

## **SENSIBILITÀ ALLA POSA IN OPERA DEI REQUISITI ACUSTICI ED EFFETTI SULLA VARIABILITÀ DEI RISULTATI**

Gianfranco Cellai (1), Renzo Cremonini (2), Patrizio Fausti (2), Elisa Nannipieri (1),  
Simone Secchi (1)

1) Dipartimento di Tecnologie dell'Architettura e Design "Pierluigi Spadolini",  
Università degli Studi di Firenze

2) Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara

### **1. Introduzione**

La determinazione dell'incertezza dei risultati delle misurazioni di acustica edilizia eseguite in opera è da anni oggetto di notevole interesse da parte degli studiosi, anche in relazione all'evoluzione delle norme e della legislazione sui requisiti acustici passivi degli edifici [1, 2, 3, 4, 5].

Per valutare correttamente la variabilità dei risultati delle misure di acustica effettuate negli edifici è in generale possibile distinguere tra le seguenti cause di incertezza:

- l'accuratezza della strumentazione di misura;
- le procedure di misurazione (ad esempio la scelta ed il numero di postazioni microfoniche e di sorgente, il tempo di integrazione dei livelli, etc.);
- le condizioni di contesto (ad esempio il grado di finitura, la forma e le dimensioni dei locali, l'influenza delle trasmissioni laterali strutturali ed aeree, etc.);
- le modalità realizzative dei campioni in prova;
- la natura dei materiali usati;
- le modalità di funzionamento degli impianti (limitatamente alle misure sul rumore degli impianti).

I primi due fattori sopra riportati, che concorrono a determinare la cosiddetta *incertezza del metodo di misura*, hanno generalmente un'influenza sull'incertezza complessiva meno rilevante rispetto agli altri fattori, se le procedure di misurazione previste dalla serie UNI EN ISO 140 vengono rigorosamente rispettate. Valori utili di tale incertezza del metodo di misura sono riportati nell'appendice F della norma UNI 11367 [6].

Per quanto riguarda l'incertezza determinata dalle condizioni del contesto e dalla natura dei materiali, la variabilità dei risultati può essere molto elevata ma, per alcune situazioni, l'effetto può essere prevedibile. Si può citare, ad esempio, l'effetto della presenza dei battiscopa o del tipo di rivestimento superficiale nella misura del rumore di calpestio, la sigillatura e la regolazione dei serramenti nella misura dell'isolamento di facciata, etc.

Vengono di seguito riportati i risultati di alcuni studi eseguiti dagli autori e che riguardano la valutazione della variabilità delle misure di acustica edilizia eseguite in opera.

Nel primo studio, oggetto del paragrafo 2 della memoria, è analizzata la variabilità dei risultati delle misure in opera prendendo in considerazione un campione esteso di risultati di misure eseguite da diversi operatori in numerosi cantieri edili. Lo studio è condotto valutando la variabilità dei risultati per ognuno dei cantieri esaminati, in cui l'operatore che segue le misure, le soluzioni tecnologiche adottate e l'impresa realizzatrice dell'intervento rimangono gli stessi. Sono stati presi in considerazione solamente quei cantieri in cui, per un dato requisito, sono state eseguite almeno due misurazioni su due distinti componenti. Oggetto di questo primo studio è valutare la variabilità dei risultati in opera dovuta sia a determinate differenze progettuali (ad esempio la variazione della finitura superficiale di un pavimento, la diversa posizione dell'impiantistica in una parete o solaio sottoposto a prova), sia a differenze o difetti esecutivi, sia a possibili errori di misura. Il dato così ottenuto può essere preso a riferimento come oscillazione tipica dei parametri oggetto di rilevazione e serve principalmente a determinare quali di questi parametri sono maggiormente affetti da variabilità. È da tenere presente che rientrano tra possibili cause della variabilità anche determinate differenze progettuali; per alcune di queste è possibile effettuare una valutazione previsionale degli effetti sul risultato di misura (ad esempio la variazione della superficie dell'infilso all'interno di una facciata), mentre per altre non è possibile tenerne conto a livello previsionale (ad esempio la diversa posizione delle scatole dell'impianto elettrico in una parete).

Nel secondo studio, oggetto del paragrafo 3 della memoria, vengono invece analizzati nel dettaglio alcune possibili cause di variabilità dei risultati connesse a determinate condizioni di posa in opera.

Infine sono riportate nel paragrafo 4 alcune valutazioni sull'importanza del ruolo del direttore lavori e della direzione cantiere nella prevenzione di eventuali errori di realizzazione in opera che possono essere all'origine della variabilità dei risultati delle prestazioni acustiche.

## **2. Variabilità delle misure in opera dei requisiti acustici passivi degli edifici**

In questo studio viene valutata la variabilità dei risultati delle misure di acustica edilizia ( $R'_w$ ,  $D_{2m,nT,w}$  e  $L'_{n,w}$ ) dovuta sia a differenze progettuali, sia alla condizione di realizzazione in opera, sia a errori di misura.

La raccolta dati, su cui si basa il lavoro di analisi, ha coinvolto circa dieci gruppi di tecnici provenienti da università, enti di controllo e studi professionali che hanno condotto misurazioni nel centro e nel nord Italia (Emilia Romagna, Friuli Venezia Giulia, Liguria, Lombardia, Piemonte, Toscana, Trentino Alto Adige, Umbria, Veneto) quasi esclusivamente su edifici residenziali. Dai dati raccolti, riferiti a misurazioni eseguite nel rispetto delle condizioni definite dalle norme della serie UNI EN ISO 140, in edifici ultimati, sono stati eliminati quelli che non risultavano omogenei in merito alla tecnologia della soluzione tecnica esaminata (ad esempio non è considerata la variabilità tra misure eseguite su pareti di tipologia differente mentre è stata considerata la variabilità tra pareti con una diversa presenza di attraversamenti impiantistici).

L'analisi dei dati ha riguardato in un primo tempo la variabilità dei parametri misurati dovuta all'insieme delle cause, considerando tutte le soluzioni tecniche di pareti e solai realizzati (analizzando tutti i gruppi omogenei rappresentati dai cantieri esaminati); successivamente la stessa analisi è stata riferita separatamente ai gruppi omogenei di so-

luzioni tecniche di pareti e solai, per indagare la sensibilità delle varie tecnologie alla variabilità connessa alla posa in opera.

La valutazione è stata effettuata su serie di misure condotte dallo stesso operatore, con la stessa strumentazione, sulla stessa tipologia di partizione, realizzata dalla stessa impresa e nel solito cantiere. In questo modo i fattori di variabilità legati al metodo di misura e alla natura dei materiali possono essere considerati costanti.

## 2.1 Analisi per soli requisiti

Per definire la misura di dispersione di ogni singola campagna di misura sono stati definiti lo scarto tipo ( $\delta$ ) ed il range massimo di variabilità.

