

THE ROLE OF STRUCTURAL MONITORING IN BUILDINGS LOCATED IN SEISMIC AREAS

Prof. Andrea Del Grosso

RINA Consulting & University of Genoa

Definizione



Il monitoraggio strutturale (**Structural Health Monitoring – SHM**) è un approccio sistemico al rilevamento e identificazione dei danni che si possono manifestare nei sistemi strutturali a causa dell'invecchiamento o del degrado dei materiali, di azioni eccedenti le previsioni di progetto, di eventi eccezionali di origine naturale o antropica.

Le tecnologie del monitoraggio strutturale più moderne si basano sull'impiego di **reti di sensori installate** permanentemente o per lunghi periodi, apparecchiature di **acquisizione, trasmissione e memorizzazione dei dati** provenienti dai sensori e su **algoritmi di trattamento, analisi e interpretazione** dei dati.

Tali tecnologie, ormai molto diffuse nei settori industriali (veicoli - **mechatronics**), da circa due decenni si stanno diffondendo anche nel settore delle costruzioni civili (dighe, ponti e gallerie, edifici) sia pure con qualche ritardo.

Le costruzioni civili



Ragioni del ritardo:

- Ogni costruzione è diversa da tutte le altre
- Il ciclo di vita delle costruzioni civili è molto esteso nel tempo
- Il danneggiamento si produce tipicamente in tempi lunghi
- Le tipologie di danneggiamento ed i loro effetti sono difficilmente riconducibili a categorie e comportamenti predeterminati
- Le tecnologie SHM sono caratterizzate da elevata interdisciplinarietà
- I sistemi SHM sono talvolta complessi e richiedono strutture dedicate per la loro gestione e manutenzione
- Gap culturale e diffidenza degli operatori del settore

Tuttavia, le tecnologie SHM sono oggi correntemente impiegate per grandi strutture e infrastrutture critiche, soprattutto di nuova costruzione.

Le costruzioni civili



Vantaggi e opportunità:

- Il dispiegamento di tecnologie SHM in una struttura consente la **valutazione della sicurezza** in tempo (quasi) reale, integrando e semplificando il ricorso a tecniche tradizionali di investigazione (diagnosi)
- Consente una determinazione ragionevolmente attendibile della **vita residua** (prognosi) attraverso la costruzione di **curve di lifetime**
- Consente una valutazione ragionevolmente attendibile dell'**efficacia** degli interventi di manutenzione, ripristino/miglioramento delle strutture
- Migliora la conoscenza del comportamento delle **strutture reali**
- Migliora la conoscenza delle **azioni** e delle loro variazioni nel tempo
- Molti edifici ed infrastrutture moderne sono equipaggiati con sistemi SCADA (BMS, IMS) in cui l'integrazione di sistemi SHM risulta più facile ed economicamente conveniente

