

VEDERE L'INVISIBILE

Lo sguardo dello scienziato dentro le cose.

Firenze, 18-19 aprile 2024

PRIMO CLASSIFICATO
SEZIONE TESINE BIENNIO

Una questione di legami

Studenti

Ponzi Rachele - Mora Matilde - Attolini Sofia

Classe 2N

Istituto di Istruzione Superiore

Liceo scientifico Giacomo Ulivi - Parma (PR)

Docente Coordinatore

Russo Annamaria

Lavoro ben rispondente al tema del concorso. Si studia la struttura invisibile dell'acqua per comprendere l'aumento visibile del volume del ghiaccio. Diverse attività sperimentali, adeguate al livello scolare, sono ben descritte sia nelle procedure sia nella discussione dei dati raccolti. Interessante la costruzione di un modello tridimensionale del ghiaccio e il calcolo trigonometrico per quantificare l'aumento di volume. Ordinata e ben strutturata la presentazione, curata sia nel lessico sia nella documentazione fotografica.

Presentazione “una questione di legami”

Lo studio della molecola dell'acqua e delle sue proprietà è stato svolto durante l'anno scolastico in una unità di apprendimento che ha coinvolto molto gli studenti. L'osservazione diretta e la trattazione di fenomeni chimico/fisici concreti, parte della quotidianità e l'analisi della struttura molecolare ed intermolecolare dell'acqua ha permesso loro di comprendere lo stretto legame che c'è tra un fenomeno (comportamento macroscopico di una sostanza) e la motivazione intrinseca per la quale esso avvenga (comportamento microscopico degli atomi o molecole).

Tutto questo ha spinto ad approfondire come tema di questo lavoro il comportamento peculiare dell'acqua a livello microscopico per spiegarne le sue proprietà macroscopiche; indagare ciò che è invisibile per comprendere e spiegare ciò che è visibile. In particolare, la variazione di densità che si ha al variare della temperatura, nel passaggio dai 4°C agli 0°C.

L'attività è stata co-progettata insieme agli studenti dai docenti di scienze e di fisica della classe.

Programmazione

L'attività è stata suddivisa in una serie di esperimenti:

1. Indagare se una massa di acqua in recipiente graduato portata a -22°C subisce un aumento di volume apprezzabile e misurabile.
2. Indagare e quantificare la variazione di volume subita da una massa d'acqua nel passaggio da 18°C a 4°C e viceversa, utilizzando dei coloranti alimentari per la visualizzazione.
3. Indagare e quantificare la variazione di volume subita da una massa d'acqua nel passaggio da 0°C a 4°C e viceversa.
4. Effettuare calcoli trigonometrici per dimostrare che l'aumento di volume di una massa d'acqua sia dovuto alla variazione dell'angolo di legame interno alla singola molecola dell'acqua.
5. Costruire un modellino a sfere e bastoncini con angolo di legame pari a 109,5° per visualizzare la struttura microscopica dell'acqua allo stato solido.

Esecuzione

Le attività programmate dalle studentesse sono state svolte interamente nel laboratorio di chimica. Le misure sono state effettuate con strumenti di precisione (bilancia, vetreria, termometri digitali, ecc.) ed estrema perizia da parte delle operatrici ed i dati ricavati in triplo sono stati analizzati con tabelle e grafici Excel.

Le studentesse si sono occupate dello svolgimento degli esperimenti, della raccolta e analisi dei dati, della ideazione, progettazione e realizzazione dei modellini molecolari a sfera.

Hanno successivamente redatto una bozza di tesina che è stata corretta e integrata dai docenti.

Contributo originale

Da qualche anno è possibile trovare nei libri di testo di scienze naturali per la scuola secondaria di secondo grado un capitolo interamente dedicato all'acqua, partendo dalla sua struttura molecolare passando alle sue proprietà fisiche e chimiche fino ad arrivare al suo essere molecola funzionale ed essenziale per la vita. In queste dissertazioni non è facile trovare l'anello di congiunzione tra questi tre aspetti: la spiegazione della variazione dell'angolo di legame interno alla molecola dell'acqua nel passaggio dallo stato liquido allo stato solido, probabilmente a causa della sua complessità a livello chimico.

Gli esperimenti e lo studio condotti in questa ricerca senz'altro rappresentano uno spunto per poterne ampliare la trattazione nei libri di testo ed offrono delle idee semplici ed efficaci per permettere la comprensione dell'argomento da parte degli alunni.