Si definisce scarto tipo (1) la radice quadrata della varianza ovvero la media aritmetica dei quadrati delle deviazioni dalla media, dove  $\mu$  è la media dei valori misurati e  $n$  il numero di misure effettuate per ogni cantiere. Si definisce invece range (2) i limiti del campo di variazione.

$$(1) \quad \delta = \sqrt{\frac{\sum (x - \mu)^2}{n}}$$

$$(2) \quad R = x_{\max} - x_{\min}$$

Le misure di dispersione appena elencate sono state valutate per ogni parametro misurato ( $R'_w$ ,  $D_{2m,nT,w}$  e  $L'_{n,w}$ ).

I cantieri analizzati per determinare la variabilità dell'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente di divisori verticali sono stati 84, nel 63% dei quali sono state effettuate solo due misure di campionamento, nel 24% tre misure, nel 13% quattro o più misure.

I cantieri analizzati per determinare la variabilità dell'indice di valutazione del livello del rumore di calpestio apparente sono stati 92. Nel 65% dei cantieri sono state effettuate due misure di campionamento, nel 20% tre misure, nel 9% quattro misure e nel 6% cinque o più misure.

Per l'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente dei divisori orizzontali i cantieri sono stati 27, nel 67% dei quali sono state effettuate due misure di campionamento mentre nel 33% tre misure.

I cantieri analizzati per determinare la variabilità dell'isolamento acustico di facciata sono stati infine 40, nel 63% dei quali sono state effettuate due misure di campionamento, nel 20% tre o quattro misure e nel 17% cinque o più misure.

Nelle figura 1 e 2 sono riportati rispettivamente lo scarto tipo e il range di variabilità delle misure sopra elencate. In figura 3 la relazione tra le due grandezze per i diversi parametri e per i cantieri esaminati.

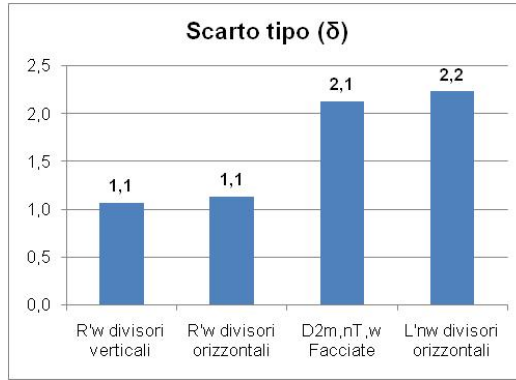


Figura 1 – Confronto tra gli scarti tipo dei vari parametri misurati.

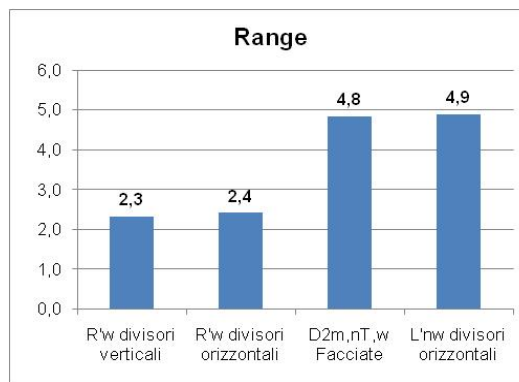


Figura 2 – Confronto tra i limiti del campo di variazione dei vari parametri misurati.

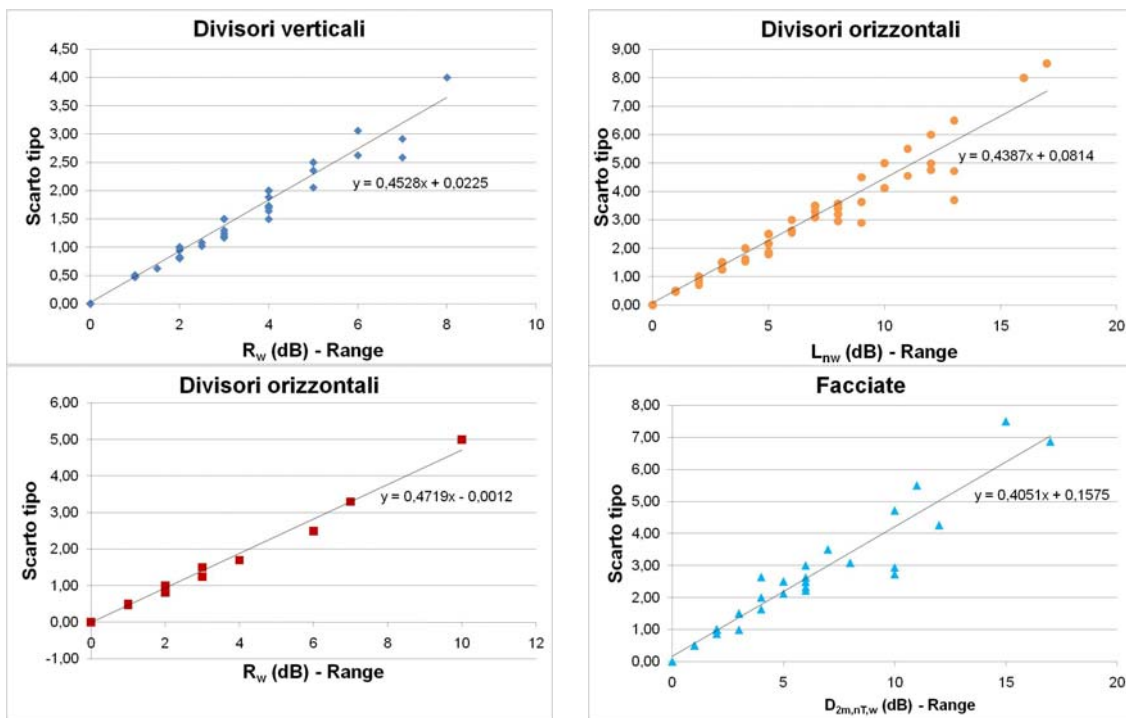


Figura 3 – Rapporto tra Scarto tipo e Range per i diversi parametri e per i diversi cantieri esaminati (gruppi omogenei).

## 2.2 Analisi per requisiti e per tecnologie

Per il potere fonoisolante dei divisori verticali e per l'isolamento al rumore di calpestio dei solai sono state analizzate le tecnologie costruttive maggiormente associate a variabilità nei risultati delle misure.

In particolare, è stata valutata la variabilità distinguendo:

- Pareti in laterizio da pareti in blocchi di calcestruzzo alleggerito ( $R'$ );
- Pareti in laterizio a singolo strato da pareti in laterizio a doppio strato o con controparete ( $R'$ );
- Solai con finitura superficiale ceramica da solai con finitura in parquet ( $L'_n$ );
- Solai con finitura in ceramica e pavimento galleggiante da solai senza pavimento galleggiante ( $L'_n$ ).

Nelle figure 4, 5, 6 e 7 sono riportati i risultati delle analisi effettuate.

