

Qualità dell'Aria negli Edifici Scolastici

WP COVID, MAC

Analisi effetti delle mascherine sulla concentrazione di CO₂ reinalata



Data: 26.1.2022
Task Leader: IDM
Autore: Clara Peretti
Co-autori: partner

INDICE

1.	INTRODUZIONE	3
2.	RIFERIMENTI	3
3.	DEFINIZIONI ED ABBREVIAZIONI	4
4.	SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE	4
5.	MODELLI UTILIZZATI E METODI DI MISURA	5
5.1	Parametri misurati e indicatori	5
5.2	Aria inspirata	5
5.3	Aria espirata	8
5.4	Indagine termografica	8
5.5	Indagine soggettiva	8
5.6	Analisi sui dispositivi	9
5.7	Apparecchiatura	9
6.	RISULTATI	10
6.1	Atti respiratori, volumi e composizione espirato	10
6.2	Influenza della velocità dell'aria	13
6.3	Misure con e senza dispositivi	16
6.4	Analisi delle temperature superficiali del viso	24
6.5	Umidità assorbita dal dispositivo	25
6.6	Analisi soggettiva	25
6.7	Riepilogo dei dati	29
7.	CONCLUSIONI	32

1. INTRODUZIONE

Consideriamo che uno studente passa una parte considerevole del tempo all'interno di un'aula scolastica, più del 90% della sua vita in generale è passata all'interno di ambienti chiusi. Il benessere, il comfort e la salute dipendono fortemente da cosa una persona respira all'interno dell'ambiente in cui si trova. Nelle condizioni migliori noi respiriamo una miscela di gas composta dal 20,9% di ossigeno (O₂), 78% di azoto (N₂), 0,04% (400 ppm) di anidride carbonica (CO₂), 1% di gas inerti, un tasso variabile di umidità (in media 6 g/m³). Con l'attività metabolica consumiamo una parte di questo ossigeno, producendo anidride carbonica e composti organici volatili che rilasciamo nell'aria. Più intensa è l'attività che svolgiamo, maggiore è la quantità di ossigeno consumato e quella di anidride carbonica prodotta. Inoltre, questa miscela di gas chiamata aria cambia la sua composizione in peggior modo tanto più velocemente, quanto più tempo trascorriamo all'interno di un ambiente chiuso, quante più persone sono presenti e meno l'ambiente viene ventilato. In questi casi diminuisce la quantità di ossigeno, aumenta quella di anidride carbonica e di altre sostanze come i composti organici volatili e aerosol rendendo in breve tempo la qualità dell'aria all'interno dell'ambiente igienicamente non più accettabile.

La recente emergenza sanitaria provocata dalla diffusione del SARS-CoV-2 ha imposto di coprire, per lunghi periodi, il naso e la bocca con dispositivi, quando si è in stretta vicinanza con altre persone: mascherine, scaldacollo e visiere, che modificano la qualità dell'aria respirata e in molti casi creano disagio a chi li indossa. In particolare, svolgere le attività quotidiane coprendo il naso e la bocca implica che una parte della propria aria espirata venga trattenuta all'interno del dispositivo indossato e quindi reinalata.

Il presente studio si propone di caratterizzare la qualità dell'aria inspirata quando viene indossato un dispositivo di copertura di naso e bocca e di valutare il disagio che esso provoca. Coprendo naso e bocca si crea un "micro" ambiente indoor ed è all'interno di questo che respiriamo.

2. RIFERIMENTI

- | | |
|--------------------------|--|
| UNI EN 16798-1 | Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica. |
| ISO 17772-1 | Indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings. |
| UNI EN 14683:2019 | Maschere facciali ad uso medico - Requisiti e metodi di prova. |
| Ad-hoc AG IRK/AOLG, 2008 | Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden - Erarbeitet durch die Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden. |

3. DEFINIZIONI ED ABBREVIAZIONI

PID	foto-ionizzatore
TVOC	composti organici volatili totali
VOC	composti organici volatili espressi per singolo componente
CO₂	anidride carbonica
O₂	ossigeno
N₂	azoto
ppm	parti per milione
Dispositivo	in questo testo: mascherina, visiera, scaldacollo indossati per coprire il naso e la bocca
Espirazione	Fase della respirazione durante la quale l'aria contenuta nei polmoni viene emessa all'esterno attraverso le vie aeree.
Inspirazione	Atto fisiologico che consente la penetrazione di aria dall'ambiente esterno nei polmoni
CO₂ Inspirata [ppm]	Concentrazione di CO ₂ in ppm che una persona immette nel proprio apparato respiratorio
CO₂ Reinalata [%]	Rapporto, in percentuale, fra la CO ₂ inspirata e quella espirata
Test 1..n	persona sottoposta a test
Scala Likert	tecnica utilizzata per misurare atteggiamenti ed opinioni attraverso la somministrazione di questionari.
Termografia	Rilevamento della distribuzione di temperatura sulla superficie di un corpo ottenuto individuando, attraverso particolari strumenti, le radiazioni infrarosse da esso emesse.

4. SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE

Gli obiettivi del seguente studio sono:

- Caratterizzare la qualità dell'aria inspirata da una persona quando indossa il dispositivo di copertura del naso e della bocca in diverse condizioni di utilizzo.
- Verificare se i materiali costituenti i dispositivi rilasciano sostanze nocive che possono essere inalate da chi l'indossa.
- Valutare il disagio che si avverte con l'uso prolungato dei dispositivi.

Lo studio **non affronta i seguenti aspetti:**

- L'efficienza di un dispositivo di copertura di naso e bocca nell'evitare la trasmissione di virus.
- Effetti tossicologici e sanitari legati all'esposizione a inquinanti.
- Qualità dell'aria inspirata, indossando un dispositivo, sotto sforzo intenso.

5. MODELLI UTILIZZATI E METODI DI MISURA

5.1 Parametri misurati e indicatori

I principali componenti dell'aria inspirata ed espirata da una persona sono ossigeno (O_2), anidride carbonica (CO_2), azoto (N_2), composti organici volatili (VOC), agenti biologici e vapore acqueo. Analogamente alle valutazioni della qualità dell'aria in ambiente indoor, anche per le prove riportate in questo studio si utilizza come indicatore unico la CO_2 in quanto questo parametro è misurabile con precisione e la sua diluizione nell'aria è rappresentativa anche per gli altri composti eventualmente ispirati/espirati. O_2 e TVOC sono stati comunque determinati durante le prove, tuttavia le elaborazioni dei dati qui riportate si riferiscono esclusivamente al parametro CO_2 .

5.2 Aria inspirata

Il metodo di campionamento e misura impiegato per le prove deve soddisfare i seguenti requisiti:

1. Non interferire con la respirazione, ovvero, l'aria prelevata dal sistema deve essere rappresentativa di quella effettivamente inspirata dalla persona.
2. separare l'aria che entra nei polmoni (inspirato) dall'aria che esce dai polmoni (espirato).

La tecnica di misura utilizzata prevede, ad ogni atto respiratorio e durante tutta la fase di inspirazione, di prelevare una piccola quantità di aria tramite una sonda posta fra naso e bocca e di raccogliere quest'aria in una sacca in Tedlar (PVDF) fino a riempirla. Il passaggio dell'aria dalla sonda alla sacca avviene azionando una pompa che viene attivata solamente durante la fase di inspirazione; in fase di espirazione la pompa viene spenta, e una valvola inibisce l'eventuale ingresso di aria nella pompa e quindi nella sacca. Pompa e valvola vengono attivate manualmente dalla persona che sta effettuando la prova, seguendo la propria respirazione. Il contenuto della sacca viene successivamente analizzato.



Figura 1



Figura 2



Figura 3



Figura 4

Linea di prelievo:

- un tubo in silicone di diametro 4mm (interni) che avvolge la testa fra naso-bocca e nuca, forato in prossimità di naso e bocca;
- una pompa in PTFE regolata a una portata di circa 1,4 L/min;
- una valvola che blocca l'aria in ingresso nella pompa in fase di espirazione;
- un comando di attivazione (pompa e valvola) che deve essere gestito dalla persona che effettua la prova:

1. Inspirazione: pompa attiva e valvola aperta.
2. Espirazione: pompa spenta e valvola chiusa.

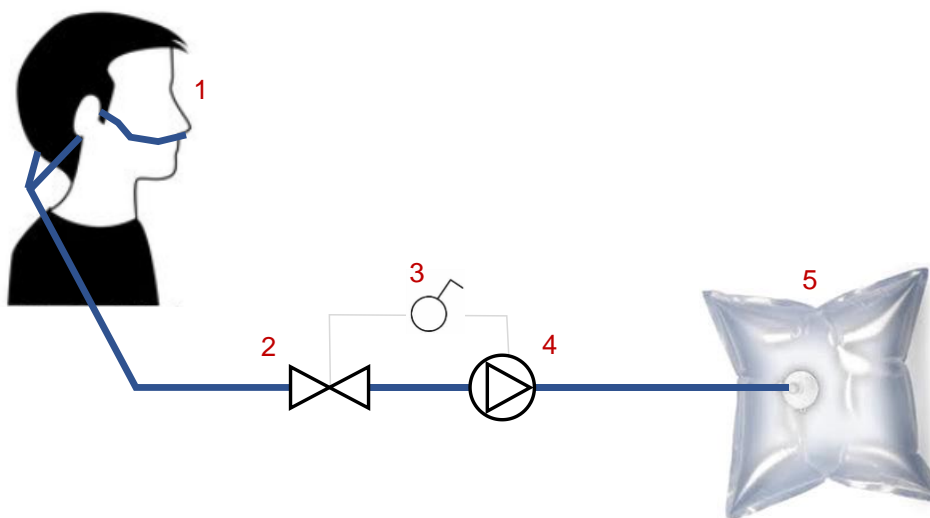


Figura 5. Linea di prelievo

Lo schema della linea di prelievo è riportato in Figura 5:

- 1 tubo in silicone forato che avvolge la testa fra naso-bocca
- 2 valvola
- 3 interruttore per azionamento manuale
- 4 pompa
- 5 sacca di Tedlar.