Difficoltà incontrate

Il valore aggiunto di questa ricerca nasce proprio dalle difficoltà incontrate.

Già nel momento della spiegazione, durante la quale gli studenti, con i loro "perché", hanno spinto la docente ad andare sempre più in profondità nell'argomento; dal fenomeno macroscopico sempre più nel microscopico, sempre più nell'invisibile.

Una volta scelto l'argomento per questa ricerca, la difficoltà più grande è stata trovare dei metodi semplici per spiegare un fenomeno complesso ma soprattutto realizzabili con strumenti semplici: ed ecco nate le idee degli esperimenti scelti.

UNA QUESTIONE DI LEGAMI

La molecola dell'acqua e le sue particolarità

OBIETTIVI DEL LAVORO

Trarre informazioni riguardanti la struttura microscopica dell'acqua e del ghiaccio a partire dallo studio sperimentale di fenomeni macroscopici.

INTRODUZIONE TEORICA

In natura esistono numerose molecole di diverso tipo ma una si distingue per le sue caratteristiche peculiari rispetto alle altre: la molecola dell'acqua. La molecola dell'acqua è formata da due atomi di idrogeno e un atomo di ossigeno che si legano tra loro attraverso legami covalenti.

Il legame covalente è un legame intramolecolare (che avviene all'interno della molecola) che si forma quando due atomi, di uno stesso o di differenti elementi, mettono in condivisione una o più coppie di elettroni per raggiungere l'ottetto. Questo legame può essere puro (se gli atomi sono dello stesso elemento) o polare (se gli atomi sono di elementi diversi).

Nel caso dell'acqua si parla di molecola polare a causa della differenza di elettronegatività tra l'atomo di idrogeno e l'atomo di ossigeno (capacità di attrarre a sé gli elettroni di legame). L'ossigeno (avente un'elettronegatività maggiore dell'idrogeno) attira maggiormente verso di sé la coppia di elettroni di legame, provocando così la formazione di una parziale carica negativa in prossimità dell'atomo di ossigeno. Al contrario, l'idrogeno assume una parziale carica positiva perché più lontano dagli elettroni di valenza.

Due o più molecole d'acqua interagiscono tra loro attraverso i legami/ponti a idrogeno. I legami a idrogeno sono legami intermolecolari (cioè che legano tra loro le molecole) deboli (10 volte meno forti di un legame covalente) che si generano per effetto di attrazioni elettrostatiche (attrazioni che dipendono dalla carica) tra la parziale carica positiva dell'idrogeno di una molecola e la parziale carica negativa dell'ossigeno di un'altra molecola. Sono legami che uniscono tra loro i poli elettrici diversi di molecole distinte, unendole. Il legame a idrogeno si crea quando l'idrogeno è legato covalentemente ad un atomo dal raggio atomico piccolo

ESPERIMENTO 1 – Pipette e cilindri

SCOPO

Osservare la variazione del volume dell'acqua dallo stato liquido allo stato solido, verificando così che il ghiaccio ha un volume maggiore dell'acqua liquida.

STRUMENTI

- Cilindro graduato (sensibilità: $\pm 2\text{ml}$; portata: $\pm 10\text{ml}$)
- Matraccio
- Pipetta (sensibilità: $\pm 0,1\text{ ml}$; portata: 10 ml)
- Bilancia (sensibilità: $\pm 0,01\text{ g}$)
- Freezer
- Parafilm
- Palla di Peleo
- Acqua distillata
- Foglio di lavoro Excel



In figura: pipetta graduata da 2 mL e palla di Peleo



In figura: cilindro graduato e baker



In figura: cilindri graduati, pipette graduate, matracci e palle di Peleo

METODO SPERIMENTALE

Una massa d'acqua distillata (densità 1g/cm^3) definita è stata posta in diversi recipienti graduati (3 cilindri e 3 pipette). I tre campioni contenevano quantità d'acqua molto simili, nell'ottica di ottenere risultati statisticamente più attendibili. Nell'esperimento coi cilindri graduati abbiamo misurato la massa lorda e la tara, ottenendo per differenza la massa netta di acqua, alla temperatura di 18°C . Con le pipette graduate, invece, abbiamo preferito misurare il volume alla medesima temperatura. Utilizzando poi il valore della densità, abbiamo ottenuto la massa o il volume.

