

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Chimica e dei Materiali

Relazione per la prova finale

**SVILUPPO DI UN MODELLO DELLA
CONDUCIBILITÀ ELETTRICA DELL'ACQUA
IN RELAZIONE AI FENOMENI DI
PRECIPITAZIONE**

Tutor Universitario:
Prof.ssa Martina Roso

Tutor Aziendale:
Ing. Denis Polato

Laureando:
Lucio Neri

Matricola:
2042454

Padova, 04/11/2025

PRESENTAZIONE DELL'AZIENDA

CAREL INDUSTRIES S.p.A. è una multinazionale italiana leader mondiale nelle soluzioni di controllo per condizionamento, refrigerazione e riscaldamento e nei sistemi per l'umidificazione e il raffrescamento adiabatico



Il tirocinio si è svolto presso il dipartimento R&D Humidification, all'interno del progetto di sviluppo di un Digital Twin di un umidificatore ad elettrodi immersi

UMIDIFICATORE AD ELETTRODI IMMERSI

Nel cilindro ebollitore sono alloggiati degli elettrodi immersi in acqua ai quali viene applicata una tensione elettrica

L'acqua viene attraversata dalla corrente elettrica e si riscalda per effetto Joule fino ad arrivare ad ebollizione

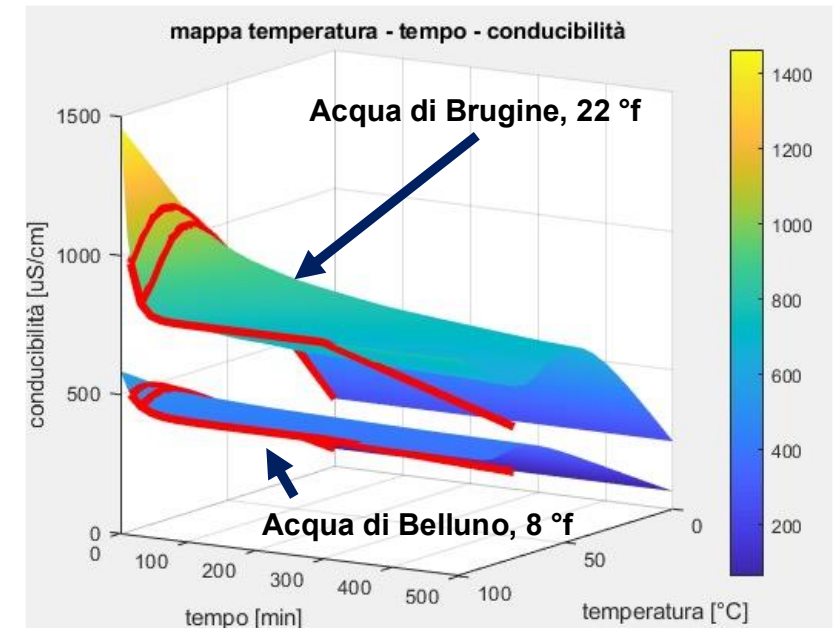
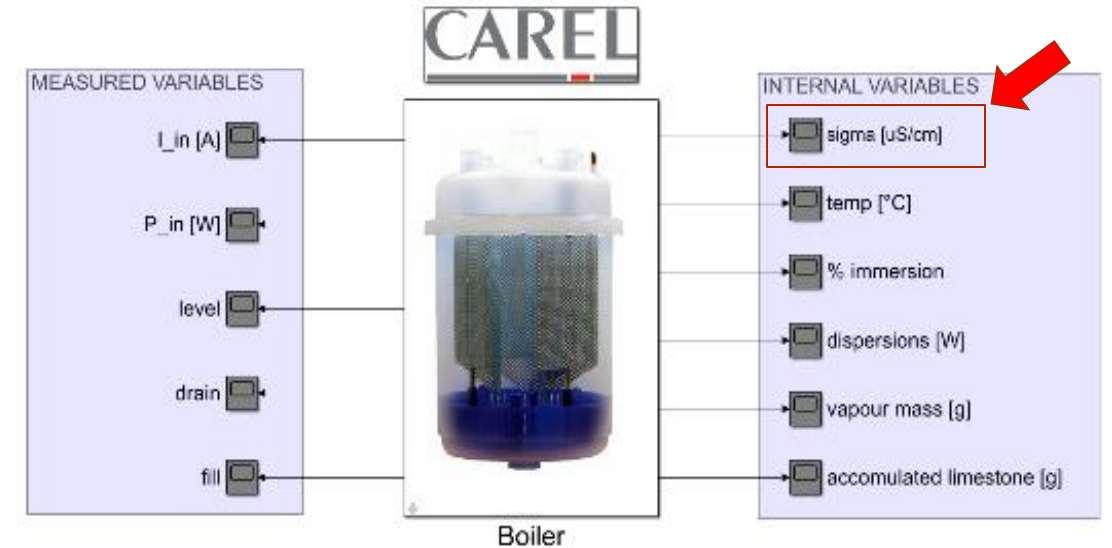
Il volume di vapore prodotto dipende dall'intensità della corrente circolante che è influenzata a sua volta da:

- Immersione e geometria degli elettrodi
- Conducibilità specifica dell'acqua « κ »

DIGITAL TWIN

Gli obiettivi che si vogliono raggiungere con il DT dell'umidificatore ad elettrodi immersi riguardano:

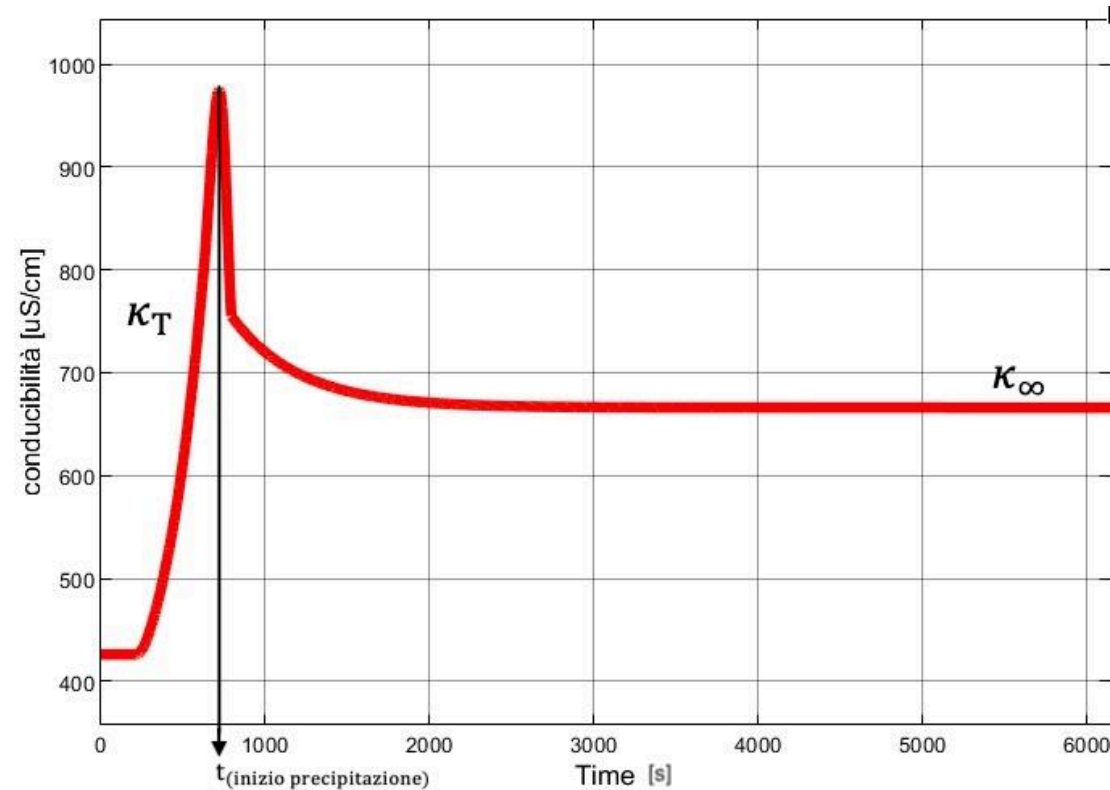
- La stima della vita utile del cilindro
- L'ottimizzazione degli interventi di manutenzione
- La riduzione dei tempi di test in laboratorio in fase di sviluppo del prodotto