Note:

- *Il flusso di prelievo è stato mantenuto sufficientemente basso (1,4 L/min) così da interferire al minimo con le condizioni di pressione presenti fra naso-bocca e col dispositivo durante la fase di inspirazione.*
- *Per contenere inspirato ed espirato sono stati utilizzati sacche separate di Tedlar da 5L e 10L.*
- *Per collegare i vari componenti della linea di prelievo sono stati utilizzati tubi in PTFE e silicone.*
- *Il volume interno dei tubi dalla sonda fino alla valvola era di circa 0,025L.*
- *La durata dell'inspirazione è variata fra i 4 e i 15 secondi.*
- *I volumi d'aria di una singola inspirazione variavano fra 0,8L e 2,5L*
- *Durata inspirazione e volume d'aria inspirato non sono correlati, ovvero ad una inspirazione breve non corrisponde necessariamente un volume d'aria minore, perché la persona può avere inspirato per minor tempo ma con più energia.*
- *Il volume prelevato dalla pompa durante la fase di inspirazione dipendeva dal tempo che questa rimaneva attiva. I volumi prelevati variavano quindi fra 0,09L e 0,35L*
- *Il tempo di percorrenza dell'inspirato dal punto di prelievo alla valvola era < 1 secondo.*

I test sono stati eseguiti sulle seguenti tipologie di dispositivi:

1. Mascherina FFP2/KN95
2. Mascherina chirurgica
3. Mascherina artigianali
4. Schermo/Visiera
5. Scaldacollo

Condizioni di utilizzo del dispositivo esaminate:

Prove preliminari

1. Seduto senza dispositivo
2. Seduto senza dispositivo con velocità aria vicino al viso 0,5-1,0 m/s (per simulare l'effetto del vento o il movimento)
3. Seduto con dispositivo indossato con velocità aria vicino al viso 0,5-1,0 m/s (per simulare l'effetto del vento o il movimento).

Prove oggetto dei test

4. Seduto con dispositivo indossato
5. Sotto sforzo leggero con dispositivo indossato (step)^a.

^a *la scelta dello step è nata dalla necessità di fare eseguire alle persone sottoposte a test uno sforzo leggero uguale per tutti. La prova consisteva nel salire e scendere da un gradino a ritmo blando.*

5.3 Aria espirata

L'aria espirata è stata raccolta in una sacca in Tedlar espirando all'interno di una maschera ermetica collegata alla sacca da un tubo in silicone. Il contenuto della sacca è stato successivamente analizzato, determinando quindi il tenore di ossigeno e di anidride carbonica.

5.4 Indagine termografica

Mediante l'impiego di una termocamera sono state determinate le temperature superficiali del viso (con e senza dispositivo), all'inizio e al termine di ogni prova. La variazione di temperatura superficiale è un indicatore del discomfort della persona.

5.5 Indagine soggettiva

Sono stati somministrati dei brevi questionari alle persone sottoposte a test (nelle tabelle e diagrammi chiamati Test 1...n) per descrivere le loro impressioni e la loro percezione.

5.6 Analisi sui dispositivi

I dispositivi sono stati analizzati per quanto riguarda le concentrazioni di inquinanti rilasciati, quali la formaldeide e le sostanze organiche volatili.

5.7 Apparecchiatura

In Tabella è descritta la strumentazione utilizzata per le analisi.

Parametro	Tecnica di misura	Strumento
O ₂	paramagnetismo	HORIBA PG250
CO ₂	infrarosso non dispersivo	
TVOC	fotoionizzatore	ION TIGER
VOC	gascromatografia	HP 5973
Temperature superficiali	infrarosso	FLIR E6

6. RISULTATI

Le prove sono state eseguite nel periodo estivo, all'interno della Biblioteca del Laboratorio. Le finestre sono state tenute aperte durante il periodo di misura in modo da mantenere stabile la concentrazione di CO₂, intorno ai 450 ppm. Tale concentrazione è stata costantemente monitorata, insieme a temperatura, umidità e velocità dell'aria.

Sono state selezionate 8 persone adulte, diverse per età, sesso, condizione fisica e caratteristiche respiratorie. Ogni persona ha replicato la prova tre volte per tutte le tipologie di dispositivi in esame e nelle due condizioni di impiego del dispositivo. In totale sono state effettuate 350 prove con dispositivi indossati e senza, oltre a 105 termografie.

6.1 Atti respiratori, volumi e composizione espirato

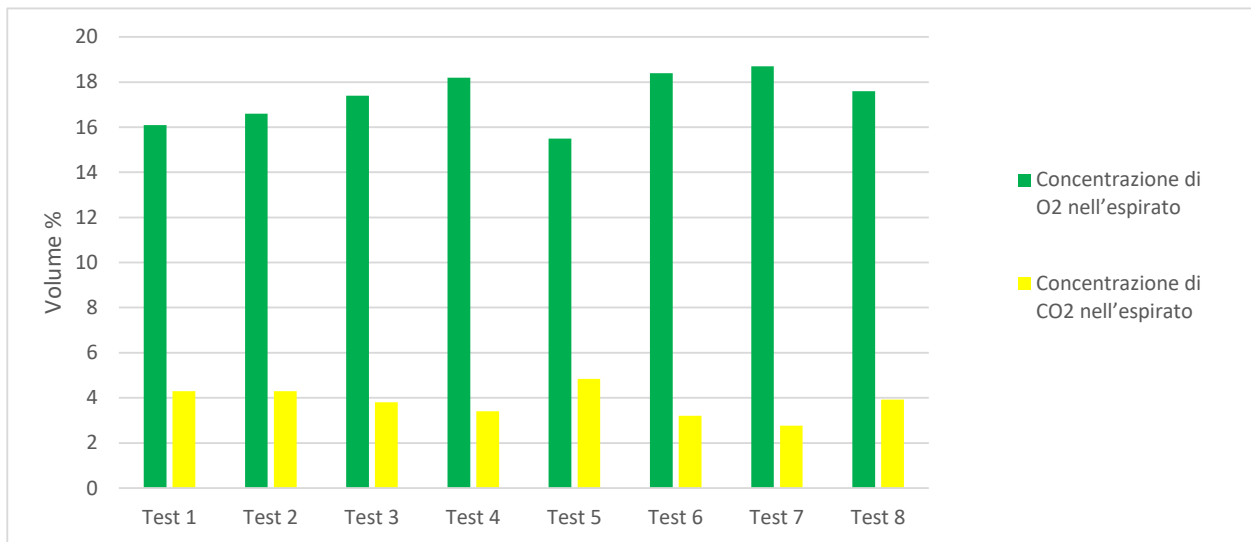
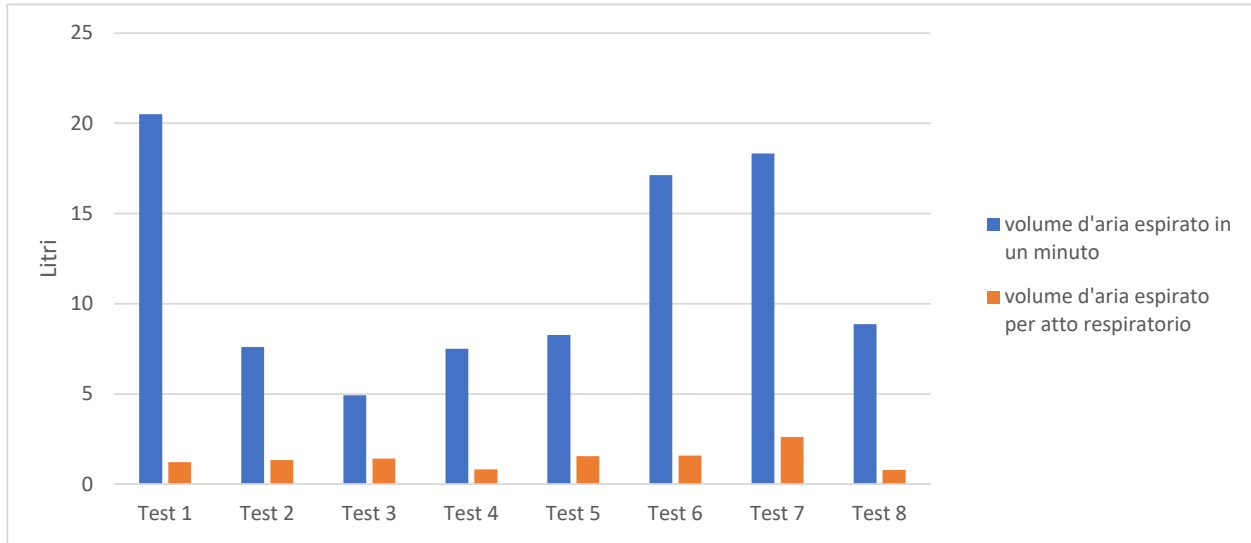
Nella Tabella 1 sono riportati i valori di frequenza degli atti respiratori, i volumi d'aria e la composizione dell'espirato per le otto persone. Nella Tabella 2 sono riportati i valori minimo medio e massimo delle otto misure riportate in Tabella 1. I medesimi risultati sono riportati nei grafici in Figura 6, nella quale si evidenzia una variabilità dei valori che dipende dalle abitudini e dalle modalità di respirazione di ogni persona.