Curve di lifetime

CEN prCWA 63:2012

Deterioration capacity

$$C_i(t) = C_I + a_n \times (S_i - S_I)^c$$

with

$$a_n = (C_F - C_I) / (S_F - S_I)^c$$

where

C_I initial condition

a_n slope of deterioration

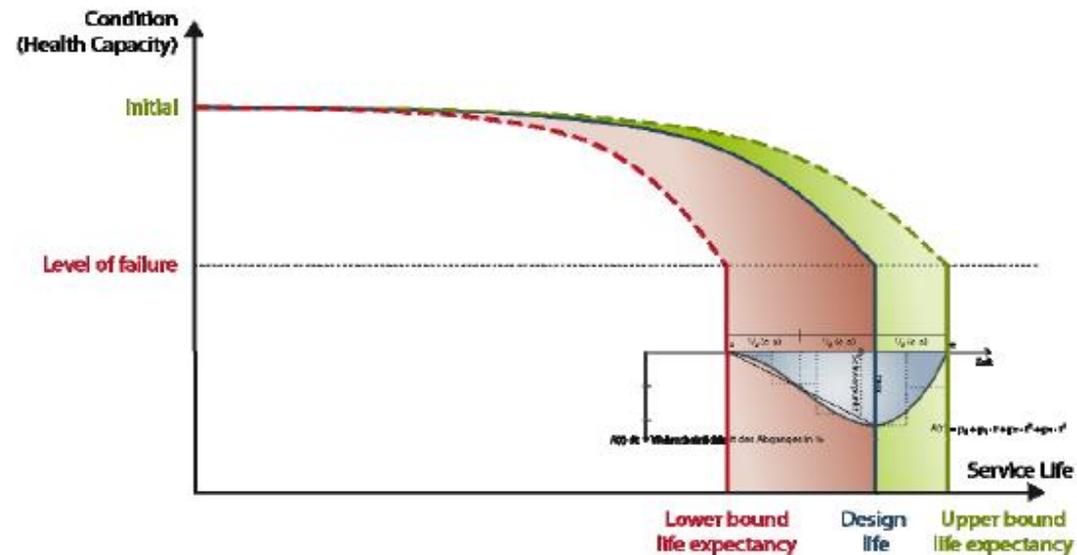
S_i current year of service life

S_I initial year of service life

c deterioration power exponent; empirical, constant value derived from sensitivity analysis; for bridge components $c = 3$ is established

C_F final condition (early-warning level)

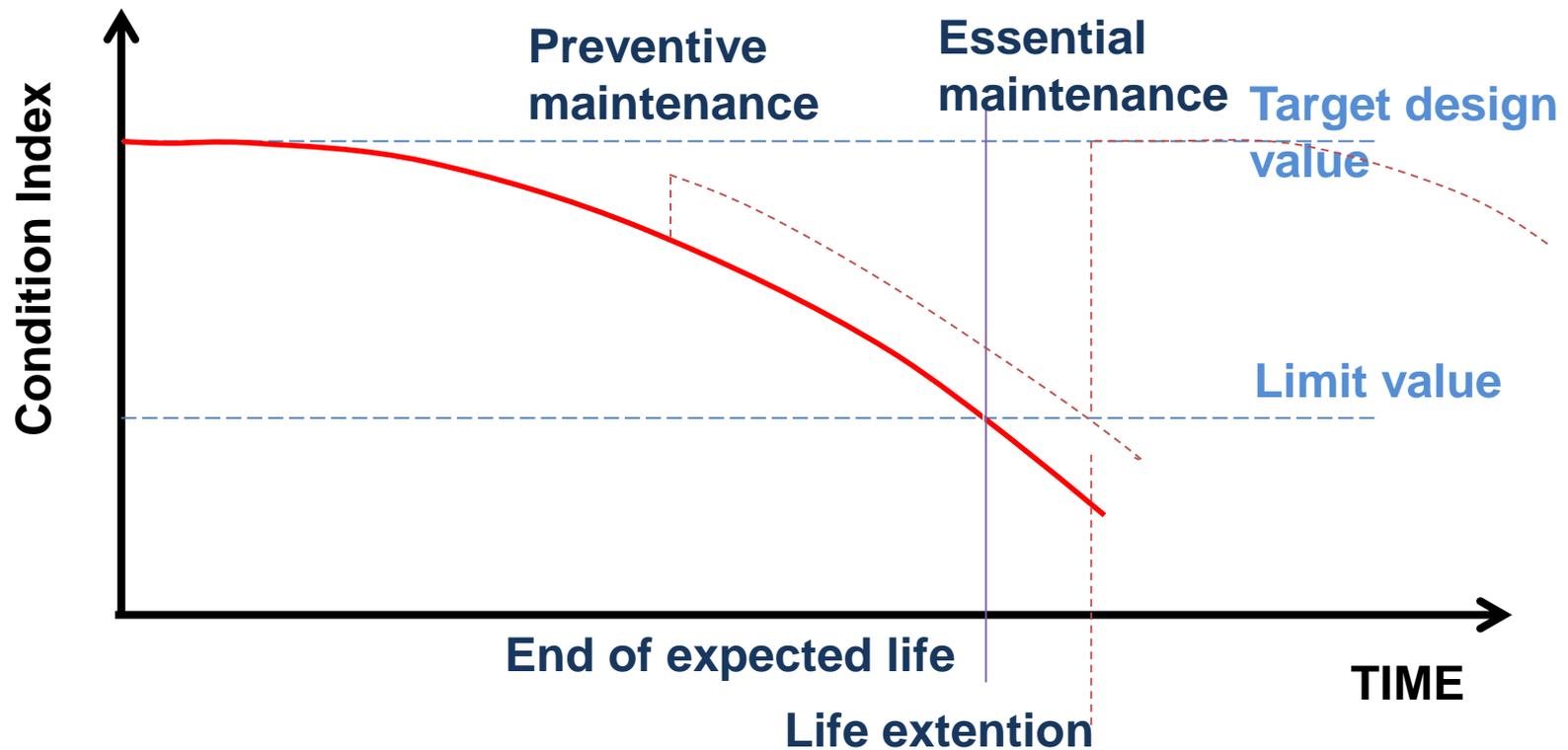
S_F final (assumed) year of service life