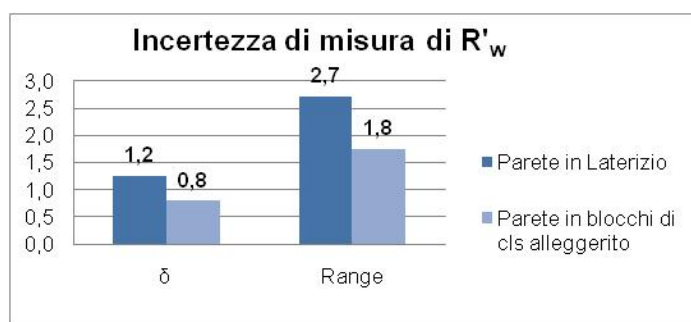


Figura 4 – Confronto tra scarto tipo ( $\delta$ ) e range massimo per misure effettuate su pareti in laterizio e pareti in blocchi leggeri di calcestruzzo.

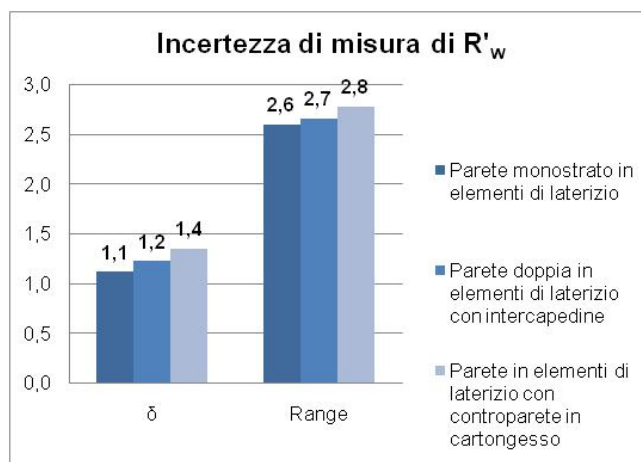


Figura 5 – Confronto tra scarto tipo ( $\delta$ ) e range massimo per misure effettuate su pareti in laterizio realizzate con diverse tecnologie costruttive.

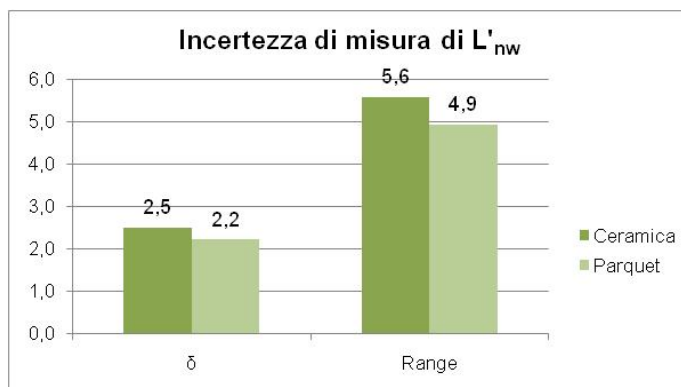


Figura 6 – Confronto tra scarto tipo ( $\delta$ ) e range massimo per misure effettuate su solai con rivestimento superficiale in ceramica e in parquet.

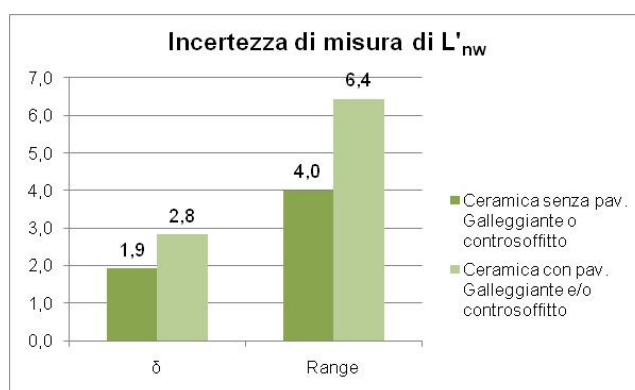


Figura 7 – Confronto tra scarto tipo ( $\delta$ ) e range massimo per misure effettuate su solai realizzati con e senza pavimenti galleggianti.

L'analisi effettuata evidenzia statisticamente una maggiore variabilità (all'incirca doppia) nelle misure di isolamento acustico di facciata e di livello di rumore da calpestio. Ciò è da porre in relazione con l'esistenza di maggiori fattori di incertezza legati alla realizzazione in opera delle soluzioni tecniche (ad esempio la regolazione della chiusura del serramento, la corretta sigillatura laterale del telaio del serramento, la presenza di discontinuità in pavimenti galleggianti etc.).

Questi fattori di variabilità sono analizzati nel dettaglio nello studio presentato nel paragrafo successivo.

L'analisi per tecnologie realizzative, riportata in sintesi nei grafici di figure 4, 5, 6 e 7, evidenzia come determinate tecnologie siano maggiormente suscettibili di variabilità nei risultati delle prove acustiche. In particolare, si evidenzia una significativa maggiore variabilità nei risultati delle prove di livello di rumore da calpestio eseguite su solai dotati di pavimento galleggiante rispetto a quelli privi di tale soluzione. Ciò sembra conseguenza del fatto che la presenza del pavimento galleggiante, che migliora fortemente le prestazioni acustiche del solaio, introduce anche fattori di variabilità non presenti nei solai tradizionali, come la possibilità di discontinuità nel manto elastico che si possono creare in corrispondenza dei battiscopa o delle soglie delle porte o delle porte finestre.

### 3. Influenza di specifici aspetti della posa in opera sui risultati delle misure

Come illustrato in precedenza, i principali fattori di variabilità dei risultati nelle misure di acustica edilizia sono la procedura di misura, le condizioni al contorno, la natura dei materiali e la posa in opera. Per analizzare *singolarmente* l'influenza di un solo fattore è necessario mantenere costanti o per lo più trascurabili tutti gli altri.

Riguardo alla valutazione della variabilità legata alla sola posa in opera, la procedura più immediata dovrebbe prevedere le misurazioni su una stessa tipologia di parete o di solaio realizzata e distrutta più volte da parte dello stesso gruppo di manovali. Tale procedura, oltre ad essere di difficile applicazione, tende probabilmente a sottostimare la variabilità dovuta alla posa in opera, che risulta certamente più curata rispetto alle reali condizioni di lavoro in cantiere.

Per questo motivo è stata ricercata una metodologia che permettesse di valutare, con una precisione accettabile, l'influenza di tale variabilità su partizioni (pareti e solai) già realizzate in opera.

È stata quindi condotta un'estesa campagna di misurazioni di isolamento al rumore aereo e livello di calpestio presso diversi appartamenti all'interno di un quartiere di nuova costruzione sito in Ferrara. La caratteristica principale di questa campagna di misura è che tutte le prove sono state effettuate dallo stesso operatore, con la stessa strumentazione, su partizioni della stessa tipologia e realizzati dalla stessa impresa di costruzioni. Ciò ha permesso di mantenere il più possibile trascurabili i fattori di variabilità legati al metodo di misurazione e alla natura dei materiali, così da poter indagare gli altri fattori, legati alle condizioni al contorno e alla posa in opera.