Tabella 1. Frequenza degli atti respiratori, volume d'aria e composizione dell'espirato di ogni persona (Test n)

		Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8
frequenza respiratoria	nr/mi n	16,7	6,0	3,3	9,3	5,3	10,8	7,0	11,3
volume d'aria espirato in un minuto	L	20,5	7,6	4,9	7,5	8,3	17,1	18,3	8,9
volume d'aria espirato per atto respiratorio	L	1,2	1,3	1,4	0,8	1,6	1,6	2,6	0,8
O ₂	Vol%	16,1	16,6	17,4	18,2	15,5	18,4	18,7	17,6
CO ₂	ppm	4300 0	4300 0	3800 0	3400 0	4840 0	3200 0	2760 0	3920 0

Tabella 2. Concentrazione di ossigeno e CO₂ dell'espirato

espirato		Valore minimo	Valore medio	Valore massimo
O ₂	Vol%	15,5	17,3	18,7
CO ₂	ppm	27600	38130	48400



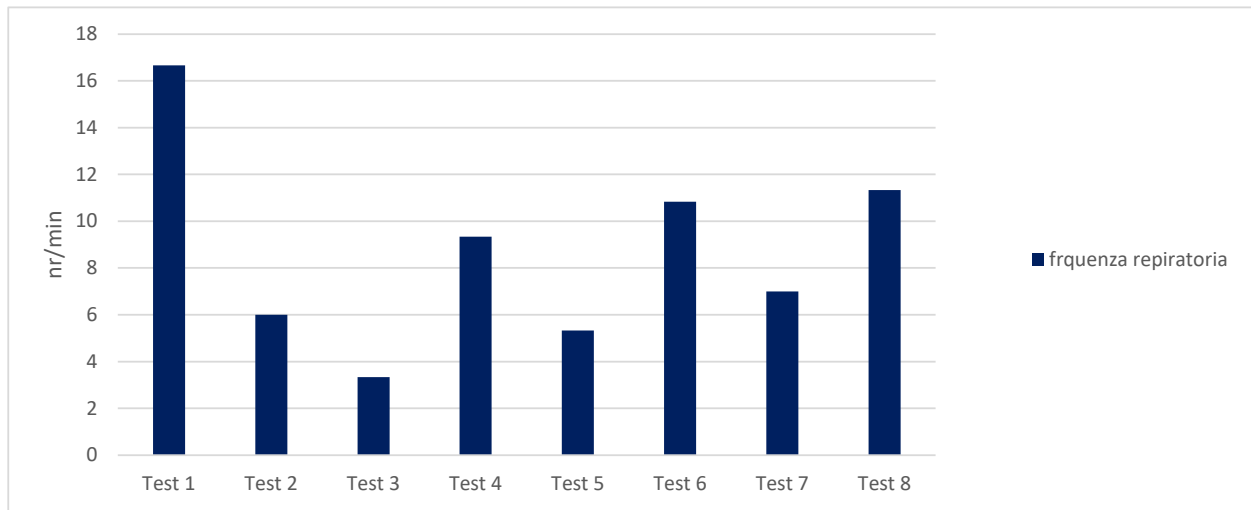


Figura 6

In Figura 7 è rappresentata la concentrazione di CO₂ misurata nell'espriato delle 8 persone test.

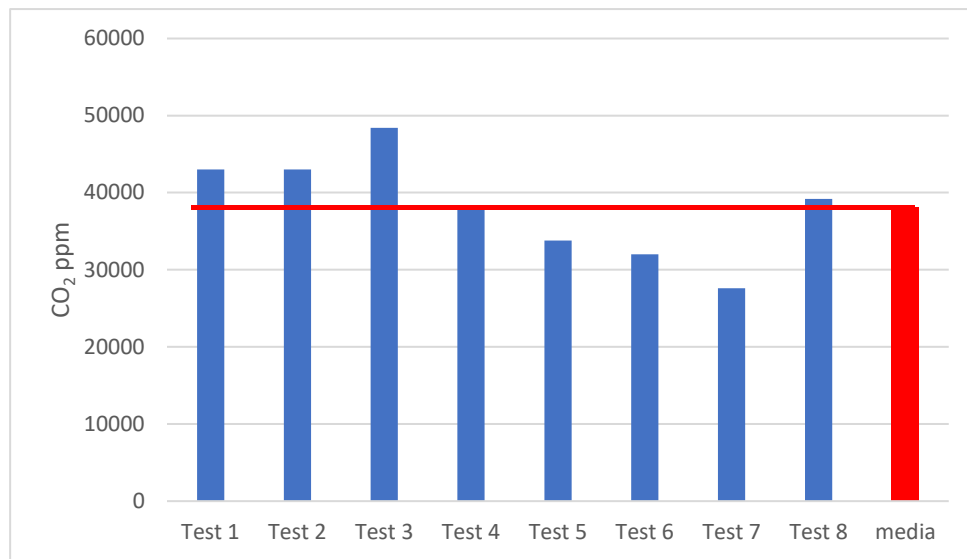


Figura 7. CO₂ espirata (ppm)

Note:

Durante le prove, nelle due condizioni di impiego del dispositivo, la persona poteva respirare nel suo modo abituale. Abbiamo tuttavia osservato che ci sono variabili che influenzano significativamente il risultato della prova, ma che non si è chiesto alla persona di tenere sotto controllo, per rimanere il più vicino possibile alle condizioni reali di utilizzo del dispositivo:

- frequenza respiratoria
- inclinazione della testa
- adesione del dispositivo al viso

- velocità dell'aria in prossimità di naso-bocca, anche con dispositivo indossato.

L'effetto e la presenza di questi elementi difficilmente controllabili ci consentono anche di avere un quadro della variabilità degli scenari reali.

6.2 Influenza della velocità dell'aria

La prova è stata effettuata in due condizioni:

1. Seduto aria ferma
1. Seduto velocità dell'aria sul viso 0,5 – 1,0 m/s (Figura 3).

È stato osservato che sia con che senza dispositivo indossato, con un leggero movimento d'aria (0,5-1,0 m/s pari a una camminata lenta, nel caso del casco integrale la velocità era di 10 m/s) la concentrazione di CO₂ misurata è sensibilmente più bassa rispetto a quando l'aria è ferma.

Le prove effettuate sul manichino (Figura 8 e Figura 9) spiegano il principale motivo di questi valori. In condizioni di aria ferma, l'aria espirata ritorna in parte sul viso e viene quindi reinalata. In condizioni di aria in movimento, l'aria espirata viene allontanata dal viso più velocemente, anche con dispositivo indossato. Per avere un ulteriore esempio del ruolo della velocità dell'aria sul dispositivo, è stata effettuata una prova anche con un casco integrale.

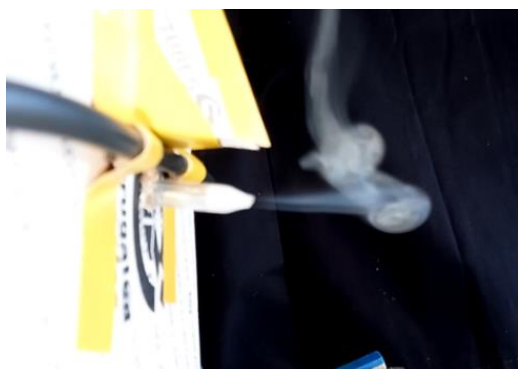


Figura 8. Espirazione manichino, aria ferma.



Figura 9. Inspirazione manichino, aria ferma.

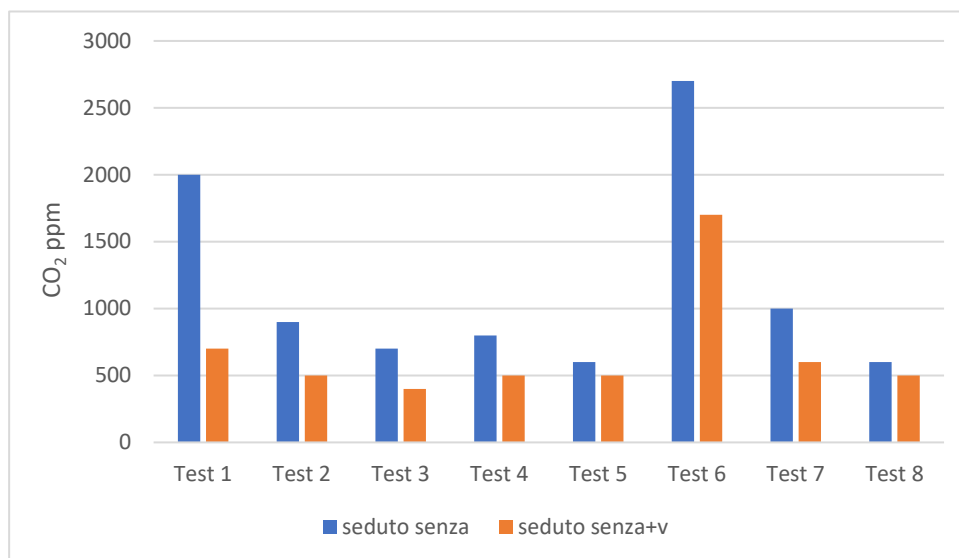


Figura 10. Influenza della velocità dell'aria senza dispositivo

In Figura 10 è rappresentata la concentrazione di CO₂ nell'aria inspirata senza dispositivi, in posizione seduta e aria ferma (in blu) e in posizione seduta con aria in movimento con una velocità tra 0,5 e 1,0 m/s (in arancione nel grafico). Test 1 – 8 sono le otto persone selezionate per le prove. La variabilità dei dati dipende dalle differenti modalità di respirazione delle persone, che nelle stesse condizioni espirano ed inspirano aria in modo diverso. Le concentrazioni con aria in movimento risultano per tutte le otto persone inferiori rispetto al caso in assenza di movimento dell'aria.