Obiettivi :

- Calcolo di κ_T
- Calcolo di κ_∞

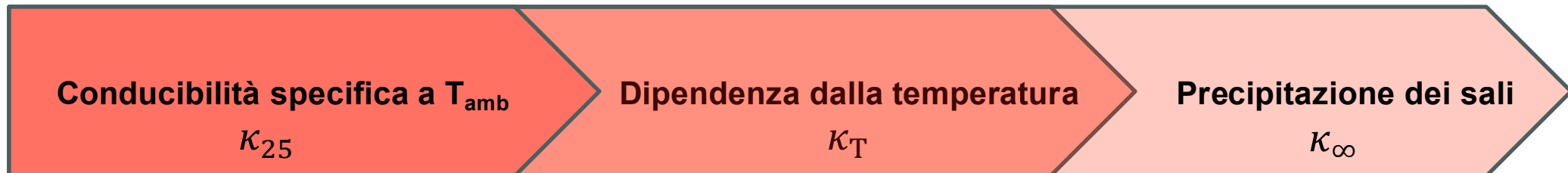
È stato richiesto un margine di errore relativo massimo del 15% tra la previsione del modello e i dati sperimentali



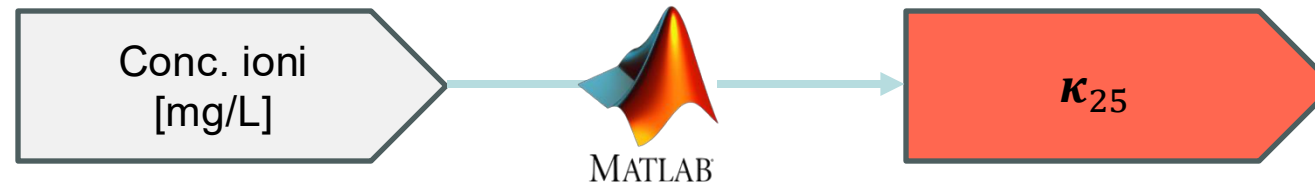
Curva che descrive l'andamento della conducibilità specifica con il tempo durante il riscaldamento di un campione di acqua della rete idrica di Brugine*

*in assenza di evaporazione

SVILUPPO DEL MODELLO



PRIMA FASE: CALCOLO DELLA CONDUCIBILITÀ A 25°C



CARATTERISTICHE DI QUALITA' DELL'ACQUA DI BRUGINE 4° TRIMESTRE 2024

calcio	mg/l	60,2
magnesio	mg/l	21,2
sodio	mg/l	3,0
potassio	mg/l	< 1
cloruri	mg/l	8
nitrato (come NO ₃)	mg/l	13
solforati	mg/l	16
bicarbonati	mg/l	293
ammonio	mg/l	< 0,05
nitrito (come NO ₂)	mg/l	< 0,05
fluoruri	mg/l	0,13

DIPENDENZA DELLA CONDUCIBILITÀ DALLA CONCENTRAZIONE

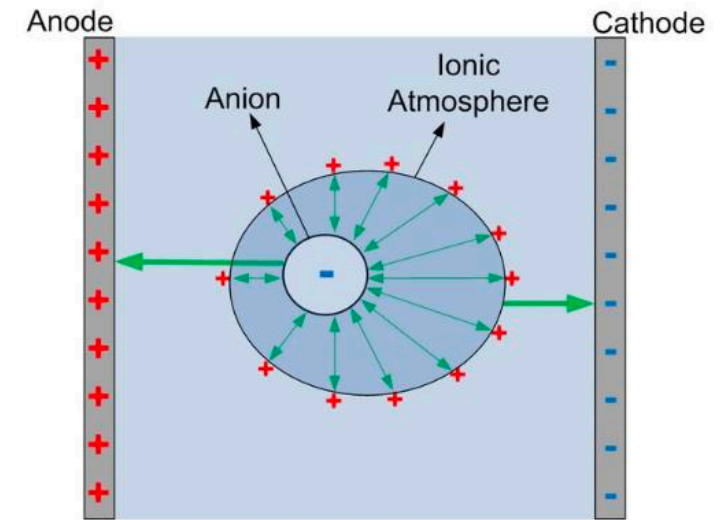
Bisogna tenere conto dell'effetto elettroforetico e di quello di rilassamento

LEGGE LIMITE DI DEBYE-HÜCKEL-ONSAGER

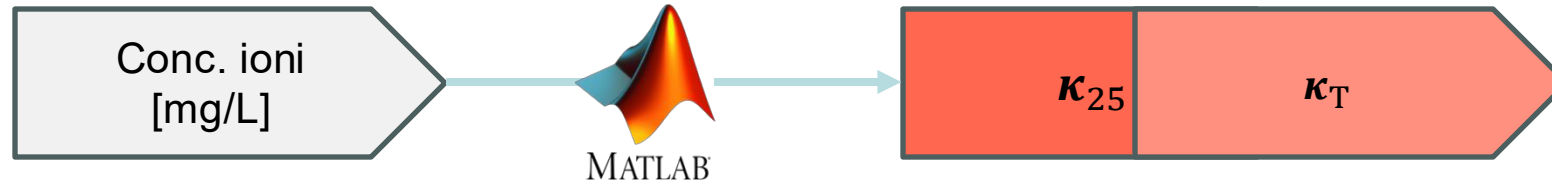
$$\lambda_{eq,i} = \lambda_{eq,i}^0 - \left[\frac{2,801 \cdot 10^6 |z_+ z_-| q \lambda_{eq,i}^0}{3(\epsilon T)^{3/2} (1 + \sqrt{q})} + \frac{41,25 |z_i|}{\eta(\epsilon T)^{1/2}} \right] \cdot \frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}}$$

Dove I è la forza ionica della soluzione e q è il coefficiente medio di rilassamento per soluzioni con più elettroliti:

