbana e si riportano sia i valori che il grafico annesso agli andamenti dell’indice di Larson.

Date prelievo	Indice di Larson (LI)
19/02/19	0,369
17/04/19	0,707
18/06/19	0,444
20/08/19	0,370
23/10/19	0,387
17/12/19	0,390
18/02/20	0,402
21/04/20	0,369
16/06/20	0,359
12/08/20	0,413
14/10/20	0,551
02/12/20	0,452
02/02/21	0,500
06/04/21	0,486
03/06/21	0,522
03/08/21	0,410
05/10/21	0,382
01/02/22	0,483
05/04/22	0,557
07/06/22	0,470
03/08/22	0,466
12/10/22	0,439
06/12/22	0,470

Figura 62 “Valori dell’indice di Larson nella zona di Bologna sud”

Si riporta anche il grafico per analizzare gli andamenti e confrontarli con l’altra area urbana.

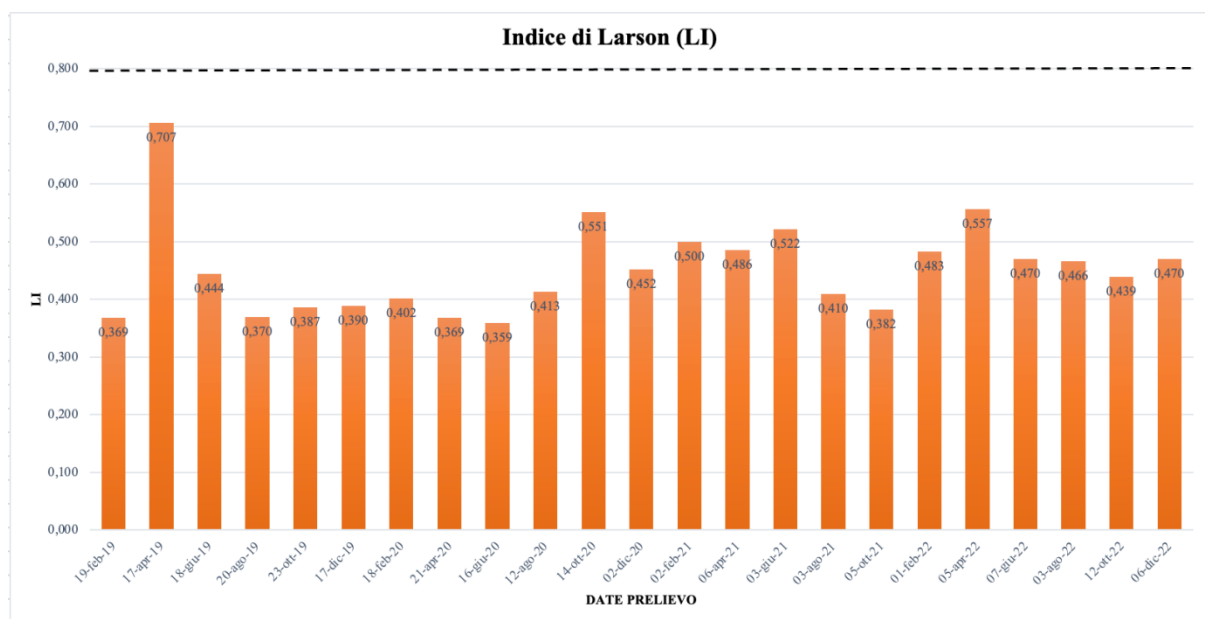


Figura 63” Grafico relativo ai valori dell’indice di Larson nell’area di Bologna sud”

Quello che è possibile osservare dal secondo grafico è che i valori riportati risultano essere al di sotto del range di probabilità di corrosione. Dunque a conferma di quanto detto in precedenza, salvo per quel valore al di sopra della soglia, i restanti valori sono tutti accettabili. Quindi secondo l'indice di Larson non vi è alcuna tipologia di corrosività da parte di solfati e cloruri, in accordo anche con quanto detto nell'analisi dei valori medi del caso studio di Bologna.

Ora passiamo al calcolo dell'ultimo indice considerato per l'analisi di valutazione delle condotte, ossia l'indice di aggressività (I.A.). Come già detto, la valutazione di questa tipologia di indice è propriamente legata all'aggressività o meno dell'acqua per condotte in cemento-amianto. Pertanto la sua valutazione ai fini della tesi è di fondamentale rilevanza. Andiamo ad esaminare gli andamenti, applicando gli indici alle due aree urbane. I parametri da considerare sono l'alcalinità totale, il pH e la durezza. Di seguito si riportano i valori dell'indice di aggressività ed il relativo grafico degli andamenti per le due aree considerate.