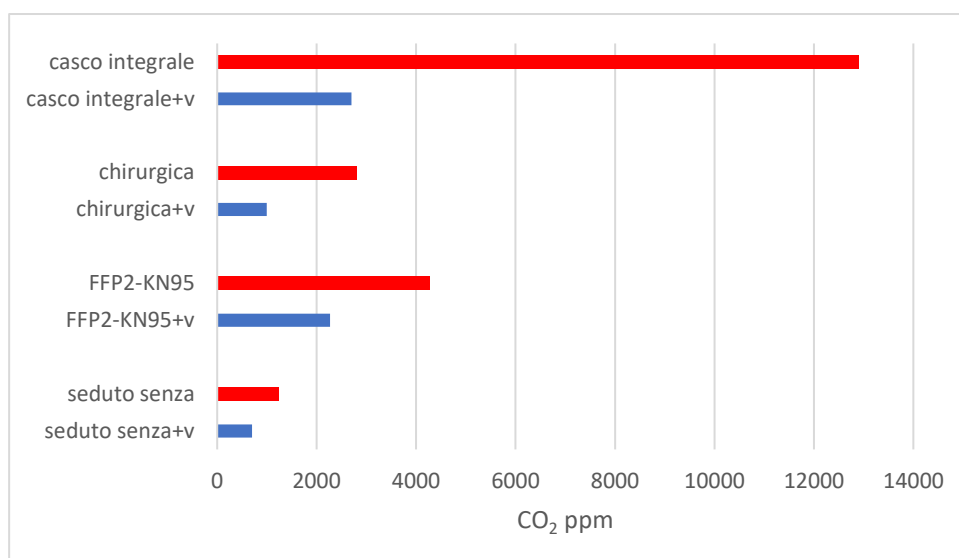


Figura 11. Influenza della velocità dell'aria con dispositivo

In Figura 11 è rappresentata la concentrazione di CO₂ nell'aria inspirata con dispositivi: in rosso in condizioni di aria ferma, in blu con aria in movimento con una velocità tra 0,5 e 1,0 m/s (per il casco la velocità era mediamente di 10 m/s). Analogamente alle prove senza dispositivi, le concentrazioni con aria in movimento risultano inferiori rispetto al caso in assenza di movimento dell'aria.

6.3 Misure con e senza dispositivi

Sono di seguito rappresentati i risultati delle prove con i dispositivi, al netto della concentrazione di CO₂ dell'ambiente (450 ppm). Ogni grafico riporta il valore minimo, medio e massimo della serie di misure condotte.

Concentrazione di CO₂ nelle condizioni seduto e step

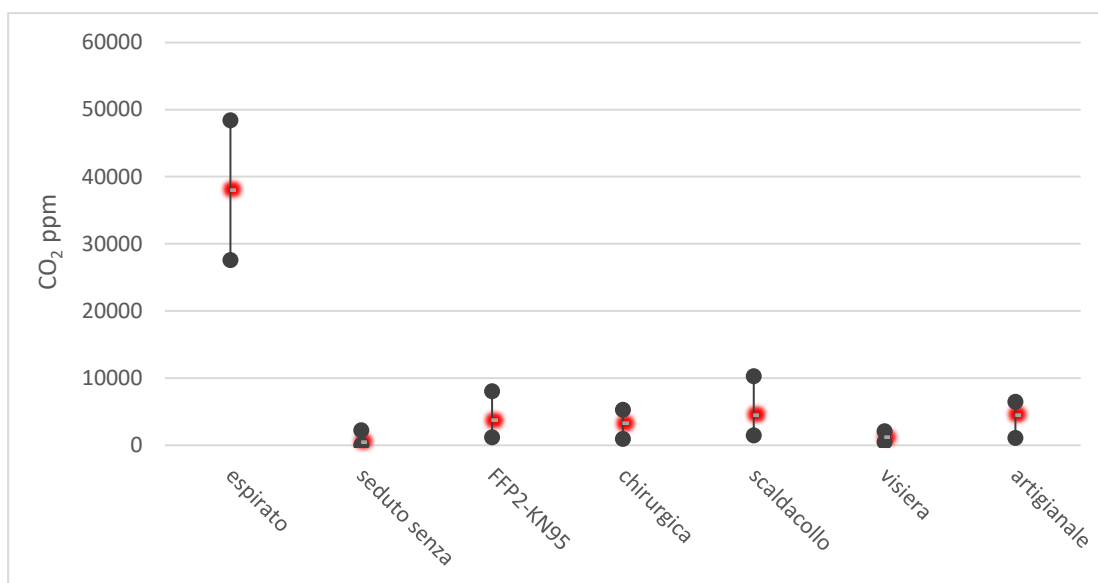


Figura 12. Seduto. Concentrazione di CO₂ inspirata al netto della CO₂ ambiente

In Figura 12 sono rappresentati i risultati delle misure di concentrazione di CO₂ in ppm nell'aria inspirata al netto di quella dell'ambiente durante le prove da seduto.

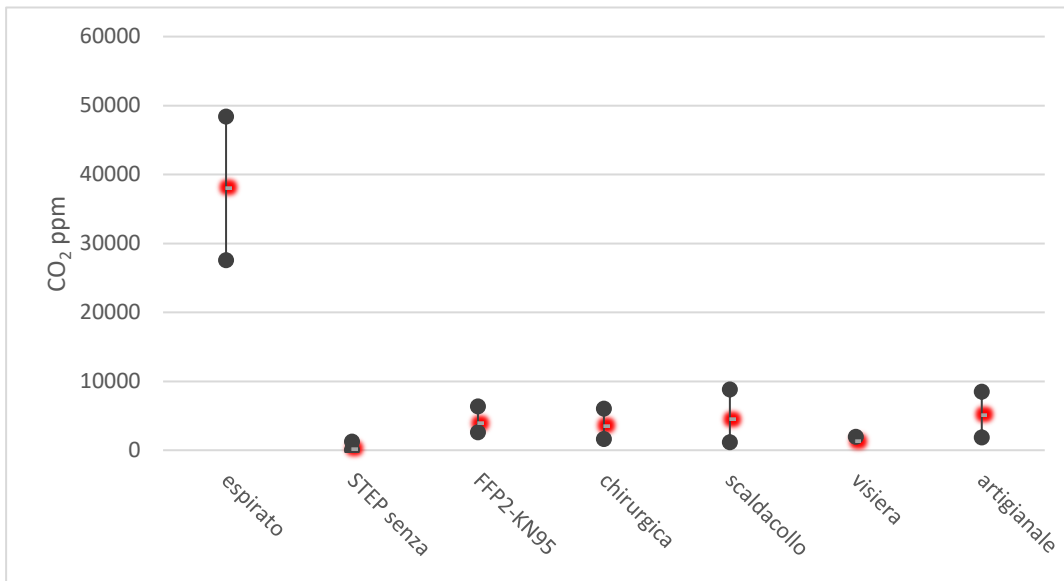


Figura 13. Step. Concentrazione di CO₂ inspirata al netto della CO₂ ambiente

In Figura 13 sono rappresentati i risultati delle misure di concentrazione di CO₂ in ppm nell'aria inspirata al netto di quella dell'ambiente durante le prove con lo step.

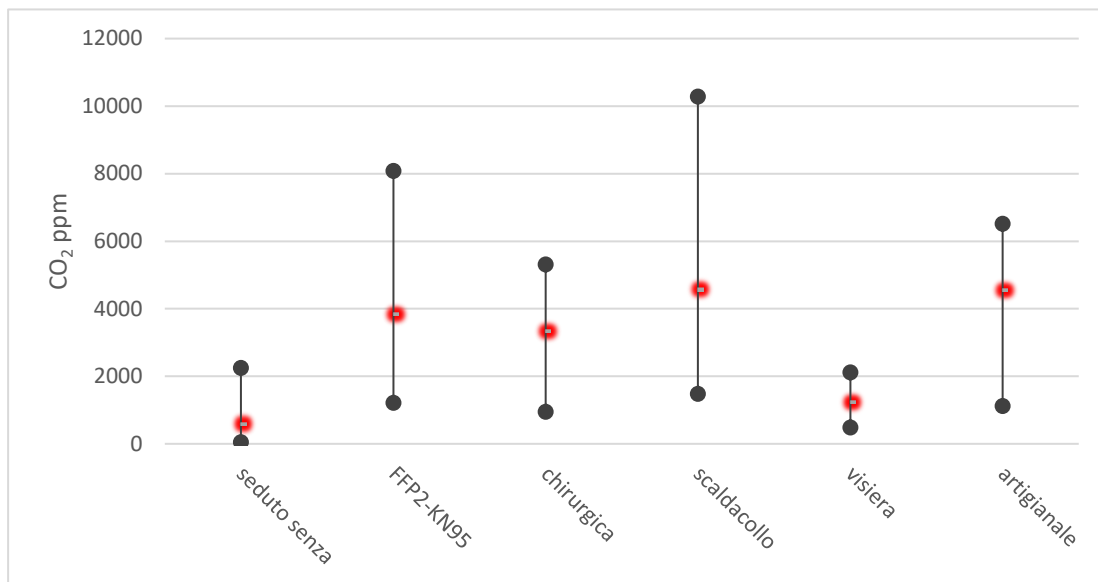


Figura 14. Seduto. Concentrazione di CO₂ inspirata al netto della CO₂ ambiente

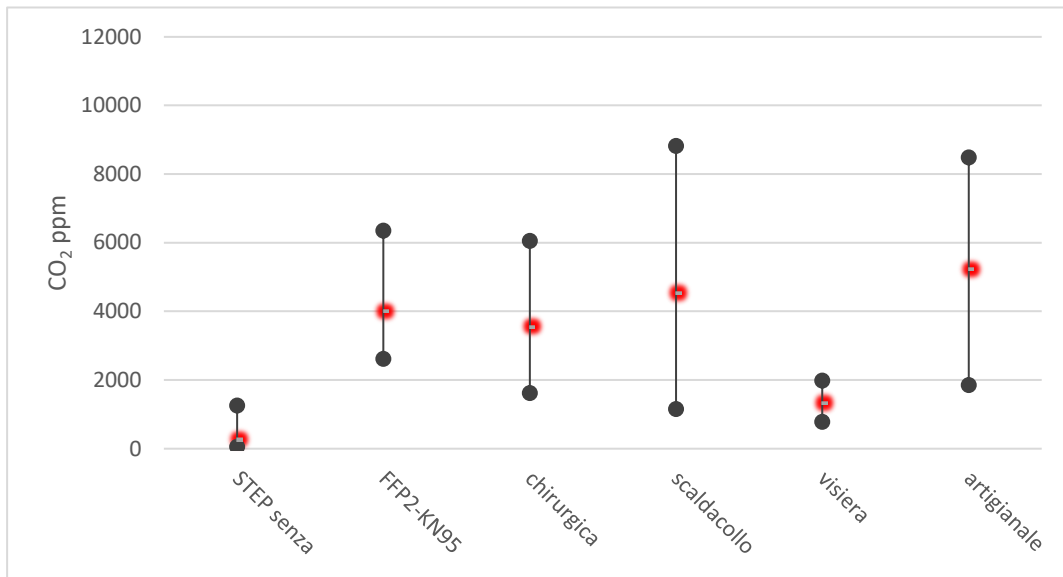


Figura 15. Step. Concentrazione di CO₂ inspirata al netto della CO₂ ambiente

Nelle figure 14 e 15 sono rappresentati i medesimi dati delle Figure 12 e 13 eliminando il dato delle concentrazione dell'espirato.