Prognosis

$$C_i(t) = a_n \cdot \left(\sqrt[c]{\frac{C_{i-1}}{a_n} + 1} \right)^c$$

Modelli di manutenzione



Le costruzioni in zona sismica



I sistemi di monitoraggio installati su costruzioni in zona sismica, oltre al miglioramento della conoscenza di comportamento delle strutture reali, consentono di :

- Valutare in un tempo relativamente breve lo **stato di danno** subito dalla struttura a seguito di un evento sismico
- Facilitare la progettazione di interventi di consolidamento e la valutazione a posteriori della loro efficacia

E, se applicati **estensivamente**:

- Fornire ai centri di protezione civile informazioni utili sulla **distribuzione areale del danno** a edifici e infrastrutture
- Fornire alle istituzioni competenti informazioni utili sulla **distribuzione areale del moto sismico** (effetti locali)

Sistemi di monitoraggio



I sistemi di monitoraggio sono composti da:

- Una rete di sensori per il rilevamento di grandezze fisiche significative della risposta strutturale, delle azioni e delle condizioni ambientali
- Apparecchiature per l'acquisizione dei dati provenienti dai sensori (DAU)
- Sistemi di trasmissione dei dati (DTU) verso le unità di processo (DPU) locali o remote
- Componenti software, più o meno complesse, per il pre-processamento, l'analisi e l'interpretazione dei dati (identificazione del danno - DDA), la valutazione della vita residua e il supporto alle decisioni

Sensori **tradizionali** (estensimetri, trasduttori di spostamento o forza, accelerometri, sensori termici, Phmetri, anemometri, ecc.) che forniscono la misura attraverso **segnali elettrici**

Sensori a **fibra ottica puntuali** (interferometrici, reticolo di Bragg), forniscono la misura di deformazioni o temperatura attraverso segnali ottici e possono essere assemblati in modo da consentire la misura di molte altre grandezze fisiche

Sensori a **fibra ottica continui**, forniscono la misura di temperatura e deformazione con risoluzioni spaziali fino ad 1 m su lunghezze di fibra anche di molti chilometri

Sensori **remoti** (non a contatto) di tipo ottico tradizionale, laser, radar (SAR) o basati su tecnologie satellitari

Sensori, DAU e DTU



Piattaforme **multisensoriali** integrate con tecnologia MEM (smart sensors)

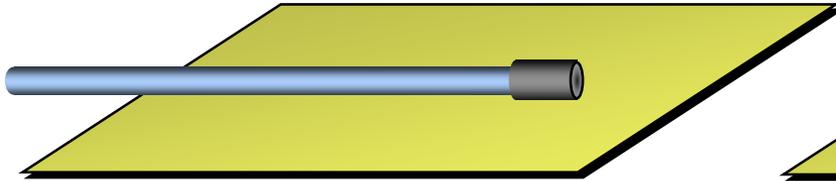
Sensori integrati in **materiali** o **componenti** strutturali (smart materials)