La procedura di valutazione è stata estrapolata dalla normativa UNI ISO 5725-3 [7], che prevede la possibilità di determinare lo scarto tipo di una condizione intermedia tra gli estremi di ripetibilità e di riproducibilità (illustrati nella UNI EN 20140-2 [8]), allo scopo di analizzare singolarmente i diversi fattori che concorrono alla variabilità massima. È importante specificare che tale normativa è normalmente utilizzata per la determinazione di fattori di variabilità legati alle *procedure di misura*: si è tuttavia ritenuto che il principio di base e le relative formulazioni statistiche potessero essere applicate anche per ricercare altri fattori di variabilità, quali appunto le condizioni al contorno e la posa in opera.

Per la stima delle misure intermedie di precisione è stato utilizzato un esperimento a tre fattori totalmente in cascata, descritto nella normativa stessa. Il vantaggio dell'impiego di tale approccio statistico consiste nella possibilità di ottenere contemporaneamente non solo lo scarto tipo di ripetibilità e di riproducibilità, ma anche un valore dello scarto tipo della precisione intermedia, nel nostro caso associabile allo scarto tipo dovuto alla posa in opera.

Tra tutte le unità immobiliari presenti nelle palazzine residenziali oggetto delle misure è stato sempre possibile individuarne almeno due identiche, sotto il profilo della geometria, della forma e delle tipologie di murature e solai (figura seguente). Considerando una coppia di unità immobiliari identiche, all'interno di ognuna è stata scelta la stessa partizione da testare (parete o solaio). In questa maniera le due partizioni testate erano identiche in termini di tipologia di parete e di condizioni al contorno (geometria, forma e campo acustico interno agli ambienti di prova): l'unico fattore di variabilità era quindi la posa in opera. Allo scopo di minimizzare il più possibile l'errore casuale dovuto alla procedura di misura, lo stesso operatore con la stessa strumentazione e ad intervalli di tempo brevi ha effettuato due prove su ogni parete.

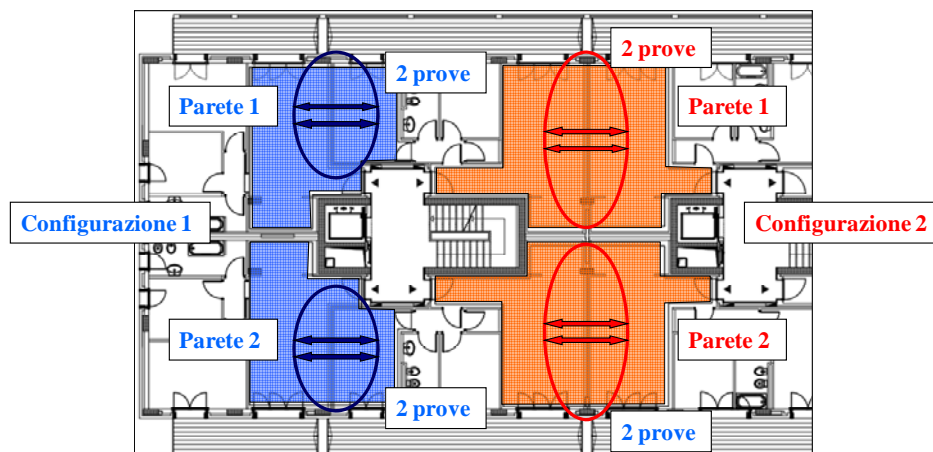


Figura 8 – Applicazione dell'approccio statistico al caso in esame

Per quanto riguarda l'isolamento al rumore aereo sono state individuate 19 configurazioni di prova (per un totale di 38 pareti testate), riguardo al livello di calpestio le configurazioni di prova sono state 11 (per un totale di 22 solai testati).

La successiva analisi statistica, descritta nella normativa UNI EN ISO 5725-3, ha permesso di valutare gli scarti tipo di ogni livello dell'esperimento a cascata: lo scarto tipo della configurazione di prova, lo scarto tipo del campione, lo scarto tipo delle prove ripetute su ogni campione (scarto tipo di ripetibilità). Lo scarto tipo del campione rappresenta proprio la variabilità legata *solamente* alla posa in opera, non solo del campione di prova ma anche delle strutture adiacenti.

I risultati, per ogni requisito acustico, sono riportati di seguito.

### 3.1 Isolamento al rumore aereo – risultati

Le misurazioni in opera hanno portato a ottimi risultati per la maggior parte delle pareti: il 53 % delle pareti ha ottenuto un indice di valutazione compreso tra 54 e 57 dB, il 32 % un indice compreso tra 50 e 53 dB e il 15 % un indice inferiore a 50 dB. A titolo di esempio si sono posti a confronto tali risultati, diminuiti tutti di 1 dB per tenere conto dell'incertezza di misura, con i limiti della classificazione acustica riportati nella UNI 11367 [6]: risulta che il 2% circa delle pareti testate ricadono in classe I (1 parete), il 50% in classe II (19 pareti), il 24 % in classe III (9 pareti) e il restante 24% in classe IV (9 pareti).

In merito all'applicazione dell'approccio statistico illustrato in precedenza, nella tabella seguente è riportato il valore medio dell'indice di valutazione e i relativi valori degli scarti tipo.

Tabella 1 - Valore dell'indice di valutazione medio, dello scarto tipo di riproducibilità e dei diversi contributi dello scarto tipo

$R'_{w,medio}$ [dB]	$sR$ [dB]	$s(0)$ [dB]	$s(I)$ [dB]	$sr$ [dB]
	Variabilità massima	Variabilità condizioni al contorno	Variabilità posa in opera	Variabilità replicazione misure
53	2.7	2.4	1.3	0.3



La variabilità massima (scarto tipo di riproducibilità) dipende quasi esclusivamente dalla variabilità delle condizioni al contorno. La variabilità dovuta alla posa in opera è risultata inferiore ma comunque significativa. La variabilità riferita alla ripetibilità infine è stata di poco superiore allo zero.

Questi risultati nel complesso sono abbastanza buoni, tipici delle misurazioni effettuate sullo stesso tipo di parete, costruito nel complesso residenziale da manodopera adeguatamente formata e controllata. Gli elevati valori di variabilità riferiti alle condizioni al contorno non dipendono da diverse forme e dimensioni, né dalle condizioni acustiche all'interno delle camere: il contributo principale è dovuto alla interazione della parete in prova con le strutture adiacenti. Tale contributo è maggiore quando l'isolamento acustico aereo del campione è elevato in quanto la trasmissione strutturale attraverso le pareti contigue e i solai è più importante. I risultati completi di questa ricerca sono riportati in [2].

### **3.2 Isolamento al rumore aereo – altri risultati su pareti monostrato**

Nel periodo dal 2000 al 2010 è stata condotta una campagna di misura in opera su una particolare tipologia di parete monostrato, costituita da blocchi di calcestruzzo alleggerito con argilla espansa, intonacata su ambo i lati, per uno spessore totale di 28 cm. Nel complesso sono state effettuate prove su 47 pareti. A differenza della campagna di misura precedente, in questo caso le prove sono state effettuate in condizioni al contorno completamente diverse tra loro, con pareti realizzate da imprese di costruzione diverse e in contesti costruttivi diversi (Lombardia, Emilia-Romagna, Veneto, Toscana etc.), in un lasso di tempo molto più lungo (10 anni). Gli operatori e la strumentazione sono invece rimasti gli stessi per tutte le misure. Il valore medio dell'indice di valutazione di tutte le misurazioni è risultato  $R'_w=51.7$  dB con uno scarto tipo  $s=1.1$  dB.

