

Normativa acustica ISO 22955:2021 e protocollo volontario WELL per gli uffici open plan: verifica dei criteri di progettazione acustica

Virginia Tardini

Dipartimento di Ingegneria Industriale,
Università di Bologna,
Via Zamboni, 33, 40126 Bologna
virginia.tardini2@unibo.it

Ricevuto: 27/2/2024

Accettato: 30/4/2024

DOI: 10.3280/ria1-2024oa17366

ISSN: 2385-2615

Il comfort acustico nei luoghi di lavoro, quali gli uffici, garantisce il benessere dei lavoratori, migliorando la concentrazione e la produttività. Norme recenti come la ISO 22955:2021 e protocolli volontari come la certificazione WELL (WELL V2 – Sound) offrono linee guida per raggiungere il comfort acustico attraverso una corretta progettazione dell'ambiente. Le sfide sorgono soprattutto in ambienti con vincoli architettonici durante i lavori di ristrutturazione. L'analisi preliminare del presente lavoro prevede la configurazione degli ambienti in base agli standard, alla letteratura, e in ultimo da casi di studio in situ di uffici *open plan* esistenti. Gli ambienti considerati sono privi di arredi e il trattamento acustico è limitato ai controsoffitti, in conformità alla norma ISO 22955:2021. I parametri includono la valutazione dell'effetto Lombard – l'aumento involontario dello sforzo vocale del parlatore in presenza di elevato rumore ambientale – per garantire il comfort acustico negli uffici *open plan*. L'intero studio è volto ad analizzare la sinergia tra standard normativi (ISO) e protocolli volontari (WELL) al fine di individuare compatibilità nell'applicazione di entrambi i documenti.

Parole chiave: uffici open plan, compatibilità tra WELL e ISO 22955:2021, comfort, privacy

ISO 22955:2021 acoustic standard and voluntary WELL protocol for open plan offices: verification of acoustic design criteria

Acoustic comfort in workplaces such as offices ensures the well-being of workers by improving concentration and productivity. Recent standards such as ISO 22955:2021 and voluntary protocols such as the WELL certification (WELL V2 – Sound) offer guidelines for achieving acoustic comfort through proper design of the environment. Challenges arise, especially in architecturally constrained environments during renovations. Preliminary analysis of the present work involves room configuration based on standards, literature, and ultimately, from in situ case studies of existing open-plan offices. The rooms considered are devoid of furniture, and acoustic treatment is limited to suspended ceilings in accordance with ISO 22955:2021. Parameters include assessment of the Lombard effect and the involuntary increase in speech effort of the speaker in the presence of high ambient noise to ensure acoustic comfort in open-plan offices. The study analyzes the synergy between normative standards (ISO) and voluntary protocols (WELL) to identify compatibility when applying both documents.

Keywords: open-plan offices, compatibility between WELL e ISO 22955:2021, comfort, privacy

1 | Introduzione

La questione dell'acustica negli uffici è complessa, con diversi aspetti critici da considerare. È fondamentale garantire un adeguato trattamento acustico per migliorare la privacy, la concentrazione e la produttività dei lavoratori. Negli ultimi anni, sono state sviluppate normative e protocolli internazionali, come la ISO 22955:2021 [1], e il protocollo volontario WELL [2], che pongono particolare attenzione agli uffici open plan.

Le normative e i protocolli variano da paese a paese, considerando le caratteristiche degli ambienti lavorativi. Ad esempio, negli Stati Uniti, gli standard come ASTM [3] sono diversi rispetto a quelli europei, influenzando il modo in cui gli ambienti sono progettati e valutati.

Le norme ISO e il protocollo WELL definiscono obiettivi e criteri per il controllo del rumore negli uffici, ma hanno ap-

procci diversi. Mentre la ISO 22955 si concentra sull'acustica generale degli uffici, il protocollo WELL offre criteri misurabili per il comfort acustico [1,2].

È importante considerare le differenze tra norme e protocolli e adattarli alle specifiche esigenze e contesti geografici. Ad esempio, gli uffici europei e quelli americani possono avere caratteristiche architettoniche e pratiche diverse che influenzano le strategie di progettazione acustica.

Inoltre, per affrontare il rumore indesiderato, come quello generato dalla cosiddetta conversazione irrilevante, sono necessari interventi indiretti come l'uso di *baffle*, schermi e trattamenti acustici.

L'analisi approfondita delle normative e dei protocolli, insieme alla comprensione dei contesti geografici e delle esigenze specifiche, è essenziale per sviluppare progetti di uffici

che garantiscano un ambiente acusticamente confortevole per i lavoratori.

In sintesi, i punti chiave riguardanti la norma internazionale ISO 22955:2021 e il protocollo volontario a punti WELL per la caratterizzazione acustica degli uffici sono:

- La ISO 22955:2021 è una normativa internazionale ma sviluppata sostanzialmente in ambiente europeo. È pensata per essere aspirazionale e non cogente e riporta, i valori di progettazione acustica e di verifica di collaudo per contenere il livello di rumore ambientale all'interno di uffici. I valori che indica non sono quindi valori limite, ma sono valori cui si ambisce di arrivare [1].
- Il WELL è un protocollo volontario a punti sviluppato in ambito US [3] con riferimenti anche agli standard locali dell'Oceania [4]. Nei criteri definiti nella categoria Sound, riporta una serie di requisiti piuttosto semplici da quantificare preliminarmente, e/o da collaudare in opera. Il rispetto di ciascuno di questi criteri porta all'acquisizione di un punteggio, spesso con valori bonus qualora il criterio sia raggiunto con un certo margine [2].

L'obiettivo di questa ricerca, partendo dalla base dei dati raccolti e dai risultati ottenuti, è quello di analizzare le caratteristiche WELL per gli *open plan* e confrontarle con i requisiti della norma ISO 22955:2021, al fine di individuare la compatibilità delle applicazioni e sviluppare alcune possibili considerazioni per una corretta progettazione degli uffici [1,2].

2 | Materiali e metodi

Il WELL V2 Sound definisce sei caratteristiche, tra cui la *feature S04 – Reverberation Time* e la *feature S05 – Sound Reducing Surfaces*. Ogni caratteristica si ispira ad altri standard tecnici locali. I requisiti per la *feature S04 – Reverberation Time* sono definiti secondo tre diverse fasce di volumi (piccoli, medi, grandi), a cui corrispondono tre diverse fasce di requisiti di tempo di riverberazione in condizioni di ambiente arredato e non occupato, come riportato in Tab. 1. [2]

Tab. 1 – Limiti del tempo di riverberazione secondo la caratteristica S04 del protocollo volontario a punti WELL [2]
Reverberation time limits according to feature S04 of the voluntary point protocol WELL [2]

| Space type | Space Volume, v $ft^3(m^3)$ | Reverberation Time, t (seconds) |
|-------------------------------------|---|--------------------------------------|
| Areas for learning and conferencing | $v < 10000 ft^3 (280 m^3)$ | $t \leq 0.6$ |
| | $10000 ft^3 (280 m^3) \leq v \leq 20000 ft^3 (570 m^3)$ | $0.5 \leq t \leq 0.8$ |
| | $v > 20000 ft^3 (570 m^3)$ | $0.6 \leq t \leq 1.0$ |

La *feature S05 – Sound Reducing Surfaces* del WELL identifica due possibilità diverse a seconda del punteggio che si vuole raggiungere.