Le DAU acquisiscono il segnale (elettrico/ottico) in forma analogica e lo traducono in un dato in **forma digitale**. Possono essere integrate nel sensore, distribuite o concentrate

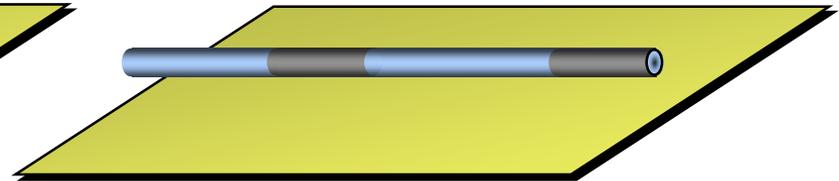
Le DTU trasferiscono il dato a distanza mediante sistemi **cablati** o **tecnologie wireless**. Possono essere integrate nel sensore (piattaforma) o nelle DAU.

I sensori smart sono dotati di microprocessori che possono eseguire funzioni di pre-processamento

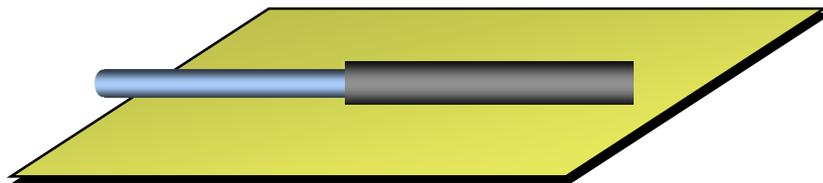
Sensori a fibra ottica



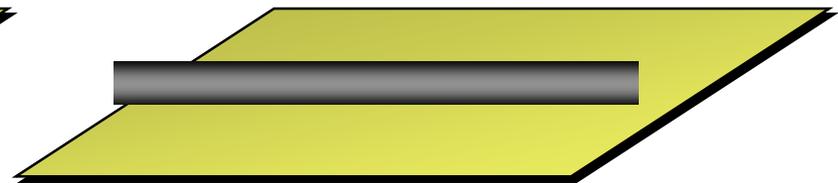
Point Sensor:
Sensoptic (Fabry-Pérot)



Quasi distributed (multiplexed):
MuST (FBG)

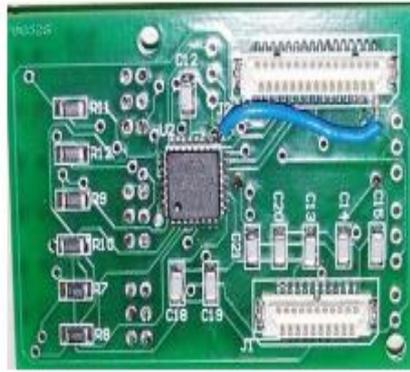
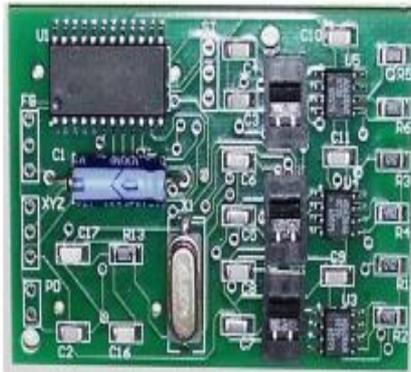


Long base:
SOFO



Distributed: DiTest / DiTemp
(Brillouin and Raman)

Piattaforme integrate



- Largo impiego di microelettronica
- Funzioni di trattamento del segnale integrate
- Conversione analogico/digitale integrata
- Dimensioni e costo ridotti

Processo di monitoraggio



I **DATI** NON SONO **INFORMAZIONI**, LE INFORMAZIONI NON SONO **CONOSCENZA**

Essenza del processo è la considerazione della sequenza di dati che viene acquisita nel tempo attraverso successive campagne di acquisizione. La scelta delle strategie di misura è una componente fondamentale del processo

