Innamorarsi della Chimica. I parte: Le basi teoriche dell'approccio

Leonardo **Seghetti**[1], Liberato **Cardellini**[2]

[1]I.I.S. Celso Ulpiani, Ascoli Piceno, leonardo.seghetti@tin.it
[2]Università Politecnica delle Marche, Ancona.

Riassunto

La chimica può essere una materia scolastica che gli studenti trovano interessante e coinvolgente. Molto dipende dagli argomenti del programma. Ma è l'insegnante che può rendere gli argomenti e i concetti rilevanti per la formazione degli studenti. In questa prima parte vengono presentati i presupposti teorici dell'approccio utilizzato per coinvolgere gli studenti.

Gli studi sul funzionamento della mente hanno evidenziato l'importanza della working memory: la memoria di lavoro può gestire un numero molto limitato di informazioni. Questo fatto ha importanti conseguenze nel modo in cui gli argomenti vengono presentati agli studenti. La conoscenza della teoria del carico cognitivo permette di trovare delle maniere per spiegare gli argomenti agli studenti in modo utile ed efficace. Molti altri fattori e variabili contribuiscono a rendere l'insegnamento una attività utile, gratificante e di qualità. Tra questi consideriamo l'ambiente di apprendimento, la motivazione, l'attitudine e la capacità dell'insegnante di rendere interessante la chimica.

Gli studenti devono trovare le attività proposte interessanti e pertinenti per la loro formazione scolastica e professionale. Le attività, il carico di lavoro e le sfide devono dare alla maggioranza degli studenti la possibilità di avere successo, perché confidenza e abilità si alimentano a vicenda. Nella seconda parte verranno presentate le sette attività sviluppate con lo scopo di rendere familiari e far utilizzare alcuni argomenti qualificanti del corso di chimica. In questi progetti sono stati coinvolti studenti di due classi di una scuola superiore.

Abstract

Chemistry can be a school subject that students can find interesting and involving. It depends a lot on the topics of the curriculum. It is the teacher who can make the topics and concepts relevant to the education of students. In this first part we discuss the theoretical assumptions of the approach used to involve the students. Studies on mind functioning have highlighted the

importance of working memory: working memory can handle a very limited number of information. This fact has important consequences on how topics are presented to students. The knowledge of the cognitive load theory allows us to find effective strategies to explain topics to the students successfully. Many other factors and variables help make teaching a useful, rewarding and quality activity. Among these we consider the learning environment, the motivation, the attitude and the teacher's ability to make chemistry fascinating.

Students have to find the planned activities motivating and relevant for their learning and professional training. The activities, the workload and the challenges should let most of the students succeed, because confidence and ability feed each other. The second part will present the seven activities developed with the aim of familiarizing and using some qualifying principles of the chemistry course. Students from two classes of a high school have been involved in these projects.

Introduzione

La chimica come materia scolastica è affetta dalla non invidiabile considerazione di essere astratta, complessa e poco amata da una parte degli studenti (Johnstone, 2000) e come conseguenza sempre meno studenti la scelgono come professione. In parte ciò è dovuto al fatto che a scuola "chemistry and physics are irrelevant and boring, mainly because their instruction is out of synchrony with the world outside of school". (Aikenhead, 2003, p. 103)

Uno studio esteso riguardante l'istruzione scientifica, che ha coinvolto 20 gruppi di discussione formati da studenti, 20 gruppi di discussione formati da genitori e 5 gruppi di discussione formati da insegnanti in tre diverse città è stato condotto in UK sul curriculum scolastico (gli aspetti interessanti e le loro opinioni su possibili miglioramenti del contenuto). È risultato che la scienza è considerata essere un importante argomento di studio da parte di tutti gli studenti e dei gruppi di genitori, ma che l'istruzione scientifica è valutata dagli studenti solo come argomento per realizzare aspirazioni di carriera, piuttosto che come un soggetto di interesse intrinseco; incidentalmente, "The subject that attracted the most antipathy was, surprisingly, chemistry. This was seen as abstruse and irrelevant to contemporary needs." (Osborne, Collins, 2000, p. 5)

La prospettiva della irrilevanza è stata sollevata anche da un rapporto ufficiale riguardante l'istruzione scientifica in Europa: "students have a perception of science education as irrelevant and difficult". (Rocard et al., 2007, p. 9) Secondo questa commissione i miglioramenti passeranno attraverso nuove forme di pedagogia da parte degli insegnanti e viene racco-

mandata l'introduzione di approcci basati sull'indagine, l'Inquiry-Based Science Education (IBSE) per le materie scientifiche e tecnologiche. La rilevanza è un aspetto delicato del programma scolastico e in genere viene definita rispetto alle idee degli adulti senza molto considerare il punto di vista degli studenti. Inoltre, va tenuto conto che il desiderio di approfondire un certo aspetto da parte degli studenti non ne garantisce il necessario impegno cognitivo: "an indication by a student that he or she wishes to learn about a topic cannot be equated with a willingness to make the intellectual effort and commitment required to achieve the necessary understanding." (Jenkins, Nelson, 2005, p. 53)

Molte ricerche hanno studiato il fenomeno della scarsa attrazione delle discipline scientifiche, con l'intento di individuarne le cause e proporre suggerimenti per rendere la chimica interessante. Secondo Alex Johnstone (1984, p. 847), ci sono almeno tre cause che rendono la chimica difficile:

1. The nature of the science itself makes it inaccessible.
2. The methods by which we have traditionally taught raise the problems.
3. The methods by which students learn are in conflict with either or both of the above.

Oltre alla difficoltà dei concetti, è il modo in cui viene insegnata che rende la chimica poco attraente. Come altre discipline scientifiche la chimica utilizza un linguaggio specializzato, delle idee astratte e dei concetti che richiedono parecchio impegno per essere assimilati in modo corretto. Possiamo presentare esempi di 'elemento' o 'composto', ma queste idee sono astratte ed esistono solo nella mente. (Johnstone, 1991) Infatti, è stato affermato che "… perhaps more than other sciences, understanding chemistry relies on making sense of the invisible and untouchable" (Kozma, Russell, 1997, p. 949). Anche il linguaggio specializzato necessario per esprimere in modo compiuto un concetto può essere un componente della percezione della difficoltà della chimica per via della confusione generata dal linguaggio comune utilizzato in un contesto scientifico. (Cassels, Johnstone, 1984; Byrne, Johnstone, Pope, 1994; Johnstone, Selepeng, 2001)

Difficoltà con l'apprendimento della chimica

La conoscenza chimica utilizza dei concetti che richiedono un impegno ed uno sforzo per essere padroneggiati e presenta delle difficoltà concettuali, ma non è la materia scientifica più difficile o l'unica difficile, almeno in certe condizioni e per molti studenti. Già nel 1956 Polya riportava che "mathematics has the dubious honor of being the least popular subject in the curriculum ... Future teachers pass through the elementary schools learning to detest mathematics ... They return to the elementary school to teach a new generation to detest it." (Polya, 1985, p. ix)

L'apprendimento dei termini, dei nuovi nomi e del loro preciso significato costituisce per gli studenti una difficoltà oggettiva, in parte analoga all'apprendimento di un nuovo linguaggio. Come è stato riportato, "the symbols and grammar of the language of chemistry are closely tied to its basic conceptual principles, and so the language of chemistry has to be constructed on an abstract and less familiar knowledge base" (Taber, 2009, p. 101). Però secondo Dudley Herron le difficoltà sono anche più profonde: "A lack of understanding of familiar words used to convey meaning in chemistry; a lack of understanding of technical terms introduced in the study of chemistry; ascribing a familiar meaning to a common word used in technical sense; using everyday meaning to draw incorrect inferences about chemical events; failing to learn the conventions applied to specialized chemical language to the level of automatization required to "read chemistry" fluently" (Herron, 1996, p. 165).