Abbiamo ripetuto le stesse misure dopo aver mantenuto i campioni per 24h in freezer a -22°C , sigillati col parafilm in modo da evitare l'evaporazione.

RACCOLTA ED ELABORAZIONE DATI

STATO LIQUIDO

- CILINDRI:

	CILINDRO S	CILINDRO M	CILINDRO R
TARA ($\pm 0,01\text{g}$)	26,22 g	36,97 g	26,19 g
MASSA + TARA	31,29 g	41,91 g	31,13 g
MASSA NETTA ($\pm 0,02\text{ g}$)	5,07 g	4,94 g	4,94 g

- PIPETTE

	PIPETTA S	PIPETTA M	PIPETTA R
MASSA PIPETTA VUOTA ($\pm 0,01\text{ g}$)	0,50 g	0,43 g	0,50 g
VOLUME ACQUA ($\pm 0,1\text{ mL}$)	5,1 mL	5,0 mL	5,2 mL

STATO SOLIDO

- CILINDRI

	CILINDRO S	CILINDRO M	CILINDRO R
VOLUME FINALE ($\pm 0,02$ mL)	5,80 mL	5,60 mL	5,60 mL
VARIAZIONE VOLUME	0,73 mL	0,66 mL	0,66 mL

- PIPETTE

	PIPETTA S	PIPETTA M	PIPETTA R
VOLUME FINALE ($\pm 0,1$ mL)	5,7 mL	5,9 mL	5,5 mL
VARIAZIONE VOLUME	0,6 mL	0,9 mL	0,3 mL

CALCOLO DELLA DENSITA' DEL GHIACCIO

$$\text{CILINDRO S} = 0,87 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{PIPETTA S} = 0,89 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{CILINDRO M} = 0,88 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{PIPETTA M} = 0,85 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{CILINDRO R} = 0,88 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{PIPETTA R} = 0,94 \text{ g/cm}^3$$

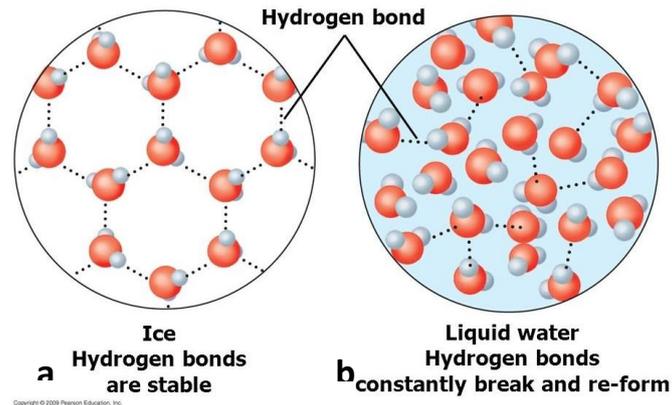
$$\text{Densità media} = 0,89 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Errore sulla densità media} = (x_{\max} - x_{\min}) : 2 = 0,05$$

$$\text{DENSITA' MEDIA} = (0,89 \pm 0,05) \text{ g/cm}^3$$

CONCLUSIONI

Tenendo conto che in questo esperimento ci possono essere stati degli errori di parallasse, ovvero degli errori dovuti al diverso punto di vista che si può assumere nell'osservare il menisco, siamo comunque riuscite a dimostrare che, a parità di massa, il volume dell'acqua è minore di quello del ghiaccio e, di conseguenza, che la densità dell'acqua allo stato liquido è maggiore di quella dell'acqua allo stato solido. Infatti, quando avviene il congelamento le molecole dell'acqua si dispongono stabilmente in un reticolo cristallino secondo una struttura geometrica esagonale, a causa della formazione dei legami a idrogeno intermolecolari (immagine sottostante).



- a. Disposizione delle molecole dell'acqua allo stato solido (ghiaccio).
- b. Disposizione delle molecole dell'acqua allo stato liquido.

Al momento del congelamento i legami a idrogeno diventano più rigidi, ed essendo ogni molecola legata alle altre attraverso quattro legami, ognuno di essi inizia a tirare la molecola stessa causando un aumento nell'ampiezza dell'angolo che si forma tra i due idrogeni e l'ossigeno della molecola che da 104,5°C (a temperatura ambiente) diventa di 109,5°C. Tale aumento provoca una variazione di volume del tetraedro. Per spiegare meglio questo fenomeno abbiamo costruito un modello geometrico, sia teorico che concreto, che presenteremo a pag. 9.