- Scelta delle grandezze fisiche da misurare, della tipologia e della localizzazione dei sensori
- Controllo della catena di misura
- Misure statiche o dinamiche
- Frequenza di acquisizione

Processo di monitoraggio



Pre-processamento dei dati

- Eliminazione dei dati spuri e integrazione dei dati mancanti
- Condensazione dei dati in serie temporali omogenee di parametri significativi della risposta strutturale

Analisi dei dati

- Fase di training o taratura dei modelli di interpretazione, in cui il sistema può essere ritenuto non soggetto a danni
 - Statistici
 - Processo di segnali (NN, Wavelets, PCA)
 - Fisico-matematici (Elementi Finiti)

Processo di monitoraggio



Pre-processamento dei dati

- Eliminazione dei dati spuri e integrazione dei dati mancanti
- Compensazione dei dati
- Condensazione dei dati in serie temporali omogenee di parametri significativi della risposta strutturale

Analisi dei dati

- Fase di training o taratura dei modelli di interpretazione, in cui il sistema può essere ritenuto non soggetto a danni
 - Statistici
 - Processo di segnali (NN, Wavelets, PCA)
 - Fisico-matematici (Elementi Finiti)

Processo di monitoraggio



Analisi

- Fase operativa
 - Riconoscimento di anomalie comportamentali (stabili)
 - Interpretazione delle anomalie
 - Attivazione di soglie di attenzione e allarme

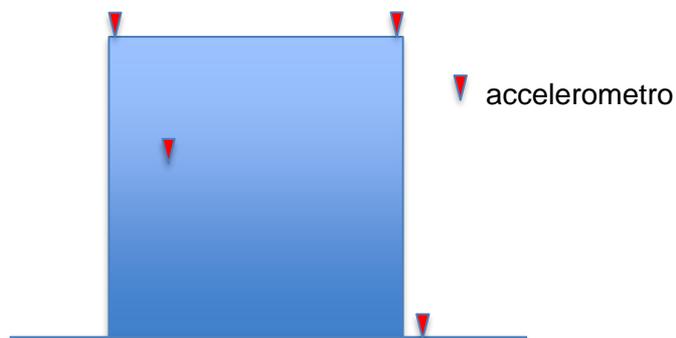
Interpretazione

- Identificazione del danno (presenza, localizzazione, intensità)

Supporto alle decisioni

- Valutazione del grado di sicurezza (vita residua)
- Valutazione degli interventi

Monitoraggio sismico

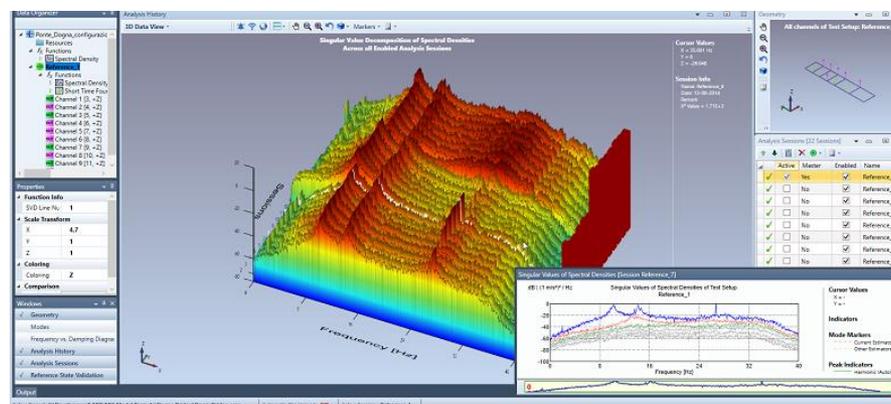


Ad intervalli di tempo prefissati, i sensori registrano per alcuni minuti le vibrazioni ambientali e le condizioni di riferimento (temperatura, umidità ecc.)