Il linguaggio specialistico, i simboli e le formule che i chimici usano posssono essere una barriera alla comprensione per i nuovi studenti: "Chemists communicate in a highly elaborated alphabetic and symbolic language. ... The chemical nomenclature works with a distinct syntax and semantic, but is not suited for textual sentences." (Sliwka, 2003, p. 24). Ci sono argomenti e capitoli del corso di chimica poco motivanti e coinvolgenti dal punto di vista cognitivo. Se consideriamo lo sviluppo dei modelli atomici dobbiamo riconoscere che la ricostruzione storica riportata nei libri di testo e spesso allo stesso modo spiegata, difficilmente è in grado di suscitare la curiosità degli studenti. (Cardellini, 2012) L'aspetto della rilevanza per gli studenti degli argomenti del corso è importante perché come vedremo nel seguito, contribuisce alla loro motivazione.

L'acquisizione della conoscenza: l'importanza della working memory

Uno degli aspetti che qualificano e giustificano l'istruzione è l'acquisizione della conoscenza. Studenti di tutte le età si sottopongono alle regole delle scuole, in modo analogo a chi frequenta una palestra, per acquisire una conoscenza utile alla propria formazione umana e professionale e per avere dei vantaggi in seguito. Tenendo conto che "knowledge ultimately depends on how the brain represents knowledge clearly has not stopped philosophers from thinking about knowledge as ... something independent of the world. But, just as clearly, grounded knowledge is essential if we (among other animals) are to survive in the real world." (Sejnowski, 2018, p. 132)

Ma com'è che il cervello umano acquisisce la conoscenza? "The recent brain research shows that at its most basic, learning is simply a matter of electrical and chemical exchanges in the brain. The signals coming in from

our senses trigger certain connections in the brain and it is the pathway of neurons that creates our thinking." (Townsend, 2007, p. 947) Il grande numero di informazioni che i nostri sensi ricevono dall'ambiente circostante viene filtrato e ridotto in proporzioni accettabili per la nostra mente. Questo meccanismo ci consente di ignorare una grande quantità di informazioni sensoriali e di prestare la nostra attenzione su ciò che consideriamo interessante e/o importante.

Di fatto il filtro è da considerare come un meccanismo di difesa; altrimenti la nostra mente sarebbe invasa da un eccesso di informazioni e la memoria di lavoro andrebbe in sovraccarico e diminuirebbe la sua efficienza. Opera come un meccanismo di selezione delle informazioni e viene guidato da ciò che già conosciamo, comprendiamo ed ha un senso, dal nostro punto di vista. La mente utilizza la conoscenza compilata che è stata immagazzinata e prodotta dalle esperienze e dalla riflessione sulle esperienze come schemi; in molte situazioni questi schemi pronti all'uso facilitano la nostra vita. Quanto tempo altrimenti sarebbe necessario per decidere cosa fare quando in auto ci avviciniamo ad un semaforo e scatta il giallo? Attraverso la percezione, non solo vengono selezionate le informazioni, ma all'input sensoriale vengono aggiunte altre informazioni contenute nella mente per meglio comprendere degli stimoli incompleti. Consideriamo come esempio le macchie senza un significato riportate in Figura 1:

Figura 1. Macchie colorate apparentemente senza senso: il lettore è invitato a chiedersi cosa percepisce dopo aver capovolto la figura. (Leeper, 1935, p. 49)

Capovolgendo la figura le macchie irregolari assumono una forma che possiamo riconoscere: un cane! Ma dov'è il cane? È nella nostra mente, che utilizzando schemi e immagini familiari ha ricostruito una figura a noi nota.

Probabilmente un meccanismo simile si attiva nella mente degli studenti, quando in aula sentono delle spiegazioni o vedono dei grafici e delle figure. Per comprendere in modo significativo, dovrebbero collegare quanto di nuovo percepiscono e apprendono con quanto già conoscono. Se la conoscenza precedente è incompleta o mancante, probabilmente il collegamento corretto con concetti precedenti è impossibile oppure non significativo e questo fatto produce ciò che viene chiamato misconcezioni o idee sbagliate.

La scienza neurale cerca di capire come il flusso di segnali elettrici attraverso i circuiti neuronali dia origine alla mente; a come percepiamo, agiamo, pensiamo, apprendiamo, e ricordiamo. Gli studiosi utilizzano dei modelli; uno dei più noti è quello proposto da Baddeley e Hitch (1974) che comprende tre componenti: un sistema di controllo e due sistemi di memorizzazione (Central executive, Visuospatial sketchpad e Phonological loop). Una descrizione completa di tutte le funzioni della memoria di lavoro non è qui necessaria ed è descritta da una copiosa bibliografia. (Atkinson, Shiffrin, 1968; Baddeley, 1992; Richardson et al., 1996; Baddeley, 2003; Baddeley, 2007; Miyake, Shah, 2007)

Il concetto della memoria di lavoro e della sua limitazione è stato introdotto da Miller (1956) nel suo articolo seminale "The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information" che ha successivamente introdotto il termine *Working memory* (Miller, Galanter, Pribram, 1960). È un costrutto importante perché ha a che fare con la nostra attenzione, la memoria e la percezione. "The concept of a working memory system that temporarily stores information as part of the performance of complex cognitive tasks is proving to be productive. ... Working memory stands at the crossroads between memory, attention, and perception. ... The central executive clearly reflects a system concerned with the attentional control of behavior, with subsequent developments almost certainly depending on parallel developments in the study of attention and of the control of action." (Baddeley, 1992, p. 559)

La working memory è caratterizzata da due fattori che hanno un ruolo importante nell'istruzione; trattiene le informazioni per un breve tempo "The contents of this short-term phonological store were assumed to be vulnerable to rapid decay over the course of 1 to 2 seconds, unless they could be "refreshed" by means of the control process of articulatory rehearsal." (Richardson et al., 1996, p. 19) "Working memory should also be distinguished from sensory short-term memory. The latter can retain information in sensory cortices for around two seconds in the absence of attention, provided that the representations aren't overwritten by subsequent stimuli." (Carruthers, 2015, p. 12) "*working memory* is defined as the management,

manipulation, and transformation of information drawn from short-term and long-term memory. At its core, working memory consists of processes that work with material from short- and long-term working memory." (Dehn, 2008, p. 58)

Un'altra severa limitazione è costituita dal numero di informazioni (Chunks) che può contenere ed elaborare; sette secondo Miller (1956); cinque secondo Simon "The magic number proposed here is five, rather than Miller's seven, because the estimates that I derive from data in the literature are closer to the former number than to the latter." (1974, p. 487) e quattro secondo Cowan (2010). Il chunk è difficile da definire e con questo termine si intende "a chunk of any kind of stimulus material is the quantity that short-term memory will hold five of." (Simon, 1974, p. 484) Lo studio, la riflessione e gli esercizi aumentano le informazioni contenute in ciascuna unità: "Since the memory span is a fixed number of chunks, we can increase the number of bits of information that it contains simply by building larger and larger chunks, each chunk containing more information than before." (Miller, 1956, p. 93)

Alcuni studiosi hanno condotto un interessante e importante esperimento. Uno studente come tanti altri, di circa 20 anni, "with average memory abilities and average intelligence for a college student" (Ericsson, Case, Faloon, 1980, p. 1181) è stato coinvolto in un esperimento che è durato oltre un anno e mezzo. L'esperimento consisteva nel mandare a memoria una successione di cifre casuali lette alla velocità di una cifra ogni secondo e poi nel ripeterle. Se la sequenza veniva ripetuta in modo corretto, la successione successiva veniva incrementata di una cifra, altrimenti veniva diminuita di una cifra. Questa pratica durava circa un'ora da tre a cinque giorni ogni settimana. Nei 20 mesi (per oltre 230 ore di test di laboratorio) il numero di cifre ripetute è aumentato in modo costante passando da 7 a circa 80 (Figura 2). Nell'articolo citato sono riportate le strategie (associazioni mnemoniche) usate dallo studente per associare le successioni sconosciute con qualcosa a lui familiare. In questo modo veniva diminuito il carico della memoria di lavoro perché il ricordo avveniva per mezzo di una unica associazione con quanto già contenuto nella memoria a lungo termine.