Per il raggiungimento di 1 punto, si ha (1):

$$\frac{A}{S_{floor}} > 0.6 \quad [-] \quad (1)$$

Per il raggiungimento di 2 punti, si ha (2):

$$\frac{A}{S_{floor}} > 0.9 \quad [-] \quad (2)$$

dove:

- A è l'area di assorbimento equivalente (m^2);
- S_{floor} è la superficie del pavimento (m^2).

La *feature S05* è definita in condizioni di ambiente vuoto; quindi, non prende in considerazione i miglioramenti che si otterrebbero in condizione arredata. Lo standard ISO 22955:2021, per gli stessi ambienti di lavoro, richiede una quantità di area di assorbimento equivalente pari ad almeno il 90% della superficie del pavimento. Si ha così il risultato di mantenere il livello di rumore sotto controllo, garantendo il benessere dei lavoratori all'interno degli spazi, e di contenere l'effetto Lombard. Vale dunque la stessa relazione espressa dall'equazione 2 riferita al protocollo WELL.

L'analisi dei requisiti acustici per la caratterizzazione di uffici *open plan* è stata sviluppata considerando lo stato dell'arte, dati sperimentali raccolti con una *literature review*, e 14 casi studio misurati in sito. Ciascun ambiente è stato considerato piccolo ($V < 280 m^3$), medio ($280 \leq V \leq 570 m^3$) o grande ($V > 570 m^3$), secondo *WELL feature S04 – Reverberation Time*. I calcoli vengono condotti ad ambiente vuoto, non arredato e non occupato, e con il solo trattamento assorbente a controsoffitto, in conformità a quanto prescritto dalla ISO 22955 e dal WELL [1,2].

L'approccio seguito nei calcoli si articola come di seguito, ed è illustrato graficamente in Fig. 1:

1. Si calcola l'assorbimento di progetto in funzione dei requisiti fissati dalle normative.
2. Si calcola il corrispondente tempo di riverberazione, verificando se esso risulta idoneo in relazione ai requisiti fissati dal WELL.
3. Si calcola (e si discute) il coefficiente di assorbimento medio corrispondente.

Durante l'analisi gli ambienti utilizzati sono stati divisi come riportato in Tab. 2.

Tab. 2 – Riepilogo della suddivisione degli ambienti utilizzati in funzione dei range di volume definiti dalla feature S04 del protocollo WELL [2]

Summary of the environments' subdivision according to the volume ranges defined by feature S04 of the WELL protocol [2]

| | Piccole dimensioni ($V < 280 m^3$) | Medie dimensioni ($280 \leq V \leq 570 m^3$) | Grandi dimensioni ($V > 570 m^3$) |
|--------------------------|---|---|--|
| Stato dell'arte | A, B, C | D, E, F | G, H, I |
| Literature review | A, B, C | / | D, E, F, G, H, I |
| Casi studio (in sito) | Uffici 10, 11, 12, 13, 14 | Ufficio 7 | Uffici 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9 |

Gli uffici *open plan* definiti secondo lo stato dell'arte e gli esempi ritrovati in letteratura si assume che siano di forma parallelepipedica e realizzati con proporzioni definite (1:4) per soddisfare le ipotesi della formula di Sabine. Questa semplificazione nasce in quanto nel primo caso si fa riferimento a geometrie ideali, e nel secondo non sempre le informazioni necessarie per ricostruire correttamente l'ambiente considerato erano definite in modo chiaro. Al contrario, per i casi studio in sito sono state considerate le dimensioni reali, direttamente misurate.

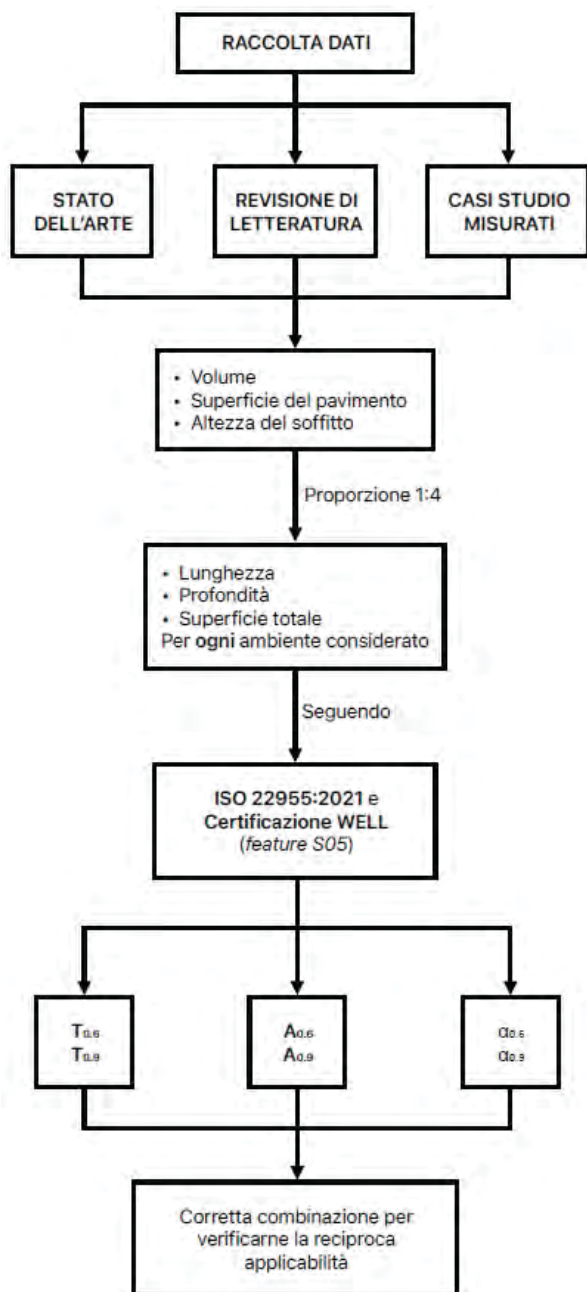


Fig. 1 – Flow chart illustrante in dettaglio il procedimento seguito per lo sviluppo dell'intera analisi, delineando le fasi, le interconnessioni e le decisioni coinvolte nel processo di elaborazione e valutazione dei dati
Flow chart detailing the process of developing the entire analysis, outlining the steps, interconnections, and decisions involved in the data processing and evaluation process

2.1 | Caratterizzazione di un ufficio *open plan* definito secondo lo stato dell'arte

Il metodo applicato per la definizione delle geometrie prevede l'ipotesi di nove configurazioni di uffici ideali, caratterizzati da tre volumi specifici (250, 450, 650 m³) e tre altezze (2.70, 3.00, 3.30 m), sulla base delle categorie di volume indicate dal WELL [2], come si vede in Tab. 3. Tutte le geometrie studiate hanno le altezze descritte, con proporzione tra lunghezza e profondità di 1:4.