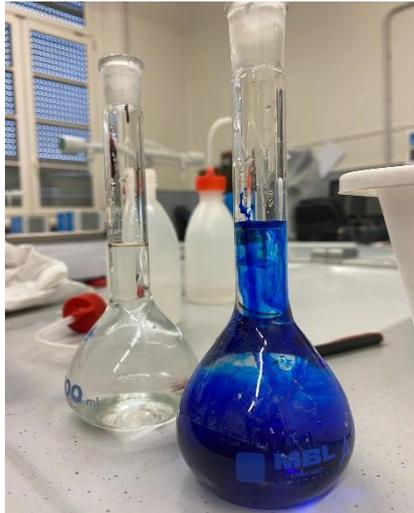
ESPERIMENTO 2 - Bagni termostatati

SCOPO

Osservare la variazione del volume al variare della temperatura, con l'uso di bagni termostatati, nell'intervallo [4°C; 18°C] e [0°C; 4°C].

STRUMENTI

- Matracci;
- vaschette di plastica;
- acqua calda e fredda;
- acqua distillata;
- Parafilm;
- colorante blu e rosso;
- Freezer.



METODO SPERIMENTALE

Una massa d'acqua definita è stata posta in un matraccio, colorata con colorante alimentare ed è stato segnato il livello del volume dell'acqua allo stato liquido a 18°C. Il matraccio è stato immerso in un bagnetto a 4°C; raggiunto l'equilibrio termico (dopo circa mezzora) abbiamo segnato il livello dell'acqua con un pennarello sul matraccio. Lo stesso procedimento è stato messo in pratica sia per il passaggio inverso (4°C->18°C) che per l'intervallo [0°C; 4°C].

RACCOLTA ED ELABORAZIONE DATI

GRAFICO 1:

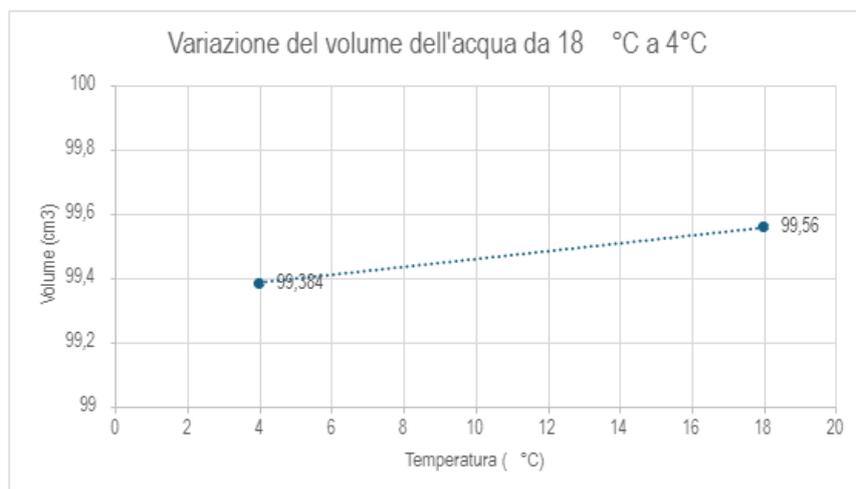
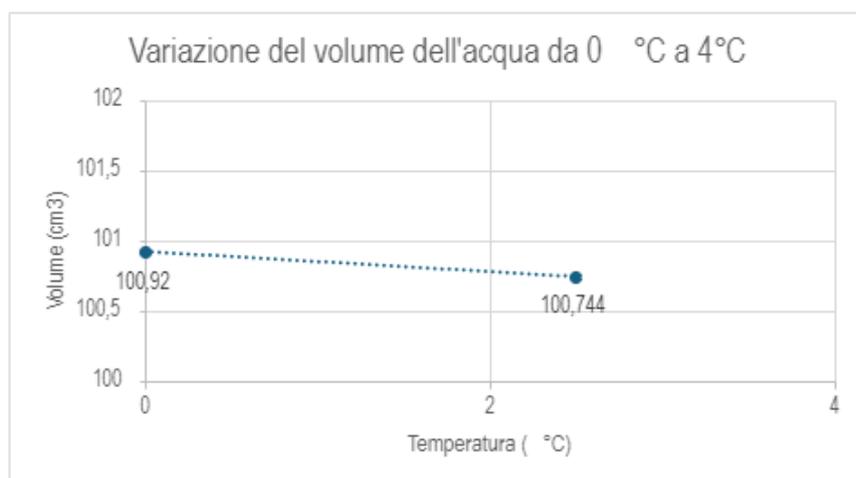