Mediante tecniche OMA si determinano i parametri dinamici per ciascuna campagna e si riportano in uno o più scattergrammi (es. PSD). Il modello viene aggiornato per riflettere il comportamento reale

Il sistema è triggerato per registrare eventi sismici in modo completo

Prima analisi dinamica dell'edificio, sono posizionati sensori accelerometrici in punti significativi oltre ad altri sensori (temperatura, strain, ecc.)



Se il sisma ha danneggiato la struttura le registrazioni delle vibrazioni ambientali dopo l'evento mostrano parametri dinamici stabilmente alterati. Il modello può simulare l'evento consentendo di formulare ipotesi sul danno e guidare le indagini dirette

Standardizzazione del Processo



Il monitoraggio strutturale è un processo complesso, non sostituisce ma integra le tecnologie tradizionali di gestione del costruito, ma può condurre a risultati non soddisfacenti se non implementato correttamente. La standardizzazione del processo è quindi ritenuta necessaria.

Esistono alcune linee guida emesse da alcuni enti a livello internazionale, caratterizzate da vari gradi di approfondimento.

UNI, per iniziativa del Comitato Ingegneria Strutturale ha emesso una linea guida particolarmente orientata all'intero processo:

UNI TR 11634:2016

UNI TR 11634:2016



INTRODUZIONE.....	7
1 SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE.....	9
2 RIFERIMENTI NORMATIVI	9
3 TERMINI, DEFINIZIONI E ABBREVIAZIONI	10
3.1 TERMINI E DEFINIZIONI	10
3.2 ABBREVIAZIONI	11
4 OBIETTIVI E REQUISITI DI PROGETTO DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO STRUTTURALE	12
4.1 IL PROCESSO DI CONTROLLO DELLE CONDIZIONI DI UNA STRUTTURA E IL RUOLO DEL MONITORAGGIO STRUTTURALE.....	12
4.2 ATTORI DEL PROCESSO DI MONITORAGGIO.....	13
4.3 GLI OBIETTIVI DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO STRUTTURALE.....	14
4.4 LE MOTIVAZIONI PER L'ATTIVAZIONE DI UN MONITORAGGIO STRUTTURALE	15
4.5 I CRITERI DI SCELTA E DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO.....	16
4.6 PIANIFICAZIONE DELLE CAMPAGNE DI MONITORAGGIO.....	17
5 PROGETTAZIONE DI MASSIMA DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO.....	19
5.1 GENERALITÀ.....	19
5.2 DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI GENERALI DEL MONITORAGGIO	19
5.3 ANALISI DELLA STRUTTURA E DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI SPECIFICI DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO	20
5.4 STRATEGIA DI MISURA E DEFINIZIONE DELLA RETE DEI SENSORI	21
5.4.1 <i>Tipi di grandezze</i>	21
5.4.2 <i>Numero e posizione dei punti misura</i>	22
5.4.3 <i>Specifiche del sistema di misura</i>	22
5.5 MODALITÀ DI ACQUISIZIONE DEI DATI.....	24
5.5.1 <i>Scelta della frequenza di campionamento</i>	25
5.5.2 <i>Periodicità di acquisizione</i>	25
5.6 TRATTAMENTO DEI DATI	26
5.6.1 <i>Pretrattamento dei dati</i>	26