Tab. 3 – Geometrie dei casi studio ideali ipotizzati secondo le categorie di volumi identificati dal protocollo volontario WELL [2].
Geometries of the ideal case studies hypothesized according to the volume categories identified by the voluntary WELL protocol [2]

| Areas for learning, lectures, and conferencing | | | | | | |
|--|---------------------|-------|--------------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------------------|
| | V (m ³) | h (m) | S _{floor} (m ²) | l ⁽¹⁾ (m) | w ⁽¹⁾ (m) | S _{tot} (m ²) |
| A | | 2.70 | 92.6 | 19.2 | 4.8 | 315.1 |
| B | 250 | 3.00 | 83.3 | 18.3 | 4.6 | 303.6 |
| C | | 3.30 | 75.8 | 17.4 | 4.4 | 295.1 |
| D | | 2.70 | 166.7 | 25.8 | 6.5 | 507.6 |
| E | 450 | 3.00 | 150.0 | 24.5 | 6.1 | 483.7 |
| F | | 3.30 | 136.4 | 23.4 | 5.8 | 465.4 |
| G | | 2.70 | 240.7 | 31.0 | 7.8 | 690.9 |
| H | 650 | 3.00 | 216.7 | 29.4 | 7.4 | 654.1 |
| I | | 3.30 | 197.0 | 28.1 | 7.0 | 625.5 |

⁽¹⁾ calcolato con proporzione 1:4

2.2 | Caratterizzazione di un ufficio *open plan* definito secondo la raccolta di dati sperimentali

Il metodo applicato per la definizione delle geometrie fa riferimento ai dati sperimentali raccolti attraverso una revisione di letteratura considerando quanti più articoli possibili pubblicati negli ultimi anni sull'argomento *open plan offices*.

Le parole chiave, in inglese, per eseguire questa ricerca sono state:

- *Open-plan offices*;
- *Open workspaces*;
- *ISO 3382-3:2021*;
- *Measurements*;
- *Standards published after 2012*.

Dalla lettura di 84 abstract di articoli pubblicati dal 2017 al 2023, cercando misure e dati di progetto, sono stati selezionati 31 articoli, per un totale di 130 casi studio di uffici *open plan* [5-9]. Analizzando gli articoli scelti, emerge che i parametri presi in considerazione in questi anni per i vari *workplaces* – misure o simulazioni di laboratorio – da diversi paesi in tutto il mondo, possono essere suddivisi in due macrocategorie:

1. Sintesi di sintesi dei parametri geometrici degli uffici.
2. Sintesi delle categorie per tipologia di intervento acustico (numero totale e percentuale).

Per ognuna di queste due sottocategorie sono stati definiti i parametri da indagare. Infatti, per la prima – *statistiche di sintesi dei parametri degli uffici* – sono stati individuati:

- numero di postazioni di lavoro (-)
- densità delle postazioni di lavoro (numero/m²);
- altezza del soffitto (m);
- superficie (m²).

Per ognuno di questi parametri e per ogni ufficio analizzato sono state calcolate la media, la deviazione standard, la mediana e la deviazione assoluta mediana. I risultati ottenuti sono riassunti in Tab. 4.

Tab. 4 – Statistiche di sintesi dei parametri geometrici delle postazioni di lavoro all'interno degli uffici open plan, raccolti attraverso literature review
Summary statistics of geometric parameters of workstations within open plan offices, collected through literature review

| Statistiche di sintesi dei parametri degli uffici | | | | |
|--|-------|---------------------|---------|-----------------------------|
| Parametri | media | deviazione standard | mediana | deviazione assoluta mediana |
| N. di postazioni di lavoro (-) | 26.4 | 33.7 | 15 | 7 |
| Densità delle postazioni di lavoro (num/m ²) | 0.3 | 0.3 | 0.15 | 0.07 |
| h _{soffitto} (m) | 3.2 | 0.7 | 2.9 | 0.3 |
| S _{pavimento} (m ²) | 267.2 | 228.2 | 186.9 | 83.9 |

Si osservi che tra tutti gli ambienti analizzati:

- per 5 uffici il numero di postazioni di lavoro non è definito;
- per 5 uffici non è definito il numero di densità delle postazioni di lavoro;
- per 27 uffici non è definita l'altezza del soffitto;
- per 6 uffici non è definita la superficie.

Mentre per il secondo – *sintesi delle categorie* – sono stati individuati:

- Tipo di controsoffitto;
- Moquette;
- *Activity-based workplace* (ABW);
- Divisori/schermi.

Per ognuno di questi parametri sono stati analizzati il soffitto, il pavimento, il luogo di lavoro (ABW) e la presenza di schermi tra le postazioni di lavoro.

Si noti che non tutti i parametri sopra elencati sono esattamente definiti per ogni ambiente e dove l'informazione non è riportata in letteratura, in fase di raccolta dati viene identificata come "non definita". In ogni caso, si tratta di una percentuale molto ridotta di dati rispetto al totale, come è possibile vedere in Fig. 2. Non sono stati riportati grafici a torta del parametro ABW, poiché in letteratura esso compare solo in 3 dei 31 articoli analizzati e senza informazioni significative [5-9].

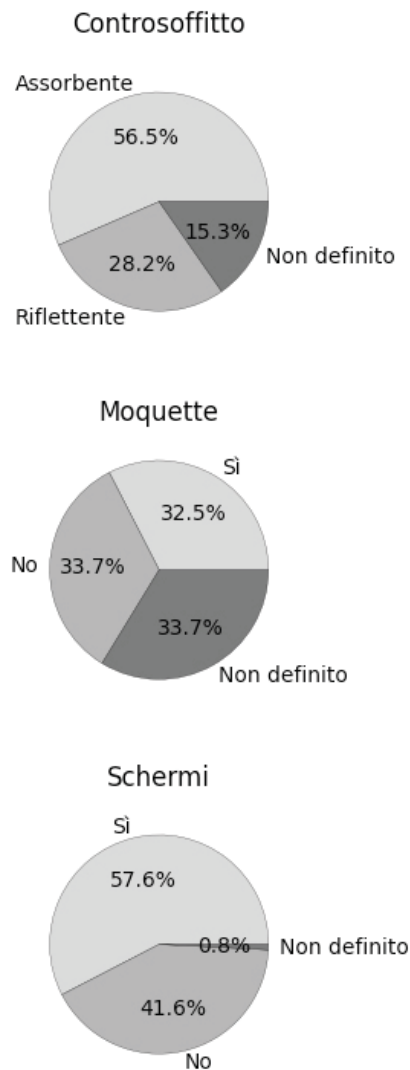


Fig. 2 – Grafici a torta con le percentuali dei materiali e delle caratteristiche degli uffici analizzati durante la revisione di letteratura, utili per avere una visione macroscopica a livello Europeo e non Europeo delle diverse configurazioni di uffici open plan

Pie charts with the percentages of office materials and characteristics analyzed during the literature review, helpful in getting a macroscopic view at the European level and not European of different open plan office configurations

Dalla revisione di letteratura sembra emergere che da un lato, il controsoffitto è il primo intervento che viene preso in considerazione, mentre il trattamento del pavimento non è così frequente. D'altra parte, l'uso di schermi sembra essere un elemento comune.

Partendo dai dati raccolti in Tab. 4, come nel paragrafo precedente, si è proceduto al confronto, prendendo in considerazione il valore medio della superficie del pavimento e dell'altezza, a cui si è sommata e sottratta la rispettiva deviazione standard. Questo ha permesso di identificare diverse superfici del pavimento (38.9, 267.2, 495.4 m²), considerando per ognuna di queste tre diverse altezze (2.4, 3.2, 3.9 m), ottenendo nove configurazioni diverse. Le caratteristiche geometriche degli ambienti analizzati sono riportate di seguito in Tab. 5.