Confrontando quest'ultimo valore dello scarto tipo ( $s=1.1$  dB) con quello ottenuto con la ricerca sulle pareti doppie ( $s=2.7$  dB) si osserva come la variabilità dei risultati per le misurazioni effettuate sulle pareti monostrato sia risultata largamente inferiore rispetto alla variabilità dei risultati della parete doppia nonostante il numero di fattori di variabilità nelle misure su pareti monostrato fossero maggiori (diversi contesti, diverse imprese, tempi più lunghi). Questo risultato, come visto anche al capitolo 2, seppure in maniera meno evidente, si giustifica considerando la diversa stratigrafia nelle due soluzioni tecnologiche: le pareti monostrato hanno una minore variabilità rispetto al risultato atteso mentre le pareti doppie hanno una variabilità maggiore. A fronte di questo, però, le pareti doppie permettono di spingersi verso risultati anche molto superiori alle pareti monostrato utilizzando materiali e spessori opportuni. Maggiori informazioni sono riportate in [2].

### **3.3 Livello di rumore di calpestio – risultati**

Le misurazioni in opera hanno portato a risultati tutti conformi al limite legislativo: poco meno della metà dei solai ha ottenuto un indice di valutazione compreso tra 49 e 53 dB, l'altra metà ha ottenuto valori compresi tra 54 e 57 dB. Effettuando il confronto con i limiti di classificazione acustica, in questo caso sommando 1 dB ad ogni indice di valutazione per tenere conto dell'incertezza di misura, si ottengono i seguenti risultati: il 32% dei solai ricade in classe I (7 solai) e il 68% ricade in classe II (15 solai).

In riferimento all'applicazione del metodo statistico descritto in precedenza, nella tabella seguente è riportato il valore medio dell'indice di valutazione e i relativi valori degli scarti tipo.

Tabella 2 - Valore dell'indice di valutazione medio, dello scarto tipo di riproducibilità e dei diversi contributi dello scarto tipo

$L'n,W,medio$ [dB]	$sR$ [dB]	$s(0)$ [dB]	$s(1)$ [dB]	$sr$ [dB]
	Variabilità massima	Variabilità condizioni al contorno	Variabilità posa in opera	Variabilità replicazione misure
53	1.9	0.3	1.9	0.2

In questo caso la variabilità massima (scarto tipo di riproducibilità) dipende quasi esclusivamente dalla variabilità della posa in opera. La variabilità riferita alle condizioni al contorno è dello stesso ordine di grandezza della ripetibilità. Ulteriori analisi sono riportate in [2].

### 3.4 Influenza della regolazione dei serramenti nelle misure in opera di isolamento di facciata

Allo scopo di valutare l'influenza della regolazione dei serramenti sui risultati dell'isolamento acustico di facciata, è stata condotta un'estesa campagna di misure su una serie di facciate appartenenti allo stesso complesso residenziale. Le facciate erano tutte costituite dallo stesso pacchetto di parete esterna e dalla stessa tipologia di serramento: portafinestra in legno a due o tre ante con vetrocamera.

Le misurazioni sono state effettuate in tre diverse sessioni. La prima sessione di misura è stata condotta su 12 facciate con serramenti non regolati. Dopo una prima regolazione sommaria di tali serramenti, è stata condotta una seconda sessione di misura, sulle stesse facciate testate in precedenza. Dal momento che anche in questo caso non è stato raggiunta la conformità con il limite di legge, in accordo con la direzione lavori si è effettuata una ulteriore campagna di misura su alcune facciate campione, in cui i serramenti sono stati regolati con maggiore cura: in questo caso sono state testate ulteriori 13 facciate, diverse dalle facciate considerate nella prima e seconda sessione di misura.

Tabella 3 - Confronto risultati misure prima e dopo la regolazione dei serramenti

Tipologia serramento	$D_{2m,nT,W}$ [dB]		
	Serramenti non regolati	Serramenti regolati in maniera approssimativa	Differenza
2 ante	37.4	38.7	+1.3
2 ante	38.3	39.4	+1.1
2 ante	35.6	39.0	+3.4
2 ante	38.0	39.1	+1.1
2 ante	28.1	34.9	+6.8
2 ante	36.3	38.3	+2.0
2 ante	36.8	38.3	+1.5
2 ante	36.8	37.9	+1.1
3 ante	37.5	40.8	+3.3
3 ante	33.9	34.9	+1.0
2 ante	32.5	36.8	+4.3
2 ante	32.2	34.1	+1.9

Tra le prima e la seconda sessione di misura, dato che le facciate erano sempre le stesse, gli unici fattori di variabilità erano riconducibili alla regolazione del serramento e, in maniera trascurabile, all'errore casuale dell'operatore nell'applicazione della procedura di misura. I risultati e i confronti tra le misure sono riportati nella tabella seguente.

Si può notare che la regolazione del serramento ha comportato un miglioramento dell'indice di valutazione compreso tra 1 e circa 7 dB, tuttavia praticamente tutte le facciate continuano ad essere non conformi al limite di legge di 40 dB. Ciò è dovuto alla persistenza di difetti sul serramento, molto evidenti prima della regolazione e meno evidenti in seguito alla stessa, relativi soprattutto a problemi di tenuta delle ante contro la battuta, presenza di fessure e spiragli tra le ante e la battuta stessa e problemi relativi al passaggio di rumore attraverso i meccanismi di chiusura centrali.

La terza sessione di misura, come illustrato in precedenza, è stata effettuata su altre facciate con i serramenti regolati in maniera più accurata. Anche se le facciate erano differenti rispetto alle prime due sessioni di misura, le tipologie di serramento (portefinestre a due e tre ante) e le condizioni del contesto (ambienti riceventi finiti e non arredati, condizioni meteo, operatore) erano le medesime. Per questo motivo è stato possibile porre a confronto i risultati delle prime due sessioni con i risultati della terza sessione di misura, in termini di indice di valutazione medio e di andamento in frequenza medio.

Dalla tabella e dal grafico riportati di seguito si evince che la regolazione del serramento effettuata a regola d'arte ha portato un miglioramento dell'indice di valutazione medio di circa 4 dB rispetto alle misure su serramenti regolati in maniera più sommaria. I miglioramenti più evidenti sono stati ottenuti alle medio – alte frequenze, in quanto con ogni probabilità sono stati risolti i problemi di tenuta delle ante in battuta e di fessurazione.

