Introduzione

Le strutture intelligenti, capaci di avvertire modificazioni del proprio stato o dell'ambiente in cui si trovano ed intervenire in modo da migliorare le proprie prestazioni, sono largamente studiate da un punto di vista teorico e trovano un sempre più vasto impiego in numerosi campi della tecnica, aprendo nuove frontiere nel campo dell'ingegneria strutturale e della scienza dei materiali. Componenti essenziali di una struttura intelligente sono sensori ed attuatori. Essi sono comunemente realizzati utilizzando materiali "adattativi" come i materiali piezoelettrici, elettrostrittivi, magnetostrittivi, i fluidi elettroreologici o magnetoreologici o le leghe a memoria di forma; tali materiali sono caratterizzati dalla capacità di trasformare energia da una forma in un'altra.

In ciò che segue l'attenzione è rivolta ai materiali piezoelettrici, in grado di convertire energia meccanica in elettrostatica e viceversa grazie all'accoppiamento tra le variabili meccaniche e quelle elettriche che tali materiali presentano. I sensori e gli attuatori costituiti di materiale piezoelettrico, grazie alle loro ridotte dimensioni ed alla loro leggerezza, possono essere integrati alla struttura da controllare per formare un sistema intelligente; un esempio tipico e molto utilizzato sono i laminati piezoelettrici, costituiti da diverse lamine incollate una sull'altra, di cui alcune piezoelettriche ed aventi le facce ricoperte da elettrodi. L'accoppiamento elettromeccanico presente nelle lamine piezoelettriche consente il loro utilizzo come sensori ed attuatori. Infatti una deformazione dell'intero laminato, e dunque delle lamine piezoelettriche in esso contenute, induce una differenza di potenziale tra gli elettrodi delle lamine piezoelettriche che funzionano così come sensori. Viceversa l'applicazione di una differenza di potenziale tra gli elettrodi delle lamine piezoelettriche induce in quest'ultime una deformazione che provoca una deformazione dell'intero laminato; in tal caso le lamine piezoelettriche hanno la funzione di attuatori. È allora possibile misurare le deformazioni di un laminato, controllare le sue vibrazioni meccaniche, il rumore da esso irradiato o la sua forma. Applicazioni più avanzate dei materiali piezoelettrici si trovano in campo aeronautico ed aerospaziale, ad esempio per

il controllo del "flutter" o per il controllo della forma di un profilo alare. Strategie di controllo efficienti richiedono ovviamente la conoscenza di modelli accurati per il comportamento statico e dinamico dei laminati piezoelettrici. Uno degli obbiettivi della presente tesi è la realizzazione di differenti modelli per il comportamento dei laminati piezoelettrici ed il loro impiego nell'analisi delle vibrazioni di tali strutture. Un altro è quello di studiare lo smorzamento delle vibrazioni dei laminati piezoelettrici mediante tecniche di controllo passivo. La presente Tesi di Dottorato è strutturata come segue.

Nel capitolo I si presenta una descrizione generale dei materiali piezoelettrici e delle loro caratteristiche fisiche.

Nel capitolo II si espone la teoria tridimensionale della piezoelettricità di Voigt. Si illustra dapprima il legame costitutivo proprio dei materiali piezoelettrici, particolarizzandolo al caso di materiali piezoelettrici trasversalmente isotropi. Successivamente si enuncia il problema dell'equilibrio statico e dinamico di un corpo omogeneo, costituito di materiale piezoelettrico lineare; il problema dell'equilibrio è formulato sia in maniera differenziale che variazionale. Poichè una descrizione accurata del laminato piezoelettrico richiede l'utilizzo di teorie "layer-wise", nelle quali ogni strato costituente il laminato è modellato singolarmente, occorre disporre di efficienti modelli di piastra piezoelettrica.

A tale proposito nel capitolo III si riportano differenti modelli di piastra piezoelettrica atti a descrivere il comportamento dei sensori e degli attuatori piezoelettrici. Modelli già esistenti in letteratura sono dedotti dalla teoria tridimensionale della piezoelettricità insieme con nuove teorie più raffinate per il comportamento membranale e flessionale di piastra piezoelettrica, facendo uso di un funzionale misto. Al termine del capitolo è presentata una valutazione critica dei vari modelli, realizzata considerando alcuni problemi campione la cui soluzione analitica tridimensionale è nota.