Tab. 5 – Geometrie dei casi studio ipotizzati secondo le categorie di volumi identificati con la raccolta dati sviluppata mediante literature review, mantenendo invariata la divisione dei volumi degli ambienti definita dal protocollo volontario WELL [2]

Geometries of the hypothesized case studies according to the volume categories identified with the data collection developed through literature review, keeping the volume division of environments defined by the voluntary WELL protocol unchanged [2]

| Areas for learning, lectures, and conferencing | | | | | | |
|--|--------------------------------------|---------|-----------------------|---------------|---------------|------------------------------------|
| | S_{floor} (m ²) | h (m) | V (m ³) | $l^{(1)}$ (m) | $w^{(1)}$ (m) | S_{tot} (m ²) |
| A | | 2.4 | 94.5 | 25.0 | 6.2 | 462.9 |
| B | 38.9 | 3.2 | 123.2 | 25.0 | 6.2 | 508.8 |
| C | | 3.9 | 151.8 | 25.0 | 6.2 | 554.7 |
| D | | 2.4 | 648.9 | 65.4 | 16.3 | 2534.3 |
| E | 267.2 | 3.2 | 845.6 | 65.4 | 16.3 | 2654.6 |
| F | | 3.9 | 1042.3 | 65.4 | 16.3 | 2775.0 |
| G | | 2.4 | 1203.2 | 89.0 | 22.3 | 4503.8 |
| H | 495.4 | 3.2 | 1568.0 | 89.0 | 22.3 | 4667.7 |
| I | | 3.9 | 1932.7 | 89.0 | 22.3 | 4831.6 |

⁽¹⁾ calcolato con proporzione 1:4

I dati raccolti aiuteranno la ricerca a definire correttamente di diverse configurazioni di ambienti (9) simili a quelli esistenti in altri Paesi, diversi dall'Italia. Questo è fondamentale per avere una visione più ampia possibile del panorama globale degli uffici *open plan*.

2.3 | Caratterizzazione di un ufficio *open plan* definito secondo misure in situ di casi studio

Tab. 6 – Geometrie dei casi studio ipotizzati secondo le categorie di volumi identificati con la raccolta dati sviluppata mediante misure in situ mantenendo invariata la divisione dei volumi degli ambienti definita dal protocollo volontario WELL [2]

Geometries of the hypothesized case studies according to the volume categories identified with the data collection developed through in situ measurements, keeping the volume division of the environments defined by the voluntary WELL protocol unchanged [2]

| Areas for learning, lectures, and conferencing | | | | | | |
|--|-----------------------|---------|--------------------------------------|---------|---------|------------------------------------|
| | V (m ³) | h (m) | S_{floor} (m ²) | l (m) | w (m) | S_{tot} (m ²) |
| U1 | 885 | 3 | 248 | 33 | 7.5 | 738 |
| U2 | 1668 | 4 | 417 | 26.2 | 15 | 1163.6 |
| U3 | 2680 | 4 | 670 | 51.8 | 12.9 | 1857.7 |
| U4 | 920 | 4 | 230 | 30.3 | 7.6 | 763.3 |
| U5 | 1600 | 4 | 400 | 40.0 | 10.0 | 1200.0 |
| U6 | 760 | 4 | 190 | 27.6 | 6.9 | 655.7 |
| U7 | 520 | 4.35 | 120 | 21.9 | 5.5 | 478.3 |
| U8 | 770 | 4.35 | 177 | 26.6 | 6.7 | 643.4 |
| U9 | 730 | 3.8 | 192 | 27.7 | 6.9 | 647.3 |
| U10 | 32 | 3 | 11 | 6.6 | 1.7 | 71.7 |
| U11 | 44 | 3 | 15 | 7.7 | 1.9 | 88.1 |
| U12 | 44 | 3 | 15 | 7.7 | 1.9 | 88.1 |
| U13 | 26 | 3 | 9 | 6.0 | 1.5 | 63.0 |
| U14 | 142 | 4.35 | 33 | 11.5 | 2.9 | 190.9 |

Per dare una maggiore solidità allo studio, sono stati analizzati 14 uffici *open plan* misurati *in situ* e appartenenti a diverse aziende. Le informazioni generali emerse sono:

- da 26 a 61 postazioni di lavoro;
- superficie del pavimento da 192 a 417 m²;
- soffitto trattato con materiali fonoassorbenti;
- pareti di vetro lungo i lati principali e tra alcuni uffici;
- schermi di diverse altezze tra le scrivanie.

Le geometrie di ciascun *open plan* misurato sono raccolte in Tab. 6.

3 | Risultati

La grande quantità di dati ottenuti dalla creazione di geometrie ideali, dall'analisi di letteratura e dai casi studio ha permesso di avere una visione globale e completa di quella che è la situazione, ad oggi, degli uffici *open plan* ed avere una visione d'insieme quanto più veritiera possibile.

Il confronto è sviluppato considerando:

- l'ambiente con il controsoffitto trattato acusticamente, in condizioni non arredate e non occupate;
- i valori di tempo di riverberazione secondo la *feature S04 – Reverberation Time* del WELL [2];
- i requisiti di A/S_{floor} secondo WELL (*feature S05 – Sound Reducing Surfaces*) [2] e la ISO 22955:2021 [1].

In questa fase di elaborazione dei risultati, sono state utilizzate famiglie di ambienti suddivise come precedentemente riportato in Tab. 2.

3.1 | Risultati ottenuti dalla caratterizzazione di un ufficio *open plan* definito secondo lo stato dell'arte

Di seguito si riporta il confronto sviluppato attraverso le nove diverse configurazioni ideali, precedentemente definite (Tab. 3).

I risultati ottenuti sono riportati di seguito in Tab. 7.

Tab. 7 – Risultati ottenuti dalle elaborazioni dei dati definiti dalle geometrie dei casi studio ideali ipotizzati secondo le categorie di volumi identificati dal protocollo volontario WELL e dalla ISO 22955:2021 [1,2]

Results from the data processing defined by the geometries of the ideal case studies assumed according to the volume categories identified by the voluntary WELL protocol and ISO 22955:2021 [1,2]

| | $A_{0.6}$ (m ²) | $A_{0.9}$ (m ²) | $T_{0.6}$ (s) | $T_{0.9}$ (s) | $\bar{\alpha}_{0.6}$ (-) | $\bar{\alpha}_{0.9}$ (-) |
|---|-----------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|--------------------------|--------------------------|
| A | 56 | 83 | 0.72 | 0.48 | 0.18 | 0.26 |
| B | 50 | 75 | 0.80 | 0.53 | 0.16 | 0.25 |
| C | 45 | 68 | 0.88 | 0.59 | 0.15 | 0.23 |
| D | 100 | 150 | 0.72 | 0.48 | 0.20 | 0.30 |
| E | 90 | 135 | 0.80 | 0.53 | 0.19 | 0.28 |
| F | 82 | 123 | 0.88 | 0.59 | 0.18 | 0.26 |
| G | 144 | 217 | 0.72 | 0.48 | 0.21 | 0.31 |
| H | 130 | 195 | 0.80 | 0.53 | 0.20 | 0.30 |
| I | 118 | 177 | 0.88 | 0.59 | 0.19 | 0.28 |

Dal confronto di $T_{0,6}$ e $T_{0,9}$, con i limiti WELL, si ha che in $T_{0,6}$ gli uffici A, B, C (250 m³) hanno tempi di riverberazione superiori al valore massimo consentito (0.6 secondi), ma aggiungendo gli arredi questo valore tenderà a diminuire, e a rientrare nel limite. Lo stesso vale per gli ambienti E, F (450 m³). Nel caso di $T_{0,9}$ per gli ambienti D (450 m³) e G, H, I (650 m³) il tempo di riverberazione è inferiore ai limiti minimi definiti dal WELL (0.5 ≤ t ≤ 0.8 s in D e 0.6 ≤ t ≤ 1 s in G, H, I). Pertanto, aggiungendo l'arredo, $T_{0,9}$ continuerà a diminuire, allontanandosi sempre di più dal limite minimo [2].