Date prelievo	Indice di aggressività (I.A.)
12/03/19	12,25
11/04/19	11,84
19/06/19	12,38
26/08/19	12,14
23/10/19	12,37
23/12/19	12,49
05/02/20	12,03
01/04/20	11,92
24/06/20	11,94
03/08/20	11,56
14/10/20	12,41
02/12/20	11,91
19/02/21	12,4
28/04/21	12,51
23/06/21	12,33
02/09/21	11,65
09/11/21	11,83
23/12/21	12,13
03/06/22	11,79
27/07/22	11,81
31/08/22	12,58
13/10/22	11,96
30/12/22	11,57

Figura 64 “Valori dell'indice di aggressività per ogni data di prelievo nell'area di Bologna ovest”

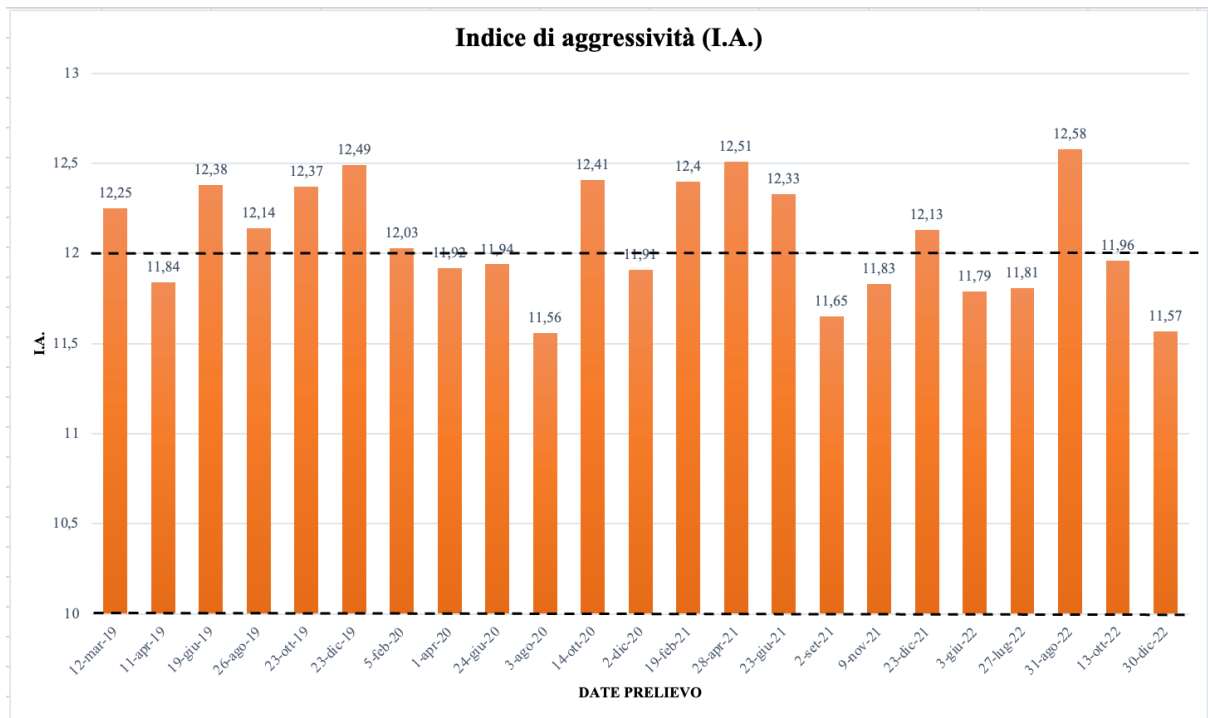


Figura 65” Grafico relativo all’andamento dell’indice di aggressività per la zona di Bologna ovest”

Come si può constatare dal grafico, l’andamento è sempre intorno al valore soglia di 12, nel quale l’acqua non risulta essere aggressiva e quindi non si hanno problemi di dispersione di fibre. I valori al di sotto possono essere trascurati, poiché tra 10 e 12 è un range in cui vi è solo probabilità di avere acqua aggressiva e comunque i valori sono tutti superiori a 11,5, quindi si è prossimi a 12.