Percentuale di CO₂ reinalata nelle condizioni seduto e step

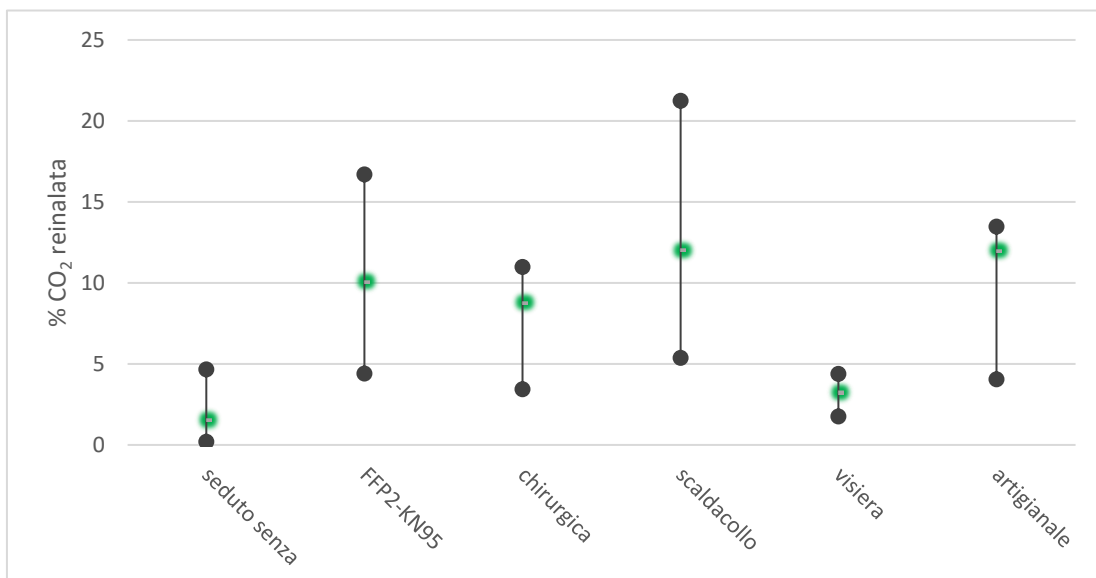


Figura 16. Seduto. Percentuale di CO₂ reinalata al netto della CO₂ ambiente

In Figura 16 è rappresentato il rapporto, in percentuale, fra la CO₂ inspirata e quella espirata nelle prove da seduto. Si tratta della CO₂ reinalata.

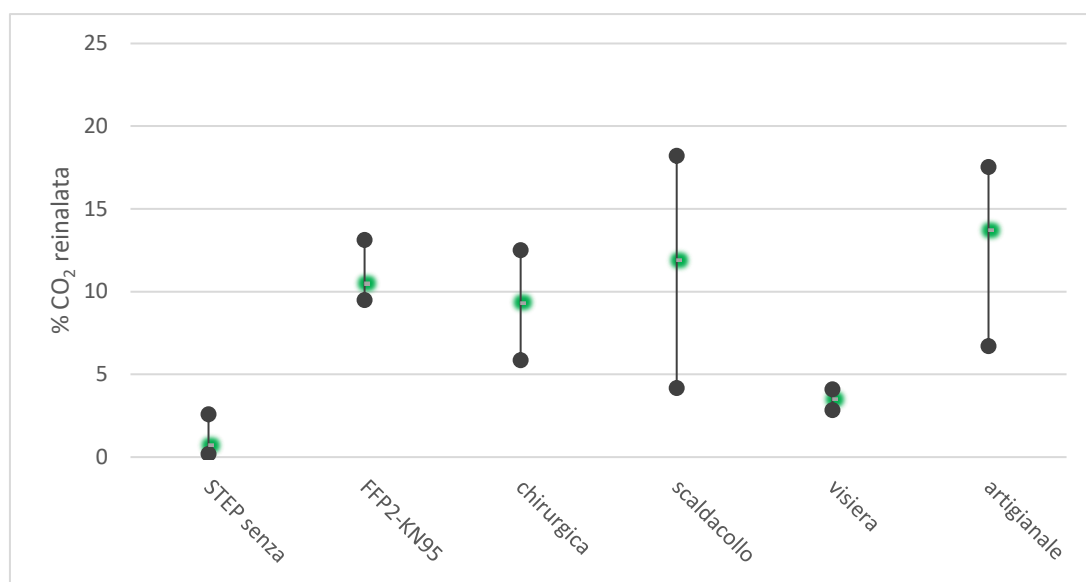


Figura 17. Step. Percentuale di CO₂ reinalata al netto della CO₂ ambiente

In Figura 17 è rappresentato il rapporto, in percentuale, fra la CO₂ inspirata e quella espirata nelle prove con lo step. Si tratta della CO₂ reinalata.

Tabella 3. Concentrazione di CO₂ inspirata al netto della CO₂ ambiente

			Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	media
seduto	senza	CO ₂ ppm	700	450	250	350	150	2250	550	50	590
	FFP2-KN95	CO ₂ ppm	4140	2520	2450	1220	2380	8080	5350	4650	3850
	chirurgica	CO ₂ ppm	3760	980	2320	950	4020	4880	4580	5320	3350
	scaldacollo	CO ₂ ppm	5730	3320	4920	3080	2080	5800	10280	1480	4590
	visiera	CO ₂ ppm	1310	480	2120	480	1620	950	1450	1520	1240
	artigianale	CO ₂ ppm	4830	1180	5920	1120	4850	5850	6520	6280	4570
			Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	media
st	senza	CO ₂ ppm	280	50	50	350	50	1250	150	50	280

FFP2-KN95	CO ₂ ppm	4890	2620	3780	3050	2750	3380	6350	5250	4010
chirurgica	CO ₂ ppm	4820	1620	3520	1620	2850	3220	6050	4850	3570
scaldacollo	CO ₂ ppm	6140	3350	3920	3850	1150	6140	8820	3020	4550
visiera	CO ₂ ppm	1360	780	1050	780	1620	1720	1980	1450	1340
artigianale	CO ₂ ppm	6130	1850	4650	3850	3580	6150	8480	7150	5230

Tabella 4. Percentuale di CO₂ reinalata rispetto a quella espirata

		minimo	media	massimo
seduto	senza	0,2%	1,6%	4,6%
	FFP2-KN95	4,4%	10,1%	16,7%
	chirurgica	3,4%	8,8%	11,0%
	scaldacollo	5,4%	12,0%	21,2%
	visiera	1,8%	3,3%	4,4%
	artigianale	4,0%	12,0%	13,5%
		minimo	media	massimo
step	senza	0,2%	0,7%	2,6%
	FFP2-KN95	9,5%	10,5%	13,1%
	chirurgica	5,9%	9,4%	12,5%
	scaldacollo	4,2%	11,9%	18,2%
	visiera	2,8%	3,5%	4,1%
	artigianale	6,7%	13,7%	17,5%

Le percentuali riportate in Tabella 4 rappresentano la quota reinalata rispetto all'espriato. Tali risultati sono ripresi nel grafico di figura 18. Per esempio, per i dispositivi FFP2-KN95 come valore medio è stata rilevata una quota di CO₂ reinalata del 10,1% nel caso seduto e del 10,5% nelle prove con lo step.

Confronto fra dispositivi nelle condizioni seduto e step

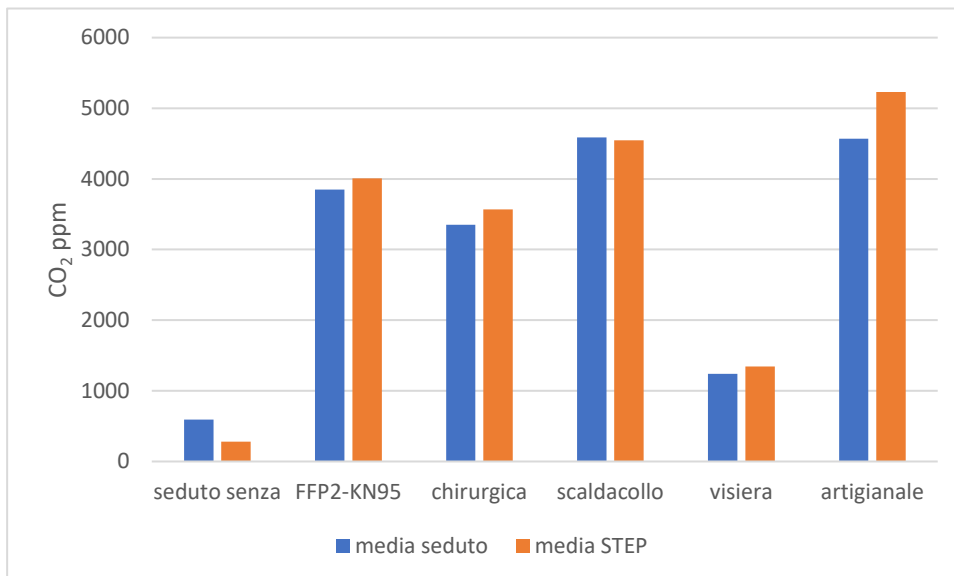


Figura 18. Concentrazione di CO₂ inspirata al netto della CO₂ ambiente. Valori medi