Gli Autori si sono chiesti se questo esperimento di allenamento nella ripetizione di successioni casuali di numeri avesse aumentato la capacità della memoria di lavoro. Diverse evidenze indicavano che non era possibile e un esperimento lo ha convalidato. Dopo circa 3 mesi di pratica con i numeri, allo studente è stato chiesto di ripetere una successione casuale di lettere e non è risultato alcun trasferimento di abilità: lo studente è stato capace di ripetere successioni di circa sei consonanti. La conclusione è stata che "the reliable working capacity of short-term memory is about three or

four units, ... and that it is not possible to increase the capacity of short-term memory with extended practice. Rather, increases in memory span are due to the use of mnemonic associations in long-term memory. With an appropriate mnemonic system and retrieval structure, there is seemingly no limit to improvement in memory skill with practice." (Ericsson, Case, Faloon, 1980, p. 1182).

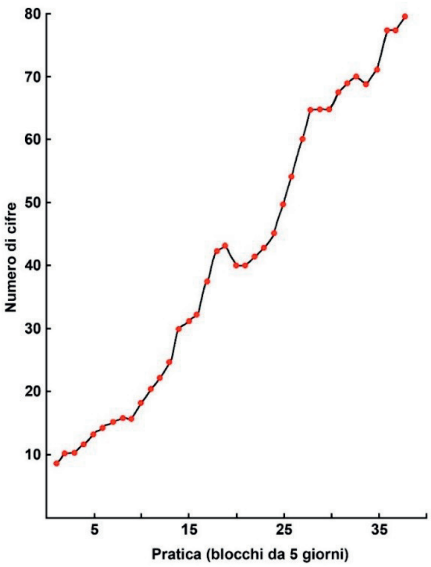


Figura 2. Media del numero di cifre (digit span) in funzione della pratica. Ridisegnato da: Ericsson, Case, Faloon, 1980, p. 1181.

Nell'esempio riportato, la capacità del numero di chunk resta fisso, ma la dimensione di ciascuno aumenta: una sorta di schemi efficienti per la memorizzazione di numeri. "What are chunks? These days, most people equate them with schemas. A large chunk is simply an extensive, sophisticated *schema*" (Colvin Clark, Nguyen, Sweller, 2006, p. 30). La limitazione della memoria di lavoro ha importanti conseguenze nell'istruzione. Studi sulle difficoltà incontrate dagli studenti nell'apprendimento delle materie scientifiche ne evidenziano l'importanza: "Science education research has battled for many decades in seeking solutions to the problems of learner difficulty which seem inherent in much of physics and chemistry as well as some areas of biology … [There is] abundant evidence that one key factor causing the learner difficulties lies in the limitations of working memory capacity." (Reid, 2009, p. 245) L'adagio che quando eravamo studenti ci ve-

niva ripetuto da insegnanti e genitori circa la necessità di studiare di più e di ripassare, aveva un fondamento scientifico.

È possibile superare la limitazione della memoria di lavoro con l'esercizio e la pratica intenzionale; l'esercizio e la riflessione permettono la realizzazione di processi efficaci di chunking e di sviluppare utili strategie. (Ericsson, Krampe, Tesch-Römer, 1993) "Increased use of strategies, such as subvocal verbal rehearsal, chunking, and organization, is also partially responsible for the apparent expansion in working memory. Broad executive processing and strategy use develop and increase with age, leading to more efficient functioning of cognitive resources in general. Strategy use and working memory span are positively correlated; higher span individuals are more likely to use strategies, such as chunking, imagery, and elaboration." (Dehn, 2008, p. 69)

Diventare esperto richiede molta pratica (Simon, Chase, 1973; Ericsson, Krampe, Tesch-Römer, 1993; Macnamara, Maitra, 2019) e sembra non ci siano limiti alla possibilità di migliorare le abilità mentali e la capacità della memoria a breve termine con l'esercizio: "... increases in memory span are due to the use of mnemonic associations in long-term memory. With an appropriate mnemonic system and retrieval structure, there is seemingly no limit to improvement in memory skill with practice." (Ericsson, Case, Faloon, 1980, p. 1182)

Ci sono però due aspetti negativi che mettono in crisi l'uso della memoria di lavoro: il panico, ove le reazioni sono dettate dall'istinto e l'annebbiamento della mente sotto pressione. Queste situazioni sono controproducenti nella classe (Beilock, 2010), ma possono originare situazioni drammatiche. (Gladwell, 2000) L'ambiente di apprendimento che possiamo creare per gli studenti eviterà questi aspetti negativi per l'apprendimento. La memoria di lavoro svolge un ruolo importante nei processi di apprendimento e insegnamento, insieme a molti altri fattori considerati in questo articolo. "... despite the importance of working memory, scholastic performance is also likely to depend on many other factors." (Baddeley, 2007, p. 205)

Lo sviluppo della mente e la capacità di svolgere ragionamenti complessi sono in gran parte dipendenti dall'età. Ma su cosa possiamo agire per aiutare i nostri studenti? Secondo Michelene Chi, tre fattori influenzano lo sviluppo della memoria: le strategie, la conoscenza e la capacità della memoria di lavoro ed elabora queste affermazioni. "The strategy component is an important factor in memory development because older children are adept at acquiring and using strategies to cope with memory tasks. ... Broadly, a strategy is a set of decision processes that determines what sequences of actions to perform. ... Knowledge affects development through the growth of knowledge base. … Associated with the growth of knowledge is a better

structure for that knowledge. ... The capacity hypothesis states that the improvement of performance with age can be partially explained by an increase in the capacity of working memory." (Chi, 1978. p. 74-75) Cosa possono significare queste conoscenze in un corso di chimica? Consideriamo il problema:

10,00 g di pentano [72,15] *reagiscono con una soluzione contenente 10,00 g di* $K_2Cr_2O_7$ [294,2] *e 10,00 g di acido solforico* [98,09].

Calcolare i grammi di CO_2 *[44,01] che si ottengono dalla reazione:*

$$K_2Cr_2O_7 + C_5H_{12} + H_2SO_4 \longrightarrow K_2SO_4 + Cr_2(SO_4)_3 + CO_2 + H_2O.$$

(Tra parentesi quadre è riportato il peso molecolare)

Questo problema viene risolto con facilità dalla maggioranza degli studenti che segue il corso di chimica. Il concetto di reagente limitante viene presentato con un esempio familiare: la metafora del panino. (Cardellini, 1995) Agli studenti viene spiegata la logica del metodo e suggerito di risolvere un numero adeguato di problemi per rinforzare l'acquisizione dei nuovi ragionamenti. Nell'ultima sessione di esame, alcuni studenti che avevano già sbagliato lo scritto della sessione precedente, hanno sbagliato la soluzione di questo problema. Consideriamo gli errori per comprendere la loro origine. Una prima soluzione:

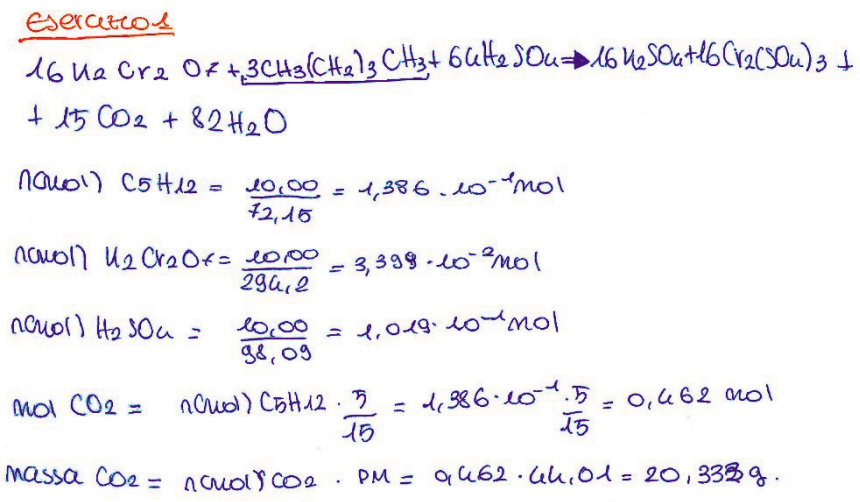


Figura 3. Osservando che la CO_2 si forma per ossidazione del C nei reagenti, la studentessa ha considerato il pentano essere il reagente limitante.