Tabella 4 - Confronto tra i valori dell'indice di valutazione medio dell'isolamento di facciata per le tre configurazioni considerate

$D_{2m, nT, W}$ [dB]	<i>Serramenti non regolati</i>	<i>Serramenti regolati in maniera approssimativa</i>	<i>Altri serramenti regolati in maniera più accurata</i>
	35.3	37.7	42.0

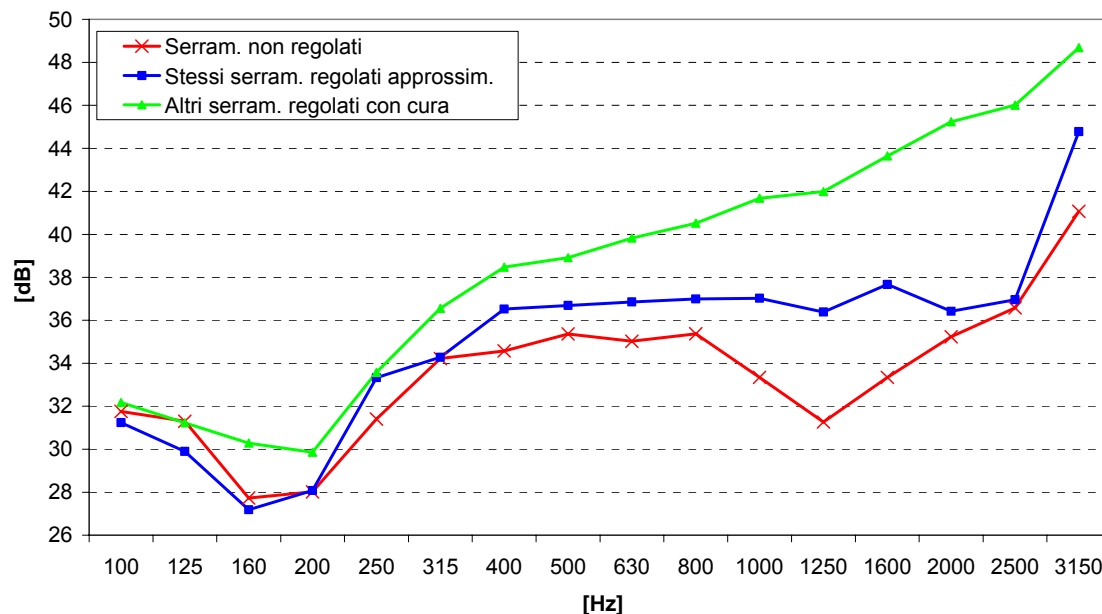


Figura 9 – Confronto tra gli andamenti in frequenza delle tre configurazioni esaminate

#### 4. Il problema della variabilità dei risultati in relazione al contesto delle costruzioni

Prima di affrontare la complessità della realizzazione di un'opera edile, occorre mettere in evidenza gli elementi di maggiore criticità costituiti dal sistema italiano delle costruzioni che è alla base della qualità dei risultati conseguibili, avente peraltro effetti immediati sulla variabilità dei risultati in generale e delle prestazioni acustiche in particolare.

In Italia, nella quasi totalità dei casi, la realizzazione delle opere avviene mediante subappalto, ovvero l'impresario affida normalmente l'esecuzione delle opere, in parte o in toto, alle piccole-medie imprese artigiane (le PMI sono pari a circa il 93% delle imprese)<sup>1</sup>, ovvero aventi un numero di addetti inferiori a 9 e con una media di addetto/impresa < 3 (Dati Censimento ISTAT 2001) e con retribuzioni sovente al limite del guadagno per il subappaltatore. Questa situazione ha assunto aspetti così evidenti e dannosi per la qualità dell'opera, che sempre più spesso si bandiscono gare di appalto non più con l'aggiudicazione al massimo ribasso, ma con il criterio dell'offerta più vantaggiosa, cui concorrono non solo il prezzo, ma anche i miglioramenti qualitativi offerti e valutati mediante rigoroso punteggio.

Le dimensioni estremamente ridotte delle imprese limitano le potenzialità di crescita ed evidenziano le seguenti problematiche:

- la dimensione dell'impresa appare direttamente correlata con gli indici di qualifica media dei lavoratori, ossia tanto più piccola è un'impresa tanto meno qualificata sarà la forza lavoro;
- le attività espletate sono spesso caratterizzate da un basso tenore tecnologico e da una dimensione della produzione eminentemente manuale-artigianale;

<sup>1</sup> I dati al 2005 evidenziano che il settore di maggior concentrazione delle attività artigiane è costituito dalle costruzioni (35,38%).

- è estremamente limitata l'attività di ricerca e sviluppo e il tasso di innovazione è praticamente inerziale;
- le piccole imprese sono caratterizzate da una bassa capacità di portare a compimento processi di riorganizzazione interni che facilitino l'adozione di nuove tecnologie.

Occorre poi far rilevare che anche a livello progettuale gli studi di progettazione sono anch'essi costituiti da un numero medio di addetti/studio  $< 2$ , per cui le problematiche evidenziate per le PMI possono tranquillamente assumersi anche per gli studi professionali.

Peraltro, la frammentazione dell'esecuzione dell'opera tra tanti soggetti diversi comporta ulteriori criticità, quali la pratica impossibilità di poter ricondurre la responsabilità dell'esecuzione ad un unico soggetto ed una maggiore difficoltà nel controllo dell'esecuzione dell'opera da parte della Direzione Lavori.

#### **4.1 Analisi del processo edilizio: dal progetto alla direzione lavori**

La difficoltà nel garantire idonei livelli qualitativi nell'opera edile nasce, oltre che dai fattori sopra enunciati, dalla complessità del quadro legislativo di riferimento non esente da contraddizioni e sovente privo di chiarezza [9], dalla molteplicità dei soggetti coinvolti [10], dalle innumerevoli azioni che devono essere realizzate con tempi e verifiche possibilmente pianificate e coordinate e dalle carenze progettuali.

Tale complessità è esplicitamente affermata dalla norma UNI 10722-1 [14] che recita: "a differenza di altri contesti produttivi la redazione del progetto si muove in edilizia *in un contesto di prevalente incertezza e incompletezza dei dati*, dove, alla sintesi di ogni scelta, deve precedere l'analisi delle possibili alternative e seguire sempre la verifica dell'alternativa selezionata."

La variabilità dei risultati dovuta alla posa in opera può quindi essere applicata alla fase di realizzazione di ogni peculiare componente dell'elemento tecnico (pareti, solai, etc.).

Si riporta di seguito un esempio pratico riferendoci alle seguenti soluzioni costruttive aventi eguali prestazioni acustiche:

- parete a cassetta realizzata con muratura doppia in forati, triplo intonaco, materiale fonoassorbente nell'intercapedine e strisce elastiche di appoggio sotto le murature (n° 7 componenti);
- parete realizzata con blocchi in calcestruzzo ad incastro intonacati (n° 3 componenti).

Come evidenziato anche nel capitolo precedente, riferito a tipologie di parete simili, nel primo caso *la variabilità della posa in opera* è almeno doppia rispetto al secondo: a questo si deve aggiungere che l'attenzione di posa deve essere sicuramente maggiore per la stesura, ad esempio, degli elementi elastici di appoggio e della malta che, nel caso di impiego dei forati, deve essere stesa uniformemente sia sui giunti orizzontali che verticali.