$$I = \frac{1}{2} \sum_i z_i \frac{\text{concMEQ}}{1000}$$



SECONDA FASE: DIPENDENZA DELLA CONDUCIBILITÀ DALLA TEMPERATURA



EQUAZIONE DI NERNST-EINSTEIN

$$\lambda_{eq,i}^0 = \frac{z_i F^2}{RT} D_{w,i}$$

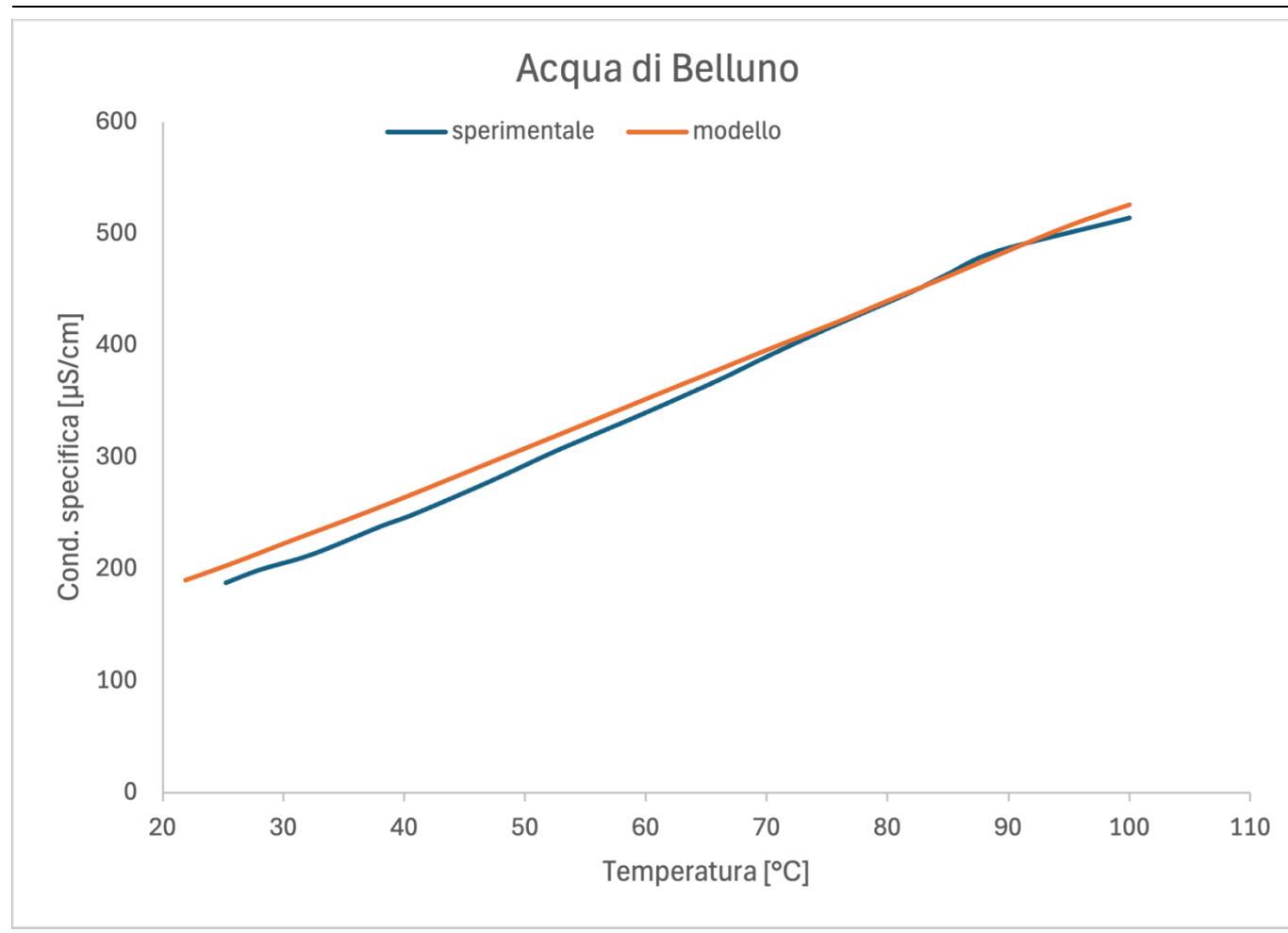
LEGGE LIMITE DI DEBYE-HÜCKEL-ONSAGER

$$\lambda_{eq,i} = \lambda_{eq,i}^0 - \left[\frac{2,801 \cdot 10^6 |z_+ z_-| q \lambda_{eq,i}^0}{3(\epsilon T)^{3/2} (1 + \sqrt{q})} + \frac{41,25 |z_i|}{\eta(\epsilon T)^{1/2}} \right] \cdot \frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}}$$

	Sperimentale κ_{25} [$\mu\text{S/cm}$]	Modello κ_{25} [$\mu\text{S/cm}$]	%error
Belluno	203	202	0,5
Dolomia	228	229	0,4
Panna	251	255	1,6
Norda	266	271	1,9
Rocchetta	339	326	3,8
San benedetto	469	469	0,0
Brugine	481	486	1,0
Vitasnella	664	681	2,6
San gemini	1411	1525	8,1
Ferrarelle	1976	2050	3,7

	Sperimentale κ_{80} [$\mu\text{S/cm}$]	Modello κ_{80} [$\mu\text{S/cm}$]	%error
Belluno	462	446	3,5
Dolomia	522	499	4,4
Panna	576	544	5,6
Norda	609	587	3,6
Rocchetta	748	697	6,8
San Benedetto	1077	1008	6,4
Brugine	1095	1042	4,8
Vitasnella	1465	1452	0,9
San gemini	3220	3195	0,8
Ferrarelle	4250	4271	0,5

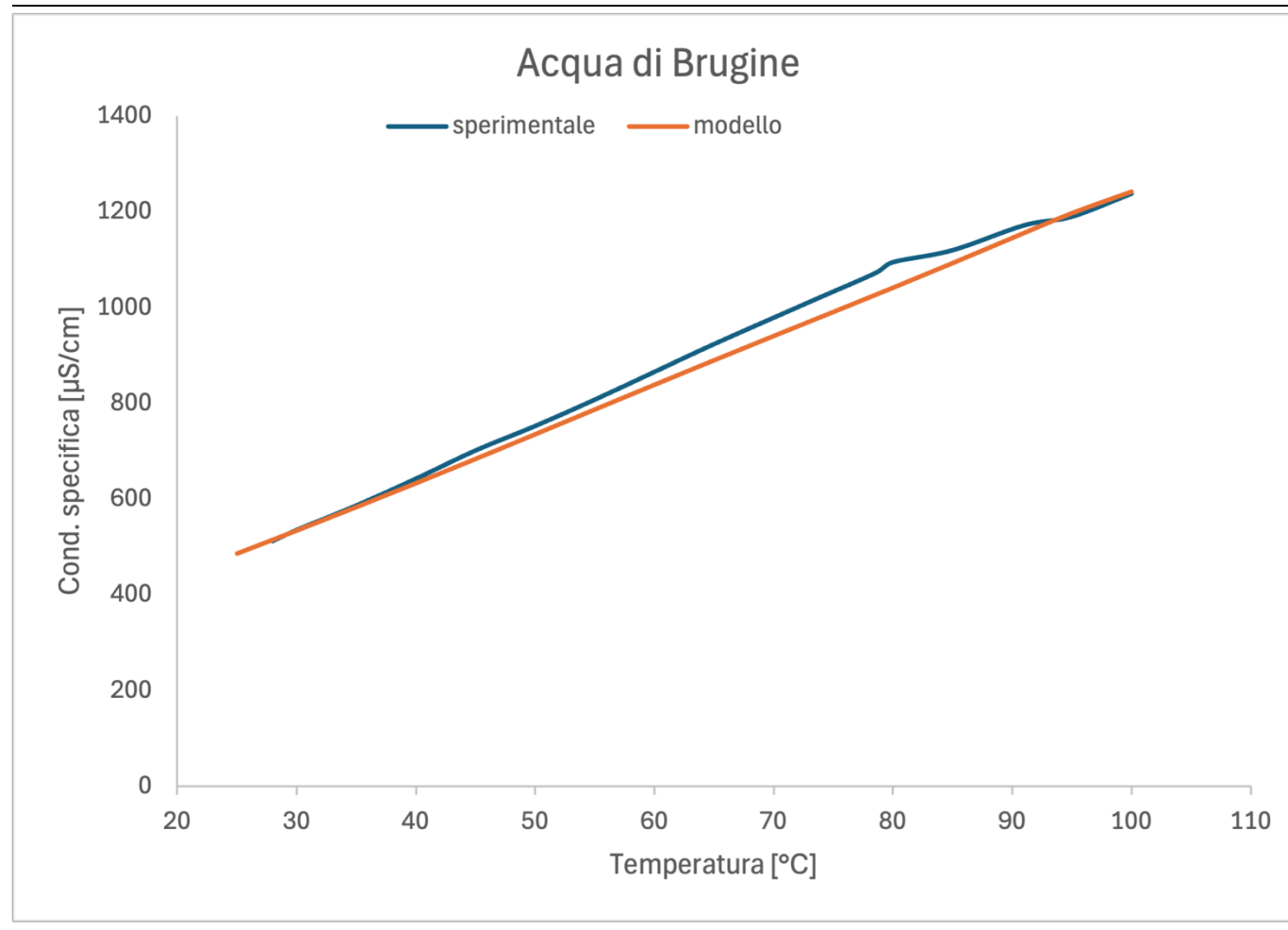
CONFRONTO TRA VALORI SPERIMENTALI E PREVISIONI DEL MODELLO