Un altro studente ha trovato che i grammi di CO_2 prodotti sono 91,1:

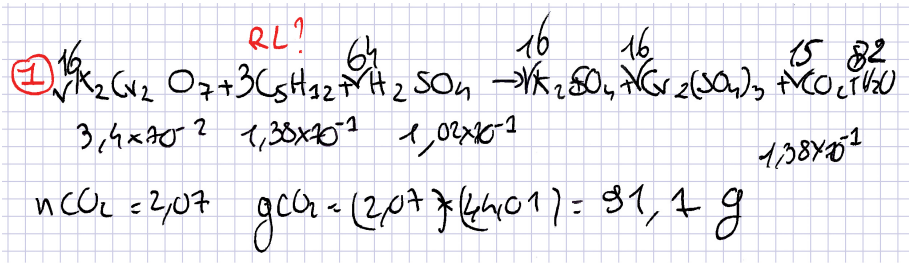
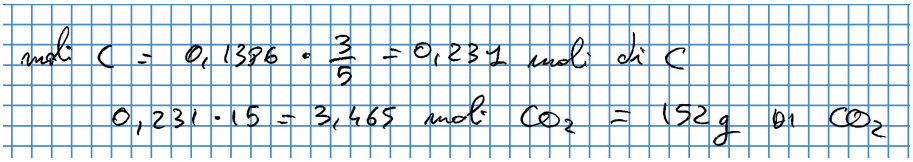


Figura 4. In questa soluzione un altro errore è nel calcolo delle moli di CO_2: (1,38x10^{-1} mol rzn) x (15 mol CO_2/ 1 mol rzn) = 2,07 mol CO_2; le 15 moli di CO_2 sono però formate da 3 moli di C_5H_{12} che reagiscono.

La familiarità con i processi di verifica, le capacità logiche e critiche avrebbero dovuto far sorgere il dubbio che il risultato non fosse accettabile: come è possibile che la massa dei prodotti sia superiore ai 30,00 grammi di reagenti? E che dire di un risultato di 152 grammi di CO_2?



Questi studenti hanno giustificato, come già detto, la determinazione del reagente limitante. Ma non potrebbe essere che la determinazione del reagente limitante sia per questi studenti un procedimento complesso (dato l'insufficiente esercizio, in modo da poter attivare processi di chunking) e sotto la pressione dell'esame hanno fatto ricorso ad una soluzione per loro più semplice? Nei fatti, le loro capacità critiche sono state diminuite dal sovraccarico della memoria di lavoro. Un'altra soluzione conferma questa ipotesi:

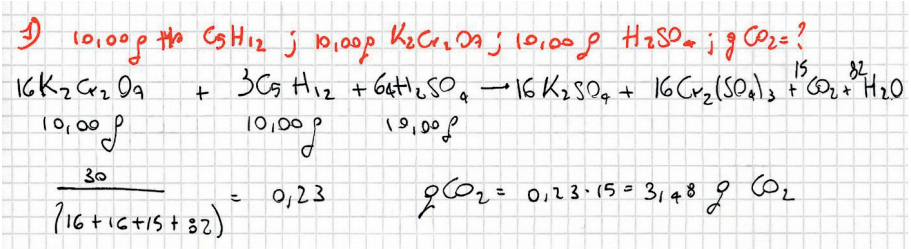


Figura 5. Lo studente ha diviso i grammi dei reagenti (30) per (16 + 16 + 15 + 82) che sono i coefficienti dei prodotti; richiesto, non ha saputo spiegare il motivo logico di tale operazione. Si noti l'assenza delle unità di misura nei calcoli dei procedimenti riportati.

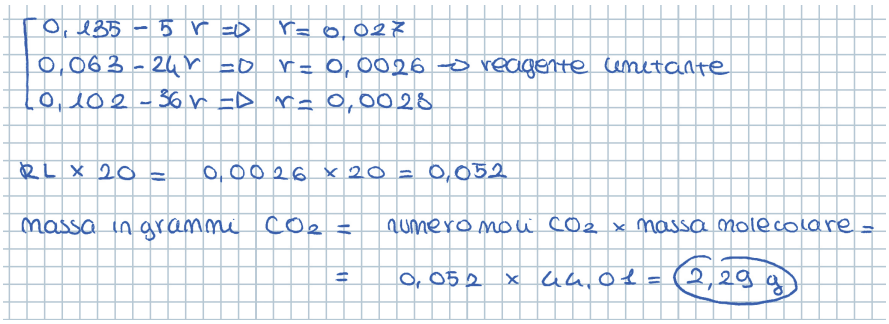
Queste soluzioni evidenziano difficoltà evidenti con il ragionamento chimico. Per aiutare gli studenti a familiarizzare con i ragionamenti del calcolo stechiometrico viene fornita una procedura (Cardellini, 2014, pp. 123-124):

1. si scrive e si bilancia la reazione;
2. si calcolano le moli dei reagenti;
3. moli di reazione che avvengono: *r* mol rzn
4. prima e dopo (*p* e *d*);
5. calcolo del reagente limitante: RL = ...;
6. si calcolano le quantità dei prodotti formati;
7. si calcolano le quantità dei reagenti che hanno reagito;
8. si esegue la verifica.

Si commentano (spiegando e argomentando) i passaggi, si riporta il tempo impiegato e considerazioni sulle difficoltà incontrate.

È importante risolvere molti problemi, ma ancor più importante è ragionare molto sui problemi che si risolvono.

L'acquisizione di questo schema aumenta l'efficacia e l'efficienza; la grande maggioranza degli studenti risolve in modo corretto i problemi e impara dei ragionamenti logici utili per aumentare le capacità cognitive. La studentessa che ha svolto il problema in modo sbagliato come riportato in Figura 3, cinque mesi prima, in un esame scritto parziale aveva risolto un problema strutturalmente identico (reazione: $KMnO_4 + CH_3CH_2CH_2CH_2OH + H_2SO_4 \longrightarrow K_2SO_4 + MnSO_4 + CO_2 + H_2O$.) in modo corretto, anche nel calcolo del reagente limitante:



Come mai lo schema appreso non è stato persistente? Una risposta proviene dalla teoria del carico cognitivo: "The purpose of instruction is to increase the store of knowledge in long-term memory. If nothing has changed in long-term memory, nothing has been learned." (Sweller, Ayres, Kalyuga, 2011, p. 24) Con l'esercizio, la studentessa ha imparato ad utilizza-

re lo schema acquisito in modo conseguente, ma ciò che ha appreso non è stato persistente, ovvero, l'esercizio non è stato sufficiente a cambiare in modo definitivo i collegamenti nella rete neuronale. Gli sforzi degli insegnanti nel motivare e nello spronare allo studio trovano un limite ben descritto da un vecchio proverbio: "You can lead a horse to water but you can't make him drink". Ci sono però delle possibilità di natura emotiva e psicologica che possono aiutare e rendere più facile lo sforzo degli studenti per imparare, come riportiamo nel seguito.