I tempi di riverberazione hanno un andamento a ramo di iperbole, come si nota in Fig. 3.

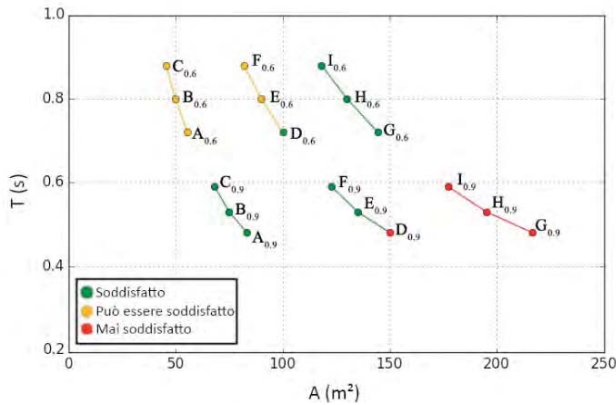


Fig. 3 – Andamento del tempo di riverberazione calcolato nelle nove configurazioni di casi ideali (da A a I), per ognuna delle due disuguaglianze ($A/S_{floor} > 0.6$ e $A/S_{floor} > 0.9$) definite da ISO 22955:2021 e WELL V2 – Sound [1,2]

Trend of reverberation time calculated in the nine ideal case configurations (A to I) for each of the two inequalities ($A/S_{floor} > 0.6$ and $A/S_{floor} > 0.9$) defined by ISO 22955:2021 and WELL V2 – Sound [1,2]

È importante notare che, come mostrato in Fig. 4, i coefficienti di assorbimento acustico $\bar{\alpha}_{0,9}$ sono indicativi di un allontanamento dalle ipotesi su cui si basano le formule previsionali della ISO 12354-6 [10]. Ciò avviene per due motivi principali:

- i coefficienti di assorbimento sono superiori alla regione di validità sabiniana ($\bar{\alpha} < 0.2$);
- il valore di $\bar{\alpha}$ è distribuito in modo non omogeneo, poiché l'assorbimento acustico è concentrato sul soffitto.

Le curve, mostrate in Fig. 4, ottenute dall'interpolazione dei valori di ($\bar{\alpha}_{0,6}$, $A_{0,6}$) e ($\bar{\alpha}_{0,9}$, $A_{0,9}$) decrescono con un andamento non lineare. Per il caso $A/S_{floor} > 0.6$, $\bar{\alpha}_{0,6}$ in media è pari a 0.18, mentre per il caso $A/S_{floor} > 0.9$, $\bar{\alpha}_{0,9}$ in media è pari a 0.28.

I valori di $T_{0,6}$ in alcune configurazioni sono superiori ai limiti WELL [2]. Al contrario, in alcuni casi $T_{0,9}$ presenta valori inferiori al requisito minimo e l'aggiunta di arredi e occupazione contribuirà a diminuire sempre più i valori di $T_{0,9}$ aumentando l'allontanamento dal limite minimo. A questi valori di $T_{0,9}$ corrispondono valori di $\bar{\alpha}_{0,9}$ maggiori o uguali a 0.3, che, come si nota in Fig. 4, sono i più lontani dalla regione di Sabine.

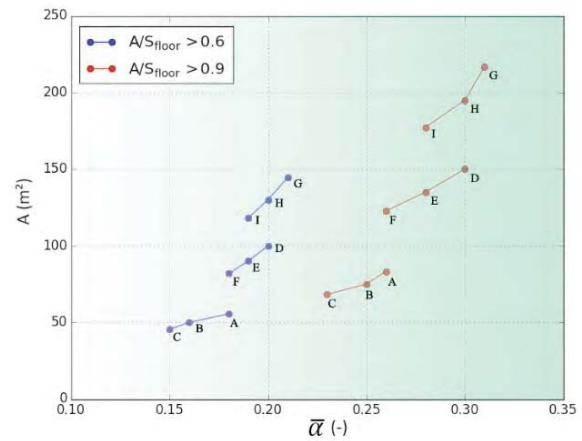


Fig. 4 – Andamento dell'area di assorbimento equivalente, in relazione al coefficiente di assorbimento medio, calcolato nelle nove configurazioni di casi ideali (da A a I), per ognuna delle due disuguaglianze ($A/S_{floor} > 0.6$ e $A/S_{floor} > 0.9$) definite da ISO 22955:2021 e WELL V2 – Sound [1,2]

Trend of the equivalent absorption area, in relation to the average absorption coefficient, calculated in the nine ideal case configurations (A to I), for each of the two inequalities ($A/S_{floor} > 0.6$ and $A/S_{floor} > 0.9$) defined by ISO 22955:2021 and WELL V2 – Sound [1,2]

3.2 | Risultati ottenuti dalla caratterizzazione di un ufficio open plan definito secondo la raccolta di dati sperimentali

Per effettuare i calcoli, sono state seguite le prescrizioni fornite da WELL e ISO 22955:2021, precedentemente descritte [1,2]. Tutti i risultati ottenuti sono raccolti in Tab. 8 [5-9].

Tab. 8 – Risultati ottenuti dalle elaborazioni dei dati definiti dalle geometrie dei casi studio definiti tramite raccolta dati sperimentale, eseguita in fase di literature review, secondo le categorie di volumi identificati dal protocollo volontario WELL e dalla ISO 22955:2021 [1,2,5-9]

Results obtained from data processing defined by case study geometries defined through experimental data collection, performed in the literature review, according to the volume categories identified by the voluntary WELL protocol and ISO 22955:2021 [1,2,5-9]

| | $A_{0,6}$ (m ²) | $A_{0,9}$ (m ²) | $T_{0,6}$ (s) | $T_{0,9}$ (s) | $\bar{\alpha}_{0,6}$ (-) | $\bar{\alpha}_{0,9}$ (-) |
|---|-----------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|--------------------------|--------------------------|
| A | 23.4 | 35.0 | 0.65 | 0.43 | 0.05 | 0.08 |
| B | 23.4 | 35.0 | 0.84 | 0.56 | 0.05 | 0.07 |
| C | 23.4 | 35.0 | 1.04 | 0.69 | 0.04 | 0.06 |
| D | 160.3 | 240.4 | 0.65 | 0.43 | 0.06 | 0.09 |
| E | 160.3 | 240.4 | 0.84 | 0.56 | 0.06 | 0.09 |
| F | 160.3 | 240.4 | 1.04 | 0.69 | 0.06 | 0.09 |
| G | 297.2 | 445.9 | 0.65 | 0.43 | 0.07 | 0.10 |
| H | 297.2 | 445.9 | 0.84 | 0.56 | 0.06 | 0.10 |
| I | 297.2 | 445.9 | 1.04 | 0.69 | 0.06 | 0.09 |

Gli uffici open plan ottenuti dalla analisi di letteratura possono essere classificati, in base alle geometrie che presentano secondo WELL, come:

- A, B, C: Uffici open plan di piccole dimensioni ($V < 280$ m³);

- D, E, F, G, H, I: Uffici *open plan* di grandi dimensioni ($V > 570 \text{ m}^3$).