GRAFICO 2:



CONCLUSIONI

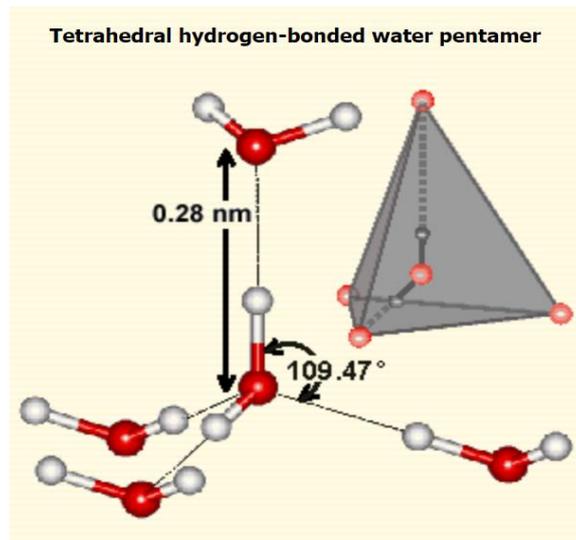
In questo esperimento abbiamo dimostrato che l'acqua, a differenza degli altri liquidi, presenta un comportamento anomalo. In particolare, il volume dell'acqua, fra gli 0°C e i 4°C, invece di aumentare con la temperatura, diminuisce. Infatti, a 4°C l'acqua assume il minimo volume e raggiunge la sua massima densità. Dopo i 4°C, invece, l'acqua si comporta come tutte le altre sostanze, cioè ad un aumento di temperatura corrisponde un aumento di volume. Questo avviene perché tra le molecole dell'acqua allo stato liquido non si formano tutti i legami a idrogeno che si potrebbero formare e, comunque, quelli presenti si distruggono e riformano continuamente tra le altre molecole.

Gli errori in questo esperimento sono soprattutto da imputare alla difficoltà di raggiungere esattamente la temperatura di 4°C.

Modello a sfere e bastoncini

INTRODUZIONE TEORICA SPECIFICA

Ogni molecola d'acqua può formare quattro legami idrogeno con altrettante molecole d'acqua. Questo succede sia allo stato solido (ghiaccio) che allo stato liquido (acqua liquida). Quello che cambia tra i due stati è l'angolo formato dai due legami covalenti O-H (angolo interno alla singola molecola). Allo stato liquido la misura dell'ampiezza di quest'angolo è 104,5°, mentre allo stato solido è 109,5°. Quest'ultimo angolo è quello caratteristico di un tetraedro regolare (vedi immagine). Un tetraedro è un solido platonico le cui quattro facce sono triangoli equilateri.



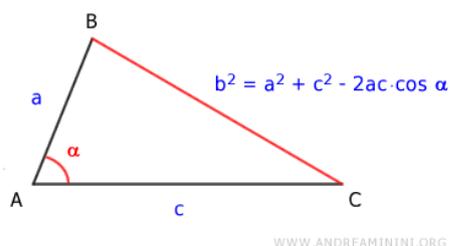
Ci siamo chieste se la differenza tra le due ampiezze $104,5^\circ$ e $109,5^\circ$ potesse essere messa in relazione con l'aumento di volume che avviene a causa della solidificazione. Quindi abbiamo calcolato il rapporto tra il volume del tetraedro del ghiaccio e quello dell'acqua.

Sappiamo che il volume di un tetraedro è esprimibile mediante la formula $V = L^3 \frac{\sqrt{12}}{12}$

dove L rappresenta la misura dello spigolo del tetraedro.

Come è collegata la misura dello spigolo all'angolo interno della molecola?

Per rispondere occorre utilizzare il teorema di Carnot, un teorema di trigonometria che consente di ricavare la misura di un lato di un triangolo conoscendo la misura degli altri due lati e dell'ampiezza dell'angolo compreso tra essi.