Ora verranno presentati e discussi anche gli altri valori inerenti all’altra area urbana di Bologna.

Date prelievo	Indice di aggressività (I.A.)
19/02/19	11,85
17/04/19	11,76
18/06/19	12,06
20/08/19	11,86
23/10/19	12,09
17/12/19	12,08
18/02/20	11,94
21/04/20	11,98
16/06/20	12,43
12/08/20	11,79
14/10/20	12,11
02/12/20	12,24
02/02/21	12,35
06/04/21	12,45
03/06/21	11,92
03/08/21	12,34
05/10/21	11,23
01/02/22	11,67
05/04/22	11,46
07/06/22	11,98
03/08/22	12,21
12/10/22	11,9
06/12/22	12,24

Figura 66'' Valori dell'indice di aggressività per ogni data di prelievo nell'area di Bologna sud''

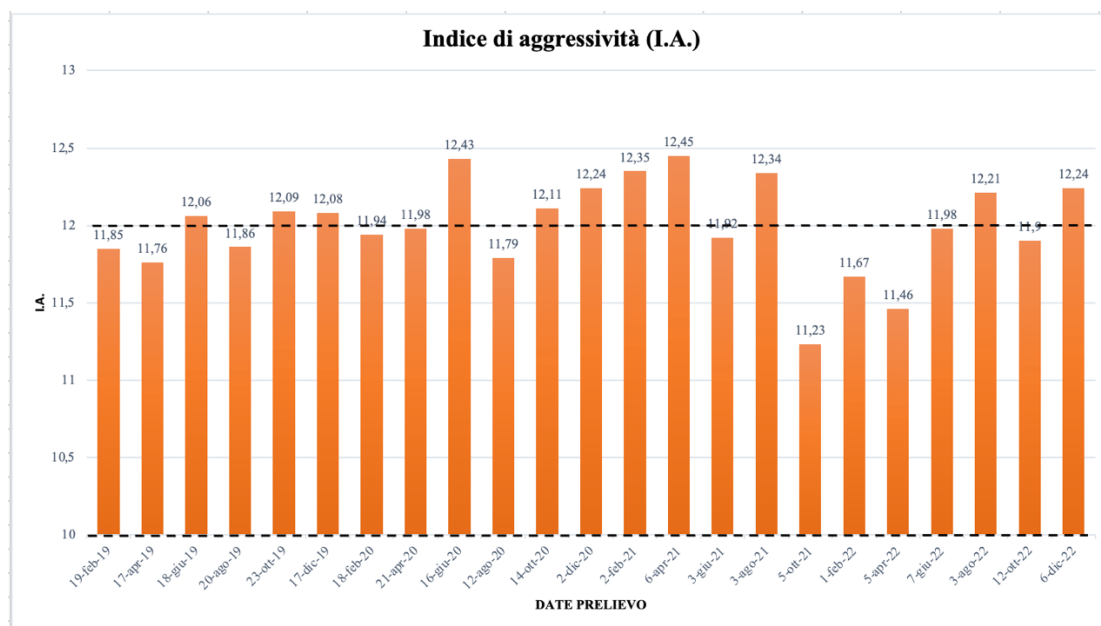


Figura 67'' Grafico relativo all'andamento dell'indice di aggressività per la zona di Bologna sud''

Da quello che si può notare anche con lo studio degli andamenti nella seconda area urbana in cui si sono svolti i calcoli, i valori risultano essere sempre intorno al valore soglia di 12. Quindi come è già stato detto, è normale che in un'ottica di valori medi si starà sempre entro la soglia di equilibrio. Anche qui i valori che sono al di sotto di 12 possono essere trascurati essendo comunque vicini. L'unico valore che risulta essere con maggiore probabilità indice di aggressività è quello riferito al prelievo del giorno 05/10/21. In quel giorno si aveva un valore di 11,23. Rispetto agli altri valori risulta essere leggermente più significativo, anche se non indicativo di certa aggressività, in quanto sarebbe dovuto risultare inferiore a 10. Tuttavia si può essere certi che in un'ottica più generale ed anche per quanto riguarda i valori medi, non vi sono mai problematiche di dispersione di fibre in concentrazioni preoccupanti.