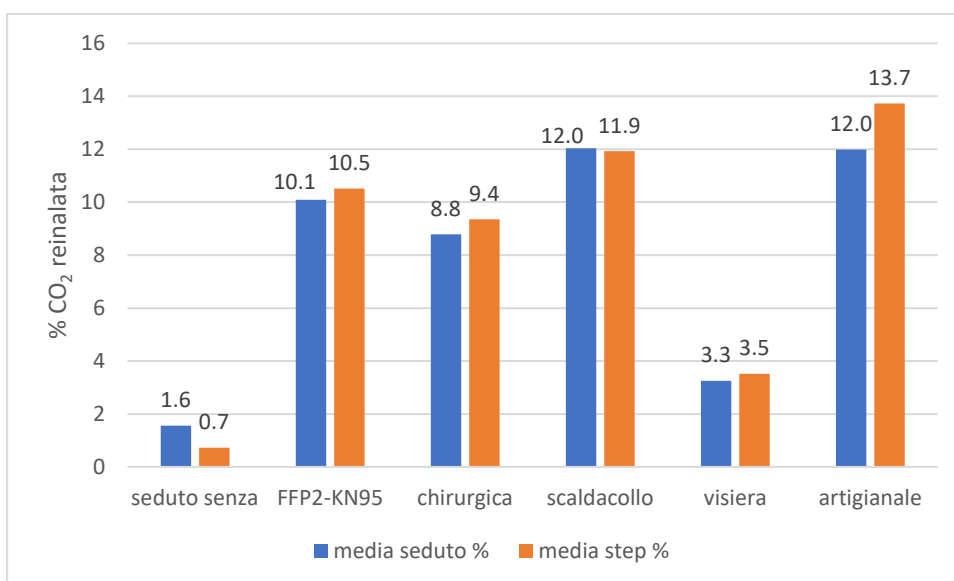


Figura 19. Percentuale di CO₂ reinalata al netto della CO₂ ambiente. Valori medi

Nelle Figure 18 e 19 sono rappresentati i valori medi delle concentrazioni della CO₂ inspirata e della CO₂ reinalata per i diversi dispositivi analizzati, rispettivamente per le prove da seduto e con lo step.

In Tabella 5 e 6 riportiamo a titolo di confronto le concentrazioni di CO₂ riscontrabili in situazioni quotidiane e i relativi valori guida.

Tabella 5. Concentrazioni di CO₂ a titolo di confronto: valore guida (prima riga) e concentrazioni tipiche (fonte APPA Bolzano)

Valore guida per ambienti indoor	CO ₂ ppm	1000
Aula scolastica	CO ₂ ppm	800-6000
Stanza da letto singola porte e finestre chiuse	CO ₂ ppm	800-3000
Treno pendolari	CO ₂ ppm	1500-2500
Autobus	CO ₂ ppm	1000-2000
Auto solo autista	CO ₂ ppm	1000
Pizzeria-ristorante	CO ₂ ppm	800-2000

Tabella 6. Valori di concentrazione della CO₂ indoor nella Ad-hoc AG IRK/AOLG, 2008

CO ₂ concentrazione (ppm)	Valutazione igienica	Consigli
< 1000	Igienicamente non rilevante	<ul style="list-style-type: none"> Nessun intervento necessario
1000-2000	Igienicamente rilevante	<ul style="list-style-type: none"> Intensificare la ventilazione (aumentare i ricambi d'aria) Verificare e migliorare le abitudini alla ventilazione
>2000	Igienicamente inaccettabile	<ul style="list-style-type: none"> Verificare il sistema di ventilazione del locale Verificare ulteriori interventi di miglioramento della ventilazione

Nota: diverse norme ISO-EN riportano valori di riferimento per la CO₂ in ambiente indoor, in particolare la UNI EN 16798-1 e la ISO 17772-1 sono specifiche per la progettazione di sistemi di ventilazione e vengono impiegate nell'edilizia pubblica. Ai fini di questo studio preferiamo riportare i valori guida proposti dal ministero dell'ambiente tedesco "Ad-hoc AG IRK/AOLG, 2008", di più immediata comprensione, essendo questi molto simili alle citate norme ISO-EN.

Commenti alle misure

Dalle prove effettuate risulta che la concentrazione di CO₂ reinalata, indossando dispositivi di copertura del naso e della bocca diversi, varia sensibilmente. I valori più elevati sono stati rilevati con FFP2/KN95, scaldacollo e mascherina artigianale. Leggermente inferiori sono i valori della mascherina chirurgica mentre con la visiera, la concentrazione di CO₂ reinalata è poco al di sopra di quella che si respira senza indossare alcun dispositivo. Le differenze di concentrazione fra i valori minimi e massimi sono dovute principalmente alla frequenza respiratoria della persona, all'inclinazione della testa, all'adesione del dispositivo al viso e alla velocità dell'aria in prossimità di naso-bocca. Non ci sono differenze significative fra le due condizioni esaminate: seduto e step; questo perché la maggior produzione di CO₂ sotto sforzo viene in parte compensata con la maggior energia con la quale viene espulsa e il leggero movimento d'aria che si crea salendo e scendendo dallo step. Sotto sforzo intenso le concentrazioni dei gas e le condizioni di respirazione cambiano sicuramente, ma questo scenario non è oggetto di questo studio.

La percentuale di CO₂ reinalata rispetto a quella espirata varia da un valore minimo del 3,3% ottenuto con la visiera a un massimo del 13,7% ottenuto con la mascherina artigianale (Figura 19). La restante aria inspirata ovviamente proviene dall'ambiente in cui ci si trova. Le misure sono state effettuate in un ambiente con bassa concentrazione di CO₂ (circa 450 ppm). Tale valore nell'analisi dei dati è stato sottratto alla CO₂ inspirata. In una situazione reale infatti alla concentrazione reinalata va aggiunta quella dell'ambiente in cui ci si trova, che spesso è molto maggiore di 450 ppm. Si osserva inoltre che anche senza indossare un dispositivo, in condizione da seduto, aria ferma, le persone sottoposte a test reinalavano l'1,6% della propria CO₂ mentre sullo step, quindi sotto leggero sforzo e movimento d'aria, il valore scendeva a 0,7%.

La concentrazione di CO₂ nell'inspirato varia da un minimo di 1240 ppm misurato con la visiera a un massimo di 5230 ppm misurato con la mascherina artigianale. A questo proposito ricordiamo quanto riportano le linee guida del ministero dell'ambiente tedesco (Ad-hoc AG IRK/AOLG, 2008): per valori di concentrazione di CO₂ degli ambienti indoor fra i 1000 e i 2000 ppm bisogna intensificare la ventilazione dell'ambiente, oltre i 2000 ppm l'aria dell'ambiente non è più igienicamente accettabile, e si rende necessario intervenire per migliorarla. Confrontando i valori guida IRK con i risultati delle prove effettuate risulta che solamente con la visiera indossata la CO₂ respirata può rimanere al di sotto dei 2000 ppm, mentre con gli altri dispositivi l'aria respirata non sarebbe igienicamente accettabile. Osservando la Tabella 5 risulta tuttavia che in diverse condizioni di vita quotidiana, in ambienti indoor, il valore di 1000 ppm è superato per lunghi periodi. In particolare, all'interno delle aule scolastiche, dove studenti e insegnanti soggiornano per buona parte della giornata, i 1000 ppm di CO₂ vengono sistematicamente superati raggiungendo valori anche superiori a 5000 ppm.

I risultati ottenuti dimostrano l'importanza che il locale, all'interno del quale viene fatto obbligo di indossare la mascherina, abbia caratteristiche di ventilazione ottimali, ovvero che la concentrazione di CO₂ sia sempre al di sotto dei 1000 ppm. Si tratta di un requisito che già in assenza dei dispositivi va perseguito, ma che assume maggiore rilevanza se si usano dispositivi.

6.4 Analisi delle temperature superficiali del viso

Sono riportate di seguito i risultati delle analisi delle temperature superficiali, effettuate mediante una termocamera ad infrarossi.

