

*Proprietà letteraria riservata.*  
*È vietata la riproduzione, anche parziale, dei contenuti di questo volume.*  
*Edizione fuori commercio per conto di:*

**ISMES spa**

viale G. Cesare 29 - 24100 Bergamo - BG



LA SPERIMENTAZIONE STATICA  
DELLE STRUTTURE

*metodi e tecniche di indagine*

*L'ISMES ringrazia il proprio Comitato Scientifico e, in particolare, i Membri Carlo Cestelli Guidi, Morando Dolcetta Capuzzo, Leo Finzi, Elio Giangreco, Giuseppe Grandori, Franco Levi, Guido Oberti, con i Collaboratori redattori Luigi Goffi, Aldo Castoldi, Mario Casirati, Claudio Piga, Enrico Ronzoni, per il valido contributo offerto alla realizzazione di questo manuale.*

Questo opuscolo, che fa seguito al manuale «La sperimentazione dinamica delle strutture» (edito nel 1988), costituisce la seconda pubblicazione della Collana «Manuali Tecnici ISMES», che si propongono l'illustrazione dell'attività dell'Istituto nei suoi vari settori. *prefazione*

In particolare questo manuale intende riferirsi al settore delle prove statiche sulle strutture e sui materiali: un rapido cenno riguarda le prove su pali per le quali — come prove di carattere geotecnico — è in preparazione un documento apposito.

Nel testo si fa particolare richiamo ai problemi di controllo della qualità (e di garanzia della qualità), per affrontare i quali l'ISMES è ben «attrezzata» grazie alla notevole esperienza acquisita nella realizzazione di importanti lavori per l'ENEL, specie di quelli svolti con l'ausilio di laboratori distaccati di cantiere.

Un settore significativo di rilievo e competenza per l'ISMES concerne il recupero delle costruzioni esistenti. L'ISMES è chiamata sistematicamente per attività di supporto al restauro di edifici aventi grande importanza storico-artistica (ad esempio il Duomo di Milano e la cupola di S. Maria del Fiore

a Firenze), nonché per il recupero e la ristrutturazione di edifici vetusti nei centri cittadini.

La rassegna delle problematiche della sperimentazione strutturale tiene conto delle elaborazioni e delle proposte degli Eurocodici, cioè di quei documenti tecnici che dovranno costituire la base di una normativa europea. È giusto rilevare in particolare che gli Eurocodici fanno significativi riferimenti alla sperimentazione finalizzata al progetto (Design by Testing); ciò che conferma l'insostituibilità della sperimentazione stessa a fronte delle tecniche di calcolo automatico sempre più diffuse, alle quali le indagini sperimentali possono utilmente e variamente affiancarsi.

Il presente manuale è indirizzato a quanti, operanti nel settore edile, necessitano di un supporto sperimentale da parte di un Istituto — con esperienza quarantennale — particolarmente qualificato per tecniche e metodologie di indagine.

Il volumetto illustra inoltre quanto l'ISMES ha fatto ed è tuttora in grado di espletare nell'ampio campo delle grandi strutture (ponti e dighe).

Ci auguriamo che l'esame di questo sintetico libro, con la sua ampia casistica, suggerisca agli operatori l'opportunità di fare riferimento ai fondamentali apporti della sperimentazione alla tecnica delle costruzioni.

Le figure sono corredate di didascalie bilingui, in italiano e in inglese. Il testo principale invece, salvo l'introduzione e l'indice, è in italiano. Si è scelto di procedere in questo modo per facilitare il lettore straniero nell'individuazione dei contenuti del libro.

The first part of the book is devoted to a general introduction to the subject of the history of the world. The author discusses the various theories of the origin of the world and the different views of the progress of human civilization. He also touches upon the question of the future of the world and the role of the individual in it.