7. CONCLUSIONI

Il fine ultimo della presente tesi è stato quello di stabilire lo stato delle condotte idriche prendendo in considerazione il caso studio di Bologna. Per farlo sono stati considerati sia valori medi che valori puntuali, per effettuare un confronto e per visualizzare meglio i diversi andamenti. Per quanto riguarda lo studio a partire dai valori medi, si sono voluti considerare anche i campionamenti effettuati da Hera in altre zone, così da avere più casi da confrontare. Inoltre la valutazione tramite gli indici di stabilità è di tipo qualitativo e non quantitativo. Sono stati analizzati i valori medi annuali e semestrali, sia per Bologna che per le altre città, dei parametri delle acque potabili da cui sono stati calcolati gli indici di stabilità. In particolare sono stati stimati gli indici di Langelier, di Ryznar, di Larson-Skold e di aggressività per ognuna delle città prese in considerazione. Si è riscontrato che i valori calcolati dell'indice di Langelier sono quasi sempre entro la soglia positiva di equilibrio di 0,5. Tali valori indicano che non vi erano casi di eccessiva aggressività. I valori sono per lo più al di sotto di 0,5, tranne che per Pesaro-Urbino e Cattolica, che presentano valori leggermente più elevati, rispettivamente di 0,833 e 0,728. Però, come già anticipato, la soglia di tolleranza secondo la letteratura può essere anche tra -1 e 1. Quindi anche se maggiori di 0,5 i valori erano molto vicini al limite minimo, denotando solo lievi tendenze a formare carbonato di calcio. Inoltre nessun valore è risultato essere minore di 0 e tanto meno di -0,5. Quindi non si è registrato alcun segno di aggressività dell'acqua. Per Bologna, i valori sono risultati sempre al di sotto della soglia di equilibrio anche variando la temperatura (10-20°C) pertanto è risultata sempre in equilibrio. Per quanto riguarda l'indice di Ryznar, si è visto come l'andamento fosse anche qui simile a quello riscontrato con l'indice di Langelier. Infatti i valori erano tutti entro il range di equilibrio, ossia tra 6 e 7. Solo il caso di Pesaro-Urbino, con un valore di 6,034, risultava al limite di incrostazione, quindi tendente ad incrostare. Per quanto riguarda l'indice di Larson, si sono viste anomalie solo per Modena e Sassuolo. Infatti in queste città si riscontrano da tempo elevate concentrazioni di solfati e cloruri. Pertanto è normale che risultino corrosive per parti metalliche dato che il calcolo dell'indice dipendeva da questi due parametri e dall'alcalinità totale. Per l'indice di aggressività, come ci si poteva aspettare, non si sono mai riscontrati andamenti anomali, con valori sempre al di sopra della soglia di aggressività di 12. Sono stati poi valutati i valori puntuali dei campionamenti effettuati in due aree di Bologna (Bologna ovest e Bologna sud). L'applicazione dell'indice di Langelier ha mostrato valori che superavano la soglia di 0,5, senza però mai superare 1, mentre si è riscontrato un solo valore negativo, trascurabile poiché molto vicino a zero. Quindi si sono rilevati solo deboli stati