Interesse e motivazione

Richard Ryan e Edward Deci hanno a lungo studiato i fattori che influenzano la motivazione ed hanno sviluppato la Self-Determination Theory (SDT); questa teoria evidenzia l'importanza che ha la motivazione nel guidare il comportamento umano. La SDT suggerisce che, se ci sono le giuste condizioni, gli studenti sono capaci di motivarsi da soli ad apprendere ed evidenza la differenza tra motivazione intrinseca ed estrinseca. "intrinsic motivation, which refers to doing something because it is inherently interesting or enjoyable" e "extrinsic motivation, which refers to doing something because it leads to a separable outcome." (Ryan, Deci, 2000, p. 55) La motivazione in aula è connessa e si riferisce alla partecipazione alle attività didattiche, al fare, all'atteggiamento positivo degli studenti verso quanto l'insegnante propone. È stata definita come "a student's tendency to find academic activities meaningful and worthwhile and to try to get the intended learning benefits from them." (Brophy, 2004, p. 249)

Altri studiosi hanno proposto tre indicatori: il comportamento, il livello del coinvolgimento e la persistenza e gestione dello sforzo. "Students make choices every day about activities and tasks in which to engage. ... A second aspect of motivated behaviors is level of activity, or involvement in a task. Some students are very involved in their courses. They ask questions during lectures, summarize their textbooks, spend considerable effort after class refining notes, outlining readings, and, in general, using different learning strategies to make sense of what they are learning. Other students are less engaged in their courses and do the minimal amount required to get by. ... The third aspect of motivated behaviors is effort and persistence. The willingness of students to work hard and persist when tasks are difficult, boring, or unchallenging is an important factor in motivation and academic success." (Dembo, Seli, 2016, p. 47)

Diverse sono le sorgenti della motivazione degli studenti; l'ambiente scolastico e la percezione dello standard della scuola, l'interesse dei genitori verso l'apprendimento dei figli, la qualità degli insegnanti, il livello di interesse della classe, tanto per citarne alcune. Uno studente più facilmente

parteciperà attivamente alle attività scolastiche se troverà le attività proposte interessanti e importanti per la sua formazione; inoltre, il constatare che è capace di avere successo è un altro fattore motivante. "A key source of self-motivation is *self-efficacy* beliefs, which are related to performance phase processes such as one's choice of activities, effort, and persistence. ... *Outcome expectancies* constitute a second important source of self-motivation. *Outcome expectations* are beliefs about the ultimate consequences of one's performance, such as receiving social recognition or obtaining a desirable position. ... Students' *goal orientations,* or reasons for learning, is another source of motivation to self-regulate that pertains to beliefs or feelings about the purpose of learning." (Zimmerman, Schunk, Dibenedetto, 2017, p. 315) Esperienze positive costruiscono la confidenza nello studente; la confidenza è importante perché confidenza e abilità si alimentano a vicenda.

L'interesse è una formidabile forza che dirige la nostra energia e la nostra attenzione verso attività che riteniamo *piacevoli*; è uno stato psicologico importante da considerare nell'istruzione perché "is grounded in a personal reactions to a wide range of things, including other people, objects, and tasks. Interest also describes a unique, content-specific, motivational variable that is responsible for the processes underlying how people act, feel, engage, and learn." (Renninger, Hidi, 2016, p. 9)

L'interesse viene concettualizzato nella letteratura in diverse maniere che riflettono l'impostazione teorica delle ricerche e dei metodi usati. Una assunzione piuttosto comune è che l'interesse è un fenomeno che emerge dall'interazione dell'individuo con il suo ambiente. (Krapp, Hidi, Renninger, 2014) Viene definito come "a psychological state that involves a desire to become engaged in an activity or know more, in general, about a subject. ... curiosity and interest differ by their objects of desire (specific knowledge vs. general knowledge / activity engagement)." (Markey, Lowenstein, 2014, p. 231)

Interesse e motivazione sono concetti differenti: in alcuni casi ci può essere motivazione senza interesse. Ad esempio, uno studente può studiare la chimica per evitare un brutto voto. Più in generale, va considerato che "The concept of "interest" has often been associated with intrinsically motivation behaviors because people seem to adopt those behaviors out of interest. In fact, several theories of human motivation have referred to people as being *intrinsically motivated* when they are freely doing what interest them." (Deci, 2014, p. 45) L'interesse è una spinta notevole e potente: "Interest is powerful. The triggering of interest initiates productive engagement and the potential for optimal motivation. A person is said to be

interested in some activity, ..., if they voluntarily engage in thinking about it, happily prioritize the problems that arise." (Renninger, Hidi, 2016, p. 1)

Studiare con interesse è importante perché "People working with contents of well-developed individual interest are motivated learners, in the sense that their activity appears purposeful, sustained, and ever deepening. ... their understanding of contents for which they have well-developed individual interest continues to develop because they seize opportunities to learn and seek to work with others and/or texts that provide models for and feedback that supports their curiosity questioning and challenge seeking and serves as a kind of scaffold to more complex aspects of the subject content." (Renninger, 2000, p. 390)

L'impegno significativo viene favorito da un ambiente di apprendimento ottimale per gli studenti; cosa dovrebbe fare un insegnante per avere un clima ottimale nella classe? Vediamo alcuni suggerimenti dalla letteratura: "teachers facilitate the positive emotions of their students by modeling their own enthusiasm and also by *providing support* for their students and their needs. ... This is done by providing choice, affirming students' abilities, scaffolding, expressing care, and otherwise providing a positive encouragement. Teachers foster academic intensity by holding high expectations for critical thinking and rigorous work, and *challenging* students to reach and meet them. ... [Questo perché] ... students are disengaged when both unsupported and unchallenged and that teachers who positively engage students combine these features by supporting students (i.e., emotionally, interpersonally) to meet the challenge of high-level thinking or completing high-quality work." (Shernoff, 2013, p. 130)

In un ambiente di apprendimento ottimale, l'insegnante facilita il coinvolgimento e il miglioramento dell'apprendimento attraverso l'uso e l'insegnamento di strategie che aumentano l'efficacia e l'efficienza. "In good strategies instruction classroom, teachers are concerned with each student's improvement. The goal is to teach every student how to carry out tasks more competently and with less effort. ... This emphasis on task competency and improvement rather than on ability differences is pedagogically sound, with substantial evidence of greater interest in, effort at, and commitment to learning when task involvement/orientation is emphasized rather than ego enhancement." (Pressley et al., 2014, p. 335)

In questo ambiente agli studenti viene suggerito l'uso delle mappe concettuali e di riassunti argomentati per strutturare la conoscenza e verranno impiegati i suggerimenti derivanti dalla cognitive load theory per aumentare l'efficacia e l'efficienza della comprensione e dell'apprendimento.

"Fundamentally, cognitive load theory is about efficiency. Cognitive load theory defines efficiency in terms of two variables: learner performance and

learner mental effort. Instructional environments that result in higher learning outcomes with less mental effort are more efficient than environments that lead to lower outcomes with greater mental effort.". (Colvin Clark, Nguyen, Sweller, 2006, p. 19)

Un maggior numero di studenti proverà interesse e si sentirà più confidente e competente nel perseguire attività scolastiche "when learning environments insure that (a) students are responsible to the group and the group is responsible to the individual, (b) students genuinely respect and value each other's contributions, and (c) students pursue meaningful and substantive ideas and goals." (Goldman et al., 1998, p. 192)

Un ultimo aspetto importante da considerare è la percezione della capacità di riuscire ad un livello designato: il successo e la competenza innescano negli studenti il desiderio di un impegno maggiore; questa convinzione è nota come self-efficacy. "Self-efficacy beliefs have also shown convergent validity in influencing such key indices of academic motivation as choice of activities, level of effort, persistence, and emotional reactions. There is evidence that self-efficacious students participate more readily, work harder, persist longer, and have fewer adverse emotional reactions when they encounter difficulties than do those who doubt their capabilities." (Zimmerman, 2000, p. 86)

Inoltre, gli studenti che percepiscono la propria efficacia usano strategie di apprendimento efficaci, sono capaci di valutare i loro progressi e si distraggono di rado; infatti, risulta che "Students who feel more efficacious about learning should be more apt to engage in self-regulation (e.g., set goals, use effective learning strategies, monitor their comprehension, evaluate their goal progress) and create effective environments for learning (e.g., eliminate or minimize distractions, find effective study partners). In turn, self-efficacy can be influenced by the outcomes of behaviors (e.g., goal progress, achievement) and by input from the environment (e.g., feedback from teachers, social comparisons with peers)." (Schunk, Pajares, 2009, p. 36)

L'interazione profonda tra motivazione e guadagni cognitivi è a fondamento del modello unificato di apprendimento (ULM). "The ULM is founded on three basic principles of learning:

1. Learning is a product of working memory allocation.
2. Working memory's capacity for allocation is affected by prior knowledge.
3. Working memory allocation is directed by motivation.