Alcune teorie di piastra piezoelettrica sono poi impiegate nella realizzazione di due modelli di tristrato piezoelettrico, riportati nel capitolo IV. Nel primo modello i piezoelettrici sono considerati semplici membrane mentre la piastra è descritta mediante la teoria classica di Reissner-Mindlin, che tiene conto delle deformazioni di scorrimento; questo primo modello si applica all'analisi di tristrati con piezoelettrici sottili. Il secondo modello, nel quale sia la piastra che i piezoelettrici sono descritti secondo modelli alla Reissner-Mindlin, si applica al caso di laminati recanti piezoelettrici spessi.

Per risolvere il problema al contorno relativo ai sistemi di equazioni alle derivate parziali che descrivono i due modelli di laminato proposti sono ricavate formulazioni agli

elementi finiti basate su elementi isoparametrici quadrangolari e riportate nel capitolo V. Il problema del "locking" è superato utilizzando sia il metodo dell'integrazione ridotta che arricchendo i campi di interpolazione all'interno di ogni elemento. Una validazione delle differenti formulazioni agli elementi finiti è ottenuta studiando alcuni problemi campione; le soluzioni numeriche di tali problemi, calcolate con le differenti formulazioni agli elementi finiti proposte, sono confrontate con le soluzioni analitiche delle equazioni che descrivono i modelli di tristrato ai quali le formulazioni agli elementi finiti si riferiscono. Le soluzioni numeriche risultano convergere in maniera quadratica alle corrispondenti soluzioni analitiche.

Nel capitolo VI i modelli di tristrato proposti e le relative formulazioni agli elementi finiti sono impiegati per ottenere modelli discreti per l'analisi dinamica di piastre strumentate con attuatori e sensori piezoelettrici. Applicando tecniche di analisi modale sono ottenuti modelli semplificati ad un numero ridotto di gradi di libertà; in particolare è presentato un modello che tiene conto di un solo modo di vibrazione meccanico della struttura accoppiata.

Il capitolo VII è dedicato allo studio dello smorzamento passivo di una piastra strumentata con un attuatore piezoelettrico. Lo smorzamento passivo si ottiene collegando gli elettrodi del piezoelettrico ad un circuito elettrico passivo esterno contenente almeno una resistenza. Durante il fenomeno vibratorio la piastra si inflette provocando un'estensione dell'elemento piezoelettrico incollato su di essa. Per l'effetto piezoelettrico diretto, alla deformazione del piezoelettrico si accompagna una differenza di potenziale tra gli elettrodi; di conseguenza circola corrente nel circuito elettrico passivo e viene quindi dissipata energia per effetto Joule nella resistenza del circuito. Uno smorzamento più considerevole si ottiene considerando un circuito esterno costituito da un'induttanza e una resistenza, sintonizzato alla frequenza propria di un singolo modo di vibrazione della struttura accoppiata le cui vibrazioni si intende smorzare. Per lo studio dello smorzamento passivo è utilizzato il modello ad un solo grado di libertà meccanico riportato nel capitolo VI. Sia nel caso di circuito elettrico resistivo che induttivo-resistivo esistono valori dei componenti elettrici che massimizzano lo smorzamento delle vibrazioni relative al modo proprio considerato. Tale problema di ottimo è risolto conducendo un'analisi dettagliata delle varie condizioni di smorzamento ottenibili al variare dei valori dei componenti relativi al circuito elettrico esterno; da tale analisi sono ottenute formule per i valori ottimali di tali componenti elettrici.

Allo scopo di verificare l'accuratezza dei modelli per lo smorzamento passivo descritti nel capitolo VII, nel capitolo VIII sono riportati alcuni risultati sperimentali sul controllo passivo delle vibrazioni di una piastra a mensola strumentata con un attuatore piezoelettrico incollato in corrispondenza del lato incastrato. Gli elettrodi dell'attuatore piezoelettrico sono stati collegati ad un circuito esterno RL, scelto in modo da smorzare in modo ottimale le vibrazioni associate al primo modo della mensola. Eccitando la trave con un impulso iniziale è stata misurata la risposta nel tempo, in termini dell'accelerazione dell'estremo libero, in corrispondenza a differenti valori di R e L. I valori di R e L in corrispondenza dei quali si è riscontrato lo smorzamento massimo sono molto prossimi ai corrispondenti valori ottimi ricavati dal modello semplificato prima menzionato; i poli del sistema determinati sperimentalmente in corrispondenza a differenti scelte dei valori R e L risultano anch'essi molto prossimi a quelli previsti dal suddetto modello.