Errore relativo
percentuale
massimo: **8,9%**



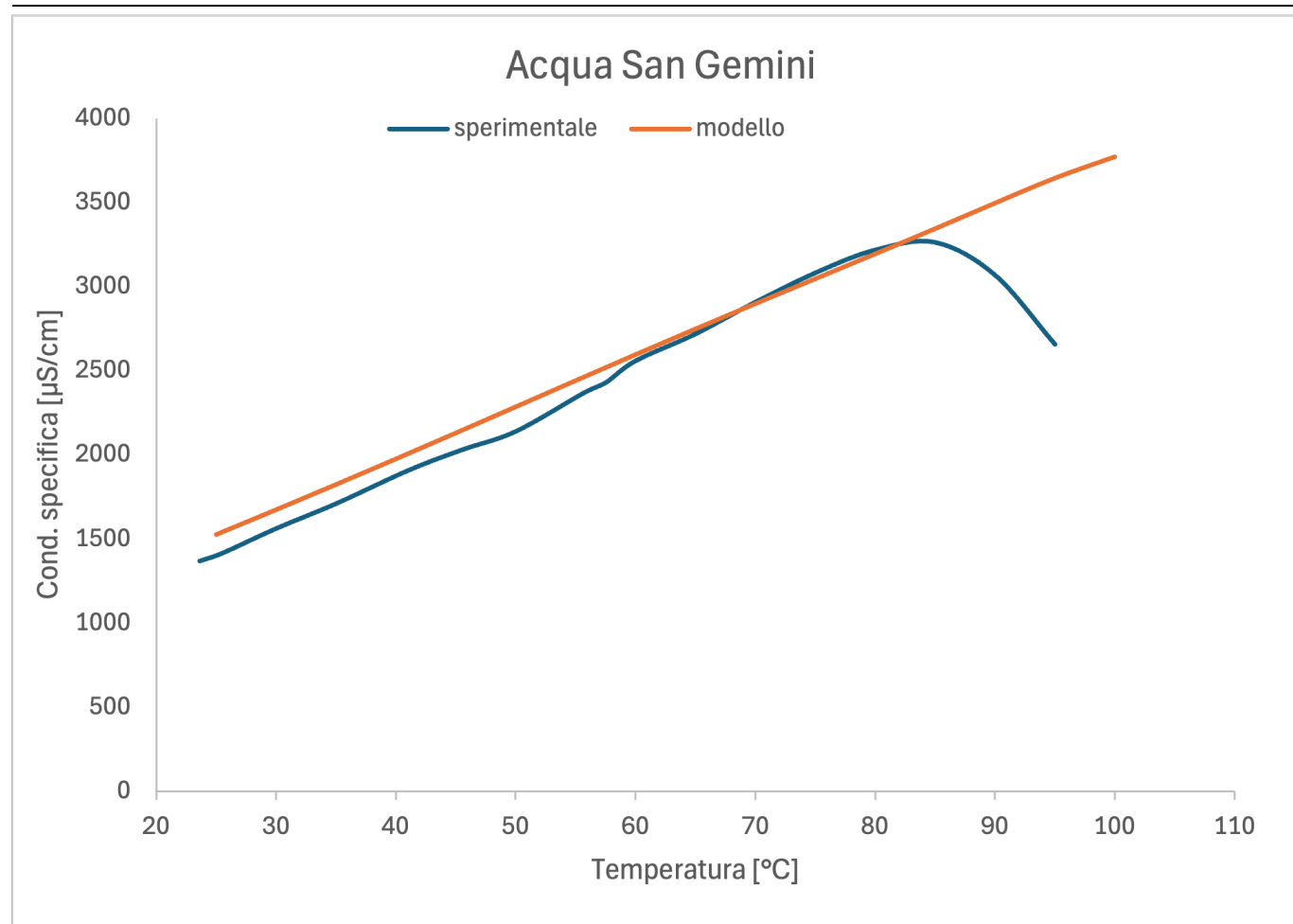
CONFRONTO TRA VALORI SPERIMENTALI E PREVISIONI DEL MODELLO