These three principles of learning form the foundation for a complete theory of instruction and teaching. Simply put, teaching that follows these

principles will be effective; teaching that does not follow these principles will be ineffective. (Shell et al., 2010, p. 3)

Gli insegnanti fanno la differenza

Gli studenti utilizzano la tecnologia con grande abilità e facilità; nondimeno hanno bisogno dell'aiuto degli insegnanti per sviluppare le loro capacità cognitive, poiché non riescono a trasferire queste loro abilità nelle conoscenze formali impartite a scuola, necessarie per riuscire nella vita. "Although our students are generally highly skilled and comfortable with using technology, what we have found with working with K–12 students is that there is limited transfer of this skill between using technology for entertainment and personal use and using technology to learn academic content and skills. This is where educators play a crucial role." (Donovan, Green, 2014, pp. 58-59)

Il titolo di questo capitolo sottolinea un cambiamento avvenuto negli ultimi decenni: le numerose riforme messe in atto in molti paesi hanno partorito risultati deludenti e non sono sopravvissute ai cambiamenti avvenuti nella scuola. "… almost none of the widely advocated reforms – modular scheduling, open space, individualized instruction, different school governance experiments, vouchers, charter schools, the various curriculum reform initiatives – have survived or changed student performance." (Codding, 1997, come riportato in Townsend, 2007, p. 933)

Che cosa è importante per la formazione degli studenti? Nel caso di molti premi Nobel, due fattori hanno influito in modo positivo alla loro formazione: i genitori, anche attraverso le competenze derivate dalla loro occupazione; "Parents also influenced the development of scientific innovators of Nobel caliber in children via their professions. Particularly, professional occupations of many parents were related to science." (Shavinina, 2013, p. 263) e alcuni insegnanti speciali; "The findings demonstrate that almost each Nobel Prize winner had at least one exceptional teacher in elementary or secondary school." (Shavinina, 2013, p. 267)

Quali erano le peculiarità di questi insegnanti di premi Nobel? Avevano alcune caratteristiche in comune che li distinguevano: "First of all, they were *teachers with love and curiosity for the subjects they were teaching*. This love for the subjects was contagious and sparked imagination and interest of future Nobel laureates. ... Second, teachers of Nobel laureates were *enthusiastic, inspiring, and challenging teachers with a playful spirit.*" (Shavinina, 2013, p. 267) Le qualità professionali e umane di questi insegnanti possono variare molto; ma all'altro estremo dello spettro forse va collocato l'insegnante descritto da alcuni commenti fatti da uno studente:

"As a student, I hated chemistry. ... The teacher ... appeared to dislike chemistry as much as he disliked the students." (Lippincott, 1979, p. 1) Purtroppo, forse questo tipo di insegnanti è conosciuto anche nel nostro paese; la conseguenza più negativa di questa avversione è che gli studenti non imparano la chimica:

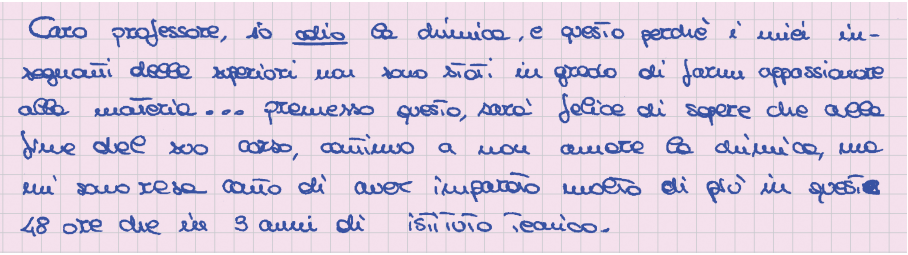

Caro professore, io odio la chimica, e questo perchè i miei insegnanti delle superiori non sono stati in grado di farmi appassionare alla materia... premesso questo, sarà felice di sapere che alla fine del suo corso, continuo a non amare la chimica, ma mi sono resa conto di aver imparato molto di più in queste 48 ore che in 3 anni di istituto tecnico.

Figura 6. "Caro professore, io odio la chimica ..."

Per avere un impatto, l'insegnante dovrebbe tener conto dei differenti contesti che formano l'ambiente nel quale l'apprendimento ha luogo e del fatto che l'insegnante stesso con le sue caratteristiche e personalità è parte di questi contesti. "Educational contexts include social elements such as teachers and peers, cultural elements such as norms and expectations, and instructional and material elements such as content area, curricula and tasks. However, more recent motivational constructs have been focused on the self while regarding context as "background."" (Turner, 2001, p. 85)

Anche le emozioni possono svolger un ruolo nell'istruzione, in certe età più che in altre. "We believe that the goals of teaching and learning science include knowledge (cognition), emotion and motivation." (Shavelson, Ruiz-Primo, Wiley, 2005, p. 414) L'esistenza di aspetti affettivi ed emotivi è più evidente nelle scuole materne e nelle prime classi elementari, ove alcune maestre vengono chiamate 'mamma'. Stati emotivi in qualche modo analoghi sono attivi in tutte le età evolutive. A cosa ci si riferisce quando nell'insegnamento si parla di dimensioni affettive? "Affective dimensions refer to such psychological constructs as attitudes, values, beliefs, opinions, emotions, interests, motivation, and a degree of acceptance or rejection." (Kahveci, Orgill, 2015, p. v)

Va evidenziato anche il concetto di attitudine, in qualche modo collegato con la motivazione. In letteratura è accettata la definizione di Eagly e Chaiken: "*attitude is a psychological tendency that is expressed by evaluating a particular entity with some degree of favor or disfavor*" (Albarracin et al., 2005, p. 4) Le attitudini sono costrutti che esistono nella mente e che hanno riflessi importanti nel comportamento; la percezione di

una positiva attitudine in chimica costituisce un potente facilitatore verso l'impegno necessario alla sua acquisizione.

Insegnare in modo da conquistare gli studenti all'impegno e coinvolgerli in ciò che desideriamo essi imparino è difficile. Ad esempio, apprendere in modo significativo le procedure ed i ragionamenti necessari per padroneggiare la soluzione di complessi problemi di stechiometria richiede molto sforzo mentale. In *Qualities of Effective Teachers* James Stronge (2007) argomenta circa il significato di efficacia nell'insegnamento: "Effective teaching is the result of a combination of many factors, including aspects of the teacher's background and ways of interacting with others, as well as specific teaching practices. To discover what makes an effective teacher, we must understand what is meant by the word *effective*, realizing that the definition of this term has multiple layers and implications within the teaching profession." (p. 99) Riassume in quattro affermazioni generali le qualità che un insegnante efficace in tutte le situazioni e per tutti i tipi di studenti dovrebbe personificare; le quattro "c" (p. 100):

- The effective teacher *cares* deeply.
- The effective teacher recognizes *complexity*.
- The effective teacher *communicates* clearly.
- The effective teacher serves *conscientiously*.

L'insegnante che abbiamo finora descritto è in grado di offrire agli studenti un ambiente di apprendimento adeguato al coinvolgimento degli studenti. Ma, dal punto di vista degli studenti, che caratteristiche dovrebbe avere questo ambiente? Sono state condotte delle interviste con tre gruppi di studenti e l'analisi delle risposte ha permesso di evidenziare otto temi motivanti per gli studenti. "The eight elements are listed below.

- Establishing interest
- Allowing choice of courses so that interests can be followed
- Establishing relevance
- Learning activities
- Teaching for understanding
- Assessment of learning activities
- Close teacher–student relationships
- Sense of belonging between classmates." (Kember, 2016, p. 80)

Aspetti motivanti e demotivanti sono complementari e la noia è all'estremo opposto dell'interesse. L'interesse è un elemento molto motivante ed è stato scelto dal 77,8% degli intervistati; ecco una delle argomentazioni: "*Interest is most important. If you are not interested in chemistry, doing labs will be very toilful for you*." (Kember, 2016, p. 82)

Che cosa soprattutto motiva gli studenti? L'interesse dell'insegnante per la riuscita dei suoi studenti e l'entusiasmo che prova per il proprio lavoro: "the lecturer's own attitudes and enthusiasm have an important effect on student motivation. Research on student ratings of teaching as well as on student learning indicates that the enthusiasm of the lecturer is an important factor in affecting student learning and motivation." (Svinicki, McKeachie, 2014, p. 59) Tutti gli insegnanti, anche coloro che non possono vantare una solida esperienza, possono fare piccoli miracoli motivando i loro studenti con il loro entusiasmo per l'insegnamento.