The second part of the book is a detailed account of the history of the world from the beginning of time to the present day. The author follows a chronological order, starting with the prehistoric period and moving on to the ancient, medieval, and modern eras. He covers the major events, wars, and revolutions that have shaped the world as we know it today.

The third part of the book is a critical analysis of the various theories and views on the history of the world. The author examines the strengths and weaknesses of different historical schools of thought and offers his own perspective on the subject. He concludes by discussing the importance of history in understanding the present and shaping the future.

1.	<b>INTRODUCTION AND GENERAL REMARKS</b> .....	1
1.1.	<b>Foreword</b> .....	3
1.1.1.	<i>The European Unique Market</i> .....	3
1.2.	<b>ISMES Quality System</b> .....	5
1.2.1.	<i>Examples of applications</i> .....	5
2.	<b>INVESTIGATIONS FOR STRUCTURAL DESIGN</b> .....	9
2.1.	<b>Investigations on physical models</b> .....	11
2.1.1.	<i>Similitude criteria</i> .....	12
2.1.2.	<i>Elastic and up-to-failure models</i> .....	13
2.1.3.	<i>Special models</i> .....	13
2.1.3.1.	Photo elastic models	
2.1.3.2.	Other models	
2.2.	<b>Investigations on materials</b> .....	14
2.3.	<b>Investigations on prototypes</b> .....	15
3.	<b>EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS FOR THE EXECUTION</b> .....	19
3.1.	<b>Controls on traditional materials and their qualification</b> .....	20
3.2.	<b>Qualification of construction procedures</b> .....	20
3.3.	<b>Controls during the construction</b> .....	21
4.	<b>INVESTIGATIONS DURING CHECK TESTS AND ON EXISTING STRUCTURES</b> .....	23
4.1.	<b>Load tests</b> .....	25
4.2.	<b>Non destructive tests</b> .....	25
4.3.	<b>Continuous control and monitoring</b> .....	27
4.4.	<b>Controls on structures under repair and rehabilitation</b> .....	29
5.	<b>EXPERIMENTAL TECHNIQUES</b> .....	31
5.1.	<b>Conventional mechanical tests</b> .....	33
5.2.	<b>Non destructive tests</b> .....	33
5.2.1.	<i>Tests on concrete and masonry structures</i> .....	34
5.2.1.1.	Tests for the determination of the conditions of a structure	
	Flat jack tests	
	Strength tests	
	Sonic tests	
	Test for reinforcement detection (concrete cover thickness, position and diameter of reinforcing bars)	

<b>1.</b>	<b>INTRODUZIONE E CONSIDERAZIONI GENERALI</b> .....	<b>1</b>
1.1.	<b>Premessa</b> .....	<b>3</b>
1.1.1.	<i>Il Mercato Unico Europeo</i> .....	<b>3</b>
1.2.	<b>Il sistema Qualità dell'ISMES</b> .....	<b>5</b>
1.2.1.	<i>Soluzioni applicative: esempi</i> .....	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>INDAGINI A SUPPORTO DELLA PROGETTAZIONE STRUTTURALE</b> .....	<b>9</b>
2.1.	<b>Indagini su modelli fisici</b> .....	<b>11</b>
2.1.1.	<i>Criteri di similitudine</i> .....	<b>12</b>
2.1.2.	<i>Modelli elastici e ad oltranza</i> .....	<b>13</b>
2.1.3.	<i>Modelli di tipo particolare</i> .....	<b>13</b>
2.1.3.1.	Modelli fotoelastici	
2.1.3.2.	Altri modelli	
2.2.	<b>Indagini su materiali</b> .....	<b>15</b>
2.3.	<b>Indagini su prototipi</b> .....	<b>15</b>
<b>3.</b>	<b>INDAGINI SPERIMENTALI A SUPPORTO DELL'ESECUZIONE</b> .....	<b>19</b>
3.1.	<b>Controlli su materiali tradizionali e loro qualificazione</b> .....	<b>20</b>
3.2.	<b>Qualificazione dei procedimenti costruttivi</b> .....	<b>20</b>
3.3.	<b>Controllo in corso d'opera</b> .....	<b>21</b>
<b>4.</b>	<b>INDAGINI IN FASE DI COLLAUDO E SULLE STRUTTURE ESISTENTI</b> .....	<b>23</b>
4.1.	<b>Prove di carico</b> .....	<b>25</b>
4.2.	<b>Prove non distruttive</b> .....	<b>25</b>
4.3.	<b>Controllo continuo e monitoraggio</b> .....	<b>27</b>
4.4.	<b>Problemi di controllo su strutture in corso di restauro o consolidamento</b> .....	<b>29</b>
<b>5.</b>	<b>TECNICHE SPERIMENTALI</b> .....	<b>31</b>
5.1.	<b>Prove meccaniche tradizionali</b> .....	<b>33</b>
5.2.	<b>Prove non distruttive</b> .....	<b>33</b>
5.2.1.	<i>Prove sulle strutture in calcestruzzo e in muratura</i> .....	<b>34</b>
5.2.1.1.	Prove per la determinazione dello stato dell'opera	
	Prove con martinetto piatto	
	Prove per la determinazione della resistenza meccanica	
	Prove soniche	
	Prove per l'individuazione dei parametri geometrici delle armature (spessore del copriferro, posizione e diametro delle barre)	