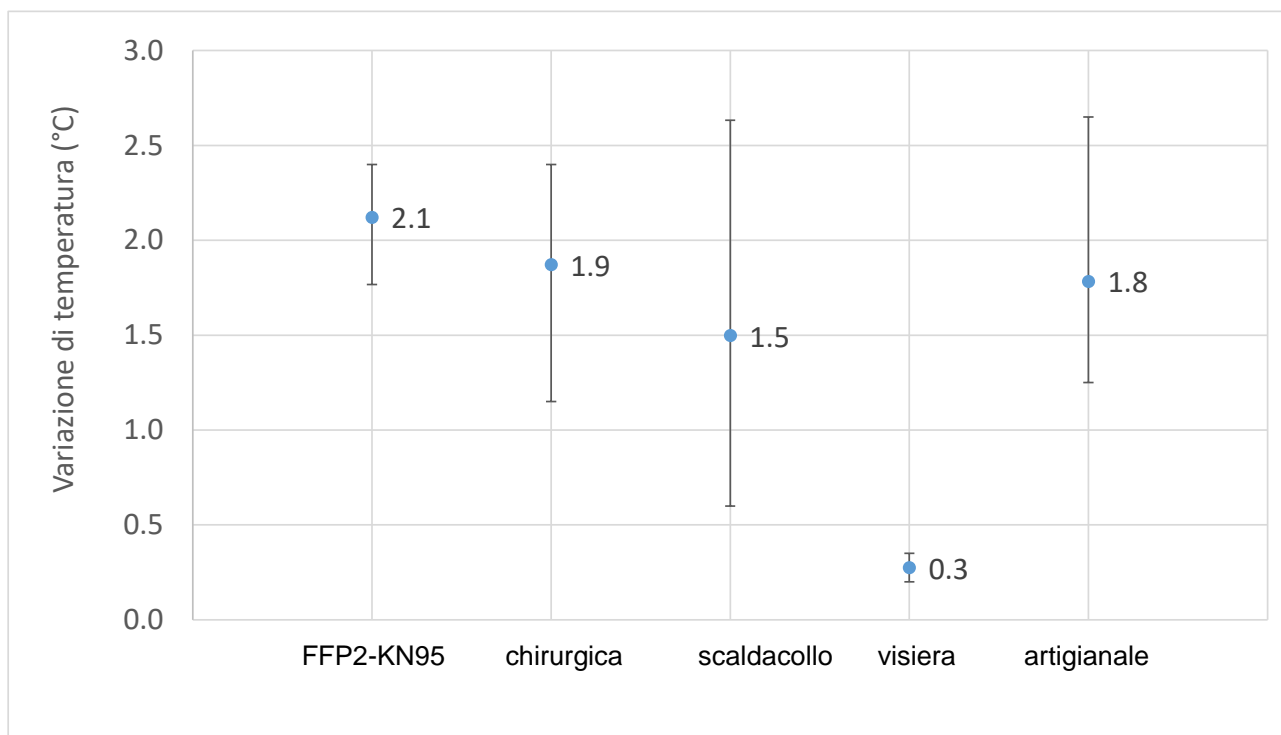


Figura 20. Variazione della temperatura superficiale del viso



Figura 21



Figura 22

In Figura 20 sono rappresentati i valori minimo, medio (in azzurro) e massimo (estremi delle barre in colore nero) delle variazioni di temperatura per ogni dispositivo. Le misure sono state

condotte nelle prove da seduto e in quelle con step e sono state poi mediate per tutte le otto persone sottoposte ai test.

Le due immagini termografiche sono state eseguite entrambe senza dispositivo, Figura 21 prima di indossarlo e Figura 22 dopo averlo indossato. Più il colore è chiaro, più la temperatura superficiale è elevata. Dalla Figura 22 emerge che la zona coperta dal dispositivo è quella più calda.

Dall'analisi termografica (Figura 21 e Figura 22) si evince che, nella porzione di viso coperta dal dispositivo, la temperatura superficiale della pelle è di 1,5-2,1 gradi più elevata rispetto alla porzione di viso non coperta; tale dato non si riferisce alla visiera, nella quale si riscontra una variazione media di 0,3 °C di temperatura. Nel caso degli scaldacollo l'incremento di temperatura non è concentrato nella zona bocca-naso, ma si estende a tutte la zona coperta dal dispositivo.

La differenza di temperatura causa una leggera sudorazione. Temperatura e sudorazione sono immediatamente percepite con disagio dalla persona che indossa il dispositivo. Sotto sforzi più intensi è verosimile che la differenza di temperatura fra parte coperta e scoperta sia maggiore con conseguente aumento del disagio percepito. Le analisi soggettive riportate nel paragrafo 6.6 confermano quanto emerge dalle riprese termografiche.

6.5 Umidità assorbita dal dispositivo

La prova è stata effettuata indossando continuamente il dispositivo per 1,5 ore, svolgendo attività varie al chiuso, seduti e in leggero movimento. Ogni 30 minuti è stato registrato il peso del dispositivo e valutata la variazione dovuta all'eventuale assorbimento di umidità emessa dalla persona.

	unità di misura	Inizio	30 min	60 min	90 min
KN95	g	5,34	5,35	5,34	5,34
chirurgica	g	3,11	3,12	3,12	3,00
scaldacollo	g	27,81	27,93	28,84	27,87
artigianale	g	18,96	19,00	19,01	18,84

Dalle prove effettuate risulta che i dispositivi provati hanno variazioni di peso minime, la sensazione di umido percepita dalla persona è provocata quasi esclusivamente dalla sudorazione della parte di viso coperta dal dispositivo.

6.6 Analisi soggettiva

L'obiettivo dell'analisi soggettiva eseguita su tutte le persone che hanno partecipato alle misure era di valutare attraverso una scala di giudizio a 5 punti (scala Likert) la comodità, la difficoltà a respirare e a parlare ed eventuali effetti psicologici indotti dall'uso dei dispositivi. Le 5 domande rivolte ai partecipanti erano le seguenti:

- è scomodo
- mi fa mancare il respiro
- mi rende claustrofobico

- mi fa girare la testa
- ho difficoltà a parlare.

I risultati hanno evidenziato una notevole variabilità di risposte per tutti i dispositivi ad esclusione degli schermi. Inoltre, emerge una marcata insoddisfazione nell'utilizzo degli scaldacollo, probabilmente in parte legata alla stagione estiva e alle temperature durante le prove.

In Figura 23 è riportato il questionario. La scala di giudizio variava da 1 a 5: più è alto il valore, più è alto il disagio.

Data, ora	Tipologia	Persona	Note		
	<input type="checkbox"/> chirurgiche <input type="checkbox"/> FFP2 <input type="checkbox"/> artigianale <input type="checkbox"/> schermo <input type="checkbox"/> scaldacollo	MF			
	Per nulla	Poco	Mediamente	Sì	Sì, moltissimo
	1	2	3	4	5
è scomodo?					
mi fa mancare il respiro					
mi rende claustrofobico					
mi fa girare la testa					
ho difficoltà a parlare					

Figura 23. Questionario

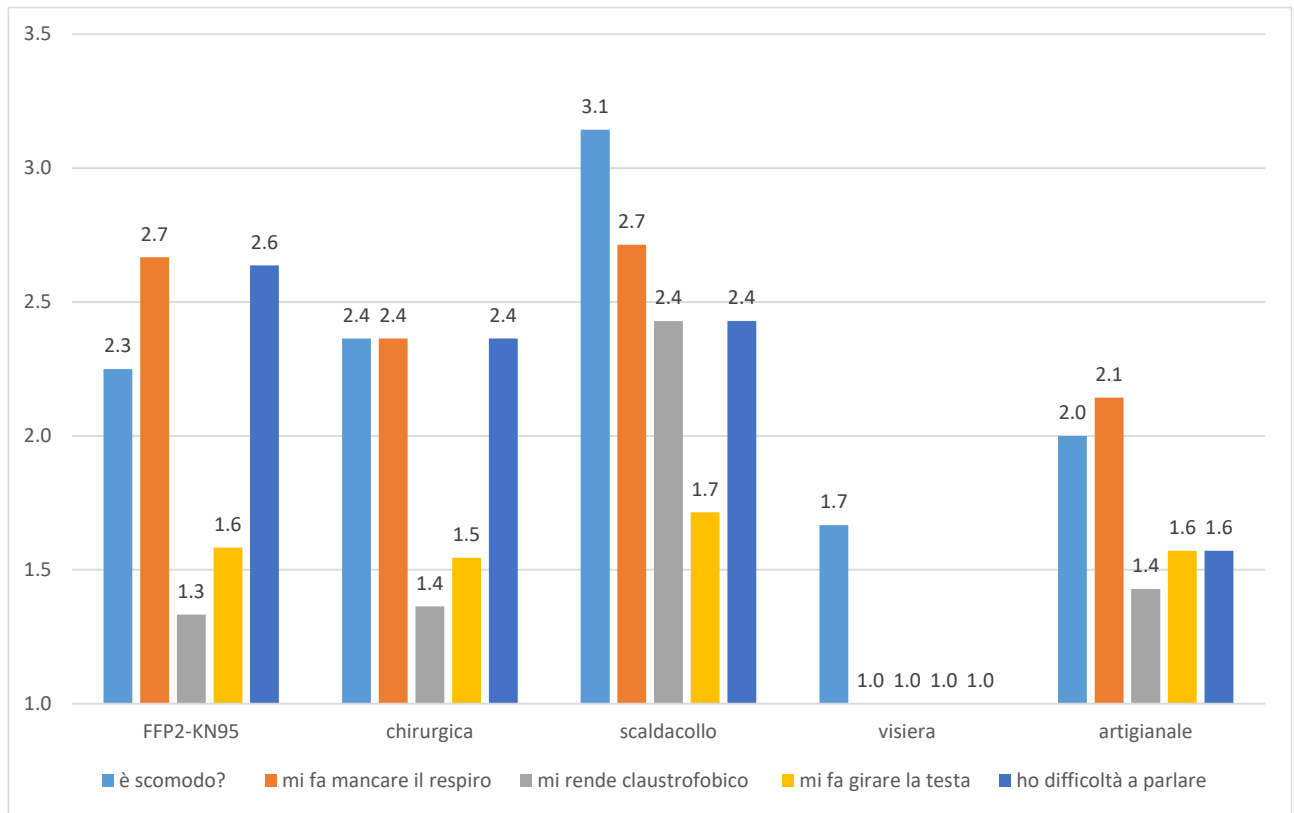


Figura 24. Risultati dell'analisi soggettiva per tipologia di dispositivo

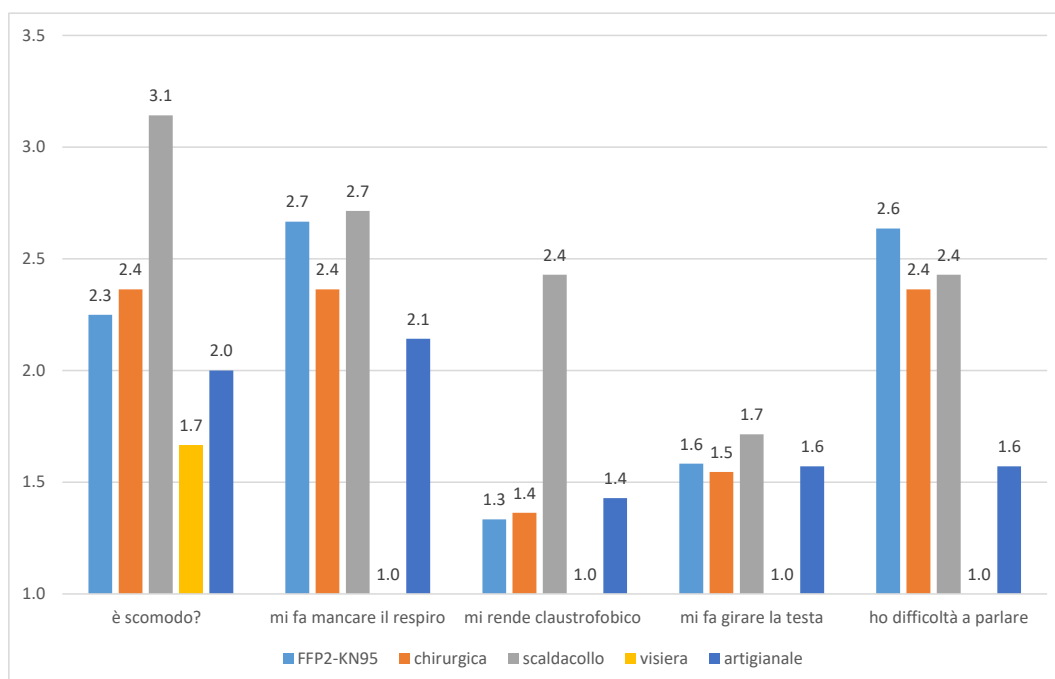


Figura 25. Risultati dell'analisi soggettiva per domanda

Al fine di determinare un indicatore che riassume la percezione che i soggetti intervistati avevano dei diversi dispositivi è stata calcolata la media dei valori delle cinque domande, ottenendo la seguente tabella.