incrostanti. Per quanto riguarda Bologna sud, i valori erano tutti entro lo 0,5, tranne per qualche valore. Tuttavia sono stati riscontrati in questo caso tre valori negativi, di cui uno al limite con -0,403 il giorno 5/10/2021. Dall'analisi dell'indice di Ryznar è risultato che i valori erano all'interno della soglia di equilibrio, con qualche valore che oscillava tra incrostante ed aggressività. A Bologna sud si sono trovati i valori di aggressività più elevati, con 7,915, 7,821 e 7,681. Il valore più elevato era sempre il giorno 5/10/2021, come visto per Langelier. Nei parametri in gioco per il calcolo non si sono riscontrate grosse anomalie, se non che in quel giorno l'acqua aveva un pH abbastanza basso ed un pHs, tra i più elevati. Tuttavia non si sono individuati altri dettagli e i fattori che potrebbero aver influenzato l'indice sono molteplici e di non facile determinazione con le informazioni che si hanno. Inoltre si è notato che la temperatura che influenzava la capacità incrostante era di 18 °C, valore che rientra nella normalità. Quindi è possibile concludere che le anomalie dell'indice di Ryznar sono da ricercare in altri fattori con analisi più approfondite. Passando all'indice di Larson, si è riscontrato un unico valore al di sopra della soglia di corrosività nella zona di Bologna ovest, segno probabilmente che in quel giorno la concentrazione di solfati e cloruri era alta. Considerando l'indice di aggressività sono stati riscontrati valori al di sotto del valore di soglia di aggressività, per entrambe le aree di Bologna analizzate. Infatti si riscontrano valori tra 11,5 e 12, che denotano una leggera tendenza all' aggressività. Comunque sono valori molto vicini al limite e quindi non risultano preoccupanti. Tuttavia per quanto riguarda l'area di Bologna sud, sono risultati due valori vicini alla soglia di 11. Precisamente nei giorni 5/10/2021 e 5/09/2022, con dei valori rispettivamente di 11,23 e 11,46. Quindi il valore più basso risulta essere sempre nel giorno 5/10/21 e nella zona di Bologna sud, come si era riscontrato anche dal calcolo con gli indici di Langelier e Ryznar. Questa tendenza che si è individuata e di cui non si è capita con chiarezza la causa porta alla conclusione che è necessario effettuare controlli e analisi più frequenti e sistematici nella zona di Bologna sud. In conclusione è stato possibile stabilire che per effettuare una più efficace valutazione dello stato delle condotte idriche in cemento-amianto, non ci si può solo basare sull'indice specifico, ossia l'indice di aggressività. Ma è utile valutare anche tramite l'utilizzo degli altri indici dal momento che fanno riferimento a dei parametri diversi che però possono influenzare il deterioramento nel tempo delle condotte in cemento-amianto. Quindi questo confronto serve per dare una valutazione più completa. Infatti è proprio da questa analisi preliminare che si possono poi stabilire eventuali interventi di rimozione laddove vi sia necessità.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Letizia Bisi, (2017) Casale Monferrato: “riflessioni sui processi di bonifica e riqualificazione della fabbrica Eternit e del quartiere Ronzone” -Tesi di laurea Magistrale-Università degli studi di Torino
- 2) Mirco Tavernelli, (2011) “Analisi delle rotture nelle tubazioni delle reti acquedottistiche” -Tesi di Laurea-Università degli studi di Bologna-DICAM
- 3) Federica Paglietti, Sergio Bellagamba, Sergio Malinconico, Beatrice Conestabile della Staffa, Paolo de Simone, Elisa Santurri, 2014, “Classificazione e gestione dei rifiuti contenenti amianto”, istruzioni operative dell’Inail ai fini della tutela della salute e sicurezza dei lavoratori e degli ambienti di vita” - Inail
- 4) Antonio Princigallo, “Proprietà elettriche e dielettriche di leganti idraulici e applicazione delle microonde nella maturazione accelerata di materiali cementizi” -tesi di dottorato di ricerca in ingegneria dei materiali- sede amministrativa-politecnico di Milano-sede operativa-Università degli studi di Pisa
- 5) Martina Avenoso, (2020-2021),” Il degrado dei materiali lapidei naturali: confronto fra soluzioni consolidanti e contestualizzazione dei requisiti dell’intervento di consolidamento tramite l’analisi critica di casi studio” -Tesi di laurea Magistrale-politecnico di Torino
- 6) Gianfranco Finzi Ugo Luigi Aparo Paolo Cacciari Gabriele Pelissero Alessandro Finzi Daniele Nepa Stefania Villani,” Le acque in ambito sanitario: caratteristiche, usi, problematiche e indicazioni sulle metodologie di controllo”, Edicom-Milano
- 7) Gazzetta ufficiale dell’Unione europea, 2001, Decreto legislativo 2 febbraio 2001 n. 31, "Attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualita' delle acque destinate al consumo umano"
- 8) “durezza dell’acqua per via idrotimetrica “su chimica.unige.it, università degli studi di Genova-URL consultato il 1° ottobre 2014 (archiviato dall'url originale il 6 ottobre 2014).
- 9) G. Chiappino, I. Venerandi, (1991) “L’erosione delle coperture in cemento amianto: un’importante sorgente d’inquinamento ambientale” la Medicina del lavoro
- 10) Matteo Vergani, (2009-2010) “Modellazione del degrado di strutture in calcestruzzo armato soggette a corrosione” - corso di laurea magistrale in ingegneria civile ambientale e territoriale-politecnico di Milano