5.6.2 <i>Valutazione delle grandezze significative oggetto del sistema di monitoraggio</i>	26
5.6.3 <i>Aggiornamento dei modelli interpretativi</i>	27
5.7 MODELLI INTERPRETATIVI E LA CALIBRAZIONE DEL MODELLO DI RIFERIMENTO.....	27
5.8 LE PROCEDURE DECISIONALI.....	27
5.9 I REQUISITI DI ACCURATEZZA.....	28
5.9.1 <i>Espressione dell'accuratezza richiesta</i>	28
5.9.2 <i>Le fonti d'errore e la valutazione dell'incertezza</i>	29
6. PROGETTO ESECUTIVO DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO	30
6.1 GENERALITÀ	30
6.2 ARCHITETTURA DEL SISTEMA	30
6.3 HARDWARE.....	31
6.3.1 <i>Sensori</i>	32
6.3.2 <i>Dispositivi di acquisizione</i>	32
6.3.3 <i>Dispositivi di comunicazione digitale</i>	33
6.3.4 <i>Equipaggiamento</i>	33
6.4 SOFTWARE	34
6.4.1 <i>Software di acquisizione</i>	34
6.4.2 <i>Software di archiviazione</i>	34
6.4.3 <i>Software di gestione</i>	35
6.4.4 <i>Software di analisi</i>	35
6.5 MANUALE DI INSTALLAZIONE.....	35
6.6 PROTOCOLLO DI GESTIONE	35
6.7 FORMATO DEI DOCUMENTI DI PROGETTO.....	36
7. INSTALLAZIONE, GESTIONE E MANUTENZIONE DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO ..	36
7.1 GENERALITÀ	36
7.2 INSTALLAZIONE DEL SISTEMA	36
7.3 COLLAUDO E MESSA IN SERVIZIO	37
7.4 GESTIONE DEL SISTEMA.....	37
7.5 MANUTENZIONE DEL SISTEMA.....	38
8. TRATTAMENTO DEI DATI.....	38
8.1 GENERALITÀ	38
8.2 COMPENSAZIONE DELLE MISURE	39
8.3 DATA REDUCTION.....	40
9. MODELLI DI INTERPRETAZIONE E METODI DI IDENTIFICAZIONE DEL DANNO	40
9.1 GENERALITÀ	40

9.2	INTERPRETAZIONE DEI DATI.....	41	B.1.2	Approccio "Matrix Mixing".....	65
9.3	MODELLI FISICO-MATEMATICI.....	41	B.1.3	Approccio Eigenstructure Assignment.....	66
9.4	MODELLI DI ANALISI DEL SEGNALE.....	42	B.2.	METODI DETERMINISTICI PARAMETRICI.....	67
9.5	AGGIORNAMENTO DEI MODELLI.....	43	B.2.1	Metodi basati sulle funzioni di penalizzazione (penalty functions).....	67
10	AFFIDABILITÀ DEI RISULTATI DEL MONITORAGGIO STRUTTURALE.....	45	B.2.2	Approccio basato sulla Analisi di Sensitività.....	67
11	USO DELLE TECNICHE DI MONITORAGGIO STRUTTURALE NELLA GESTIONE DEL COSTRUITO.....	45	B.2.3	Metodi della varianza minima.....	68
11.1	GENERALITÀ.....	45	B.2.4	Metodi che utilizzano i dati nel dominio della frequenza.....	68
11.2	MODELLAZIONE DEL DEGRADO.....	46	B.3	METODI PROBABILISTICI.....	68
11.3	RUOLO DEL MONITORAGGIO STRUTTURALE.....	47	B.3.1	Stimatori probabilistici.....	68
12.	MONITORAGGIO E PROGETTAZIONE STRUTTURALE.....	48	B.3.2	Metodi Monte Carlo.....	69
12.1	GENERALITÀ.....	48	B.3.3	Approccio Multi-Modello.....	70
12.2	OPERE DI NUOVA COSTRUZIONE.....	49	APPENDICE C: ALGORITMI DI OTTIMIZZAZIONE DELLA LOCALIZZAZIONE DEI SENSORI	72	
12.3	COSTRUZIONI ESISTENTI.....	49	C.1	MONITORAGGIO DIAGNOSTICO.....	72
12.4	INTEGRAZIONE CON ALTRI SISTEMI DI CONTROLLO.....	50	C.2	MONITORAGGIO DELLA RISPOSTA DINAMICA.....	72
APPENDICE A: PROCEDURA FORMALE DI PROGETTO DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO	51		APPENDICE D: CASI STUDIO	75	
A.1	GENERALITÀ.....	51	D.1	VIADOTTO AUTOSTRADALE 'COLLE ISARCO'.....	75
A.2	ANALISI DEI REQUISITI E DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI SPECIFICI DEL MONITORAGGIO.....	52	D.1.1	Descrizione della struttura.....	75
A.3	GRANDEZZE OBIETTIVO.....	53	D.1.2	Motivazione del monitoraggio.....	76
A.4	ACCURATEZZA RICHIESTA.....	54	D.1.3	Obiettivi del monitoraggio.....	76
A.4.1	Classificazione.....	54	D.1.4	Modello e parametri.....	76
A.4.2	Quantità numeriche.....	54	D.1.5	Strategia di misura.....	76
A.4.3	Funzioni.....	55	D.1.6	Progetto del sistema.....	76
A.5	SOGGIE D'ATTENZIONE E AZIONI (CONTROMISURE).....	55	D.1.7	Risultati del monitoraggio.....	79
A.6	ESEMPI.....	55	D.2	ARENA DI VERONA.....	80
A.7	STRATEGIA DI MISURA.....	57	D.2.1	Descrizione della struttura.....	80
A.8	GRANDEZZE FISICO-CHIMICHE E CAMPI DI MISURA.....	58	D.2.2	Motivazione del monitoraggio.....	80
A.8.1	Tipi di grandezze.....	58	D.2.3	Obiettivi del monitoraggio.....	80
A.8.2	Numero e posizione dei punti misura.....	58	C.2.4	Strategia di misura.....	80
A.8.3	Incertezze metrologiche.....	59	D.2.5	Progetto del sistema.....	81
A.9	ELABORAZIONE DELLE MISURE E MODELLI DI INTERPRETAZIONE.....	60	D.2.6	Risultati del monitoraggio.....	82
A.10	VERIFICA DELL'EFFICACIA DELLA STRATEGIA DI MISURA.....	60	D.3	TORRE CIVICA – PALAZZO MARGHERITA (L'AQUILA).....	84
APPENDICE B: CALIBRAZIONE DEI MODELLI.....	62		D.3.1	Descrizione della struttura.....	84
B.1	METODI DETERMINISTICI DIRETTI.....	64	D.3.2	Motivazione del monitoraggio.....	84
B.1.1.	Metodo dei moltiplicatori di Lagrange.....	64	D.3.3	Obiettivi del monitoraggio.....	84
			D.3.4	Modello e parametri.....	85