Errore relativo
percentuale
massimo: **4,7%**



CONFRONTO TRA VALORI SPERIMENTALI E PREVISIONI DEL MODELLO

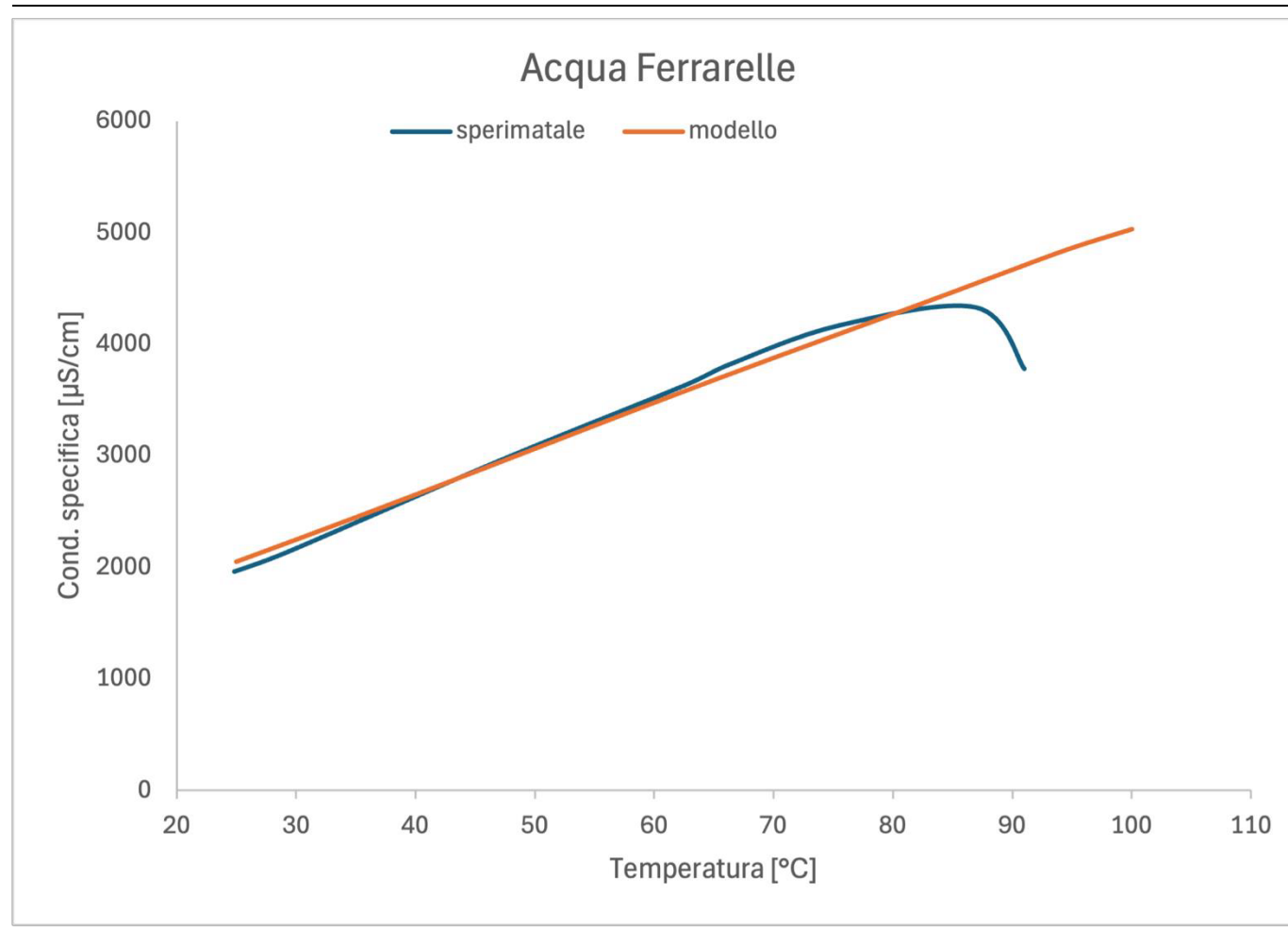


Errore relativo
percentuale
massimo*: **8,7%**

*per $T \leq 80^\circ\text{C}$



CONFRONTO TRA VALORI SPERIMENTALI E PREVISIONI DEL MODELLO



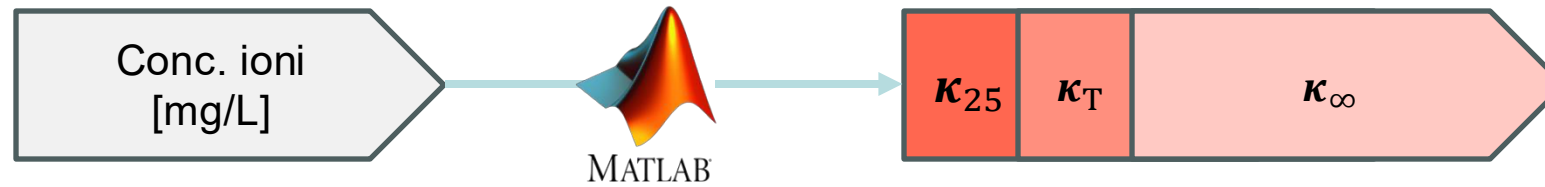
Errore relativo
percentuale
inferiore al 9% per
tutte le tipologie di
acqua

Errore relativo
percentuale
massimo*: 4,0%

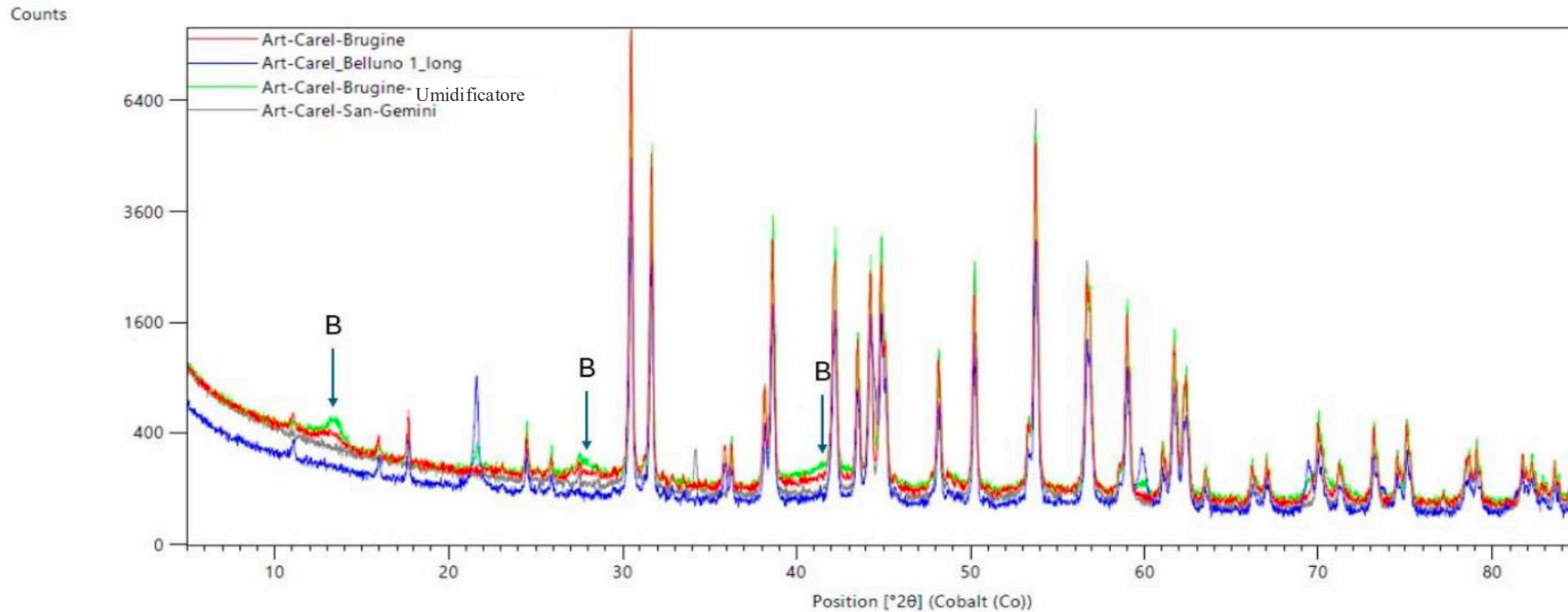
*per $T \leq 80^{\circ}\text{C}$



TERZA FASE: PRECIPITAZIONE DEI SALI



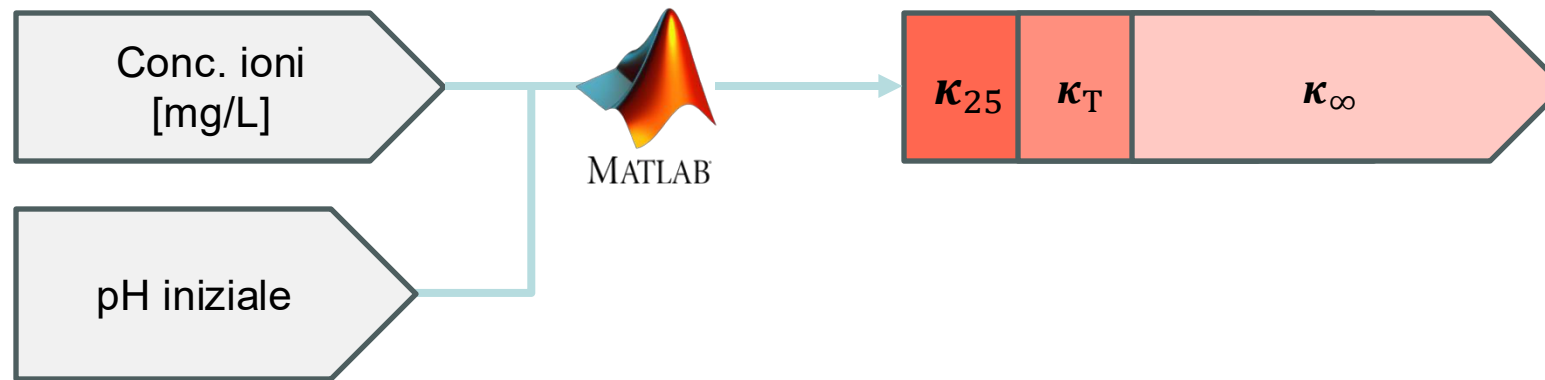
ANALISI SUL PRECIPITATO XRPD



Tab. 2. Risultati dell'analisi quantitativa mediante full-profile fitting. *In frazioni ponderali percentuali

sample		<i>aragonite</i>	<i>calcite</i>	<i>hydromagnesite</i>	<i>brucite</i>	<i>serpentine</i>
Belluno	HighScore	78.9 %		5.7 %	15.4 %	
	Profex	82.5 %		4.6 %	12.9 %	
	Topas	80.5 %		5.7 %	13.9 %	
Brugine	HighScore	90.3 %		4.0 %		5.7 %
	Profex	91.4 %		3.6 %		5.0 %
Brugine-umidificatore <input type="checkbox"/>	HighScore	82.2 %		3.4 %	1.9 %	12.4 %
	Profex	87.0 %		2.0 %	1.0 %	10.0 %
	Topas	85.2 %		2.8 %	1.4 %	10.5 %
San Gemini	HighScore	98.5 %	1.5 %			
	Profex	99.1 %	0.9 %			
	Topas	98.9 %	1.1 %			

TERZA FASE: PRECIPITAZIONE DEI SALI



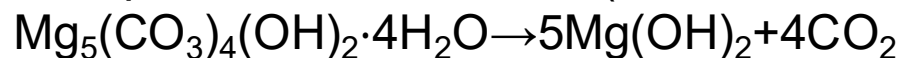
Precipitazione dell'aragonite:



Precipitazione dell'idromagnesite:



Precipitazione della brucite (in condizioni alcaline):