5.2.1.2.	Tests for detecting the corrosion in progress (chemical - physical tests) Concrete pH (carbonation) measurement Chloride content measurement Concrete aggregate control Moisture measurement Chemical and physical tests for structures under repair Tests for detecting reinforcement corrosion	
5.2.2.	<i>Tests on steel structures</i>	55
5.2.2.1.	Ultrasonic tests	
5.2.2.2.	Other surface controls on steel structures	
5.2.2.3.	X-Ray tests	
5.3.	<b>Recent experimental techniques</b>	59
5.3.1.	<i>Sonic tomography</i>	59
5.3.2.	<i>Radar tests</i>	60
5.3.3.	<i>Thermography</i>	60
5.3.4.	<i>Investigations on Fracture Mechanics problems</i>	62
6.	<b>APPENDIX</b>	65
6.1.	<b>ISMES' experimental equipment</b>	67
6.1.1.	<i>Equipment for load tests on structures</i>	67
6.1.2.	<i>Measurement instrumentation</i>	73
6.1.3.	<i>Laboratory equipment for the investigation and qualification of building materials</i>	75
6.1.4.	<i>Equipment for structural diagnostic and non-destructive controls</i>	76
6.2.	<b>Application examples</b>	79
6.2.1.	<i>Dam model tests</i>	79
6.2.1.1.	Ridracoli Dam	
6.2.1.2.	Itaipu Dam	
6.2.2.	<i>Tests on bridges</i>	91
6.2.2.1.	Overpass on Rome-Pisa railway	
6.2.2.2.	Overpass on Aurelia n. 1 State road	
6.2.3.	<i>Tests on concrete piles</i>	94
6.2.4.	<i>Tests on structures under repair</i>	95
6.2.4.1.	Experimental investigations on the Milan cathedral drum pillars	
6.2.4.2.	Statical controls on the structures of the S. Augustine building (a former church in Bergamo)	
6.2.4.3.	St. Laurent Cathedral (Perugia): structural controls when pulling the aisle transverse chains	
6.2.4.4.	Au example of monitoring: Santa Maria del Fiore dome in Florence	
6.2.4.5.	Flat jacks for structures under repair	