D.3.5	<i>Strategia di misura</i>	85
D.3.6	<i>Progetto del sistema</i>	85
D.3.7	<i>Risultati del monitoraggio</i>	86
D.4	PONTE NUOVO DEL POPOLO – VERONA.....	88
D.4.1	<i>Descrizione della struttura</i>	88
D.4.2	<i>Motivazione del monitoraggio</i>	89
D.4.3	<i>Obiettivi del monitoraggio</i>	89
D.4.4	<i>Modello e parametri</i>	89
D.4.5	<i>Strategia di misura</i>	90
D.4.6	<i>Progetto del sistema</i>	90
D.4.7	<i>Risultati del monitoraggio</i>	90
D.5	DIGA DUCA DI GALLIERA (PORTO DI GENOVA).....	92
D.5.1	<i>Descrizione della Struttura</i>	92
D.5.2	<i>Motivazione del Monitoraggio</i>	93
D.5.3	<i>Obiettivi del Monitoraggio</i>	94
D.5.4	<i>Modello e parametri</i>	94
D.5.5	<i>Strategia di Misura</i>	94
D.5.6	<i>Progetto del Sistema</i>	94
D.5.7	<i>Risultati del Monitoraggio</i>	94
APPENDICE E: GLOSSARIO		97
BIBLIOGRAFIA		129

PROBLEMI E PROSPETTIVE



PROSPETTIVE

- BIG DATA
- Durabilità dei sensori
- Durabilità dei componenti elettronici
- Rapporto costo/beneficio
- Sviluppo di nuove tecnologie di sensori
- Estensione delle fenomenologie osservabili
- Sviluppo di algoritmi evoluti di analisi/interpretazione dei dati
- Interfacciamento con modelli BIM
- Crescita del numero di applicazioni e relative esperienze

VI HILTI Seismic Academy



Towards civionics ?

Thank you for your attention !