Rilevanza di ciò che si apprende

La rilevanza di ciò che si insegna è un aspetto fondamentale per ciò che si intende per apprendimento significativo. Questo è sempre vero, ma in certe età è cruciale; una domanda che spesso gli studenti pongono è: "Perché devo studiare ...". In letteratura è un concetto ricorrente, ma non esiste una definizione condivisa del termine rilevanza: certamente ha più dimensioni ed è spesso usato come sinonimo di altri concetti educativi. Un'ampia recensione recente fornisce alcuni suggerimenti per concettualizzare e rendere operativo il concetto. "These suggestions intend to differentiate between a perception of relevance which merely overlaps students' interests and a perspective which contains other areas of relevance, e.g. those justified by economical needs and/or defined by societal interests. ... The definition of 'relevance' we have chosen to employ possesses a multi-dimensional character (not just the perspective of learner needs and interests). ... relevance contains different major dimensions, namely those stemming from the individual, societal and vocational realms. All of these dimensions are part of a broader field covering both intrinsic and extrinsic components which have value for both the present and the future." (Stuckey et al., 2013, p. 26)

Il laboratorio e più in generale le applicazioni sono aspetti che aumentano l'interesse e la rilevanza dell'insegnamento. Come è stato osservato, "chemistry curricula tend to put the subject first, and applications a poor second. Forgotten is that relevancy is in the processes and products we utilise in society, and only afterwards in the understanding (should we wish to utilise scientific principles in solving a problem or making a decision). Thus, in terms of relevant conceptual learning, it would seem that current curriculum approaches are not providing the impetus to promote the popularisation of chemistry that is expected." (Holbrook, 2005, p. 1)

Una domanda importante riguarda i modi in cui si può aumentare la rilevanza del nostro insegnamento. L'interesse aumenta se gli studenti si sentono sfidati nelle loro capacità e percepiscono la possibilità di riuscire.

"Relevance can be achieved through the use of realistic science - related problems in which opportunities are provided for critical judgements and decisions. Understanding of the processes of science can be promoted by exercises in which simultaneous cognition and exhibition of scientific behaviours is ensured." (Byrne, Johnstone, 1988, p. 45)

Insegnanti desiderosi sia di insegnare ciò che viene richiesto dal programma che di migliorare le capacità cognitive degli studenti, cercano un equilibrio nell'organizzare il tempo nella classe. Le richieste del programma sono importanti, ma la qualità degli studenti non è da meno e varia di anno in anno. A volte è necessario tralasciare alcuni argomenti del programma, o dare ad essi una enfasi minore, per adattarlo alla qualità degli studenti. L'organizzazione del tempo è necessaria per spiegare gli argomenti rilevanti e per avere tempo per delle attività motivanti. Non è sempre vero che *repetita iuvant*: "It's a common misconception that the more you give the learners the better." (Colvin Clark, Nguyen, Sweller, 2006, p. 108)

La comunità Europea, attraverso i descrittori di Dublino e la società hanno grandi aspettative nella scuola; oltre alla conoscenza delle materie scolastiche viene richiesta la formazione umana e sociale degli studenti: "The ability to plan, think critically and creatively, work with others and make decisions about your future, be aware and appreciate yourself and others from your own and other cultures, recognize your value and responsibilities as a citizen, become a life-long learner that has a value system, the leadership skills and commitment to build a better life for yourself, your family and the community, both local and global, may be, in the end, of more value to our development as a society than learning trigonometry or when a particular event in history occurred." (Townsend, 2007, p. 954)

Bibliografia

G. S. Aikenhead, Chemistry and physics instruction: Integration, ideologies, and choices, *Chemical Education: Research and Practice*, **4** (2), 115-130, 2003.

D. Albarracin, B. T. Johnson, M. P. Zanna, G. T. Kumkale, Attitudes: Introduction and scope. In D. Albarracin, B. T. Johnson, M. P. Zanna (Eds.), *The handbook of attitudes* (pp. 3-19). Erlbaum: Mahwah, NJ, 2005.

R. C. Atkinson, R. M. Shiffrin, Human memory: A proposed system and its control processes. In K. W. Spence, J. T. Spence (Eds.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory*, Vol. 2 (pp. 89-195). Academic Press: New York, 1968.

A. D. Baddeley, G. J. Hitch, Working memory. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory*, Vol. 8 (pp. 47-89). Academic Press: New York, 1974.

A. Baddeley, Working memory. *Science*, **255** (5044), 556-559, 1992.

A. Baddeley, Working memory: Looking back and looking forward. *Nature Reviews*, **4**, 829-839, 2003.
A. Baddeley, *Working memory, thought, and action*. Oxford University Press: Oxford, 2007.
S. Beilock, *Choke: What the secrets of the brain reveal about getting it right when you have to*. Free Press: New York, 2010.
M. S. Byrne, A. H. Johnstone, How to make science relevant. *School science review*, **70** (251), 43-46, 1988.
J. Brophy, *Motivating students to learn*. Lawrence Erlbaum: Mahwah, NJ, 2004.
M. Byrne, A. H. Johnstone, A. Pope, Reasoning in science: a language problem revealed? *School Science Review*, **75** (272), 103-107, 1994.
L. Cardellini, Moli di reazione che avvengono: un concetto utile nella stechiometria. *La Chimica nella Scuola*, **17** (1), 19-21, 1995.
L. Cardellini, Chemistry: Why the subject is difficult? *Educación Química*, **23**, E2, 305-310, 2012.
L. Cardellini, *Strategie per il problem solving in chimica*. Libreria Scientifica Ragni: Ancona, 2014,
P. Carruthers, *The centered mind. What the science of working memory shows us about the nature of human thought*. Oxford University Press: Oxford, 2015.
J. R. T. Cassels, A. H. Johnstone, The effect of language on student performance on multiple choice tests in Chemistry. *Journal of Chemical Education*, **61** (7), 613-615, 1984.
M. T. H. Chi, Knowledge structures and memory development. In R. S. Siegler (Ed.), *Children thinking: What develops*? (pp. 73-96). Erlbaum: Hillsdale, NJ, 1978.
R. Colvin Clark, F. Nguyen, J. Sweller, *Efficiency in learning. Evidence-based guidelines to manage cognitive load*. Pfeiffer: San Francisco, CA, 2006.
N. Cowan, The magical mystery four: How is working memory capacity limited, and why? *Current Directions in Psychological Science*, **19** (1), 51-57, 2010.
E. L. Deci, The relation of interest to the motivation of behavior: A self-determination theory perspective. In K. A. Renninger, S. Hidi, A. Krapp (Eds.), *The role of interest in learning and development* (pp. 43-70). Psychology Press: New York, 2014.
M. H. Dembo, H. Seli, *Motivation and learning strategies for college success. A focus on self-regulated learning*. Routledge: New York, 2016.
M. J. Dehn, *Working memory and academic learning. Assessment and intervention*. John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, 2008.
L. Donovan, T. Green, *Making change: Creating 21st century teaching & learning environments*. Shell Education: Huntington Beach, CA, 2014.
K. A. Ericcson, W. G. Chase, S. Faloon, Acquisition of a memory skill. *Science*, **208** (4448), 1181-1182, 1980.
K. A. Ericsson, R. T. Krampe, C. Tesch-Römer, The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review*, **100** (3), 363-406, 1993.
M. Gladwell, The art of failure. Why some people choke and others panic. *The New Yorker*, August 21 & 28, 84-92, 2000.