- 11) Mapei Spa, “Il degrado del calcestruzzo”
- 12) Bacchetta Adriano Paolo, “le istruzioni operative Inail e la loro interpretazione”, iris acqua, acqua: un futuro da costruire
- 13) Aimag spa, Italo Melchiorre, 2013, “Presenza di fibre di amianto nell’acqua distribuita dall’acquedotto di carpi: cause e rimedi” provincia di Modena
- 14) Università degli studi di Bari, Aldo Moro, (2015), “Modalità e mezzi per la sterilizzazione, la disinfezione e la disinfestazione” -dipartimento di scienze biomediche e oncologia umana, sezione igiene
- 15) Shiping Wei, Zhenglong Jiang, Hao Liu, Dongsheng Zhou, Mauricio Sanchez-Silva, 2013, “Microbiologically induced deterioration of concrete”, 1School of Marine Sciences, China University of Geosciences, Beijing, China. 2Department of Civil and Environmental Engineering, Universidad de Los Andes, Bogota, Colombia.
- 16) Vincenzo Calvo, Elisabetta Scalora, 2015, “Il degrado dei materiali da costruzione”, materiali lapidei naturali ed artificiali, calcestruzzo, acciaio e legno, Grafil
- 17) New foundland labrador, 7/11/2023, “Langelier index summary for public water supplies in new foundland and Labrador”, water resources management division
- 18) Giovanni Buzzanca, Gian Maria Quaglia, Lucia Torri, (1994) “Il fenomeno della corrosione dei materiali metallici utilizzati nelle reti acquedottistiche”, biocorrosione - Cise-Milano
- 19) “Langelier and Aggressive Indices”, Method 8073
- 20) Hach Company/Hach Lange GmbH, 2015-2017 “Determination of Langelier Index in water” DOC316.52.93108
- 21) Arpa Emilia-Romagna, 2011, “Determinazione qualitativa e quantitativa delle concentrazioni di fibre di amianto in acque destinate al consumo umano, mediante la tecnica della microscopia elettronica a scansione”
- 22) ECOSCIENZA n.3, (2014), “La ricerca di amianto nelle acque potabili”, capuano et al.
- 23) H. Schreier, 1989, “Asbestos in the natural environment/Studies in environmental science 37-Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo-Department of Soil Science and Westwater Research Centre, University of British Columbia, Vancouver, B.C. V6T 2A2, Canada

- 24) Massimo Ottaviani e Lucia Bonadonna, Rapporti Istisan, 03/31, “Metodi analitici di riferimento per le acque destinate al consumo umano ai sensi del Dl. vo 31/2001”, istituto superiore di sanità
- 25) Giosuele Prò, 2019/2020, “Degrado delle opere portuali in C.A & C.A.P Bacino alti fondali: porto di Manfredonia”, Politecnico di Torino, laurea Magistrale in ingegneria Civile
- 26) Salvatore Raimondi, 2014, “Vino e ambiente: sostenibilità e qualità primaria nel sottobacino Iudeo-Bucari (TP), Palermo, Dipartimento di scienze agrarie e forestali, la cantina UVAM
- 27) Stevano Andrea, 2016/2017,” Analisi di sicurezza nelle attività di taglio delle tubazioni in cemento amianto delle reti idriche”, tesi di Laurea Magistrale in ingegneria della prevenzione e della sicurezza nell’industria di processo, Politecnico di Milano,