Dove sei uffici su nove sono *open plan* di grandi dimensioni.

Gli uffici *open plan* considerati in letteratura provengono da diversi paesi, tra cui Finlandia, Germania, Austria, Spagna e Gran Bretagna fino ad Australia, Cina e Corea [5-9]. La maggior parte di questi ha il pavimento interamente rivestito di moquette, un soffitto completamente assorbente e gli schermi quasi sempre presenti.

Qui è interessante spostare l'attenzione sugli uffici di grandi dimensioni ($0.6 \leq t \leq 1.0 \text{ s}$). Alcune configurazioni presentano lo stesso problema in termini di rispetto dell'intervallo di T per gli ambienti di grandi dimensioni rilevato precedentemente per $T_{0.9}$. Infatti:

- D con $T_{0.9} = 0,43 \text{ s}$;
- E con $T_{0.9} = 0,56 \text{ s}$;
- G con $T_{0.9} = 0,43 \text{ s}$;
- H con $T_{0.9} = 0,56 \text{ s}$.

Tutte queste configurazioni hanno un tempo di riverberazione inferiore al limite minimo. Pertanto, aggiungendo arredi e considerando il contributo di assorbimento delle persone, il tempo di riverberazione tenderà a diminuire maggiormente, come mostrato in Fig. 5.

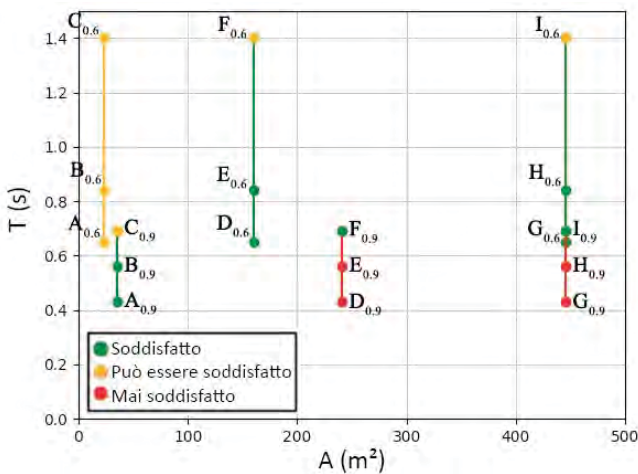


Fig. 5 – Andamento del tempo di riverberazione calcolato nelle nove configurazioni di ambienti con geometrie definite mediante la raccolta dati sperimentale (da A a I), per ognuna delle due disuguaglianze ($A/S_{\text{floor}} > 0.6$ e $A/S_{\text{floor}} > 0.9$) definite da ISO 22955:2021 e WELL V2 – Sound [1,2,5-9]

Calculated reverberation time trends in the nine-room configurations with geometries defined by experimental data collection (A to I) for each of the two inequalities ($A/S_{\text{floor}} > 0.6$ and $A/S_{\text{floor}} > 0.9$) defined by ISO 22955:2021 and WELL V2 – Sound [1,2,5-9]

Per valutare A/S_{floor} i calcoli sono stati eseguiti partendo dai dati di S_{floor} ottenuti dalla *Literature review* (38.9, 267.2, 495.4 m^2) [5-9].

I risultati ottenuti per ogni configurazione sono riportati in Fig. 6.

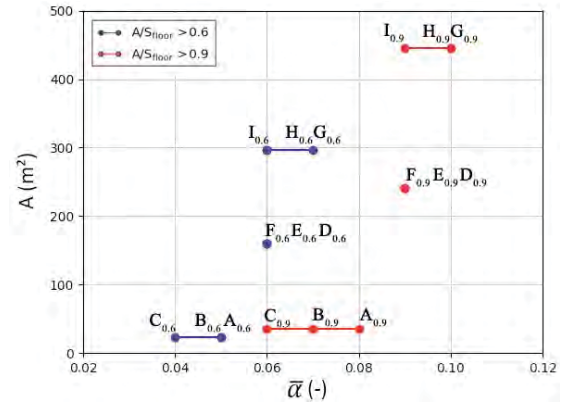


Fig. 6 – Andamento dell'area di assorbimento equivalente, in relazione al coefficiente di assorbimento medio, calcolato nelle nove configurazioni di ambienti con geometrie definite mediante la raccolta dati sperimentale (da A a I), per ognuna delle due disuguaglianze ($A/S_{\text{floor}} > 0.6$ e $A/S_{\text{floor}} > 0.9$) definite da ISO 22955:2021 e WELL V2 – Sound [1,2,5-9]

Trend of the equivalent absorption area, in relation to the average absorption coefficient, calculated in the nine-room configurations with geometries defined by experimental data collection (A to I) for each of the two inequalities ($A/S_{\text{floor}} > 0.6$ and $A/S_{\text{floor}} > 0.9$) defined by ISO 22955:2021 and WELL V2 – Sound [1,2,5-9]

In entrambi i casi i coefficienti $\bar{\alpha}_{0.6}$ e $\bar{\alpha}_{0.9}$ in condizioni non arredate e non occupate rientrano nella regione di validità di Sabine ($\bar{\alpha} < 0.2$), quindi considerando il contributo di arredi e persone, la A aumenterà e l'ambiente tenderà a non essere più sabiniano.

3.3 | Risultati ottenuti dalla caratterizzazione di un ufficio *open plan* definito secondo le misure in sito

Partendo dai dati raccolti dalle misure in sito, per effettuare i calcoli, sono state seguite le prescrizioni, precedentemente

Tab. 9 – Risultati ottenuti dalle elaborazioni dei dati definiti dalle geometrie dei casi studio definiti tramite misure in sito, secondo le categorie di volumi identificati dal protocollo volontario WELL e ISO 22955:2021 [1,2]