Serpentino: $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$

Equazione di Van't Hoff

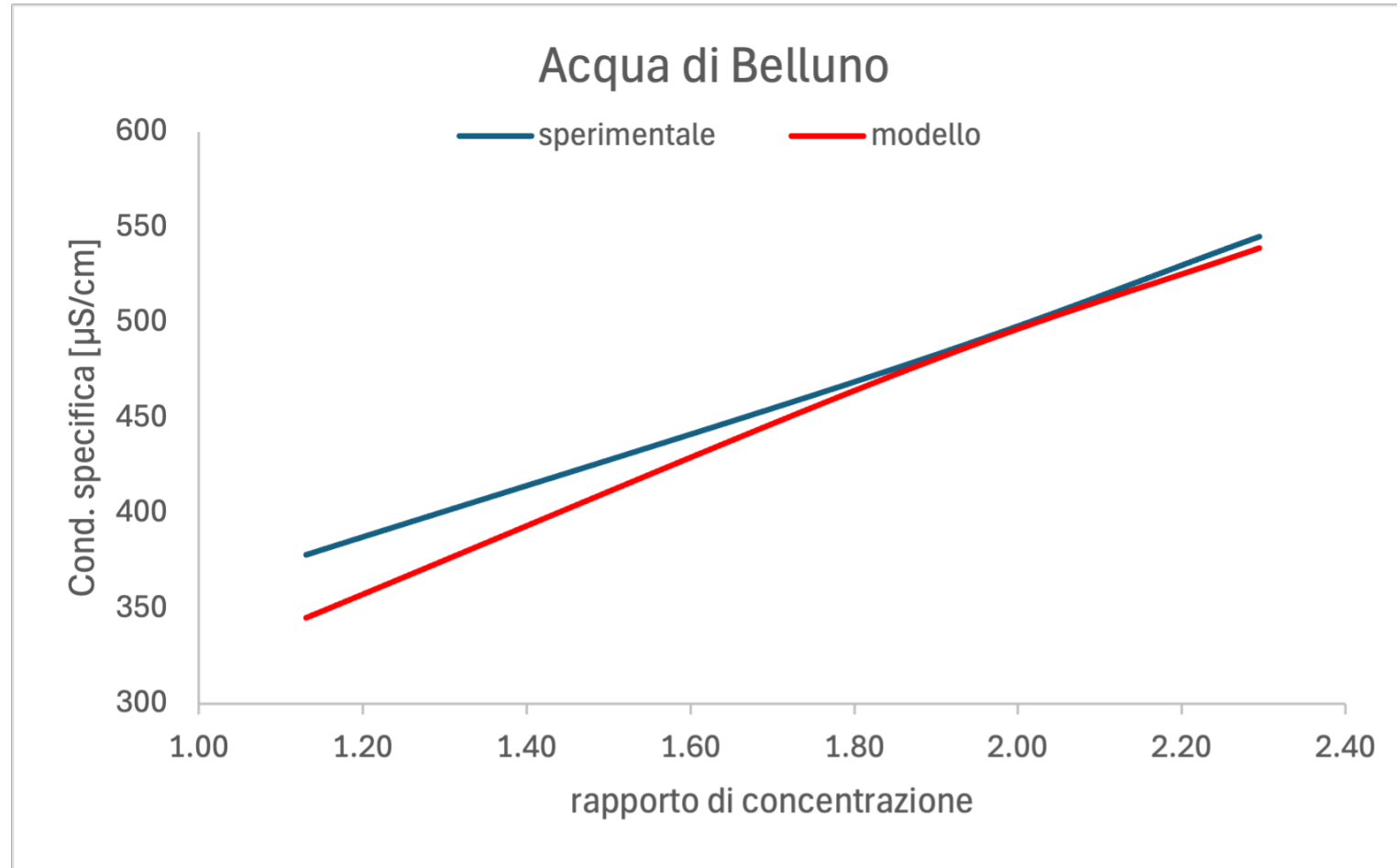
$$K_{ps,T} = K_{ps,298} \cdot \exp\left[\frac{\Delta H^\circ}{R} \left(\frac{1}{T_{298}} - \frac{1}{T}\right)\right]$$

Equazione analitica

$$\log_{10} K_{ps,T} = A + B \cdot T + \frac{C}{T} + D \cdot \log_{10} T + \frac{E}{T^2} + F \cdot T^2$$

$$K_{ps,T} = 10^{\log_{10} K_{ps,T}}$$

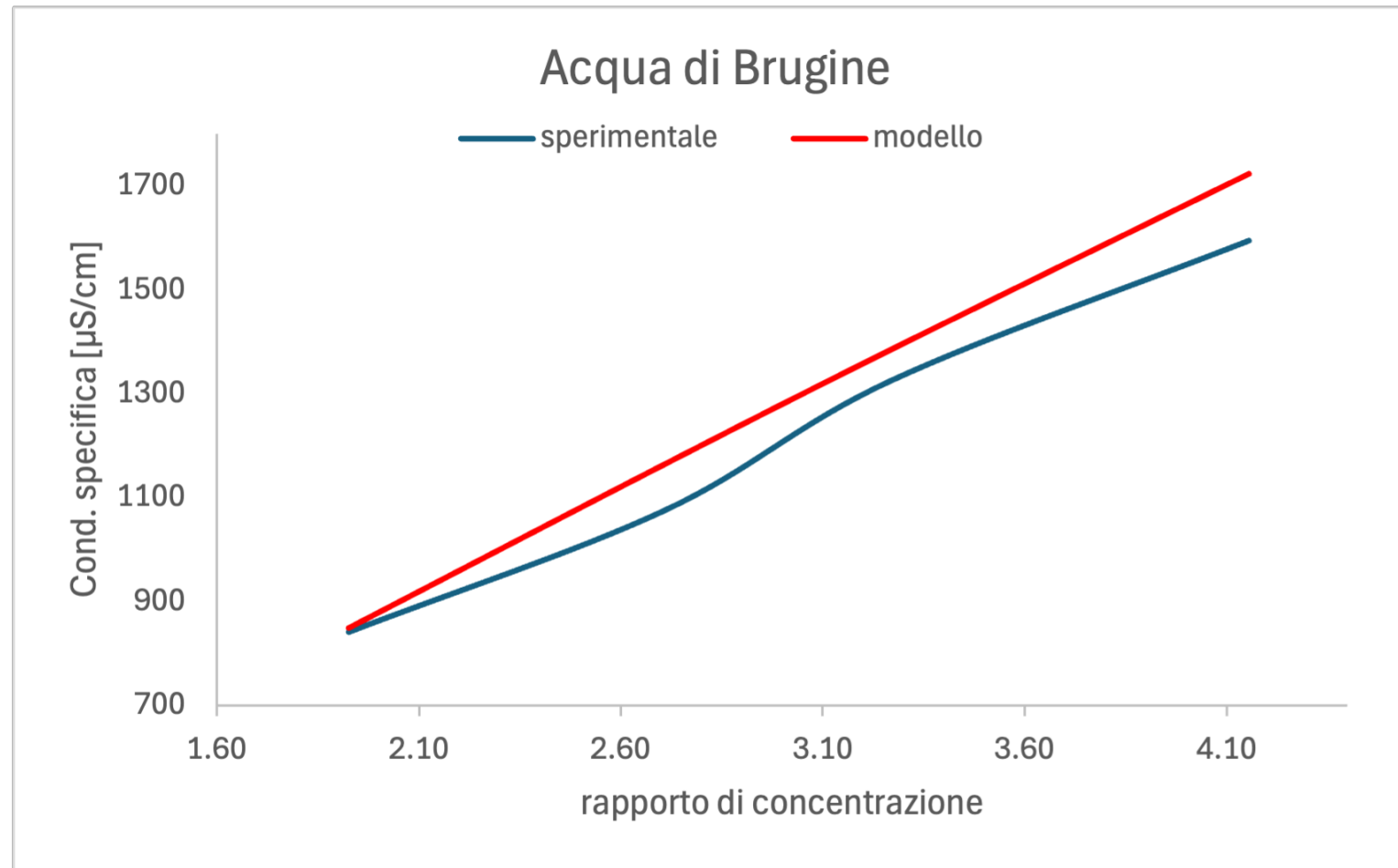
CONFRONTO TRA VALORI SPERIMENTALI E PREVISIONI DEL MODELLO