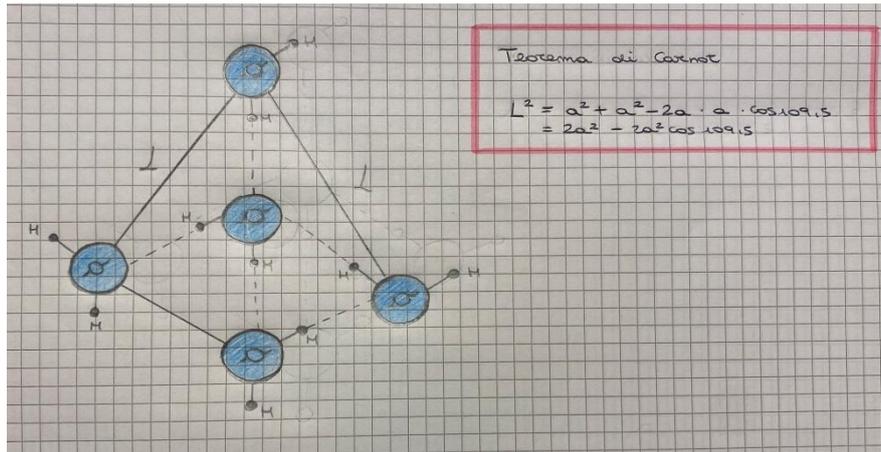


Nel nostro caso i triangoli sono isosceli, quindi avremo che:

$$L^2 = a^2 + a^2 - 2a \times a \times \cos 109,5$$

$$L^2 = a^2 + a^2 - 2a \times a \times \cos 104,5$$

dove $a = 0,028$ nm è la misura della distanza degli atomi di ossigeno di due molecole legate da un legame idrogeno.



Per determinare il rapporto tra i due volumi procediamo in questo modo:

$$\frac{V_{ice}}{V_{water}} = \frac{L_{ice}^3}{L_{water}^3} = \left(\frac{1 - \cos 109,5}{1 - \cos 104,5} \right)^{\frac{3}{2}} = 1,1$$

Sapendo che volume e densità, se la massa è costante, sono due grandezze inversamente proporzionali, confrontiamo questo valore con l'inverso del rapporto tra le due densità (consideriamo la densità dell'acqua in condizioni standard).

$$\frac{\rho_{water}}{\rho_{ice}} = \frac{1000}{916,8} = 1,1$$

Abbiamo notato che questi due rapporti sono uguali. Quindi si potrebbe pensare che la differenza di densità tra i due stati della materia sia da imputarsi proprio alla differenza nell'angolo interno della molecola d'acqua.

Occorre comunque fare alcune importanti considerazioni:

- nel ghiaccio si formano delle strutture esagonali caratterizzate da molto spazio vuoto. Abbiamo stimato l'area della superficie interna ad ogni esagono:

$$L = 0,28 \text{ nm}$$

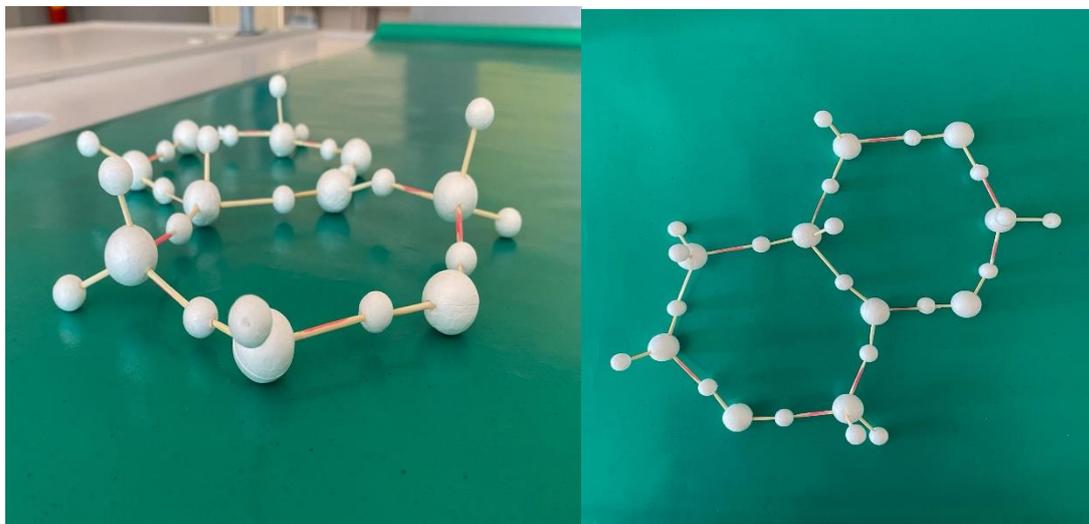
$$h = \frac{L \cdot \sqrt{3}}{2} = \frac{0,28 \cdot \sqrt{3}}{2} \text{ nm}$$