Results obtained from data processing defined by case study geometries defined by in situ measurements, according to the volume categories identified by the voluntary WELL protocol and ISO 22955:2021 [1,2]

| | $A_{0.6} \text{ (m}^2\text{)}$ | $A_{0.9} \text{ (m}^2\text{)}$ | $T_{0.6} \text{ (s)}$ | $T_{0.9} \text{ (s)}$ | $\bar{\alpha}_{0.6} \text{ (-)}$ | $\bar{\alpha}_{0.9} \text{ (-)}$ |
|-----|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| U1 | 148.5 | 222.8 | 0.95 | 0.64 | 0.20 | 0.30 |
| U2 | 250.2 | 375.3 | 1.07 | 0.71 | 0.22 | 0.32 |
| U3 | 402.0 | 603.0 | 1.07 | 0.71 | 0.22 | 0.32 |
| U4 | 138.0 | 207.0 | 1.07 | 0.71 | 0.18 | 0.27 |
| U5 | 240.0 | 360.0 | 1.07 | 0.71 | 0.20 | 0.30 |
| U6 | 114.0 | 171.0 | 1.07 | 0.71 | 0.17 | 0.26 |
| U7 | 72.0 | 108.0 | 1.16 | 0.77 | 0.15 | 0.23 |
| U8 | 106.2 | 159.3 | 1.16 | 0.77 | 0.17 | 0.25 |
| U9 | 115.2 | 172.8 | 1.01 | 0.68 | 0.18 | 0.27 |
| U10 | 6.6 | 9.9 | 0.78 | 0.52 | 0.09 | 0.14 |
| U11 | 9.0 | 13.5 | 0.78 | 0.52 | 0.10 | 0.15 |
| U12 | 9.0 | 13.5 | 0.78 | 0.52 | 0.10 | 0.15 |
| U13 | 5.4 | 8.1 | 0.77 | 0.51 | 0.09 | 0.13 |
| U14 | 19.8 | 29.7 | 1.15 | 0.76 | 0.10 | 0.16 |

descritte, fornite da WELL e ISO 22955:2021 [1,2]. Una volta note le geometrie degli ambienti, sono stati determinati l'area di assorbimento equivalente, il tempo di riverberazione e il coefficiente di assorbimento medio, come riportato in Tab. 9.

In questo caso, al contrario rispetto ai precedenti, la situazione più critica potrebbe essere quella relativa agli ambienti di piccole dimensioni ($V < 280 \text{ m}^3$), infatti qui il tempo di riverberazione $T_{0,9}$ è già inferiore al limite minimo.

I risultati dei tempi di riverberazione sono raccolti in diversi grafici, rispetto a $A/S_{\text{floor}} > 0.6$ (Fig. 7) e $A/S_{\text{floor}} > 0.9$ (Fig. 8).

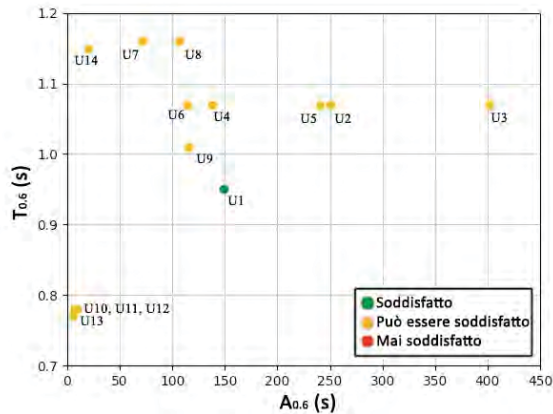


Fig. 7 – Andamento del tempo di riverberazione calcolato nelle quattordici configurazioni di ambienti con geometrie definite mediante misure in situ (da U1 a U14), per la disuguaglianza $A/S_{\text{floor}} > 0.6$ definita da WELL V2 – Sound [2].

Trend of reverberation time calculated in the fourteen room configurations with geometries defined by in situ measurements (U1 to U14) for the inequality $A/S_{\text{floor}} > 0.6$ defined by WELL V2 – Sound [2]

In Fig. 7, si vede che solo l'ufficio U1 è subito verificato rientrando nell'intervallo $0.6 \leq t \leq 1 \text{ s}$. Gli altri uffici hanno tutti un tempo di riverberazione superiore al limite, che però considerando l'arredo e l'occupazione tenderanno a rientrare nell'intervallo prescritto.

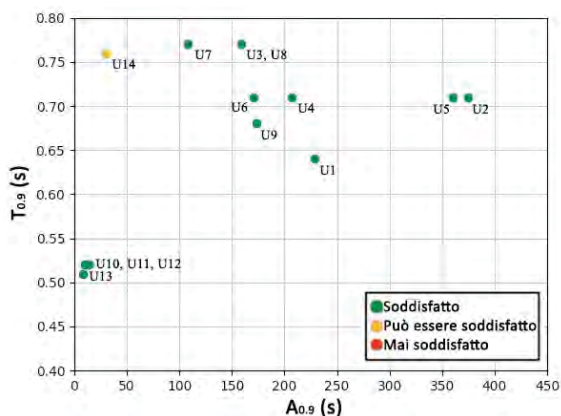


Fig. 8 – Andamento del tempo di riverberazione calcolato nelle quattordici configurazioni di ambienti con geometrie definite mediante misure in situ (da U1 a U14), per la disuguaglianza $A/S_{\text{floor}} > 0.9$ definita da ISO 22955:2021 e WELL V2 – Sound [1,2]

Trend of reverberation time calculated in the fourteen room configurations with geometries defined by in situ measurements (U1 to U14) for the inequality $A/S_{\text{floor}} > 0.9$ defined by ISO 22955:2021 and WELL V2 – Sound [1,2]

In Fig. 8 si vede che quasi tutti i $T_{0,9}$, ad eccezione di U14, hanno valori che soddisfano i limiti definiti dal WELL [2]. In questo caso, l'aggiunta dei mobili e l'assorbimento delle persone tenderanno a far abbassare il tempo di riverberazione, che potrebbe risultare inferiore al minimo prescritto.

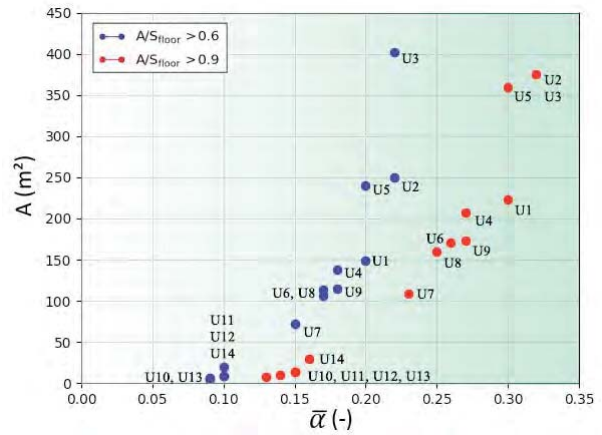


Fig. 9 – Andamento dell'area di assorbimento equivalente, in relazione al coefficiente di assorbimento medio, calcolato nelle quattordici configurazioni di ambienti con geometrie definite mediante misure in situ (da U1 a U14), per ognuna delle due disuguaglianze ($A/S_{\text{floor}} > 0.6$ e $A/S_{\text{floor}} > 0.9$) definite da ISO 22955:2021 e WELL V2 – Sound [1,2]

Trend of the equivalent absorption area, in relation to the average absorption coefficient, calculated in the fourteen room configurations with geometries defined by on-site measurements (U1 to U14) for each of the two inequalities ($A/S_{\text{floor}} > 0.6$ and $A/S_{\text{floor}} > 0.9$) defined by ISO 22955:2021 and WELL V2 – Sound [1,2]

In Fig. 9, la configurazione $A/S_{\text{floor}} > 0.6$ ha un $\bar{\alpha}$ in media pari a 0.15, quindi la maggior parte dei valori di $\bar{\alpha}_{0,6}$ ricade all'interno della regione di validità di Sabine ($\bar{\alpha} < 0.2$), ad eccezione di U2 e U3, leggermente più alti. La configurazione $A/S_{\text{floor}} > 0.9$ presenta un $\bar{\alpha}$ in media pari a 0.23, e la metà degli uffici, soprattutto quelli di piccole dimensioni, hanno un $\bar{\alpha}_{0,9}$ inferiore a 0.2 ricadendo nella regione di Sabine, mentre i restanti *open plan* hanno valori superiori a 0.2 allontanandosi dalla regione di Sabine [1,2].