Errore relativo
percentuale
massimo: **8,7%**



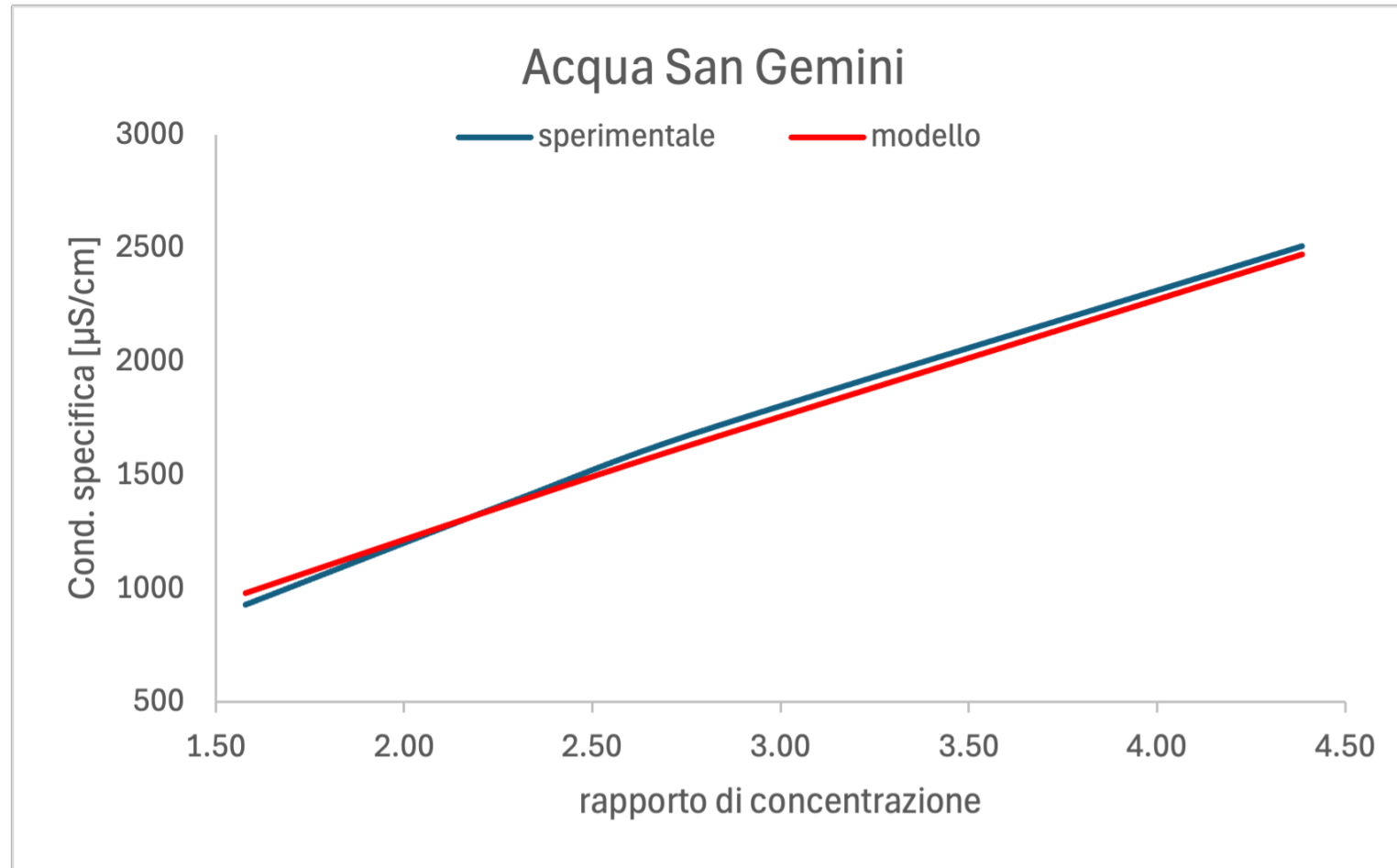
CONFRONTO TRA VALORI SPERIMENTALI E PREVISIONI DEL MODELLO



Errore relativo
percentuale
massimo: **8,2%**
*La sovrastima
della previsione è
dovuta alla
mancanza del
modello di
precipitazione del
serpentino*



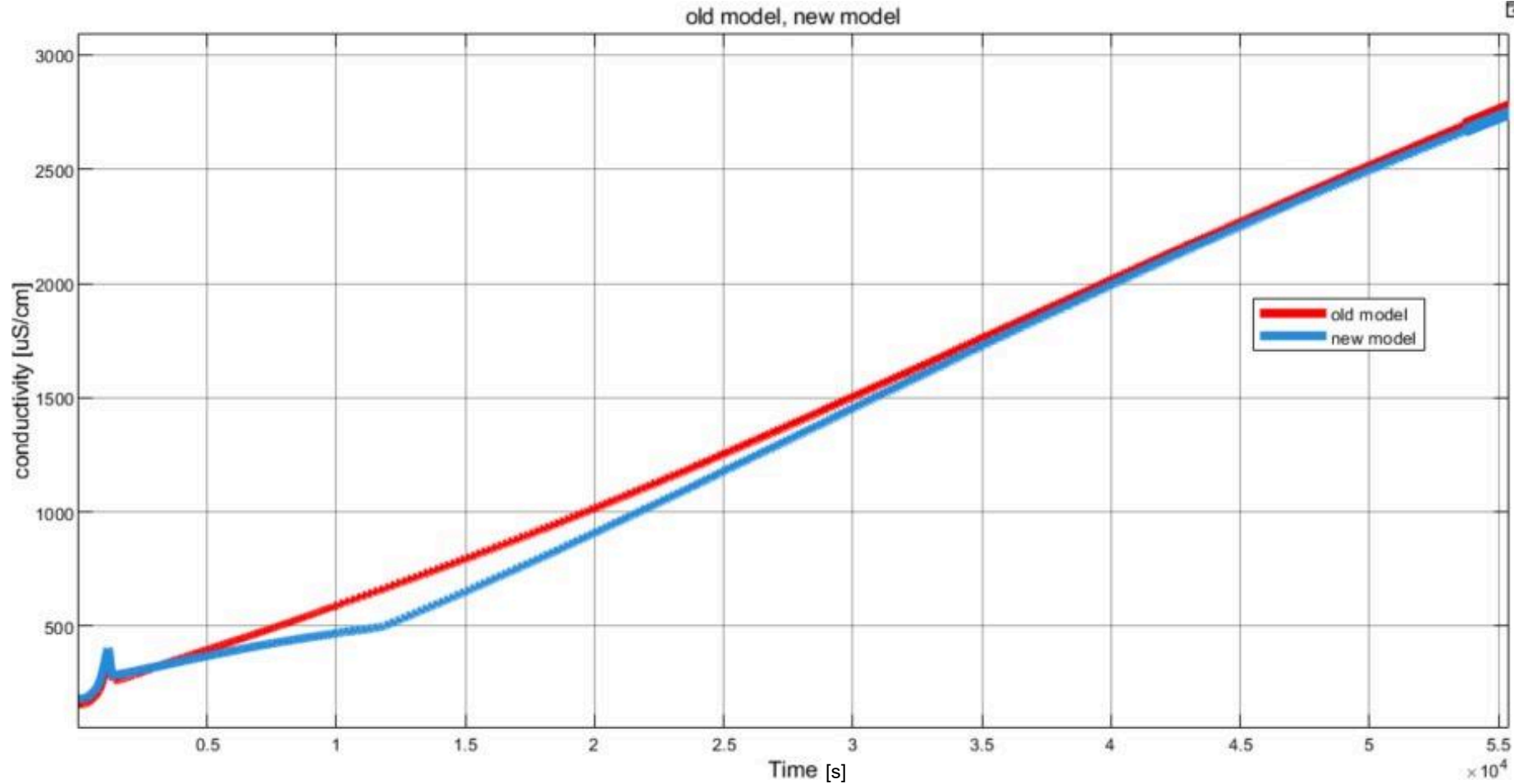
CONFRONTO TRA VALORI SPERIMENTALI E PREVISIONI DEL MODELLO