S. R. Goldman, C. Mayfield-Stewart, H. V. Bateman, J. W. Pellegrino, Environments that support meaningful learning. In L. Hoffmann, A. Krapp, K. A. Renninger, J. Baumert (Eds.), *Interest and learning* (pp. 184-196). IPN: Kiel, 1998.
J. D. Herron, *The chemistry classroom. Formulas for successful teaching*. American Chemical Society: Washington, DC, 1996.
J. Holbrook, Making chemistry teaching relevant. *Chemical Education International*, **6** (1), 1-12, 2005.
E. W. Jenkins, N. W. Nelson, Important but not for me: students' attitudes towards secondary school science in England. *Research in Science & Technological Education*, **23** (1), 41-57, 2005.
A. H. Johnstone, New Stars for the Teacher to Steer by? *Journal of Chemical Education*, **61** (10), 847-849, 1984.
A. H. Johnstone, Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, **7** (2), 75-83, 1991.
A. H. Johnstone, Chemical education research: Where from here? *University Chemistry Education*, **4** (1), 32-36, 2000.
A. H. Johnstone, D. Selepeng, A language problem revised. *Chemistry Education Research and Practice in Europe*, **2** (1), 19-29, 2001.
M. Kahveci, M. Orgill, Preface. In M. Kahveci, M. Orgill (Eds.), *Affective dimensions in chemistry education* (pp. v-ix). Springer-Verlag: Berlin, 2015.
D. Kember, *Understanding the nature of motivation and motivating students through teaching and learning in higher education*. Springer: Singapore, 2016.
R. B. Kozma, J. Russell, Multimedia and understanding: Expert and novice responses to different representations of chemical phenomena, *Journal of Research in Science Teaching*, **34** (9), 949-968, 1997.
A. Krapp, S. Hidi, K. A. Renninger, Interest, learning, and development. In K. A. Renninger, S. Hidi, A. Krapp (Eds.), *The role of interest in learning and development* (pp. 3-25). Psychology Press: New York, 2014.
R. Leeper, A study of a neglected rortion of the field of learning—the development of sensory organization. *The Pedagogical Seminary and Journal of Genetic Psychology*, **46** (1), 41-75, 1935.
W. T. Lippincott, Why students hate chemistry. *Journal of Chemical Education*, **56** (1), 1-1 1979.
B. N. Macnamara, M. Maitra, The role of deliberate practice in expert performance: revisiting Ericsson, Krampe & Tesch-Römer (1993). *Royal Society Open Science*, **6** (8), 190327, 2019.
A. Markey, G. Lowenstein, Curiosity. In R. Pekrun, L. Linnenbrink-Garcia (Eds.), *International handbook of emotion in education* (pp. 228-246). Routledge: New York, 2014.
G. A. Miller, The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review,* **63** (2), 81-97, 1956.
G. A. Miller, E. Galanter, K. H. Pribram, *Plans and the structure of behavior.* Holt: New York, 1960.
A. Miyake, P. Shah (Eds.), *Models of working memory: mechanisms of active maintenance and executive control*. Cambridge University Press: New York, 2007.

J. Osborne, S. Collins, *Pupils' and parents' views of the school science curriculum*. King's College London: London, 2000.
G. Polya, *How to solve it: A new aspect of mathematical method*, 2nd Ed. Princeton University Press: Princeton, NJ, 1985.
M. Pressley, P. Beard El-Dinary, M. B. Marks, R. Brown, S. Stein, Good strategy instruction is motivating and interesting. In K. A. Renninger, S. Hidi, A. Krapp (Eds.), *The role of interest in learning and development* (pp. 233-358). Psychology Press: New York, 2014.
N. Reid, Working memory and science education: conclusions and implications. *Research in Science & Technological Education*, **27** (2), 245-250, 2009.
K. A. Renninger, Individual Interest and its implication for understanding intrinsic motivation. In C. Sansone, J. M. Harackiewicz (Eds.), *Intrinsic and extrinsic motivation. The search for optimal motivation and performance* (pp. 373-404). Academic Press: San Diego, CA, 2000.
K. A. Renninger, S. E. Hidi, *The power of interest for motivation and engagement*. Routledge: New York, 2016.
J. T. E. Richardson, R. W. Engle, L. Hasher, R. H. Logie, E. R. Stoltzfus, R. T. Zacks, *Working Memory and human cognition*. Oxford University Press: New York, 1996.
M. Rocard, P. Csermely, D. Jorde, D. Lenzen, H. Walberg-Henriksson, V. Hemmo, *Science education now: A renewed pedagogy for the future of Europe*, Directorate General for Research, Science, Economy and Society, Brussels 2007. Retrieved 03/12/2016, from http://ec.europa.eu/research/science-society/document_library/pdf_06/report-rocard-on-science-education_en.pdf.
R. M. Ryan, E. L. Deci, Intrinsic and extrinsic motivations: Classic definitions and new directions. *Contemporary Educational Psychology*, **25** (1), 54-67, 2000.
R. M. Ryan, E. L. Deci, An overview of self-determination theory: An organismic-dialectical perspective. In E. L. Deci, R. M. Ryan (Eds.), *Handbook of self-determination research* (pp. 3-33). University of Rochester Press, Rochester, NY, 2002.
D. H. Schunk, F. Pajares, Self-efficacy theory. In K. R. Wentzel, A. Wigfield (Eds.), *Handbook of motivation at school* (pp. 35-53). Routledge: New York, 2009.
T. J. Sejnowski, *The deep learning revolution*. The MIT Press: Cambridge, MA, 2018.
H. A. Simon, How big is a chunk? By combining data from several experiments, a basic human memory unit can be identified and measured. *Science*, **183** (4124), 482-488, 1974.
R. J. Shavelson, M. A. Ruiz-Primo, E. W. Wiley, Windows into the mind. *Higher Education*, **49** (4), 413-430, 2005.
L. V. Shavinina, Where did all great innovators come from? Lessons from early childhood and adolescent education of Nobel laureates in science. In L. V. Shavinina (Ed.), *The Routledge international handbook of innovation education* (pp. 259-272). Routledge: New York, 2013.

D. F. Shell, D. W. Brooks, G. Trainin, K. M. Wilson, D. F. Kauffman, L. M. Herr, *The unified learning model. How motivational, cognitive, and neurobiological sciences inform best teaching practices*. Springer: Dordrecht, Heidelberg, 2010.
D. J. Shernoff, *Optimal learning environments to promote student engagement*. Springer New York, 2013.
H. A. Simon, W. G. Chase, Skill in chess. *American Scientist*, **61** (4), 394-403, 1973.
H.-R. Sliwka, Reform of chemical language as a model for spelling reform. *Journal of the Simplified Spelling* Society, **32**, 24-28, 2003.
J. H. Stronge, *Qualities of effective teachers*, 2nd Ed. Association for Supervision and Curriculum Development: Alexandria, VA, 2007
M. Stuckey, A. Hofstein, R. Mamlok-Naaman, I. Eilks, The meaning of 'relevance' in science education and its implications for the science curriculum. *Studies in Science Education*, **49** (1), 1-34, 2013.
M. D. Svinicki, W. J. Mckeachie, *McKeachie's teaching tips. Strategies, research, and theory for college and university teachers*, 14 ed. Wadsworth, Cengage Learning: Belmont, CA, 2014.
J. Sweller, P. Ayres, S. Kalyuga, *Cognitive load theory*. Springer: New York, 2011.
K. S. Taber, Learning at the symbolic level. In J. K. Gilbert, D. Treagust, (Eds), *Multiple representations in chemical education* (pp. 75-105). Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2009.
T. Townsend, School effectiveness and improvement in the twenty-first century: Reframing for the future. In T. Townsend (Ed.), *International handbook of school effectiveness and improvement* (pp. 933-962). Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2007.
J. C. Turner, Using context to enrich and challenge our understanding of motivational theory. In S. Volet, S. Järvelä (Eds.), *Motivation in learning contexts. Theoretical advances and methodological implications* (pp. 85-104). Elsevier Science: Oxford, UK, 2001.
B. J. Zimmerman, Self-efficacy: An essential motive to learn. *Contemporary Educational Psychology*, **25** (1), 82-91, 2000.
B. J. Zimmerman, D. H. Schunk, M. K. Dibenedetto, The role of self-efficacy and related beliefs in self-regulation of learning and performance. In A. J. Elliot, C. S. Dweck, D. S. Yeager (Eds.), *Handbook of competence and motivation: theory and application* (pp. 313-333), 2nd Ed. The Guilford Press: New York, 2017.

Finito di stampare nel mese di dicembre del 2019
dalla tipografia «The Factory S.r.l.»
00156 Roma – via Tiburtina, 912
per conto della «Gioacchino Onorati editore S.r.l. – unipersonale» di Canterano (RM)