SITOGRAFIA

- I. <https://www.sipotra.it/wp-content/uploads/2019/03/Utilitalia.pdf>
- II. <http://www.ruwa.it/site/ciclo-integrato-delle-acque>
- III. https://it.wikipedia.org/wiki/Equazione_di_Bernoulli
- IV. <https://it.wikipedia.org/wiki/Amianto>
- V. <https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/amianto-polveri-e-fibre/scopri-di-piu/cose-lamianto>
- VI. https://puntoamianto.com/portfolio_page/amianto-o-asbesto/
- VII. <https://www.arpa.vda.it/it/amianto/le-coperture-di-cemento-amianto>
- VIII. <https://www.encosrl.it/resistenza-meccanica-del-calcestruzzo/>
- IX. http://2.228.19.88/censimento_amianto/home/materiale_sito/services/services.htm#:~:text=L'amianto%20%C3%A8%20resistente%20al,lega%20facilmente%20con%20altri%20materiali
- X. <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp61-c4.pdf>
- XI. https://inspectapedia.com/hazmat/Asbestos_Properties_Chemical.php
- XII. <https://www.ecolseasrl.it/amianto-tubature-rischi-ecol-sea/>
- XIII. <https://www.pipsisland.com/what-is-asbestos-cement-pipe/>
- XIV. <https://www.inabottle.it/it/benessere/acqua-potabile-qualita-valori-differenza-con-acqua-minerale-naturale>
- XV. https://www.indam.it/fileadmin/user_upload/tabelle/INDAM_acque_potabili.pdf
- XVI. <https://web.uniroma1.it/dicmalab/sites/default/files/allegati/durezza.pdf>
- XVII. <https://www.chimica-online.it/download/durezza-totale-temporanea-permanente.htm>
- XVIII. [https://www.santanna.it/il-bicchiere-mezzo-pieno/la-durezza-dellacqua/#:~:text=La%20durezza%20dell'acqua%20%C3%A8,e%20solfato%20magnesi%20\(MgSO4\).](https://www.santanna.it/il-bicchiere-mezzo-pieno/la-durezza-dellacqua/#:~:text=La%20durezza%20dell'acqua%20%C3%A8,e%20solfato%20magnesi%20(MgSO4).)
- XIX. https://www.wikiwand.com/it/Durezza_dell'acqua
- XX. [http://www.dica.unict.it/users/prossi/Files/Files%20Progetto/Lezione%2012%20%20Strutture%20\(Materiale%20Conglomerato%20Cementizio\).pdf](http://www.dica.unict.it/users/prossi/Files/Files%20Progetto/Lezione%2012%20%20Strutture%20(Materiale%20Conglomerato%20Cementizio).pdf)
- XXI. <https://www.encosrl.it/ettringite-dott-jekyll-e-mr-hyde/#:~:text=Da%20un%20punto%20di%20vista,A12O3%E2%80%A23CaSO4%E2%80%A232H2O>

- XXII. <https://www.brignone-ediliziaspecializzata.it/carbonatazione-il-male-occulto-del-cemento-armato/>
- XXIII. <https://en.wikipedia.org/wiki/Thaumasite>
- XXIV. <https://rockidentifier.com/it/wiki/Thaumasite.html>
- XXV. <https://idraulica.caleffi.com/articolo/inconvenienti-tipici-ad-impianti-funzionanti>
- XXVI. <https://www.nurse24.it/oss/risorse-oss/decontaminazione-disinfezione-affinita-differenze.html>
- XXVII. <https://corrosion-doctors.org/Cooling-Water-Towers/Index-Lang-calcul.htm>
- XXVIII. <https://www.corrosionpedia.com/definition/6672/ryznar-index-rsi>
- XXIX. <https://www.diecastingpartsupplier.com/it/news/what-is-mild-steel.html>
- XXX. <https://support.hach.com/myhach/s/article/KA-it-IT-TE779-1028268?language=it#:~:text=1%20mg%2FL%20%3D%201%20parte,1%2C8%20ppm%20di%20cloro.>
- XXXI. <https://www.gruppohera.it/gruppo/sostenibilita/non-solo-bilancio-di-sostenibilita/in-buone-acque/dati-qualita-acqua>
- XXXII. <https://www.hte-engineering.com/analisi-sem>
- XXXIII. <https://www.gruppohera.it/offerte-e-servizi/casa/acqua/che-acqua-bevi>
- XXXIV. <https://hydro-land.com/e/docen/local/Indice-Ryznar.html>
- XXXV. <https://it.hach.com/parameters/dissolved-oxygen>
- XXXVI. https://www.umass.edu/mwwp/protocols/lakes/oxygen_lake.html#:~:text=For%20example%2C%20if%20you%20measured,percent%20saturation%20would%20be%2054%25.
- XXXVII. <https://www.nussbaum.ch/it/t/tematiche/igiene-dellacqua-potabile-la-soluzione-e-limpianto/principi-e-requisiti/6-2.html>
- XXXVIII. https://temi.camera.it/leg18/post/OCD15_14621/la-normativa-materia-amianto.html
- XXXIX. https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_pubblicazioni_1945_allegato.pdf
- XL. <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2008;81>
- XLI. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2668/oj>
- XLII. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020L2184>
- XLIII. <https://www.parlamento.it/parlam/leggi/deleghe/01031dl.htm>