Il progetto deve quindi mettere a disposizione del processo esecutivo le migliori condizioni per ridurre al minimo *la variabilità della posa in opera*. A questo riguardo una possibile strategia potrebbe essere quella di privilegiare la scelta di elementi tecnici con il minor impiego di materiali, con la minore richiesta di mezzi d'opera, e con il minor grado di specializzazione della manodopera. Sulla base del quadro sopra delineato, questo sembrerebbe quanto allo stato attuale si possa permettere il sistema produttivo nazionale nel settore edilizio. Peraltro questi aspetti sono fondamentali per consentire la migliore Direzione Lavori.

Prima di affrontare un intervento occorre quindi avere chiari gli obiettivi che si vogliono raggiungere, i mezzi di cui si può disporre e le condizioni specifiche del contesto normativo in cui si opera: è possibile tutto questo in campo acustico? La risposta è affermativa a condizione che nella fase progettuale, si siano attuate le scelte giuste [11]: *il progetto corretto dell'opera costituisce la condizione necessaria*, pur se insufficiente, per raggiungere i risultati attesi.

Le decisioni suddette fanno riferimento alle fasi del processo edilizio definite meta-progettazione degli elementi tecnici e progettazione tecnologica (figura 10).

Una volta che la progettazione tecnologica ha raggiunto gli obiettivi, l'attenzione si sposta all'esecuzione ed al controllo della stessa che, se corretta, è condizione necessaria e sufficiente per il rispetto dei requisiti acustici. Diventano quindi essenziali le fasi della progettazione operativa e del processo costruttivo vero e proprio definito in figura 10.

A tal fine si può fare riferimento ad alcune norme tecniche [12, 13, 14] e documenti elaborati a supporto dell'attività professionale [15].

Consegnare un progetto conforme agli standard UNI sopra riportati significa tuttavia essere a metà strada dell'opera: l'altra metà compete alla Direzione Lavori che deve assicurare il rispetto del progetto. A seconda della complessità dell'opera, altre figure professionali possono essere deputate a sovrintendere alla realizzazione del progetto:

- il Direttore dei lavori Operativo (D.O.), figura già presente per le strutture, gli impianti meccanici, etc.
- l'Assistente di Cantiere del D.L. o di nomina dell'impresa costruttrice (A.C.).

In tempi recenti si è sempre più affermata la figura del D.O. acustico, ovvero l'esperto incaricato di controllare in cantiere il conseguimento degli obiettivi posti dal D.P.C.M. 5.12.97, coadiuvato nelle fasi più critiche dall'A.C. (ad esempio nel seguire la posa dei materassini elastici anticalpestio). Dall'esame del progetto il D.O. individua ogni subsistema tecnologico avente rilevanza acustica, e conseguentemente le fasi costruttive da controllare più attentamente.

Volendo limitare l'analisi agli aspetti inerenti il rispetto dei requisiti acustici ai sensi del DPCM 5.12.97, subsistemi e fasi suddette sono relative alla fornitura e posa in opera in ordine di criticità:

- dei pavimenti galleggianti,
- delle pareti di separazione tra distinte unità immobiliari;
- dei serramenti esterni;
- degli impianti a funzionamento continuo e discontinuo.

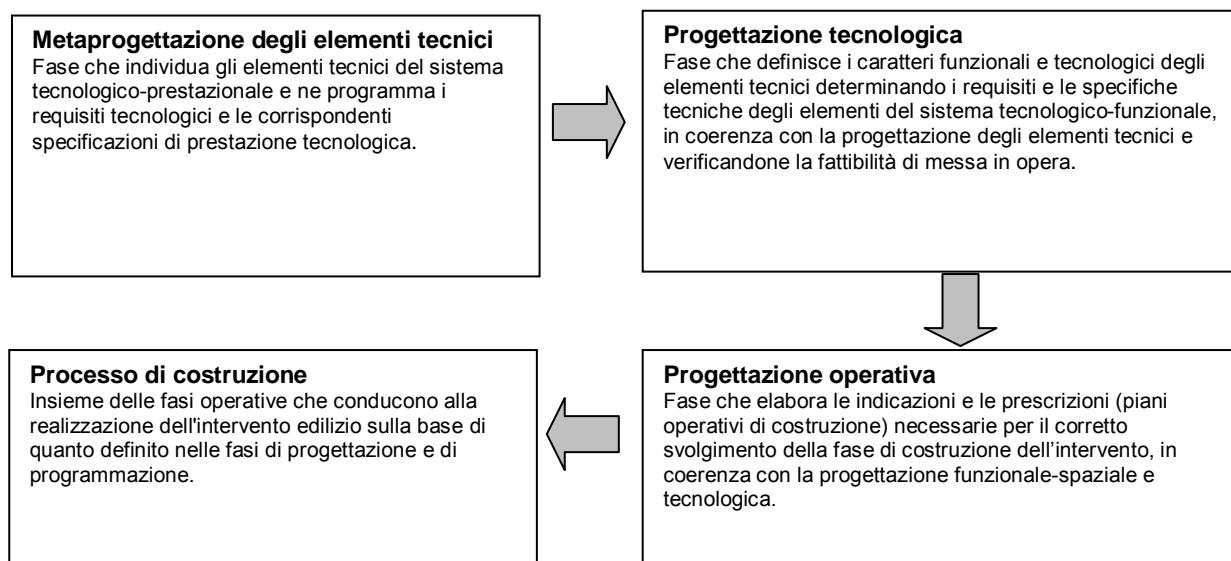


Figura 10 – Sintesi delle fasi progettuali e costruttive per la realizzazione dell'opera

Ciascun intervento sopra descritto, per ridurre al minimo la variabilità della posa in opera, deve essere oggetto di uno specifico *piano operativo di costruzione* (Progettazione operativa [13]) sottoposto ai controlli e verifiche richiamati nelle norme UNI [14] in relazione agli specifici contenuti di indicazioni legislative e prescrizioni contrattuali. Tra queste spiccano per l'esito delle prestazioni acustiche le **Condizioni di accettazione**, ovvero la descrizione delle modalità di controllo della conformità dell'eseguito mediante la definizione delle verifiche/controlli da esercitarsi in corso d'opera ovvero a piano operativo eseguito [12]. Il rispetto delle condizioni di accettazione significa che l'esecuzione del piano è avvenuta a "regola d'arte"; nel caso di esito negativo delle verifiche, l'esecuzione deve essere completamente ripetuta o parzialmente corretta, a seconda delle specifiche peculiarità del particolare procedimento esecutivo e ciò a insindacabile giudizio della direzione lavori e/o del collaudatore in corso d'opera.

Tutte le condizioni di accettazione relative all'insieme dei piani operativi devono far parte dell'articolato del capitolato tecnico dell'intervento nella voce "**piano del controllo**", in cui devono altresì essere indicati strumenti e metodi per la realizzazione dello stesso. In particolare viene definita la **Squadra operativa**, ovvero la composizione in termini di qualifica e quantità di operatori della squadra necessaria per l'esecuzione, con indicazione del responsabile.

Infine viene descritta la **Procedura esecutiva**, ovvero la sequenza logico-funzionale delle operazioni elementari necessarie per l'esecuzione del piano di controllo, le modalità secondo le quali dette operazioni si devono svolgere, ed indicati in logica successione temporale gli eventi soggetti a controllo, informazione fondamentale perché il piano venga svolto correttamente.