In conclusione, dai risultati ottenuti dall'analisi delle tre caratterizzazioni di uffici considerate emerge che la progettazione acustica basata su standard e protocolli volontari citati in alcuni casi potrebbe condurre a tempi di riverberazione troppo bassi, soprattutto nel caso di ambienti di grandi dimensioni in condizioni arredate e occupate.

4 | Discussione

L'applicabilità e la compatibilità dei protocolli americani in Italia, è legata ai vincoli storici e architettonici a cui gli ambienti progettati sono soggetti, infatti i requisiti WELL [2] sono basati prevalentemente sull'applicazione di parametri provenienti da norme ASTM statunitensi [3], australiane e neozelandesi [4]. In molti di questi paesi gli uffici presentano pavimenti rivestiti con moquette, hanno una consistente

ventilazione forzata e una consolidata abitudine al *masking noise*. Al contrario, il contesto europeo vede pavimenti lisci, differente abitudine nel trattamento aria e assenza di *masking noise*. C'è poi una consistente differenza tra nord e sud dell'Europa nell'uso della voce in ufficio e nell'abitudine a lavorare con schermi più o meno alti. Questi contesti producono logiche molto differenti nell'applicazione delle norme e dei protocolli, in funzione della regione geografica. Quindi, lo stesso progetto di ufficio, efficace negli Stati Uniti, può non esserlo in ambito mediterraneo, né in quello scandinavo, e viceversa.

I risultati indicano che i valori calcolati in funzione di $A/S_{\text{floor}} > 0.6$ non presentano problemi critici rispetto ai requisiti. I tempi di riverberazione $T_{0,6}$, ad ambiente vuoto e con il solo controsoffitto trattato acusticamente, tendono ad essere più alti dei limiti WELL [2]. Qui, l'aggiunta di arredi e persone può aiutare a rispettare tali limiti. Tuttavia, i risultati per $A/S_{\text{floor}} > 0.9$ hanno $T_{0,9}$ più critici, soprattutto per gli ambienti di grandi dimensioni; quindi, la progettazione acustica basata sugli standard e i protocolli citati potrebbe in alcuni casi condurre a tempi di riverberazione troppo bassi, soprattutto in sale arredate e piene.

5 | Conclusioni

In conclusione, l'analisi condotta evidenzia la complessità e le sfide nell'applicazione dei protocolli americani, come la Certificazione WELL, in contesti italiani, soprattutto quando si considerano i vincoli storici e architettonici degli edifici. L'interazione tra standard come la ISO 22955:2021 e protocolli volontari come il WELL ha rivelato discrepanze significative, soprattutto riguardo al comfort acustico nei luoghi di lavoro.

È emerso che, sebbene i protocolli definiscano requisiti precisi per garantire il comfort acustico, come il T e il rapporto A/S_{floor} , le loro applicazioni in ambienti reali possono essere complesse. Ad esempio, il tempo di riverberazione calcolato in base ai requisiti di A/S_{floor} può risultare al di sopra o al di sotto dei limiti definiti dalla certificazione WELL per gli ambienti di grandi dimensioni.

In particolare, nelle situazioni in cui il tempo di riverberazione tende a essere inferiore al limite minimo imposto dalla certificazione WELL, si potrebbe creare un ambiente troppo secco, compromettendo il comfort, la privacy e la concentrazione dei lavoratori. D'altra parte, quando il tempo di riverberazione supera il limite massimo, si potrebbe compromettere l'intelligibilità del parlato.

Questa ricerca sottolinea l'importanza di considerare attentamente le specificità dei contesti locali e gli aspetti architettonici quando si applicano protocolli internazionali. Talvolta può essere necessario sviluppare approcci più flessibili e adattabili che tengano conto dei vincoli storici e delle caratteristiche degli edifici italiani, al fine di garantire un ambiente lavorativo ottimale in termini di comfort acustico, privacy e produttività.

Conclusions

In conclusion, the analysis highlights the complexity and challenges in applying American voluntary protocols, such as WELL Certification, in Italian contexts, especially when considering buildings' historical and architectural constraints. The interaction between standards such as ISO 22955:2021 and voluntary protocols such as the WELL revealed significant discrepancies regarding workplace acoustic comfort.

It turned out that although the protocols define precise requirements for ensuring acoustic comfort, such as T and A/S_{floor} ratio, their applications in real environments can be complex. For example, reverberation time calculated from A/S_{floor} requirements may be above or below the limits defined by WELL certification for large rooms.

In situations where reverberation time tends to be below the minimum limit imposed by the WELL certification, it could create an environment that is too dry, compromising the comfort, privacy, and concentration of workers. On the other hand, when reverberation time exceeds the maximum limit, speech intelligibility could be compromised.

This research emphasizes the importance of considering the specifics of local contexts and architectural aspects when applying international protocols. Sometimes, it may be necessary to develop more flexible and adaptable approaches.

Bibliografia

- [1] ISO 22955:2021, Acoustics – Acoustic quality of open office spaces. www.iso.org/standard/74237.html
- [2] WELL Building Standard V2, Q4 2020, International WELL Building Institute, 2020. <https://v2.wellcertified.com/en/wellv2/overview>
- [3] ASTM E1374, Standard Guide for Open Office Acoustics and Applicable. ASTM Standards. www.astm.org/e1374-18e01.html
- [4] AS/NZS 2107:2016, Acoustics – Recommended design sound levels and reverberation times for building interiors. www.standards.govt.nz/shop/asnz-21072016/
- [5] D., Cabrera, M., Yadav, D., Protheroe, Critical methodological assessment of the distraction distance used for evaluating room acoustic quality of open-plan offices, *Appl. Acoust.* 140 (2018) 132-142. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(81\)80020-X](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(81)80020-X)
- [6] J. Selzer, F. Schelle. Practical aspects of measuring acoustics in German open plan offices, In 11th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Euronoise), Crete May 27-31 2018.
- [7] M. Yadav, D. Cabrera, J. Love, J. Kim, J. Holmes, H. Caldwell, R. de Dear, Reliability and repeatability of ISO 3382-3 metrics based on repeated acoustic measurements in open-plan offices, *Appl. Acoust.* 150 (2019) 138-146. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.02.010>
- [8] G. Lüthi, V. Desarnaulds. Analysis of open plan acoustic parameters based on Swiss and international databases of in situ measurements, *Proceedings of the ICSV27, Prague, Czech Republik, July 12-16 2020.*
- [9] S. Kang, C.M. Mak, D. Ou, Y. Zhang, An investigation of acoustic environments in large and medium-sized open-plan offices in China, *Appl. Acoust.* (2022) 186 108447. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108447>
- [10] ISO 12354-6:2003, Building Acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from performance of elements – Sound absorption in enclosed spaces. <https://store.uni.com/uni-en-12354-6-2006>