	Media risposte questionari
FFP2-KN95	2,1
chirurgica	2,0
scaldacollo	2,5
visiera	1,1
artigianale	1,7

Nell'analisi soggettiva emerge quanto segue:

- La visiera è il dispositivo con punteggio più basso ovvero maggiore comfort e minore insoddisfazione. I partecipanti hanno dichiarato all'unanimità che tale dispositivo non impedisce il parlato e non fa mancare il respiro.
- Il dispositivo con voto maggiore, ovvero quello che crea più discomfort è lo scaldacollo, in particolar modo per la scomodità quando lo si indossa.
- Non vi è una marcata differenza tra le mascherine FFP2-KN95 e le chirurgiche, mentre mediamente la percezione degli intervistati è migliore per quelle artigianali.

6.7 Riepilogo dei dati

Sovrapponendo i dati misurati (concentrazione di CO₂, variazione delle temperature superficiali) e quelli ricavati dai questionari si ottiene il grafico riportato in Figura 26.

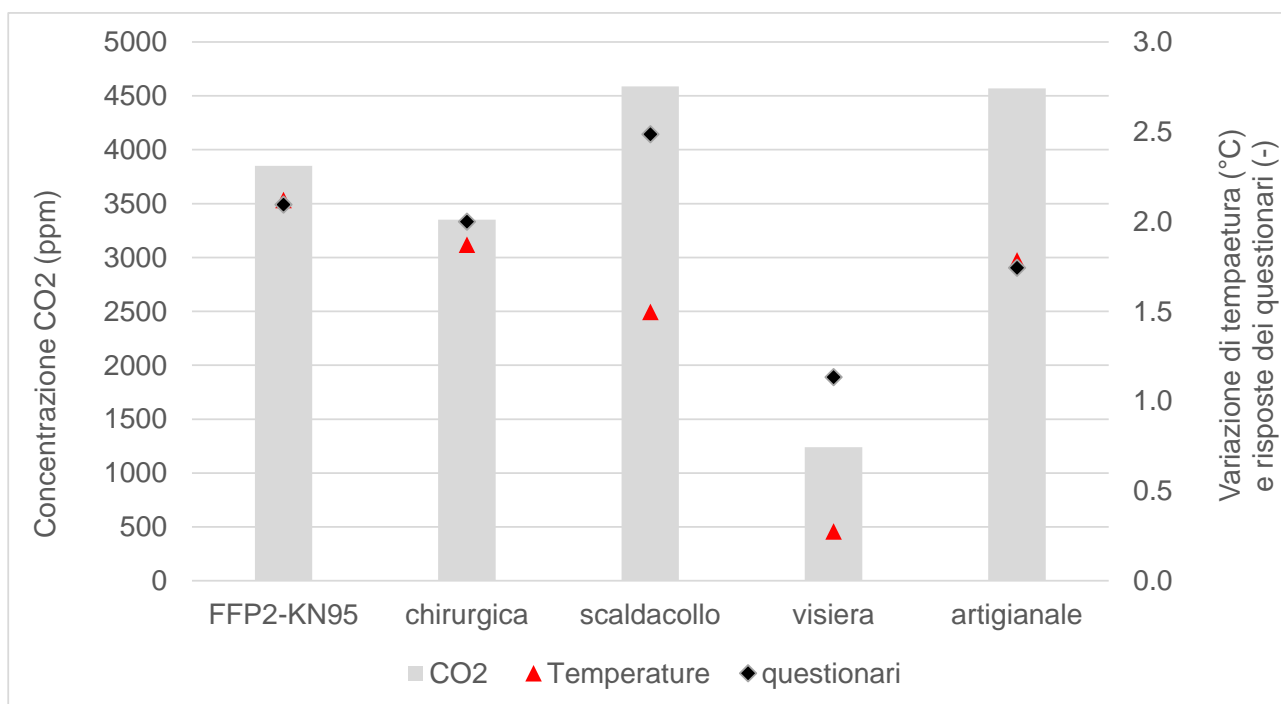


Figura 26. Riepilogo dei dati oggettivi e di quelli soggettivi: concentrazione di CO₂ (seduto) inspirata, variazione di temperatura del viso e medie dei questionari

Sovrapponendo i dati delle concentrazioni di CO₂ con le analisi termografiche e soggettive si evidenzia che:

- Concentrazioni di CO₂, temperature medie e gradimento presentano andamenti simili;
- La visiera è il dispositivo con concentrazione di CO₂ inspirata mediamente inferiore rispetto agli altri dispositivi;
- Non vi è evidente differenza tra le mascherine FFP2-KN95 e le chirurgiche, sia in termini di concentrazione di CO₂ che di temperatura superficiale che di soddisfazione.

6.7 Analisi su dispositivi

Le prove sono state effettuate inserendo, prima dell'utilizzo, il dispositivo all'interno di un cilindro di vetro con le due estremità aperte: su una è stato posto un filtro in carboni attivi, sull'altra è stata prelevata l'aria filtrata dal carbone attivo, esposta al dispositivo ed è stata indirizzata al sistema analitico.



Figura 27. Analisi sui dispositivi

In queste condizioni sono state determinate le concentrazioni di formaldeide e di composti organici volatili rilasciate dai dispositivi. Per tutti i dispositivi esaminati, tranne uno, le sostanze ricercate sono state rilevate in concentrazioni molto basse, non rilevanti. Per la mascherina sotto riportata, tipo chirurgica, ma non certificata come tale, sono state rilevate concentrazioni di idrocarburi di circa $2300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ appena questa veniva tolta dall'involucro di plastica che la conteneva. Dopo alcune ore di esposizione della mascherina all'aria le concentrazioni rilasciate scendevano a livelli accettabili. Scaldacollo e mascherine artigianali, una volta lavate, non emettono concentrazioni rilevanti di composti inquinanti.

Tabella 7. Analisi emissioni dispositivi

Dispositivo	tipo	All'apertura della confezione TVOC ppb	4 ore dopo l'apertura della confezione TVOC ppb	All'apertura della confezione Formaldeide ppb
A	KN95	< 10	-	<5
B	Chirurgica certificata ^a	< 10	-	<5
C	Chirurgica non certificata	2300	< 10	5
D	Chirurgica certificata ^a	< 10	-	<5

a dispositivo certificato secondo EN 14683: 2019

Tabella 8. Composizione TVOC Dispositivo C all'apertura della confezione

Parametro	Risultato [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
HC lineari e ramificati	1343
2,4-dimetil eptano	271
n-decano	187
N,N-Dimetil acetammide	133
4 metil ottano	116
Toluene	56
4 metil undecano	36
2,3,5 trimetil esano	34
n-dodecano	28
4 metil eptano	25
2,3 dimetil eptano	21
4,6 dimetil dodecano	18
Etanolo	17
Somma senza HC	940
Somma	2283

7. CONCLUSIONI

- È stata quantificata la concentrazione di CO₂ inspirata (come indicatore unico della qualità dell'aria) per diverse tipologie di dispositivi di copertura del naso e della bocca.
- È stata quantificata la percentuale di CO₂ reinalata rispetto a quella dell'espirsto per diverse tipologie di dispositivi di copertura del naso e della bocca.
- Per tutti i dispositivi analizzati le concentrazioni di CO₂ inspirate sono ampiamente inferiori rispetto a quelle espirate.
- Anche senza dispositivi di copertura una parte di aria espirata viene reinalata. Tale effetto è maggiore in condizioni di aria ferma e minore con aria in movimento.
- Il movimento d'aria riduce la CO₂ reinalata, anche con i dispositivi.
- Le concentrazioni inspirate sono più elevate rispetto ai valori guida per gli ambienti indoor.
- Le concentrazioni inspirate non sono significativamente diverse da quelle rilevate in ambienti nei quali si soggiorna (scuole, macchina, ufficio, casa).
- Le prove non evidenziano significative differenze tra le concentrazioni misurate da seduto e sotto leggero sforzo (step).
- L'aumento di temperatura superficiale della pelle e la conseguente maggiore sudorazione sono la principale causa del disagio percepito.
- I dispositivi non assorbono quantità significative di umidità.
- Alcuni dispositivi, appena aperta la confezione, rilasciano quantità significative di composti organici volatili. Una volta esposti all'aria per qualche ora la situazione migliora sensibilmente.
- L'ambiente nel quale viene indossato un dispositivo di copertura deve avere caratteristiche di ventilazione ottimali, ovvero la concentrazione di CO₂ deve essere inferiore a 1000 ppm. Altrimenti la concentrazione di CO₂ inspirata indossando i dispositivi può aumentare sensibilmente.