$$A_{triangolo} = \frac{L \cdot \frac{L \cdot \sqrt{3}}{2}}{2} = \frac{0,28 \cdot \frac{0,28 \cdot \sqrt{3}}{2}}{2} \text{ nm}^2$$

$$A_{esagono} = 6 \cdot \frac{L \cdot \frac{L \cdot \sqrt{3}}{2}}{2} = 6 \cdot \frac{0,28 \cdot \frac{0,28 \cdot \sqrt{3}}{2}}{2} = 0,20 \text{ nm}^2$$

- le molecole d'acqua nella fase liquida sono molto mobili ed è molto difficile quantificare la percentuale di spazio vuoto della fase liquida;
- probabilmente l'aumento di densità che si registra tra le temperature di 0°C e 4°C è dovuto al fatto che alcune molecole d'acqua, liberate da legami idrogeno rigidi, vanno a riempire gli spazi vuoti compresi all'interno delle strutture esagonali. All'aumentare della temperatura i moti browniani prendono via via il sopravvento e la densità diminuisce gradualmente.

Per visualizzare meglio quanto appreso col modello teorico, abbiamo realizzato un modellino reale tridimensionale utilizzando palline di polistirolo (di due misure diverse a seconda del "ruolo": atomo di ossigeno oppure atomo di idrogeno) e stuzzicadenti, come mostrato nella figura sottostante.



SCALA DEL MODELLINO RISPETTO ALLE DIMENSIONI REALI

- Modellino:

Legame covalente (incolore) = 3,4 cm

Legame idrogeno (in rosa in figura) = 4,2 cm

- Realtà

Legame covalente = 99 pm = $9,9 \times 10^{-9}$ cm

Legame idrogeno = 177 pm = $1,77 \times 10^{-8}$ cm

SCALA LEGAMI COVALENTI: $3,4\text{cm}/9,9 \times 10^{-9} \text{ cm} = 3,4 \times 10^8$

SCALA LEGAMI IDROGENO: $4,2\text{cm}/1,77 \times 10^{-8} \text{ cm} = 2,4 \times 10^8$

Il modello reale è stato quindi ingrandito circa 300 milioni di volte.

CONCLUSIONI FINALI

Il nostro interesse è partito dall'osservazione di fenomeni chimico-fisici relativi alle proprietà dell'acqua. Abbiamo voluto indagare una peculiarità della molecola dell'acqua spiegata a lezione e non presente sul libro di testo: la variazione di volume (e quindi di densità) dell'acqua nel passaggio dallo stato liquido allo stato solido (fenomeno macroscopico) dovuta ad una variazione dell'angolo di legame interno alla molecola d'acqua (fenomeno microscopico). Ci siamo chieste se la variazione macroscopica di volume corrispondesse alla variazione microscopica dell'angolo di legame. Abbiamo dimostrato, per quanto fosse nelle nostre possibilità (attraverso esperimenti chimici e calcoli trigonometrici) che è così. Abbiamo infine realizzato due tipi di modellini al fine di rendere di facile intuizione lo spazio occupato dalla singola molecola e la struttura formata da più molecole nell'acqua allo stato solido.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- Ozair G. and Torre Gutierrez J., An Overview of Magnetic Water Treatment System & Further Course of Study. This paper was presented at “5th International Conference on Desalination Technologies & Water Re-Use”, Alexandria University Desalination Studies and Technology Center (ADST), Alexandria (Egypt), 29-30 December, 2010.
- Valitutti G., Falasca M., Amadio P., Chimica – concetti e modelli – Dalla materia all’atomo, seconda edizione, Zanichelli editore.
- Valitutti G., Falasca M., Amadio P., Chimica – concetti e modelli – Dalla struttura atomica alle soluzioni, seconda edizione, Zanichelli editore.

https://water.lsbu.ac.uk/water/water_hydrogen_bonding.html

<https://pinostriccoli.altervista.org/dai-fiocchi-al-solido-il-ghiaccio-e-le-sue-strutture/>

<https://www.youtube.com/watch?v=UukRggzk-KE>

Si ringrazia per il supporto tecnico fornito il dott. Rocco Caliandro, Primo Ricercatore presso l’Istituto di Cristallografia del CNR di Bari; la sua competenza è stata determinante.