Errore relativo
percentuale
massimo: 5,6%



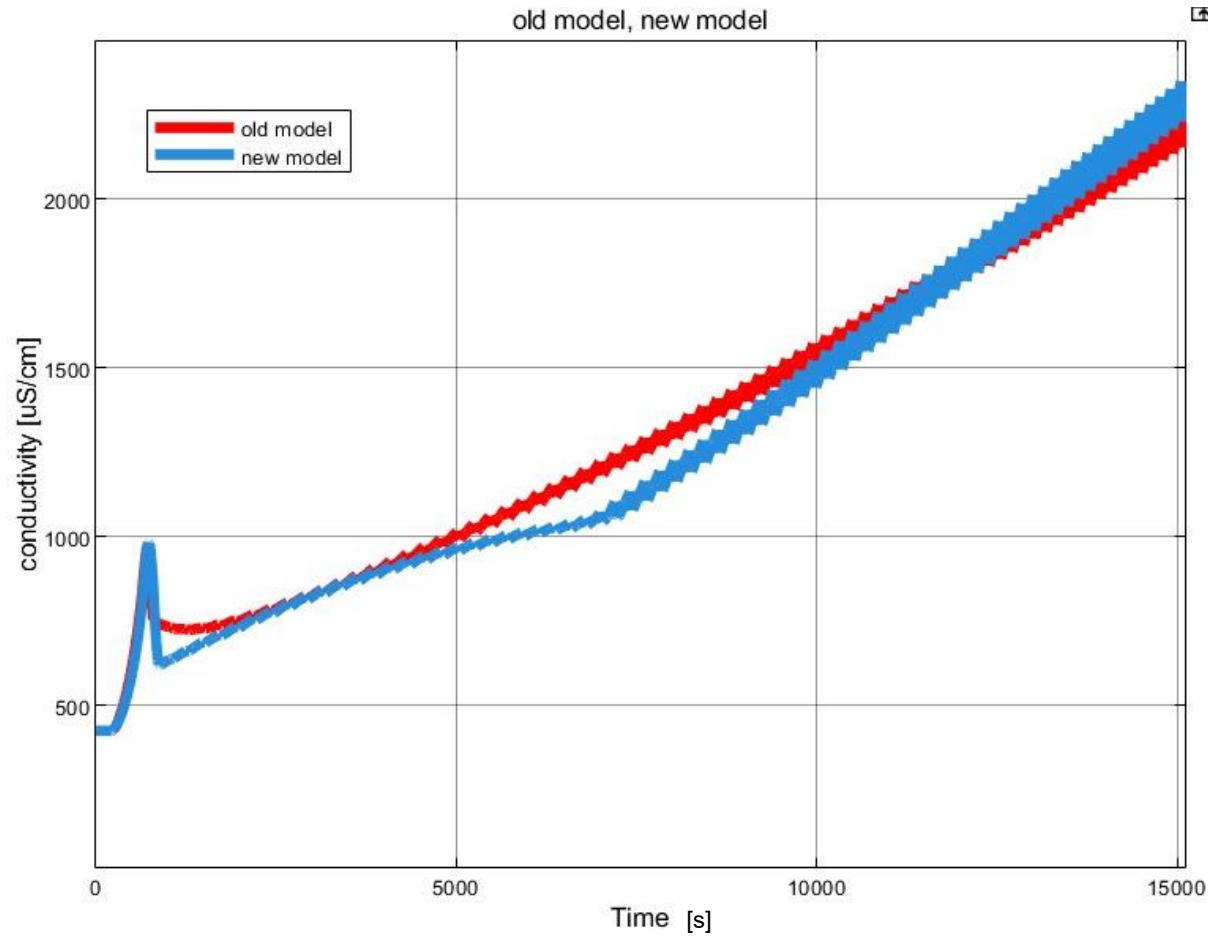
CONFRONTO TRA MAPPA SPERIMENTALE E NUOVO MODELLO



Simulazione del DT con
l'acqua di **Belluno**



CONFRONTO TRA MAPPA SPERIMENTALE E NUOVO MODELLO



Simulazione del DT con
l'*acqua di Brugine*

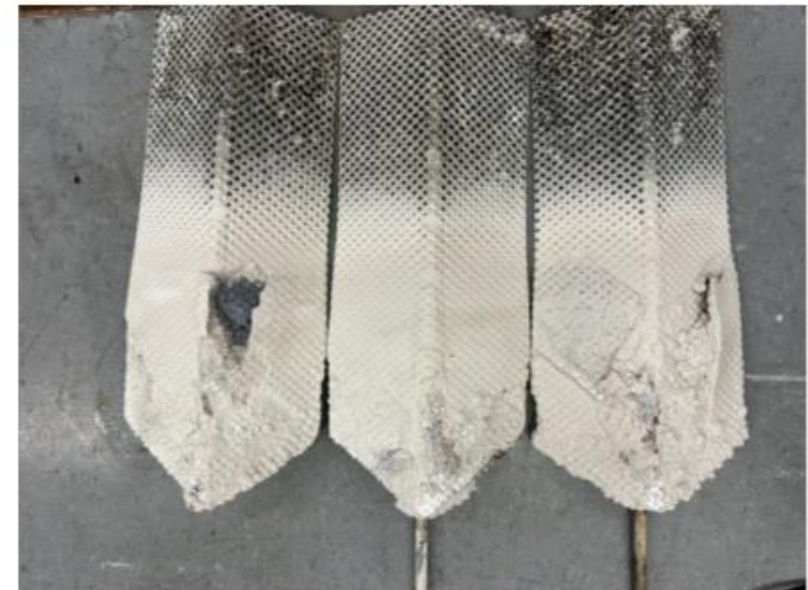


Si è potuta constatare la validità del modello per la stima della conducibilità specifica dell'acqua: l'errore relativo massimo riscontrato tra il valore stimato e quello reale non ha mai superato il 9%.

Possibili sviluppi futuri:

- Implementazione della precipitazione del serpentino nel modello
- Previsione della quantità di calcare che si forma all'interno del cilindro

Bisogna tenere in considerazione che all'interno delle analisi chimiche fornite dai gestori della rete idrica potrebbero mancare alcune specie chimiche non analizzate ma presenti nell'acqua, come ad esempio il silicio per l'acqua di Brugine.



BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- D. Polato, «Sviluppo di un modello digitale di un generatore di vapore ad elettrodi immersi,» tesi di laurea mag., Università degli Studi di Padova, 2022.
- F. Calascibetta e G. Moretti, «Conduzzanza molare di soluzioni elettrolitiche: le acque minerali § Parte I. Relazioni chimico-fisiche fondamentali nello studio della conduzzanza molare di soluzioni elettrolitiche,» CnS – La Chimica nella Scuola, 2011.
- R. A. Robinson e R. H. Stokes, Electrolyte Solution. Second revised edition. Dover Publications, 2002.
- K. Mazloomi e N. Sulaiman, «Retarding Forces Cancellation in Electrolyte Solutions-An Electrical Approach,» International Journal of Applied Electronics in Physics Robotics, 2013.
- J. R. Rossum, «Checking the Accuracy of Water Analyses Through the Use of Conductivity,» Journal AWWA, pp. 204–205, apr. 1975.
- E. Merlak, «Un algoritmo per l'interpretazione dei valori di conducibilità delle acque carsiche,» atti e Memorie della Commissione Grotte “E. Boegan”, 2009.
- M. Dalal, A textbook of physical chemistry, vol.1. Dalal Institute, 2018.
- Aqion, Temperature Correction of log K. indirizzo: <https://www.aqion.de/site/121>.