5.2.1.2.	Prove per la determinazione dei meccanismi di degrado in atto (prove chimico-fisiche) Misura del pH del calcestruzzo (carbonatazione) Misura del tenore di cloruri Controllo degli aggregati del calcestruzzo Misura dell'umidità Prove chimico-fisiche per strutture in restauro Prove per l'individuazione dello stato di corrosione delle armature	
5.2.2.	<i>Prove sulle strutture metalliche</i>	55
5.2.2.1.	Prove con ultrasuoni	
5.2.2.2.	Altri controlli per indagini superficiali (su strutture metalliche)	
5.2.2.3.	Radiografia	
5.3.	<b>Nuove tecniche sperimentali</b>	59
5.3.1.	<i>La tomografia sonora</i>	59
5.3.2.	<i>Rilievi radar</i>	60
5.3.3.	<i>Termografia</i>	60
5.3.4.	<i>Indagini su problemi di meccanica della frattura</i>	62
6.	<b>APPENDICE</b>	65
6.1.	<b>Le attrezzature sperimentali dell'ISMES</b>	67
6.1.1.	<i>Attrezzature per l'esecuzione di prove di carico su strutture</i>	67
6.1.2.	<i>La strumentazione di misura</i>	73
6.1.3.	<i>Attrezzature di laboratorio per lo studio e la qualifica dei materiali da costruzione</i>	75
6.1.4.	<i>Attrezzature per la diagnostica strutturale e per i controlli non distruttivi</i>	76
6.2.	<b>Esempi di applicazioni</b>	79
6.2.1.	<i>Prove su modelli di dighe</i>	79
6.2.1.1.	Diga di Ridracoli	
6.2.1.2.	Diga d'Itaipu	
6.2.2.	<i>Prove su ponti</i>	91
6.2.2.1.	Cavalcavia sulla ferrovia Roma-Pisa	
6.2.2.2.	Cavalcavia sulla S.S. n. 1 Aurelia	
6.2.3.	<i>Prove su pali in calcestruzzo</i>	94
6.2.4.	<i>Prove su strutture in restauro</i>	95
6.2.4.1.	Indagini sperimentali sui pilastri del tiburio del Duomo di Milano	
6.2.4.2.	Verifiche statiche delle strutture dell'ex Chiesa di Sant'Agostino (BG)	
6.2.4.3.	Cattedrale di San Lorenzo (PG) - Controllo strutturale durante la messa in tiro delle catene trasversali della navata	
6.2.4.4.	Esempio di monitoraggio (Cupola di Santa Maria del Fiore in Firenze)	
6.2.4.5.	Applicazioni di martinetti piatti in strutture in restauro	

6.2.5.	<i>Other tests on prototypes</i> .....	115
6.2.5.1.	Load tests on SCAC prestressed beams	
6.2.5.2.	Test on a Tensacciai prestressed concrete anchorage	
6.2.5.3.	Load test on sandwich bearing walls	
6.2.5.4.	Tests for measuring the friction angle and the vertical displacement of a Neotopf bearing device for bridges	
6.2.5.5.	Pressure test on a I.M.S. vessel	
6.2.5.6.	Tests on a REP steel-reinforced concrete T beam	
6.2.5.7.	Tests on Gemini reinforced concrete cantilevers	
6.2.5.8.	Cooling towers in Serrazzano and Sasso Pisano	
6.2.5.9.	Structures of the former FIAT - Lingotto factory	

6.2.5.	<i>Altre prove su prototipi</i> .....	115
6.2.5.1.	Prove di carico su travi SCAC in c.a.p.	
6.2.5.2.	Prova su testata Tensacciai	
6.2.5.3.	Prove di carico su strutture portanti tipo sandwich	
6.2.5.4.	Prove per valutare il coefficiente di attrito e il cedimento verticale di un appoggio per ponte tipo Neotopf	
6.2.5.5.	Prova di pressione su colonna I.M.S.	
6.2.5.6.	Prove su trave REP mista a T composta	
6.2.5.7.	Prove di carico su mensole in c.a. (struttura Gemini)	
6.2.5.8.	Torri refrigeranti di Serrazzano e Sasso Pisano.	
6.2.5.9.	Strutture dell'ex stabilimento FIAT - Lingotto (Torino)	