In figura 11 sono sintetizzati i contenuti delle procedura sopra descritta.

Per concludere si illustra un esempio applicato ai pavimenti galleggianti:

- nella meta-progettazione si definiscono per il solaio i requisiti prestazionali (es.  $L'_{nw} \leq 63$  dB);
- nella progettazione tecnologica si individuano i componenti e le relative specifiche tecniche (ad esempio rigidità dinamica,  $\Delta L_{nw}$ , caratteristiche del massetto, etc.);
- nella progettazione operativa si forniscono le indicazioni per una corretta esecuzione (piano operativo di costruzione contenente le indicazioni di posa del materassino

- elastico, disgiunzione delle pareti laterali dal massetto galleggiante, cura nella sigillatura delle sovrapposizioni, protezione nella fase di posa, etc.);
- si definisce la squadra operativa (personale qualificato incaricato della realizzazione e nominativo del responsabile);
  - si definisce la procedura esecutiva di controllo nelle varie fasi, quali verifica della corretta posa del materassino, verifica del getto del massetto, verifica della posa del pavimento e del relativo battiscopa;
  - si definiscono le condizioni di accettazione con le modalità di verifica (ad esempio possesso del certificato di prova del  $\Delta L_{nw}$ , collaudo in opera a campione con misura del  $L'_{nw}$ ).

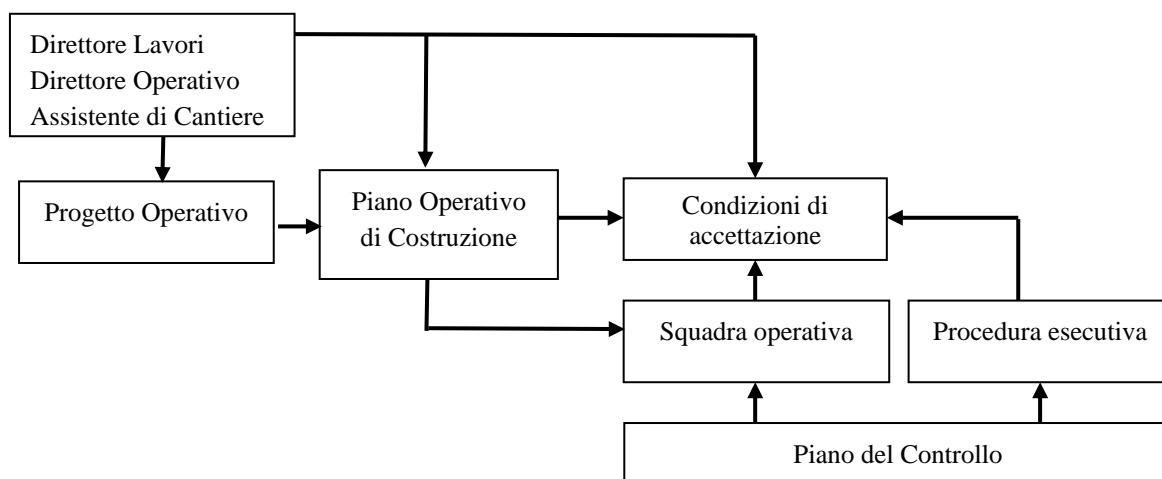


Figura 11 – Contenuti e percorso di controllo dell'esecuzione

## 5. Ringraziamenti

Si ringraziano i tecnici che hanno condiviso con gli autori i risultati delle proprie campagne di misura e hanno permesso di effettuare lo studio presentato nel paragrafo 2 del seguente articolo. In particolare si ringraziano Dino Abate (studio professionale), Gianni Calistri (ASL Pistoia), Folco De Polzer (studio professionale), Claudio Martorana (studio professionale), Francesco Pelucchi (studio professionale), Andrea Poggi (ARPAT, Firenze), Giovanni Semprini e Luca Barbaresi (Univ. Bologna).

## 6. Riferimenti

- [1] P. Fausti, S. Secchi, “La variabilità dei risultati delle misure in opera dei requisiti acustici passivi in atti del seminario *Strumenti e metodi di misura per l'acustica e le vibrazioni*, Ancona, 22 settembre 2008.
- [2] R. Cremonini, P. Fausti, “la variabilità dei risultati delle misurazioni di collaudo in opera”, in *Convention Nazionale del Gruppo di Acustica Edilizia, L'acustica edilizia in Italia: esperienze e prospettive*, Ferrara 11 – 12 marzo 2009
- [3] J. Lang, “A round robin on sound insulation in buildings”, *Applied Acoustics* 52, pp 225-238, 1997



- [4] E. Gerretsen, “Interpretation of uncertainties in acoustic measurements in buildings”, in Proceedings of Symposium dB, Le Mans, 27 – 29 June 2005.
- [5] R.L.X.N. Michalski, D. Ferreira, M. Nabuco and P. Massarani, “Uncertainty evaluation in field measurements of airborne sound insulation”, in Proceedings of Acoustics 08, Paris, June 29 – July 4, 2008.
- [6] UNI 11367: 2010, Acustica in edilizia - Classificazione acustica delle unità immobiliari, Procedura di valutazione e verifica in opera
- [7] UNI ISO 5725-3: 2004, “Accuratezza (esattezza e precisione) dei risultati e dei metodi di misurazione. Parte 3: Misure intermedie di precisione in un metodo di misurazione normalizzato”
- [8] UNI EN 20140-2: 1994, Acustica – Misura dell’isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio. Determinazione, verifica e applicazione della precisione dei dati
- [9] G. Cellai, E. Nannipieri, S. Secchi “*Il rispetto dei requisiti acustici passivi: dalla protezione alla speculazione – riflessioni a margine dell’esperienza e proposte d’intervento*” in Atti del Convegno Naz. AIA, 1B-8, Milano 11-13 Giugno 2008.
- [10] G. Cellai, S. Secchi “*Dal progetto al collaudo acustico degli edifici: analisi delle criticità del processo*” in Atti del 36° Convegno nazionale AIA, mem011 on CD, Torino 10-12 Giugno 2009.
- [11] G. Cellai “Aspetti tipologici e distributivi della progettazione architettonica per il comfort acustico”, in atti del Seminario Gruppo Acustica Edilizia (GAE) *Il collaudo acustico degli edifici secondo il DPCM 5.12.97*, 11-26, Ancona, 15 Giugno 2005.
- [12] UNI 10721: 1998, Edilizia - Servizio di controllo tecnico per nuove costruzioni - Criteri per l’affidamento dell’incarico e sviluppo del servizio.
- [13] UNI 10723: 1998, Processo edilizio - Classificazione e definizione delle fasi processuali degli interventi edilizi di nuova costruzione.
- [14] UNI 10722/1-2-3: 2007, Edilizia - Qualificazione e verifica del progetto edilizio di nuove costruzioni.
- [15] Consiglio Nazionale degli Architetti “*Protocolli prestazionali - edilizia privata di nuova costruzione*” Maggioli Ed. Dicembre 2009.